

# POSTĘPY FIZYKI



CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO  
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

Zanieczyszczenie światłem

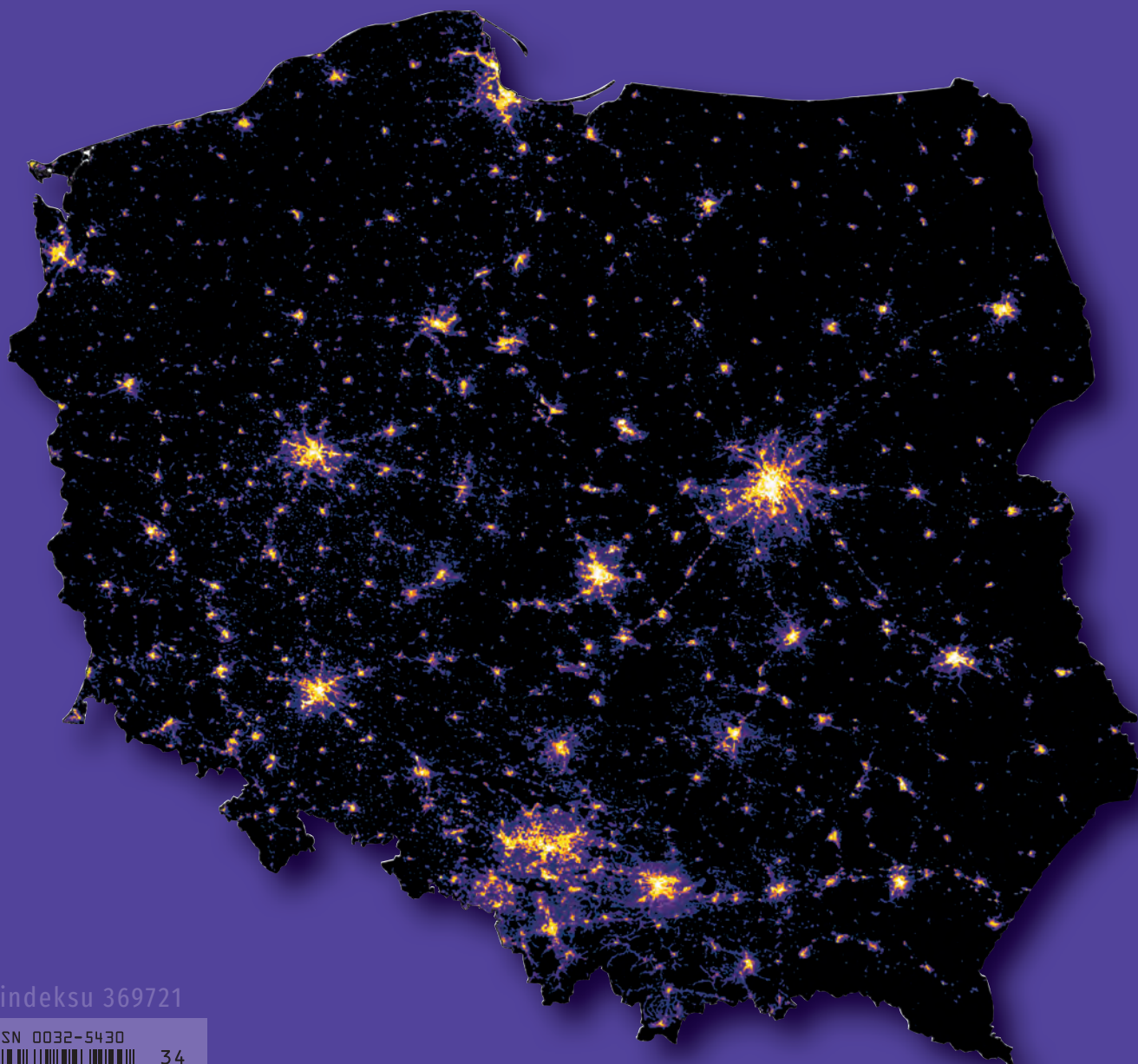
Nobel z fizyki (?) 2024

Bilard protonowy w LHC

Nontrivially realized simple symmetries of a simple system

Fizycy i fizycy, których już nie ma wśród nas

3-4 / 2024  
TOM 75



nr indeksu 369721

ISSN 0032-5430



34

9 770032 543240



## POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE (PTF)

[www.ptf.net.pl](http://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 Kistryn  
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](mailto:biuro@ptf.net.pl)

### PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW

Krzysztof Szymański (Białystok)  
Yuriy Zorenko (Bydgoszcz)  
Piotr Gębara (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 (Stąpsk)  
Adam Balcerzak (Szczecin)  
Wiesław Nowak (Toruń)  
Aneta Drabińska (Warszawa)  
Ewa Dębowska (Wrocław)  
Justyna Kalaga (Zielona Góra)

## POSTĘPY FIZYKI (PF)

CZASOPISMO NAUKOWE POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO  
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU WIEDZY FIZYCZNEJ

ukazuje się od 1949 roku

[www.ptf.net.pl](http://www.ptf.net.pl)

### RADA REDAKCYJNA

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

### MATERIAŁY DO KRONIKI DOSTARCZYŁO BIURO MEDIALNE PTF W SKŁADZIE:

Krzysztof Petelczyc – kierownik	Michał Kaczor (Rzeszów)
Mikołaj Baranowski (Poznań)	Janusz Kuliński (Łódź)
Beata Bochentyn (Gdańsk)	Wojciech Olszewski (Białystok)
Jakub Borkowski (Toruń)	Adam Pikul (Wrocław)
Zbigniew Ficek (Zielona Góra)	Grzegorz Siudem (Warszawa, SFENS)
Janusz Filiks (Lublin)	Bogumiła Świeżewska (SFOF)
Marcin Jarosik (Częstochowa)	Andrzej Wilczek (Katowice)

### 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](mailto: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 o objętości nieprzekraczającej 18 000 znaków ze spacjami plus ilustracje należy przysyłać e-mailem na adres: [postepy.fizyki@ptf.net.pl](mailto: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 2025 DLA PODMIOTÓW ZEWNĘTRZNYCH

- cena pojedynczego numeru PF wynosi 35,00 PLN (w tym 8% VAT)
  - cena prenumeraty rocznika (4 numery z 10% rabatem) – 126,00 PLN (w tym 8% VAT)
  - **koszty wysyłki czasopisma pokrywa zamawiający**
  - zamówienie prenumeraty należy wysłać na adres [postepy.fizyki@ptf.net.pl](mailto:postepy.fizyki@ptf.net.pl)
- Szczegółowe warunki prenumeraty PF oraz informacje dotyczące cen numerów archiwalnych znaleźć można na stronie internetowej PTF <https://www.ptf.net.pl/PF/prenumerata>

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**

75 LAT

# POSTĘPY FIZYKI

## Adres PF

postepy.fizyki@ptf.net.pl

## PFsą 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>

Nagrody i wyróżnienia Polskiego Towarzystwa Fizycznego 2024	2
Postępy fizyki kończą w tym roku 75 lat!	
A. Szemberg	3
Ocalmy noc	
A. Z. Kotarba	4
Ktokolwiek widział, ktokolwiek wie! Ukradziono Nagrodę Nobla z fizyki!	
A. Dawid	12
Bilard protonowy w LHC	
R. Staszewski	17
Nontrivially realized simple symmetries of a simple system	
P. Chankowski	27
Mirosław Łoś (1956-2024)	
M. Dobkowska	34
Marianna (Maryla) Kraińska-Miszczak (1934-2024)	
J. Szudy	38
Danuta Makowiec (1957-2024)	41
Wprowadzenie do wydania polskiego książki <i>Napięta nić życia</i>	
W. Dominik	63
Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego	67



Rozkład przestrzenny radiacji nocnych światel nad Polską w 2022 roku, na podstawie obserwacji VIIRS satelity Suomi-NPP (Andrzej Kotarba)

# NAGRODY I WYRÓŻNIENIA POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO 2024

## **Nagroda Naukowa PTF im. Wojciecha Rubinowicza: prof. dr hab. Stanisław Drożdż (IFJ PAN)**

za prace dotyczące rozwoju i zastosowania fizyki do interdyscyplinarnych badań nad układami złożonymi

### **Wyróżnienie:**

#### **prof. dr hab. Michał Tomza**

(Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski)

za serię artykułów naukowych opisujących potwierdzone doświadczalnie teoretyczne przewidywania efektów kwantowych w ultrazimnych zderzeniach atomów, jonów i cząsteczek

## **Nagroda PTF im. Zygmunta Florentego Wróblewskiego za rozprawę doktorską: dr Antoni I. Frej**

(Wydział Fizyki, Uniwersytet w Białymstoku)

za rozprawę *Time-resolved spectroscopy of femtosecond laser-induced magnetization dynamics in garnets*

(promotor dr hab. Andrzej Stupakiewicz)

### **Wyróżnienie:**

#### **dr Paweł Holewa (Politechnika Wrocławska)**

za rozprawę *InAs/InP quantum dots for telecom quantum photonics* (promotorzy:

dr hab. inż. Marcin Syperek

i dr Elizaveta Sermenova)

## **Nagroda PTF im. Arkadiusza Piekary za pracę magisterską:**

**mgr Izabella Wojciechowska** (Wydział Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza)

za pracę *Efekty Halla w heterostrukturach van-der-Waals'a opartych na grafenie*

(promotorka dr hab. Anna Dyrdał)

### **Wyróżnienia:**

#### **mgr Jakub Pawłowski (Politechnika Wrocławska)**

za pracę *Eigenmodes in nearly integrable quantum chains*

(promotor prof. dr hab. Marcin Mierzejewski)

#### **mgr Damian Śnieżek (Uniwersytet Wrocławski)**

za pracę *Inertial Flows in Fractal Porous Media*

(promotor dr hab. Maciej Matyka)

## **Nagroda PTF za Popularyzację Fizyki i Medal im. Krzysztofa Ernsta:**

**red. Karolina Głowacka** – twórczyni i redaktor naczelnej internetowego Radia Naukowego za nietuzinkowy format, zaangażowanie, skalę i zasięg prowadzonych działań na rzecz popularyzacji fizyki. Członkowie Kapituły uhonorowali Laureatkę za wiarygodność, racjonalność, uczciwość, prostotę i przystępność przekazu trudnych niejednokrotnie, zagadnień fizycznych i informacji naukowych, jakie są poruszane w realizowanych audycjach i podcastach.

### **Nagroda za artykuł popularnonaukowy:**

#### **prof. dr hab. Andrzej Dragan**

(Uniwersytet Warszawski)

za artykuł *Skoro fizycy grzęzną w elementarnych pytaniach, skąd odwaga, by pytać o naturę Boga?*

(opublikowany w Gazecie Wyborczej–Wolna Sobota z 01.01.2023)

## **Nagroda PTF I stopnia im. Grzegorza Białkowskiego dla wyróżniających się nauczycieli i Medal Grzegorza Białkowskiego: mgr Zbigniew Gawron (I Liceum Ogólnokształcące w Gliwicach)**

### **Nagroda PTF II stopnia dla wyróżniających się nauczycieli:**

#### **dr Krzysztof Lorek (XIV Liceum Ogólnokształcące**

im. Stanisława Staszica w Warszawie)

za kształtowanie zainteresowania fizyką

oraz sukcesy w pracy z uczniami zdolnymi

### **Nagroda PTF III stopnia dla wyróżniających się nauczycieli:**

#### **dr Tomasz Greczyło (Zespół Szkolno-Przedszkolny**

nr 13 im. Kawalerów Orderu Uśmiechu we Wrocławiu)

za bardzo aktywną i różnicowaną pracę w zakresie nauczania fizyki

### **Wyróżnienie:**

#### **mgr Aleksander Kołodziej (Szkoła Podstawowa**

i Liceum Ogólnokształcące Stowarzyszenia

„Sternik” w Warszawie)

za rozbudzanie zainteresowania uczniów fizyką

oraz osiągnięcia w pracy z młodzieżą

---

**Serdecznie gratulujemy wszystkim nagrodzonym i wyróżnionym!**



# POSTĘPY FIZYKI KOŃCZĄ W TYM ROKU 75 LAT!

W lipcu 1949 roku ukazał się pierwszy numer nowego czasopisma Polskiego Towarzystwa Fizycznego, który otwierała następująca informacja:

*Przystępując do wydawania Postępów Fizyki działamy w myśl naszego Statutu, który celem naszym czyni krzewienie wiedzy fizycznej w Polsce. [...] Postępy Fizyki nie mają być pismem popularnym w najpełniejszym znaczeniu tego wyrażenia. Nasze pismo przeznaczamy dla tych, którzy mając już pewne przygotowanie i interesując się fizyką nie mogą korzystać bezpośrednio z publikacji oryginalnych, przeważnie zbyt specjalnych i trudno dostępnych.*

Postępy Fizyki (PF) miały informować o osiągnięciach fizyki, przybliżyć wyzwania i osiągnięcia polskich naukowców, archiwizować ważne wydarzenia i stanowiska, kultywować pamięć o historii fizyki i postaciach z nią związanych, recenzować pozycje literaturowe, inspirować dydaktyków oraz unifikować język, tradycję i kontakty fizyków rozsianych po całej Polsce. Komitet redakcyjny pierwszego numeru dwumiesięcznika tworzyli: Szczepan Szczeniowski z oddziału poznańskiego PTF oraz Władysław Kapuściński, Stefan Pieńkowski i Wojciech Rubinowicz z oddziału warszawskiego – wybitni polscy fizycy swoich czasów. Publikację tę sfinansowano z zasiłku (współcześnie nazywanego dotacją) Wydziału Nauki Ministerstwa Oświaty. Po ukazaniu się trzech tomów (roczników) redaktorem naczelnym został inicjator powstania czasopisma – Stefan Pieńkowski, a do zespołu redakcyjnego dołączyli: Henryk Niewodniczański, Leonard Sosnowski oraz Barbara Wójtowicz w roli sekretarza redakcji, wydawanie pisma zaś powierzono Państwowemu Wydawnictwu Naukowemu (PWN).

Artykuły w *Postęпах Fizyki* publikowali fizycy z całego kraju, w tym czołowi przedstawiciele polskiej fizyki. Na łamach czasopisma pojawiały się także tłumaczenia istotnych dla rozwoju fizyki artykułów autorstwa wybitnych fizyków zagranicznych, w tym tłumaczenia wykładów laureatów Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki.

Warto tu przypomnieć, że Andrzej Trautman (Wydział Fizyki UW) – autor serii fundamentalnych prac dających podstawy matematyczne teorii fal grawitacyjnych, wspominał o tym w opublikowanym w naszym czasopiśmie artykule [PF 10 (3), 301 (1959)] znacznie wcześniej niż późniejsi nobliści zajęli się tym zagadnieniem.

**Szczegółowe informacje o zawartości czasopisma, poczynszy od pierwszego numeru sprzed 75 lat, można znaleźć w spisie treści PF <https://www.ptf.net.pl/PF/spis-tresci> oraz zapoznać się z poszczególnymi artykułami w archiwum PF <https://www.ptf.net.pl/PF/archiwum>**

Z biegiem lat zmieniał się skład redakcji (redaktorem naczelnym o najdłuższym stażu był Adam Sobiczewski – pełnił tę funkcję 25 lat!), następowały zmiany: częstotliwości ukazywania się (dwumiesięcznik/kwartalnik), nakładu, formatu i kolorystyki, a także sposobu finansowania czasopisma. Zawartość PF była coraz bardziej różnorodna. Znajdujemy tu: artykuły *stricte* naukowe dotyczące fizyki i jej zastosowań, tłumaczenia ważnych doniesień fizyki polskiej i światowej, polemiki, relacje z sympozjów, seminariów i konferencji naukowych, wśród których poczesne miejsce zajmują Zjazdy Fizyków Polskich, teksty dotyczące dydaktyki fizyki, biografie fizyków, wspomnienia o wybitnych polskich fizykach, którzy odeszli, artykuły historyczne o rozwoju fizyki na ziemiach polskich oraz historii Polskiego Towarzystwa Fizycznego, ponadto recenzje książek z dziedziny fizyki ukazujących się na polskim rynku wydawniczym. Na łamach naszego czasopisma na stałe zagościła KRONIKA opisująca wydarzenia ważne dla środowiska fizyków, która do dziś jest stałym elementem każdego numeru stanowiąc bezcenny dla historyków nauki zapis „na żywo” historii fizyki w Polsce.

Przed erą internetu *Postępy Fizyki* stanowiły forum wymiany myśli naukowej w dziedzinie fizyki i nauk pokrewnych, zgodnie z podtytułem czasopisma przybliżały fizykom, co nowego działo się w fizyce światowej. Obecnie, kiedy to rozwinęło się wiele różnych wąskospecjalistycznych dziedzin fizyki teoretycznej i doświadczalnej, kiedy naukowcy/badacze śledzą za pośrednictwem internetu rozwój badań w swoich specjalnościach niemal w czasie rzeczywistym i mają łatwy dostęp do periodyków naukowych, PF stały się czasopismem upowszechniającym wiedzę fizyczną dotyczącą jakiejś wąskiej dziedziny wśród fizyków spoza niej.

**Z okazji 75 urodzin życzymy sobie wzajemnie (Czytelnicy i Redakcja), by nadal PF umożliwiały polskim fizykom oraz pasjonatom nauki, którzy niekoniecznie są specjalistami w danej dziedzinie, poznanie i, co ważne, zrozumienie najnowszych osiągnięć światowej fizyki.**

*redaktor naczelna*

---

# Ocalmy noc

## Let's save the night

Andrzej Z. Kotarba\*

Centrum Badań Kosmicznych PAN

---

**Abstrakt.** Światło jest niezbędne do życia nie mniej, niż jego brak. Nadmiar światła w środowisku nocnym powoduje zaburzenia naturalnych cykli życiowych roślin i zwierząt, w tym ludzi. Problem jest na tyle poważny, że współcześnie mówi się już wprost o zanieczyszczeniu światłem. W tekście przybliżam ten problem i pokazuję, jak narzędzia fizyki pomagają w jego monitorowaniu.

**Słowa kluczowe:** zanieczyszczenie światłem, jasność nocnego nieba, obserwacje satelitarne, radiancja, luminancja

**Abstract.** Light is essential for life. But just as much their absence. Excessive light in the nighttime environment disrupts the natural life cycles of plants and animals, including humans. The problem has become known as light pollution. In this article, I will take a closer look at this issue and show how the tools of physics contribute to monitoring it.

**Key words:** light pollution, night sky brightness, satellite observations, radiance, luminance

---

Z całego spektrum fal elektromagnetycznych zakres 380-780 nm ma dla ludzi szczególne znaczenie. Na fotony z tego przedziału, potocznie nazywanego światłem, uczulone są fotoreceptory naszych oczu. Dzięki nim widzimy, a zmysł wzroku zapewnia nam około 80% informacji o otoczeniu. Światło ma też ogromne znaczenie w fizjologii. Jest podstawowym sygnałem (tzw. dawcą czasu) w synchronizacji naszego wewnętrznego zegara biologicznego ze środowiskiem zewnętrznym – procesie, w którym człowiek ostatnio bardzo „namieszał”.

Impuls świetlny poprzez receptory w siatkówce oka trafia do systemu nerwowego i jest transmitowany do mózgu. Ten steruje gospodarką hormonalną organizmu, ustawiając go bądź to w trybie aktywności (dzień), bądź odpoczynku (noc). Kluczowa jest rola melatoniny zwanej hormonem ciemności, produkowanej wyłącznie w warunkach mroku. Gdyby światło było dostępne tylko za dnia, produkcja melatoniny mogłaby się prawidłowo rozpoczynać z nastaniem zmroku. Tak się jednak nie dzieje, gdyż nawet po zachodzie Słońca wciąż jesteśmy otoczeni światłem – sztucznym.

Precyzyjnie zsynchronizowane cykle fizjologiczne ulegają więc zaburzeniu. U wielu osób pojawiają się problemy z zasypianiem, jakością snu, bezsennością. W ciągu dnia jesteśmy zdekoncentrowani, w kiepskim nastroju, co z czasem zamienia się w depresję. Pojawiają się problemy z metabolizmem, stopniowo prowadzące do otyłości czy chorób układu krążenia. Z jeszcze więk-

szymi problemami borykają się rośliny i zwierzęta, również oczekujące cyklu dnia i nocy – teraz drastycznie zaburzonego przez obecność antropogenicznego światła po zachodzie Słońca.

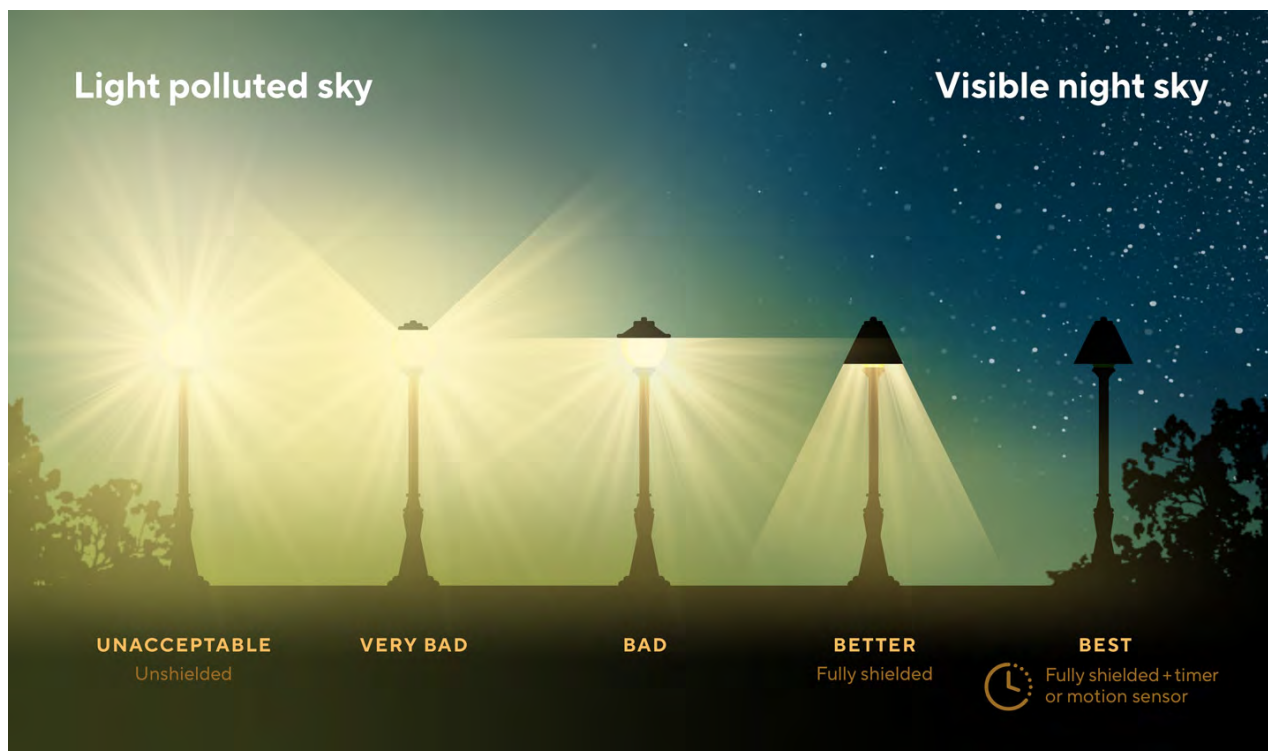
W naukach przyrodniczych nadmiar światła nocą uznaje się za rodzaj zanieczyszczenia środowiska. W ścisłej definicji jest to sytuacja, gdy organizmy są ekspozowane na światło o niewłaściwym natężeniu i barwie, o niewłaściwej porze i w niewłaściwym miejscu. Przy takim podejściu za zanieczyszczenie wypadaloby uznać nawet jeden antropogeniczny foton. Pragmatycznie przyjmuje się więc, że zanieczyszczenie światłem to niezamierzony rezultat oświetlenia elektrycznego czy też nadmiar sztucznego światła, spowodowany np. nieprawidłowo zaprojektowanym oświetleniem (ryc. 1).

I tu przyrodnicy stawiają sobie pytanie: ile tego sztucznego światła jest wokół nas? Z jak intensywnym zanieczyszczeniem świetlnym mamy do czynienia? Odpowiedzi szukamy czerpiąc garściami z metod badawczych i technik obserwacyjnych od dawna znanych w fizyce, w szczególności powszechnie stosowanych w astronomii, geofizyce (fizyce atmosfery) czy teledetekcji.

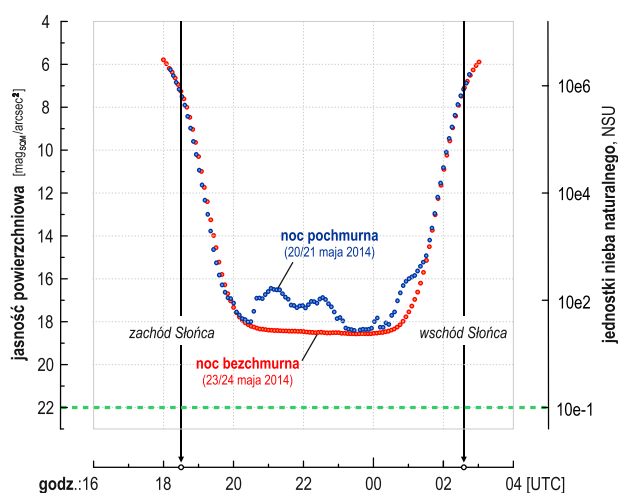
Zacznę od astronomii, bo to astronomowie jako pierwsi zaalarmowali, że z nocą dzieje się coś niedobrego. Zainteresowani obserwacją ciemnego nieba coraz dobitniej doświadczała jego wyjaśnienia (ryc. 2). Było oczywiście, że za niepożądaną zmianą stoi dynamiczny rozwój miast i błyskawiczne zmniejszenie się dystansu między rozświetlonymi aglomeracjami a wymagającymi mroku obserwatoriami.

---

\*ORCID: 0000-0001-7982-1992



Rys. 1. Lampa uliczna to jedno ze źródeł oświetlenia, które może powodować zanieczyszczenia światłem. Wiele zależy od kwestii technicznych, w tym sposobu emisji światła z oprawy. Najgorsza sytuacja to tzw. „szklana kula”, czyli oprawa, która emituje światło dookoła, z taką samą intensywnością (pierwsza lampa po lewej). Sytuacja najlepsza (druga lampa z prawej) to oprawa, która kieruje światło w dół i zapobiega niepotrzebnej emisji światła na boki czy w górę, np. na fasady budynków, czy na tereny zielone. Idealnie byłoby, gdyby tak zaprojektowana lampa była użytkowana tylko wtedy, gdy ma komu służyć, tj. wyłączała się automatycznie, gdy nie ma pieszych i ponownie włączała np. za pomocą czujnika ruchu (pierwsza lampa po prawej) (źródło: darksky.org)



Rys. 2. Przykład zmiany jasności nocnego nieba określanej za pomocą półprofesjonalnego fotometru SQM (*sky quality meter*) w Warszawie, w maju 2014 roku. Kolorem czerwonym zaznaczone są wartości dla nocy bezchmurnej. W warunkach nieba naturalnego wartości te powinny spadać do poziomu  $22 \text{ magn}_{\text{SQM}} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ . Zanieczyszczenie światłem powoduje, że tak się nie dzieje. Kolor niebieski to pomiar w warunkach nocy z chmurami. Obecność chmur w warunkach zanieczyszczenia światłem zwiększa jasność nieba nawet kilkadziesiąt razy. Jednostki nieba naturalnego (skala po prawej) wskazują, ile razy niebo aktualne jest jaśniejsze od nieba wolnego od zanieczyszczenia światłem

By lepiej zbadać problem, podjęto próby modelowania jasności nieba (lata 60. XX w.). Jak na dzisiejsze standardy, pierwsze modele były dość trywialne. Jasność

nieba była w nich proporcjonalna do odległości od miasta. Z racji braku danych o intensywności miejskich świateł, „moc świecenia” metropolii przybliżano wskaźnikami ekonomicznymi i liczbą mieszkańców (ludne i bogate miasto świeciło bardziej, niż mała i biedna wioska). Geometrię trójwymiarowego miasta zredukowano do punktu.

Przy takich założeniach powstał pionierski model Merle’a F. Walkera z 1970 roku [1]. Szybko został on jednak dopracowany przez Richarda L. Berry’ego [2], który wprowadził pierwsze elementy fizyki atmosfery. Berry uzależnił jasność nieba od współczynników rozproszenia i ekstynkcji promieniowania. Pozwolił również wchodzić światłu w interakcje z aerozolami, przy czym w atmosferze mogła znajdować się tylko jedna ich warstwa. Model samej atmosfery pozostawał prymitywny i to do tego stopnia, że jej gęstość malała liniowo z wysokością.

Istotnym krokiem do przodu okazały się prace Roya Henry’ego Garstanga [3, 4]. Ów brytyjski astrofizyk zaproponował model, który znacząco „ufizycznił” obraz nocnego świata. U Garstanga gęstość gazów zmieniała się już wykładniczo, a aerozole mogły występować w kilku warstwach i mieć różną grubość optyczną. Jasność nieba mogła być liczona w dowolnym punkcie nieboskłonu (nie tylko w zenicie), na dowolnej wysokości nad poziomo-

mem morza. Otrzymywano wyniki  $y$  dla popularnych w astronomii zakresów fotometrycznych  $V$  i  $B$ .<sup>1</sup>

Zmienił się też sposób postrzegania miast. Z punktów rozrosły się do świecących dysków, a co najważniejsze model Garnstanga pozwalał na anizotropowy rozkład *funkcji kierunkowej emisji światła* – miasta mogły świecić z różną intensywności w różnych kierunkach.

Z takim modelem jasności nieba astronomowie wkroczyli w XXI w. – stulecie, w którym już nawet proste komputery PC pozwalały na zadowalające symulacje numeryczne. Z dobrodziejstw tych szybko skorzystali włoscy naukowcy, Pierantonio Cinzano i Fabio Falchi. Sięgnęli po model Garnstanga i przenieśli go na grunt współczesnych metod numerycznych [5].

Skupili się na problemie transferu promieniowania, w zakresie od 250 nm do podczerwieni, uproszczonym do śledzenia promieni (*ray-tracing*). Użytkownik modelu Cinzana i Falchiego zyskał możliwość uwzględnienia własnej atmosfery z maksymalnie pięcioma warstwami chmur i aerozoli. Mógł też zdefiniować funkcję kierunkowej emisji światła dla każdego osobnego piksela, a nie jak dotąd jedną uniwersalną dla całego badanego obszaru.

Co ważne, opis fizyczności świata wsparły wcześniej niedostępne obserwacje satelitarne. Dostarczyły one szczegółowej informacji o topografii (model SRTM) oraz danych o albedo<sup>2</sup> powierzchni lądów (obserwacje MODIS). Jednak największym przełomem było uwzględnienie empirycznych danych na temat intensywności i lokalizacji nocnych światel. Miasta przestały być geometrycznymi abstrakcjami – dzięki użyciu danych satelitarnych z instrumentu OLS model Cinzana i Falchiego jako pierwszy został zasilony rzeczywistymi mapami nocnych światel naszej planety.

Na efekty nie trzeba było długo czekać. W 2001 roku ukazała się publikacja przynosząca pierwszy w historii atlas sztucznego rozjaśnienia nieboskłonu na całej planecie [6]. 15 lat później atlas doczekał się kolejnej edycji, tym razem zasilonej danymi satelitarnymi instrumentu VIIRS i walidowany pomiarami fotometrycznymi [7]. Okazało się, że w 2015 roku niebo zanieczyszczone światłem miało nad sobą 80% ludności świata i ponad 99% mieszkańców i mieszkańek Europy i USA. Naturalnie ciemne niebo nie występowało niemal na jednej czwartej

(23%) lądów między 75°N i 60°S szerokości geograficznej i aż nad 88% terytorium Europy.

Model Cinzana i Falchiego pozostaje najpopularniejszym narzędziem do kartowania<sup>3</sup> zanieczyszczenia światłem w skali całego globu. Coroczna aktualizacja map wykonywana jest np. przez Davida Lorenza z Uniwersytetu Wisconsin w Madison. Sięgnąłem po jedną z jego map (dla roku 2022), by ocenić, jaki jest stopień zanieczyszczenia świetlnego nocnego nieba nad Polską (ryc. 3). Dane pokazały, że w 2022 roku nocne niebo nad naszym krajem było średnio 147% jaśniejsze, niż niebo wolne od zanieczyszczenia światłem (za takie przyjmuje się nieboskłon o jasności powierzchniowej<sup>4</sup> 22,0 mag · arcsec<sup>-2</sup>, co odpowiada w przybliżeniu luminancji równiej 174 μcd · m<sup>-2</sup>). Najbliższe naturalnemu wystąpiło w Bieszczadach, gdzie było tylko o 6-8% jaśniejsze, niż niebo referencyjne. Niestety oznacza to jednocześnie, że nieba wolnego od zanieczyszczenia światłem w Polsce nie ma już wcale.

Mieszkańcy największych miast o niebie „nocnym” w zasadzie mogą tylko pomarzyć. Nieboskłon prosto nad ich głowami (zenit) jest ponad 1000% jaśniejszy, niż niebo naturalne. Najjaśniej jest w centrum stolicy, gdzie niebo zostało sztucznie rozświetlone do 17,46 mag · arcsec<sup>-2</sup> (11,2 μcd · m<sup>-2</sup>), tj. do wartości 6329% większej, niż rejestrowana dla nieba wolnego od skażenia światłem. W takich warunkach fazy Księżyca przestają już mieć znaczenie: zawsze jest jaśniej, niż w czasie pełni. Drogi Mlecznej nie dostrzeżemy nad 9% powierzchni Polski. To obszar zamieszkały przez 58% Polek i Polaków. Sytuacja jest najgorsza w województwie śląskim, gdzie obrazu Galaktyki na nocnym niebie nie może zobaczyć aż 89% populacji (72% w województwie mazowieckim, 63% w pomorskim). Dla co piątego Polaka i Polki nocne niebo jest tak jasne, że ich oczy nie przełączają się z dzien-

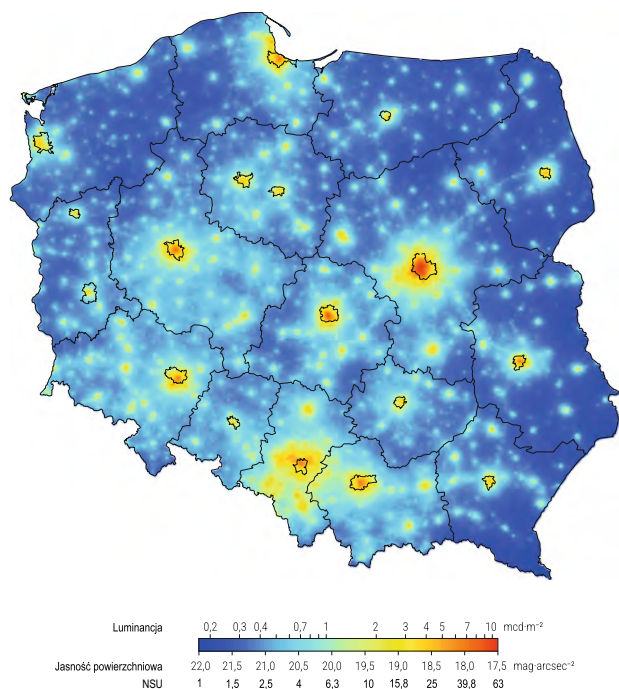
1. Jednym z najczęściej stosowanych w astronomii jest zestaw filtrów *UBV* Johnsona. Pozwala on na obserwacje w trzech różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego: *U* – ultrafioletowym, *B* – niebieskim i *V* – widzialnym (przyp. red.).

2. Albedo (łac. *białość*) – parametr fotometryczny określający zdolność odbijania światła przez daną powierzchnię. Współczynnik albedo jest równy stosunkowi ilości promieniowania odbitego do ilości promieniowania padającego. Pojęcie to do fizyki wprowadził Johann Heinrich Lambert (przyp. red.).

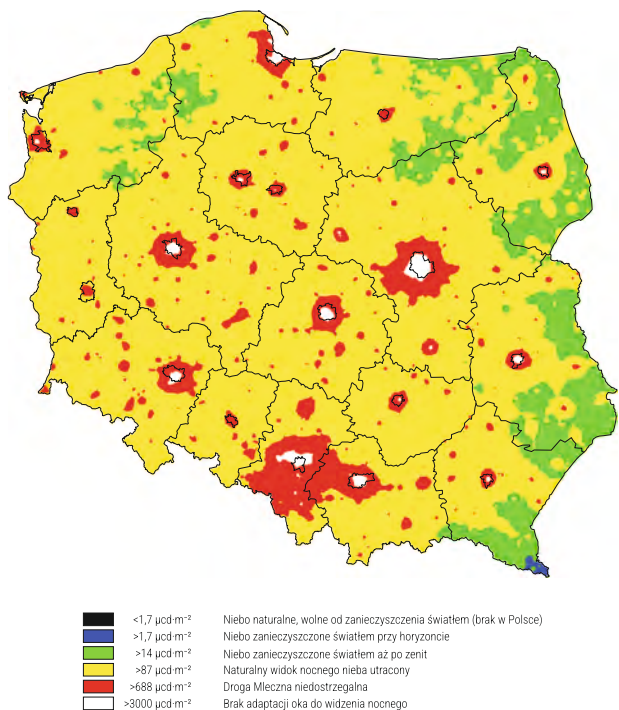
3. Kartowanie – nanoszenie na podkład mapy topograficznej szczegółów dotyczących wybranego tematu, na podstawie bezpośrednich obserwacji i pomiarów w terenie (przyp. red.).

4. Jasność powierzchniowa nieba  $S_a$  podawana jest najczęściej w powszechnie używanych w astronomii jednostkach *magnitudo na sekundę łuku do kwadratu* (mag/arcsec<sup>2</sup>). Jest to skala pochodna względem skali jasności gwiazdowej *magnitudo* (mag, <sup>m</sup>), określającej wizualne wrażenie jasności gwiazdy jako źródła punktowego. Skala *magnitudo* jest skalą logarytmiczną, względną i odwrotną, w której obiekt o jasności 0 mag jest jaśniejszy 100 razy od obiektu o jasności 5 mag. Skala mag/arcsec<sup>2</sup> określa jasność powierzchniową obiektów astronomicznych rozciągłych, takich jak mgławice, galaktyki, komety czy właśnie tło nieba. Jednostką jasności powierzchniowej w układzie SI jest *kandela na metr kwadratowy* (cd/m<sup>2</sup>). Zależność pomiędzy tymi wielkościami opisuje następujący wzór: cd/m<sup>2</sup> = 10,8 · 10<sup>4</sup> · 10<sup>(-0,4 · [mag/arcsec<sup>2</sup>])</sup>. W związku z niską jasnością powierzchniową nocnego nieba stosowane są jednostki pochodne: milikandela na metr kwadratowy (mcd/m<sup>2</sup>), mikrokandela na metr kwadratowy μcd/m<sup>2</sup> (przyp. red.).





Rys. 3. Jasność nocnego nieba nad Polską w 2022 roku na podstawie obserwacji VIIRS i modelu Cinzana i Falchiego (dane źródłowe udostępnione przez Davida Lorenza z Uniwersytetu Wisconsin w Madison). Jasność wyrażona w wartościach jasności powierzchniowej (zakres fotometryczny V) i przybliżona do wartości luminancji oraz jednostek nieba naturalnego (NSU, *night sky unit*, wielokrotności jasności nieba aktualnego względem referencyjnego, tj. wolnego od zanieczyszczenia światłem)



Rys. 4. Jasność nocnego nieba nad Polską w 2022 roku na podstawie obserwacji VIIRS i modelu Cinzana i Falchiego (dane źródłowe udostępnione przez Davida Lorenza z Uniwersytetu Wisconsin w Madison). Jasność podzielona wg stopnia antropogenicznego wyjaśnienia nieba na klasy przyjęte przez Falchiego i in. (2016) w globalnym atlasie jasności nieba

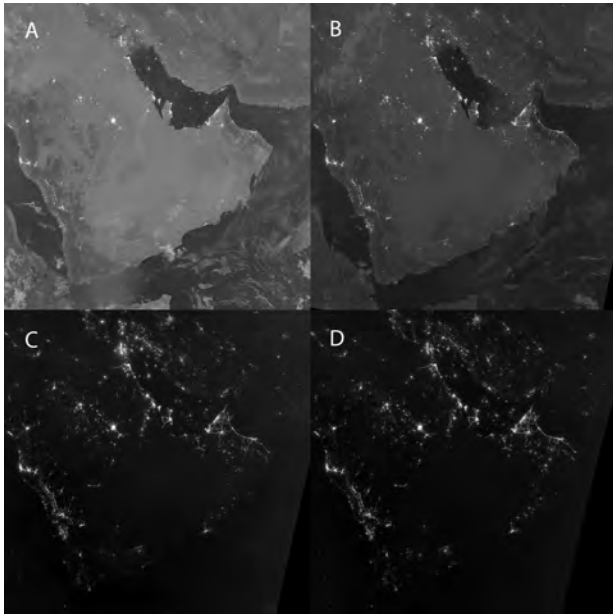
nego (fotopowego) na nocny (skotopowy) tryb widzenia (ryc. 4). W Warszawie, Krakowie, Łodzi, Poznaniu, Lublinie, Gdańsku zmierzch od razu przechodzi w świt.

Sukces modelu Cinzana i Falchiego nie byłby możliwy, lub nie byłby tak spektakularny, gdyby nie obserwacje satelitarne. Bez nich wciąż musielibyśmy przyjmować mniej lub bardziej abstrakcyjne przybliżenia jasności światła uwarunkowane wskaźnikami demograficznymi. Wspomniałem wcześniej o dwóch instrumentach OLS i VIIRS. To ważne narzędzia obserwacyjne. Chciałbym poświęcić im nieco więcej uwagi.

OLS (*Operational Linescan System*) był dzieckiem amerykańskiej armii. Gdy w latach 60. XX. Amerykanie próbowali fotografować z orbity okołozemskiej terytorium ZSRR i jego sojuszników, okazało się, że spora liczba zdjęć przedstawia chmury. Potrzebowali narzędzia, które pozwoliłoby z wyprzedzeniem ocenić sytuację meteorologiczną nad miejscem obserwacji, by mogli efektywniej wykorzystać możliwości satelitów szpiegowskich. Rozwiązaniem okazał się *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) oraz jego „oczy”, tj. instrument OLS, którego sensorem był radiometr obrazujący w dwóch zakresach promieniowania. Jeden kanał pokrywał zakres 10,0-13,4  $\mu\text{m}$ , fale powszechnie stosowane w meteorologii do określania temperatury radiacyjnej chmur – tak za dnia, jak i w nocy (rejestrowane jest promieniowanie własne Ziemi). Drugi kanał przypadł na szeroki zakres od 0,47 do 0,95  $\mu\text{m}$ , czyli promieniowanie widzialne i bliską podczerwień. Obrazy teoretycznie można byłoby uzyskiwać jedynie w ciągu dnia (odbite od Ziemi promieniowanie Słońca), ponieważ Ziemia nie emituje promieniowania w tym zakresie. Wojskowi byli jednak ambitni. Stwierdzili, że Księżyc w czasie pełni na tyle jasno oświetla chmury, że na orbitę powinno docierać wystarczająco dużo światła, by dało się je rejestrować (ryc. 5). Potrzebny był tylko wystarczająco czuły instrument. W OLS zainstalowano zatem fotopowielacz, który w sposób dynamiczny wzmacniał słabe nocne światła planety. Dynamiczny oznacza tu, że stopień wzmocnienia był wyliczany na bieżąco („w locie”), w efekcie czego wojskowi otrzymywali poprawnie naświetlone obrazy zarówno dziennej, jak i nocnej strony Ziemi.

Pierwszy OLS wysłano w kosmos w 1976 roku. Naukowcy od razu dostrzegli potencjał zbieranych danych widząc, że na zdjęciach wyraźnie zaznaczają się światła generowane przez człowieka, np. miasta, obszary eksploatacji ropy. Na szeroką skalę mogli skorzystać z dobrodziejstw OLS jednak dopiero po 1992 roku, gdy amerykańskie wojsko stworzyło cyfrowe archiwum danych DMSP w obrębie cywilnej agencji meteorologicznej (NOAA). Od razu ruszyły prace, które ostatecznie zaowocowały mapami wykorzystanymi w pierwszym atlasie jasności nieba z 2001 roku.

OLS szybko ujawnił swoje ograniczenia. To, co wystarczyło wojskowym meteorologom, niekoniecznie było optymalne dla cywilnych zastosowań. Największą bo-



Rys. 5. Półwysep Arabski obserwowany instrumentem VIIRS w różnych fazach Księżyca: a) 30.09.2012, pełnia; b) 5.10.2012, tarcza Księżyca oświetlona w 75%; c) 10.10.2012, tarcza Księżyca oświetlona w 29%; d) 15.10.2012, nów (fot. NASA).

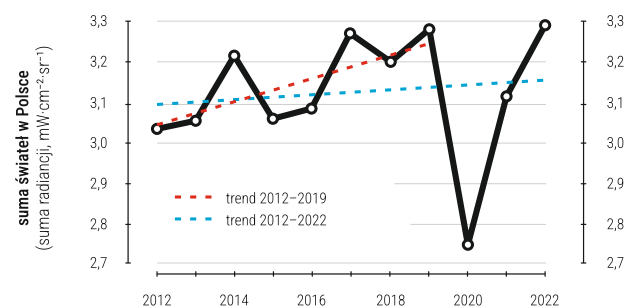
łącką okazał się charakter samych danych. Radiometry satelitarne przesyłają zazwyczaj informacje o radiancji<sup>5</sup> promieniowania. Natomiast OLS przekazywał obrazy, w których każdy piksel charakteryzowała bezwymiarowa wartość z zakresu od 0 do 63. Dynamiczne wzmacnianie sygnału powodowało, że już na poziomie pomiaru tracono oryginalną informację o radiancji. Jej odtworzenie było piekielnie trudne i wykonalne jedynie w szczególnie sprzyjających okolicznościach [8, 9].

To i inne ograniczenia przezwyciężono projektując następcę OLS, skaner VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) dla satelitów meteorologicznych nowej generacji [10, 11]. VIIRS jest już pełnowymiarowym radiometrem, kalibrowanym non stop na orbicie. Przesyła informacje o radiancji promieniowania, będąc przy tym niemal trzy razy bardziej czuły, niż poprzednik (limit detekcji dla VIIRS to około  $2 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ). Zakres dynamiczny VIIRS dobrano tak szeroko (od  $3 \cdot 10^{-10}$  do  $2 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ), że wyeliminowany został dość irytujący w OLS problem saturacji sygnału, tj. notorycznego prześwietlenia obszarów miejskich. Pierwszy VIIRS trafił na orbitę w 2012 roku na pokładzie należącego do NASA satelity Suomi-NPP. Od tego czasu dostarcza danych dla każdego miejsca na świecie dwa razy na dobę: raz w ciągu dnia, raz w ciągu nocy.

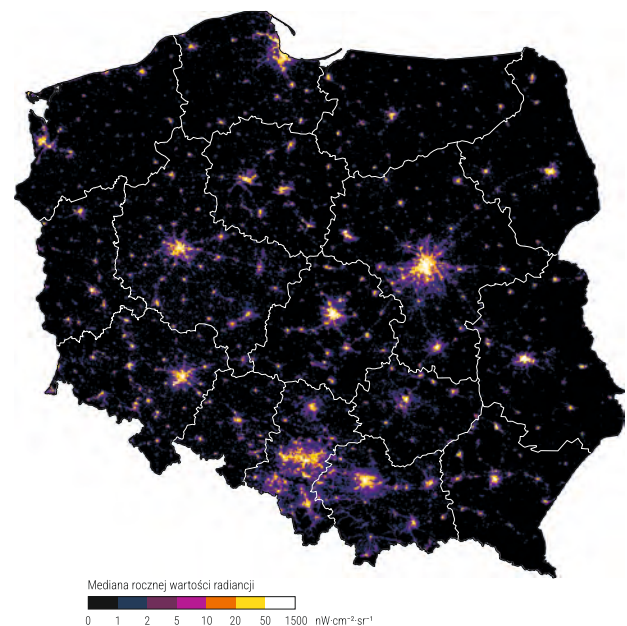
Sięgnąłem do archiwum tych obserwacji, by sprawdzić, co VIIRS ma do powiedzenia o radiancji nocnych

5. Radiancja (termin radiometryczny) – strumień promieniowania na jednostkę powierzchni na jednostkę kąta bryłowego. W układzie SI jednostką radiancji jest wat na steradian na metr kwadratowy ( $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) (przyp. red.).

światel w Polsce, a co za tym idzie, o zanieczyszczeniu światłem. Ciekawe rzeczy widać już w największym stopniu uogólnienia, tj. w wartości sumy radiancji w obrębie terytorium kraju, popularnie nazywanej „sumą światel” (ryc. 6). W roku 2022 wyniosła ona  $3\,290\,590 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ , będąc nieznacznie większą od wartości notowanych w latach 2017 i 2019. Tym samym była o 6% większa niż przeciętna suma światel w dekadzie 2012-2021 oraz aż o 20% większa niż w roku 2020 (podczas pandemii, gdy wielu wódatarzy decydowało się w czasie kwarantanny wyłączyć część nocnego oświetlenia w gminach).



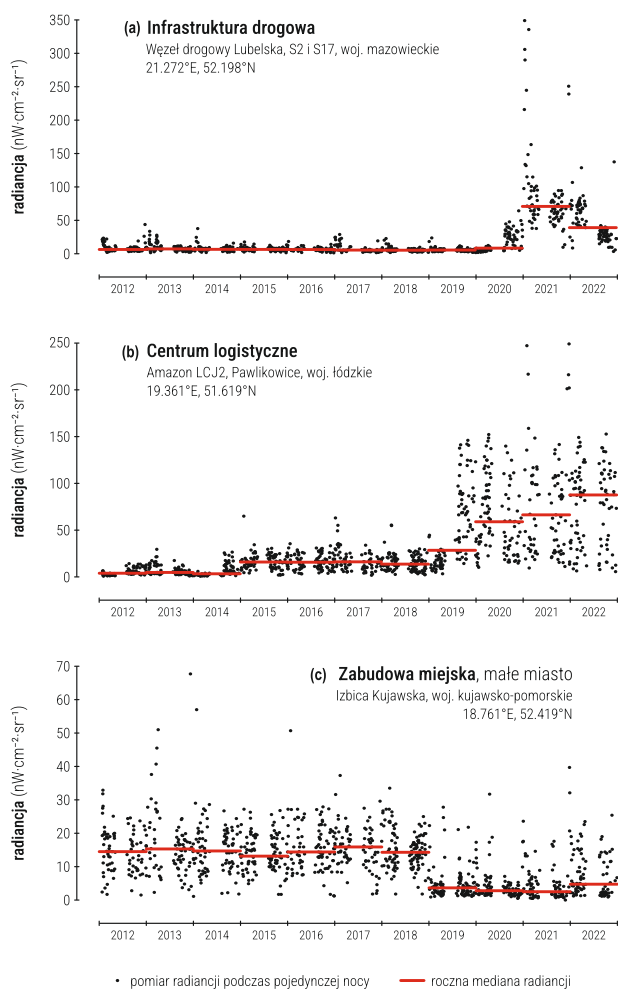
Rys. 6. Wieloletnia zmienność sumy światel, tj. obszarowej sumy przeciętnej rocznej wartości radiancji w Polsce. Opracowane na podstawie obserwacji VIIRS satelity Suomi-NPP



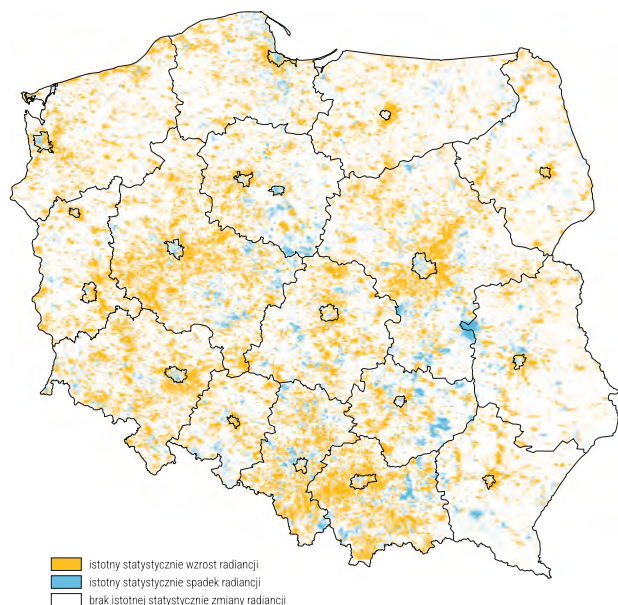
Rys. 7. Rozkład przestrzenny radiancji nocnych światel (dokładniej: promieniowania elektromagnetycznego w zakresie  $0,5\text{--}0,9 \mu\text{m}$ ) nad Polską w 2022 roku, na podstawie obserwacji VIIRS satelity Suomi-NPP

Szukając najjaśniejszego miejsca na nocnej mapie Polski (ryc. 7), trafimy nie na miasta, ale na szklarnie. Aż pięć najjaśniejszych lokalizacji w kraju to właśnie obiekty tego typu. Dla najjaśniejszej z nich (w Goczałkowicach-Zdroju) VIIRS wskazał w 2022 roku przeciętną radiancję sięgającą  $1436 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ . Dla porównania, okolice warszawskiego Pałacu Kultury i Nauki – najjaśniejsza w Polsce lokalizacja o typowo miejskim cha-





Rys. 8. Zmienność radiancji promieniowania w zakresie 0,5-0,9  $\mu\text{m}$  w wybranych punktach Polski. Mniejsza liczba obserwacji w miesiącach letnich wynika z występowania dnia polarnego i negatywnego wpływu rozproszonego światła słonecznego na pomiar



Rys. 9. Lokalne tendencje zmiany wartości radiancji: wartość w 2022 roku względem średniej wartości z dekady 2012-2021

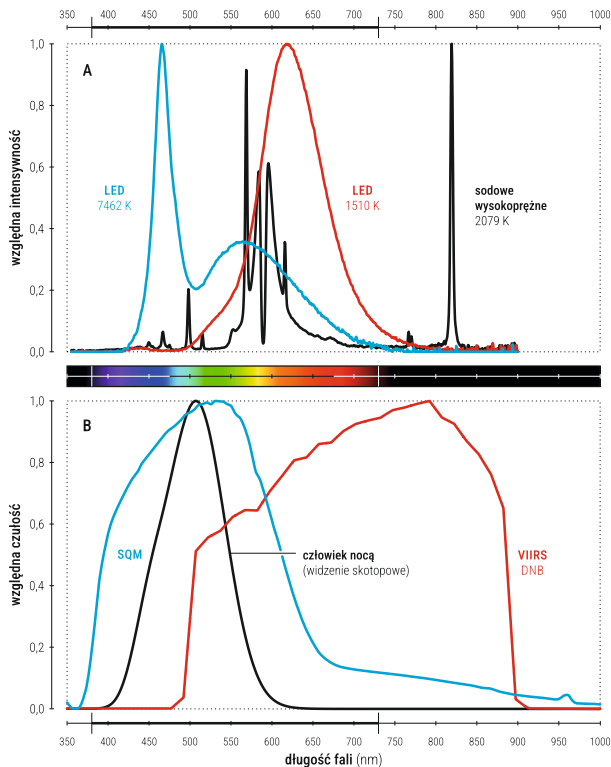
rakterze – cechowały się przeciętną radiancją równą  $239 \text{ nW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ .

Jaśnienie (czyli wzrost radiancji) nie było jednak równomierne (ryc. 8, ryc. 9). Istotny statystycznie wzrost radiancji w 2022 roku względem dekady 2012-2022 wystąpił na 23,3% powierzchni kraju (w 78% gmin), podczas gdy na 5,2% terytorium kraju radiancja spadła. Na pozostałym obszarze 12 lat obserwacji VIIRS okazało się niewystarczające, by uchwycić istotną statystyczną zmianę. W poszczególnych województwach proporcje były inne tak *in plus*, jak *in minus*. Przykładowo, radiancja wrosła aż na 40% powierzchni Małopolski, ale tylko na 13% powierzchni Podkarpacia. Gdy spojrzeć na miasta wojewódzkie, w zasadzie wszystkie doświadczyły wzrostu radiancji – najsilniejszego Opole (+21%) i Białystok (+15%). Na mapach obrazujących zmiany doskonale zaznaczyły się różnego rodzaju inwestycje infrastrukturalne. W szczególności węzły drogowe na drogach krajowych i autostradach czy też licznie otwierane (i bardzo intensywnie oświetlane) centra logistyczne firm kurierskich oraz sieci handlowych.

Znaczące spadki radiancji pojawiały się natomiast w centrach miast. Mogły wynikać ze zmiany charakteru oświetlenia, pojawienia się nowej zabudowy (zagęszczenia tkanki miejskiej), pojawienia się roślinności czy być efektem świadomych działań na rzecz redukcji zanieczyszczenia światłem. Bez bardzo szczegółowych badań w skali lokalnej nie sposób tego rzetelnie wyjaśnić. Trzeba brać też poprawkę na ograniczenia samego systemu obserwacyjnego. Mówiąc o zanieczyszczeniu światłem siłą rzeczy odwołujemy się do światła, a więc promieniowania z zakresu 380-780 nm, na które dodatkowo trzeba nałożyć krzywą czułości ludzkiego oka. A ta zmienia się z długością fali, przypomina bowiem rozkład gaussowski z maksimum czułości dla 555 nm w ciągu dnia (widzenie fotopowe) i 507 nm w ciągu nocy (widzenie skotopowe). Zestawienie funkcji czułości oka z czułością VIIRS od razu uświadamia, z jakim wyzwaniem musimy się mierzyć (ryc. 10).

Największy problem sprawia sam skaner VIIRS, który w zasadzie „nie widzi” promieniowania niebieskiego. Co prawda w nocnym pejzażu monochromatycznego światła niebieskiego jest tyle, co nic, jednak do środowiska w dużych ilościach emitują je diody LED stosowane w białym oświetleniu publicznym. Diody te świecą na biało, gdyż stanowiąca ich serce dioda (niebieska!) jest pokryta luminoforem. Od rodzaju luminoforu zależy jaką temperaturę barwową<sup>6</sup> osiągnie światło. Światło o barwie ciepłej charakteryzuje niska temperatura barwowa, około 2000 K. Maksimum emisji wypada wtedy w zakresie światła czerwonego i pomarańczowego. Ochładzając światło, a więc zwiększając jego temperaturę barwową,

6. Jednym ze sposobów określania barw światła jest *temperatura barwowa* wyrażana w kelwinach (K) (przyp. red.).



Rys. 10. Charakterystyki spektralne wybranych źródeł światła (A) oraz czułości widmowe wybranych detektorów światła (B)

przesuwamy maksimum emisji w stronę fal krótszych. „Zimne” diody LED, świecące „ostrym” światłem białym, cechuje temperatura barwowa  $\sim 7000$  K, co przypomina dzienne światło słoneczne (dla porównania, w czasie zachodu Słońca do naszych oczu trafia światło o temperaturze barwowej około 3000 K). Widmo emisyjne stosowanego powszechnie w polskich miastach wysoko-  
prężnego oświetlenia sodowego ma dwa piki. Pierwszy znajduje się w podczerwieni ( $\sim 830$  nm), drugi w okolicach 600 nm. Nasze oczy widzą tylko ten drugi i dlatego lampy sodowe znamy jako pomarańczowe. Gdy lampę sodową zastąpimy LED-ową, to po pierwsze likwidujemy pik w podczerwieni, a po drugie dodajemy pik w zakresie promieniowania niebieskiego (tym większy, im wyższa temperatura barwowa). VIIRS zarejestruje ubytek w podczerwieni, ale już nie zarejestruje ewentualnego wzrostu emisji w zakresie fal krótkich.

Sięgając po VIIRS do monitoringu zanieczyszczenia światłem dostajemy więc niezłą łamigłówkę. Czy spadek radiancji, jaki VIIRS mierzy, jest spadkiem faktycznym, czy tylko pozornym, wynikającym ze zmiany typu oświetlenia? Dużo zależy od tego, po jakie oprawy oświetleniowe (zob. ryc. 1) sięgają włodarze miast. Zaleca się, by lampy sodowe zastępowali LED-owymi o takiej samej temperaturze barwowej. Nagminnie staje się jednak zamienianie nocy w dzień i zalewanie całych dzielnic światłem zimnym (o temperaturze barwowej  $> 5000$  K). Wniosek: wskazania VIIRS musimy uznać za optymistyczne, jednak część spadków radiancji w Polsce nie

musi oznaczać rzeczywistego spadku zanieczyszczenia światłem.

Mniej istotna, choć nie bez znaczenia, jest też pora obserwacji VIIRS. O ile sięgając po radiometry i fotometry naziemne jesteśmy w stanie prowadzić obserwacje ciągłe dla danej lokalizacji, o tyle czas pomiaru z orbity jest zeterminowany specyfiką orbity. VIIRS pracuje na niskiej (830 km), wstecznej orbicie okołobiegunowej ( $98.8^\circ$ ). Dzięki temu uzyskiwana jest *heliosynchroniczność*, tj. satelita przelatywał nad danym obszarem zawsze o tej samej porze lokalnego czasu słonecznego. Dla VIIRS wybrano godzinę 01:30 w nocy. Co za tym idzie, wszelkie dane VIIRS (i pochodne, jak modelowe mapy jasności nieba) informują wyłącznie o świetle emitowanym z Ziemi o tej właśnie porze.

Pomimo ograniczeń istniejących metod badawczych, wniosek z obserwacji jest jeden: zanieczyszczenie światłem w Polsce (ale też na świecie) jest zjawiskiem powszechnym i nasila się [12, 13]. Trend ten można odwrócić stosownymi regulacjami prawnymi, zmuszającymi nie tyle do wyłączenia wszelkich instalacji oświetleniowych po zmroku (nonsens!), co do wprowadzenia **polityki zrównoważonego oświetlenia** [14, 15]. Jej filarem jest kilka prostych zasad. Po pierwsze, jeśli nie musisz – nie świeć. Gdy świecisz, zadbaj o to, by światło nie uciekało na boki i w górę. Instaluj oświetlenie o temperaturze barwowej nie wyższej niż 2000-3000 K i intensywności dopasowanej do warunków. Stosuj wyłączniki czasowe i detektory ruchu, by nie emitować światła, które nikomu nie służy.

To są wskazówki, które już teraz każdy z nas może wdrożyć na własnym podwórku czy osiedlu. Wystarczy chcieć. W efekcie zmniejszy się ucieczka światła do środowiska, z korzyścią dla naszego bezpieczeństwa, zdrowia i portfela (bo za marnowane światło przecież też płacimy). Poprawi się też kondycja ekosystemów, a i astronomowie się ucieszą. To jedna z tych rzadkich sytuacji, gdy zmiana przynosi same korzyści i to każdej ze stron.

Dzisiejsze badania zanieczyszczenia światłem nie byłyby możliwe, gdyby nie radiometria i fotometria zarówno te naziemne, jak i satelitarne, co – mam nadzieję – udało mi się pokazać w niniejszym tekście. Pomiar nadmiaru światła same w sobie oczywiście nie rozwiążą problemu, ale są kluczowym elementem poznania skali zjawiska, które wywołaliśmy i w centrum którego się znajdujemy; są krokiem do zrozumienia, że światło ma tak jasną, jak i ciemną stronę. **Bądźmy tego świadomi i dla własnego dobra ocalmy noc.** A przynajmniej to, co z niej jeszcze zostało.

#### Literatura

- [1] Walker M.F., „The California site survey” Publ. Astron. Soc. Pacific 82 (1970).



- [2] Berry R.L., „Light Pollution in Southern Ontario” *J. R. Astron. Soc. Canada* 70 (1976).
- [3] Garstang R.H., „Model for artificial night-sky illumination” *Publ. Astron. Soc. Pacific* 98 (1986).
- [4] Garstang R.H., „Night sky brightness at observatories and sites” *Publ. Astron. Soc. Pacific* 101 (1989).
- [5] Cinzano P. i Falchi F., „The propagation of light pollution in the atmosphere” *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 427 (2012).
- [6] Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., „The first World Atlas of the artificial night sky brightness” *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 328 (2001).
- [7] Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Kyba C.C.M., Elvidge C.D., Baugh K., Portnov B.A., Rybnikova N.A., Furgoni R., „The new world atlas of artificial night sky brightness” *Sci. Adv.* 2 (2016).
- [8] Elvidge C.D., Baugh K.E., Dietz J.B., Bland T., Sutton P.C., Kroehl H.W., „Radiance Calibration of DMSP-OLS Low-Light Imaging Data of Human Settlements” *Remote Sens. Environ.* 68 (1999).
- [9] Hsu F.-C., Baugh K.E., Ghosh T., Zhizhin M., Elvidge C.D., „DMSP-OLS Radiance Calibrated Nighttime Lights Time Series with Intercalibration” *Remote Sens.* 7 (2015).
- [10] Elvidge C.D., Baugh K., Zhizhin M., Hsu F.C., Ghosh T., „VIIRS night-time lights” *Int. J. Remote Sens.* 38 (2017).
- [11] Lee T.E., Miller S.D., Turk F.J., Schueler C., Julian R., Deyo S., Dills P., Wang S., „The NPOESS VIIRS day/night visible sensor” *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 87 (2006).
- [12] Kyba C.C.M., Altıntaş Y.Ö., Walker C.E., Newhouse, M., „Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022” *Science* 379 (2023).
- [13] Pawson S.M. i Bader M.K.-F., „LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature” *Ecol. Appl.* 24 (2014).
- [14] Zielinska-Dabkowska K.M., Schernhammer E.S., Hanifin J.P., Brainard G.C., „Reducing nighttime light exposure in the urban environment to benefit human health and society” *Science* 380 (2023).
- [15] Cao M., Xu T., Yin, D., „Understanding light pollution: Recent advances on its health threats and regulations” *J. Environ. Sci.* 127 (2023).

---

# Ktokolwiek widział, ktokolwiek wie! Ukradzono Nagrodę Nobla z fizyki! Beware! The Nobel Prize in physics got stolen!

Anna Dawid\*

{aQa<sup>L</sup>} Applied Quantum Algorithms – Lorentz Institute for Theoretical Physics  
& Leiden Institute of Advanced Computer Science, Uniwersytet w Lejdzie, Holandia

---

**Abstrakt.** Nagroda Nobla z fizyki w 2024 została przyznana Johnowi J. Hopfieldowi z Uniwersytetu w Princeton i Geoffrey'owi E. Hintonowi z Uniwersytetu w Toronto za *fundamentalne odkrycia i wynalazki umożliwiające uczenie maszynowe przy użyciu sztucznych sieci neuronowych*. Choć wywołała kontrowersje wśród naukowców, to wpisuje się ona w trend nagradzania twórców nowych przyrządów do badania świata, a takim staje się ostatnio uczenie maszynowe. Opisuję w tym artykule dokonania noblistów, w szczególności sieć Hopfielda i maszynę Boltzmanną i wyjaśniam, jak różnią się od współczesnego paradygmatu uczenia maszynowego. Zwracam też uwagę na ograniczenia sieci neuronowych, a także ekscytujący dwukierunkowy wpływ, jaki wciąż mają na siebie nawzajem uczenie maszynowe i fizyka.

**Słowa kluczowe:** 2024 Nagroda Nobla z fizyki w 2024, uczenie maszynowe, sieci neuronowe, sieć Hopfielda, maszyna Boltzmanną

**Abstract.** The 2024 Nobel Prize in Physics was awarded to John J. Hopfield of Princeton University and Geoffrey E. Hinton of the University of Toronto for *fundamental discoveries and inventions that enable machine learning using artificial neural networks*. Although controversial among scientists, the award is part of a trend of rewarding creators of new devices for studying the world, and machine learning has recently become such a device. In this article, I describe the achievements of the Nobel Prize winners, in particular the Hopfield network and the Boltzmann machine, and explain how they differ from the modern paradigm of machine learning. I also describe the limitations of current neural networks, as well as the exciting bidirectional influence that machine learning and physics continue to have on each other.

**Keywords:** Nobel Prize in Physics, machine learning, neural networks, Hopfield network, Boltzmann machine

---

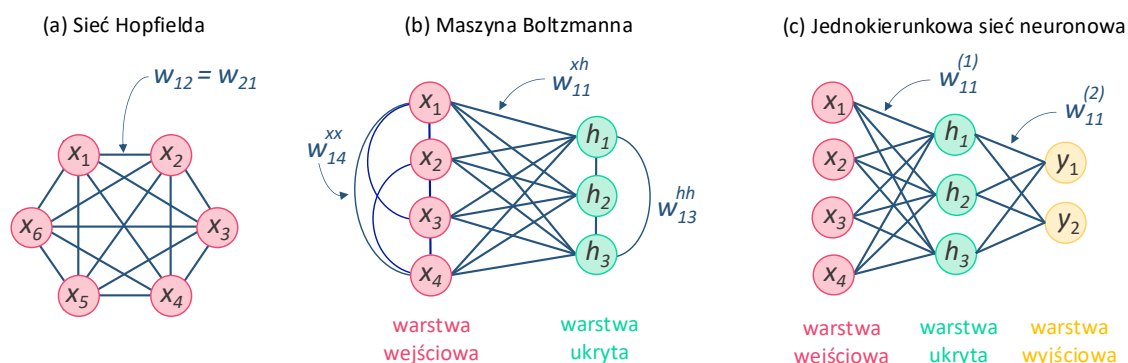
„Ukradziona” Nagroda Nobla. Dawno Nagroda Nobla z fizyki nie wywołała takiego poruszenia jak ta ogłoszona 8 października 2024. Wówczas poznaliśmy werdykt Królewskiej Szwedzkiej Akademii Nauk, która przyznała tę najbardziej prestiżową z nagród Johnowi J. Hopfieldowi z Uniwersytetu w Princeton i Geoffrey'owi E. Hintonowi z Uniwersytetu w Toronto za *fundamentalne odkrycia i wynalazki umożliwiające uczenie maszynowe przy użyciu sztucznych sieci neuronowych*. Nawiasem mówiąc, dzień później połowa Nagrody Nobla z chemii przypadła Demisowi Hassabisowi i Johnowi Jumperowi z firmy Google DeepMind za przewidywania struktury białek, umacniając dominację sieci neuronowych w nauce. Jak to się stało, że informatyka „ukradła” Nagrodę Nobla fizyce?

Nowe narzędzie do badania świata. Uczenie maszynowe to nowe podejście do starych i nowych problemów,

będące nowym spojrzeniem na posiadane informacje, potencjalnie pozwalającym uniknąć ludzkich uprzedzeń. Gdy spojrzymy na nie jak na nowe narzędzie do badania naszej rzeczywistości, natychmiast zobaczymy, że Nobel 2024 wpisuje się w trend nagradzania budowania nowych przyrządów pomiarowych. W 1907 Nagroda Nobla z fizyki została przyznana za konstrukcję interferometru, w 1924 nagrodzono wysiłki prowadzące do spektroskopii rentgenowskiej, a w roku 1986 nagrodzone zostały projekty mikroskopu elektronowego i skaningowego mikroskopu tunelowego, nie wspominając już o wynalezieniu tranzystora (Nobel 1956) i układu scalonego (Nobel 2000). Jeden z noblistów z fizyki, Steven Chu (nagrodzony w 1997 za rozwój metod chłodzenia atomów do temperatur bliskich zera bezwzględnej) powiedział nawet, że najpewniejszy sposób na Nobla to zrobienie nowego przyrządu pomiarowego. Porównał to do zagłębienia po raz pierwszy pod nowy kamień – z dużym prawdopodobieństwem znajdziecie tam coś ciekawego!

---

\*ORCID: 0000-0001-9498-1732



Rys. 1. Przykłady (a) sieci Hopfielda, (b) maszyny Boltzmana i (c) prostej sieci neuronowej

**Modele Hopfielda i Boltzmana a sieci neuronowe.** Tegorocznymi laureatami Nagrody Nobla z fizyki postawili kamienie węgielne pod fundament współczesnego uczenia maszynowego. Co więcej, zrobili to metodami wywodzącymi się z fizyki statystycznej. Zaproponowali i rozwinęli sieci, inspirowane modelami spinowymi w fizyce, np. modelem Isinga, których *uczenie* polegało na minimalizacji energii. To podejście oparte na energii różni się od współcześnie używanych najpopularniejszych sieci neuronowych, które trenuje się przez minimalizację błędu, jaki popełniają w danym zadaniu. Modele noblistów przygotowały jednak grunt pod współczesne sieci (ponadto Hinton zaproponował wiele skutecznych heurystyk wykorzystywanych w treningu sieci po dziś dzień). Modele bazujące na energii są również stosowane w fizyce kwantowej jako reprezentacja stanów kwantowych. Ponadto, niektórzy czołowi specjaliści w uczeniu maszynowym jak Yann LeCun postulują powrót do korzeni i porzucenie współczesnego paradygmatu na rzecz modeli opartych na energii [1]. Prace noblistów są więc dalej istotne w szybko zmieniającym się krajobrazie uczenia maszynowego; także w kolejnych paragrafach spojrzymy na ich dokonania nieco dokładniej.

**Sieć Hopfielda.** Fizyka statystyczna i modele spinowe wkroczyły do uczenia maszynowego po raz pierwszy jako sieci Hopfielda. Sieci Hopfielda to w pełni połączone sieci rekurencyjne zaproponowane przez Williama A. Little'a w 1974 [2] i rozwinęte przez Hopfielda w 1982 [3]. Schemat takiej sieci przedstawiono na rys. 1(a). Każdy węzeł tej sieci, zwany też neuronem, niczym spin  $1/2$ , przyjmuje binarne wartości,  $x_i \in \{-1, 1\}$ , zwane aktywacjami. Węzły tej sieci są połączone w sposób symetryczny,  $w_{ij} = w_{ji}$ , a wagi tych połączeń są rzeczywiste. Danej konfiguracji (wartości aktywacji i wag) sieci Hopfielda można przypisać energię

$$F_w(\mathbf{x}) = - \sum_{ij} x_i w_{ij} x_j. \quad (1)$$

Little zauważył, że taka sieć może przechowywać (zapamiętywać) wzorce. Jej trening polega na utrwaleniu  $m$  pożądanym wzorców binarnych o wymiarze  $d$ ,

$\mathbf{x}^{\text{trening}} = \{\mathbf{x}^{\text{trening}, 1}, \dots, \mathbf{x}^{\text{trening}, m}\}$ , gdzie  $\mathbf{x}^{\text{trening}, i} = \{x_1^{\text{trening}, i}, \dots, x_d^{\text{trening}, i}\}$ , przez uczynienie ich minimami energetycznymi sieci. Innymi słowami, sieć zmienia wagi swoich połączeń w taki sposób, żeby zminimalizować energie odpowiadające wzorcom treningowym poprzez zasadę uczenia hebbiańskiego:  $w_{ij} \leftarrow w_{ij} + y_i^{\text{trening}} y_j^{\text{trening}}$ . Uczenie hebbiańskie, zaobserwowane w biologicznych sieciach neuronowych, polega na wzmacnianiu połączeń między tymi neuronami, które są jednocześnie aktywne. Końcowe wagi wytrenowanej sieci oznaczamy  $\check{w}$ . Na etapie przewidywania, sieć jest w stanie wskazać, do którego wzorca dana wejściowa jest najbardziej podobna, poprzez sprawdzenie energii odpowiadającej danej wejściowej i znalezienie najbliższego minimum energetycznego. Bardziej precyzyjnie, sieć odnajduje wzorec poprzez wielokrotną aktualizację stanów neuronów w zależności od wartości wszystkich innych neuronów:  $x_i \leftarrow \text{sign}(\sum_j \check{w}_{ij} x_j)$ . W ramach tej procedury  $\mathbf{x} = \{x_i\}$  zbiegają do lokalnego minimum funkcji energii i odtwarzają odpowiadający zapamiętany wzorec. Hopfield pokazał, że taka sieć może działać w praktyce oraz zbadał jej pojemność (pamięć) stosując metodę pola średniego dla szkła spinowego [3]. Stosowanie w praktyce sieci Hopfielda ograniczone jest jej niewielką pojemnością, a także zdarzającym się czasem przypadkowym wytwarzaniem w trakcie treningu tzw. minimów (wzorców) pozornych, tj. przypadkowych minimów energii nieukształtowanych przez dane treningowe, które można znaleźć podczas predykcji.

**Maszyna Boltzmana.** Rok po pracy Hopfielda, w 1983, Hinton i Terrence Sejnowski zaproponowali rozszerzenie sieci Hopfielda, zwane maszyną Boltzmana [4], wprowadzając do modelu neurony zwane *ukrytymi* (ang. *hidden*), jak przedstawiono na rys. 1(b). To rozszerzenie stało się ważne dla całej dziedziny uczenia maszynowego, ponieważ było pierwszym wprowadzeniem warstw neuronów ukrytych, absolutnie kluczowych dla sukcesu współczesnych sieci neuronowych. Funkcja energii maszyny Boltzmana jest nieco bardziej skomplikowana niż sieci Hopfielda, gdyż jest rozkładem brzego-

wym uwzględniających różne wartości neuronów ukrytych

$$E_w(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = - \sum_{ij} x_i w_{ij}^{xx} x_j - \sum_{ij} z_i w_{ij}^{zz} z_j - \sum_{ij} x_i w_{ij}^{xz} z_j, \quad (2)$$

$$F_w(\mathbf{x}) = - \log \sum_{\mathbf{z}} \exp[-E_w(\mathbf{x}, \mathbf{z})]. \quad (3)$$

Poza obecnością węzłów ukrytych, maszyna Boltzmanna różni się też od sieci Hopfielda sposobem trenowania. Dalej minimalizowana jest energia dla danych treningowych, ale dodatkowo minimalizowana jest energia próbek „kontrastowych”, generowanych z maszyny Boltzmanna za pomocą próbkowania Monte Carlo łańcuchami Markowa. W efekcie, maszyna Boltzmanna nie zapamiętuje konkretnych wzorców jak sieć Hopfielda, ale stara się odtworzyć rozkład prawdopodobieństwa, z którego pochodzą wzorce treningowe. Zmniejsza to ryzyko wytworzenia minimów pozornych, ale generuje duże koszty obliczeniowe, co spowodowało, że współcześnie są rzadziej stosowane.

**Głębokie sieci neuronowe.** Współczesne sieci neuronowe są często jednokierunkowe (z elementami rekurencyjnymi) i nie bazują na minimalizacji energii. Prosty przykład współczesnego paradygmatu obrazuje rys. 1(c). Taka jednokierunkowa sieć ma warstwę wyjściową, w której podaje swoje odpowiedzi. Mówimy, że jest probabilistyczna, bo jej warstwa wyjściowa zawiera wszystkie możliwe odpowiedzi i w związku z tym normalizujemy odpowiadające im wartości  $y_i$ , by odpowiadały prawdopodobieństwu danej odpowiedzi. Jej trening odbywa się poprzez minimalizację błędu, czyli zmienianiu parametrów sieci w taki sposób, żeby sieć w warstwie wyjściowej przypisywała jak największe prawdopodobieństwo oczekiwanej odpowiedzi. Rozpatrzmy przykład, aby unaocznić różnicę w działaniu modeli bazujących na minimalizacji energii i sieci opartych na minimalizacji błędu. Standardowym zadaniem jest rozpoznawanie, czy na obrazku znajduje się kot czy pies. W warstwie wejściowej sieci jednokierunkowej umieszczamy wówczas obrazek i zmieniamy wagi sieci tak, by w warstwie wyjściowej pierwszy neuron miał większą (mniejszą) wartość niż drugi, jeśli na obrazku jest kot (pies). W przypadku modeli bazujących na energii, takich jak sieć Hopfielda, jeśli na wejściu umieścimy obraz kota, to w wyniku aktualizacji pikseli, sieć sprowadziłaby obrazek do zapamiętanego wzorca kota i w taki sposób odpowiedziałaby na pytanie. Tutaj warto wspomnieć, że Hinton miał również wielki wkład w rozwój głębokiego uczenia maszynowego, w szczególności zaproponował działający sposób treningu głębokich sieci neuronowych (nawiasem mówiąc, użył do tego maszyn Boltzmanna!), czym poszerzył w latach 2000. drogę do nowoczesnego uczenia maszynowego.

**Uczenie maszynowe dla fizyki.** Mimo że rzadziej stosowane w problemach inżynierskich, modele-dzieci sieci Hopfielda i maszyny Boltzmanna z sukcesami służą fizyce kwantowej [5]. W tym momencie są one najbardziej obiecującym podejściem do szukania stanów podstawowych największych i najtrudniejszych układów kwantowych (dwu- i trójwymiarowych o wysokim poziomie korelacji między cząstkami kwantowymi) [6]. Bardziej ogólnie, sieci neuronowe celują w szukaniu wzorców w danych, więc stosowane są w detekcji faz materii i do wykrywania nowych ciekawych zachowań układów, ale także w CERN, gdzie szukają anomalii (w których może kryć się np. nowa cząstka elementarna), a także w astrofizyce, gdzie mają pomóc zrozumieć podstawowe prawa rządzące formacją gwiazd i galaktyk [7].

**Fizyka dla uczenia maszynowego.** Interakcja fizyki i uczenia maszynowego działa w obie strony, w szczególności fizyka nie tylko położyła kamienie węgielne pod uczenie maszynowe, ale i dalej je współcześnie rozwija. Fizycy statystyczni, np. tacy jak Lenka Zdeborová [8], próbują rozwiązać fundamentalne zagadki nowoczesnych sieci neuronowych, takie jak ich zdolność do uogólniania i unikania przeuczenia polegającego na głupim zapamiętywaniu każdego przykładu, przy ogromnym przeparametryzowaniu, które teoretycznie umożliwia takie przeuczenie. Fizycy kwantowi jak Maria Schuld szukają sposobów, żeby połączyć modele uczenia maszynowego z kwantowym przetwarzaniem informacji [9]. Poza tym problemy z różnych gałęzi fizyki są źródłem ciekawych, dobrze poznanych danych, które pomagają wyłapywać ograniczenia sieci neuronowych i lepiej zrozumieć ich działanie [10].

**Nobel za wcześnie?** Uczenie maszynowe bez wątpliwości jest nowym obiecującym narzędziem, które, podążając za analogią Stevena Chu, pozwala zajrzeć pod nowe kamienie. Ale czy faktycznie zobaczyliśmy coś ciekawego pod jednym z tych kamieni? Wydaje się, że do tej pory Nagrody Nobla za nowe przyrządy pomiarowe przyznawane były już po tym, gdy nagrodzone przyrządy udowodniły swoją wartość dla nauki. Michelson otrzymał Nobla już po wykonanym w 1887 roku doświadczeniu Michelsona-Morleya dowodzącym, że prędkość światła w układzie źródła nie zależy od ruchu Ziemi. Siegbahn dostał Nobla za spektroskopię rentgenowską, ale już po tym jak dzięki niej poprawił układ pierwiastków i zrozumiał lepiej powłokę elektronową. Przy Noblu za projekty mikroskopu elektronowego i skaningowego mikroskopu tunelowego wiadomo było, gdzie takich odkryć szukać.

**Sieci neuronowe to nie koniec fizyki.** Choć narzędzie to jest bardzo obiecujące, to jednak daleko jest jeszcze do faktycznego rozwiązywania problemów naukowych za jego pomocą, mimo twierdzeń niektórych twórców (w tym Sama Altmana – dyrektora generalnego OpenAI,



który w wywiadzie z NBC News na Aspen Ideas Festival zadeklarował, że w przyszłości będziemy mogli wydawać polecenie komputerowi *hey, computer, discover all of physics i on to zrobi*). Kiedy ktoś wypowiada się ekstatycznie o nowym sprzedawanym narzędziu, warto sprawdzić, czy słowa tej osoby mogą mieć drugie dno, a w szczególności czy jej zarobki mogą zależeć od opinii społeczeństwa o stworzonych przez nią narzędziach. Póki co, w najlepszym razie, sieci neuronowe dają nam odpowiedzi na różne pytania, nie informując jednak o ścieżce rozumowania i w związku z tym, mają ograniczone możliwości odkrywania przed nami mechanizmów rządzących rzeczywistością. To jest coś, co najbardziej zaskakuje mnie w werdykcie komisji noblowskiej: ta nagroda wydaje się przedwczesna. Choć sieci neuronowe pomagają nam w pracy naukowej, to brakuje wciąż przykładu, w którym dzięki sieciom dowiedzieliśmy się czegoś przełomowego i nowego o świecie. Dobrym przykładem tego ograniczenia jest AlphaFold [11], czyli największy dotychczasowy sukces uczenia maszynowego w nauce. AlphaFold pobiło wszelkie inne numeryczne podejścia do przewidywania struktury trójwymiarowej białek, znając tylko kolejność aminokwasów w białku. Jest fantastycznym, choć nieidealnym narzędziem do predykcji, które przyspieszyło pracę biologów podając dobre punkty wyjściowe do dalszych badań, ale nie rozwiązało problemu składania białek, a w szczególności niewiele powiedziało nam o mechanizmach rządzących składaniem białek [12]. Problemem AlphaFold, jak i innych sieci neuronowych, jest brak ich *interpretowalności*. Pracujemy nad tym i np. w celu detekcji przejść fazowych budujemy specjalne sieci, które zmuszone są mówić naszym językiem i dzięki temu rozumiemy, co dokładnie robią [13]. Wymaga to jednak jakiegoś stopnia zrozumienia atakowanego problemu, więc wielkim wyzwaniem jest projektowanie interpretovalnych sieci dla problemów, o których niewiele wiemy.

**ChatGPT i jego krewniacy też nie zwiastują końca fizyki.** Najbardziej imponujące współcześnie modele uczenia maszynowego, które spowodowały ostatni zryw zainteresowania tymi metodami to niewątpliwie wielkie modele językowe, takie jak ChatGPT, Claude, czy Gemini. Są one modelami probabilistycznymi, tak trenowanymi by przewidywały jak najbardziej prawdopodobne kontynuacje zdań. Choć wykazują imponujące zachowania emergentne (np. duże modele potrafią podążać za instrukcjami, choć nie były konkretnie tego uczone), to ostatecznie ich interakcja ze światem zewnętrznym odbywa się, w dużej mierze, za pośrednictwem tekstu. Wyobraźcie sobie, że nigdy niczego nie dotknęliście, nie zobaczyliście, nigdy niczym nie rzuciliście. Możecie tylko czytać o tym co inni robią, a waszym jedynym celem jest zgadywać, jakie słowa pojawią się za chwilę. Co najwyżej oglądacie czasem zdjęcia lub wideo, ale niewiele pomaga

to w zrozumieniu przyczynowości. Bardzo ciężko na tej podstawie nauczyć się zasad działania rzeczywistości czy ciekawości i zadawania niezadanych jeszcze pytań. Łatwo za to „halucynować” [14] i dochodzić przez to do błędnych (w wersji pesymistycznej) lub zaskakujących (w wersji optymistycznej) wniosków na temat świata. Te ograniczenia objawiają się szczególnie w zadaniach wymagających rozumowania i planowania, czego wielkie modele językowe wciąż nie opanowały [15]. Są to ograniczenia, z których koniecznie trzeba zdawać sobie sprawę, gdy chce się korzystać z tych narzędzi. Zawsze sprawdzajcie fakty podawane przez modele językowe, zanim się na nie powołacie – wystarczy szybkie wyszukiwanie internetowe.

**Eksycytująca przyszłość.** Wielkie modele językowe będą świetnymi asystentami osobistymi i będą tylko lepiej i lepiej wykonywać zadania związane z tekstem. Naukowcy dalej będą stawiać krytyczne hipotezy i testować je wykonując eksperymenty oraz analizując wyniki. Będziemy mieć za to teraz inspirującą pomoc w postaci sztucznych sieci neuronowych, które usprawnią różne elementy tego procesu: poprawią błędy językowe, streszczą artykuły naukowe, zautomatyzują powtarzalne elementy pracy doświadczalnej [16], czy nawet będą partnerem do dyskusji na temat dowodów matematycznych czy nowych kierunków badań [17]. Gdy uczynimy je interpretowalnymi, może pokażą nam też wzorce, które do tej pory przegapialiśmy w jakichś danych naukowych? Może wytłumaczą rozwiązanie problemu, które do tej pory nam się wymykało? Takie odkrycie byłoby przełomowe i z pewnością warte Nobla!

## Literatura

- [1] A. Dawid and Y. LeCun, Introduction to latent variable energy-based models: a path toward autonomous machine intelligence, *J. Stat. Mech.* 2024, 104011 (2024).
- [2] W. Little, The existence of persistent states in the brain, *Mathematical Biosciences* 19, 101 (1974).
- [3] J. J. Hopfield, Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 79, 2554 (1982).
- [4] G. E. Hinton and T. J. Sejnowski, Optimal perceptual inference, in *Proc. IEEE Comput. Vis. Pattern Recognit.* (1983).
- [5] A. Dawid et al., Modern applications of machine learning in quantum sciences (2023), arXiv:2204.04198 [quant-ph].
- [6] J. Hermann, J. Spencer, K. Choo, A. Mezzacapo, W. M. C. Foulkes, D. Pfau, G. Carleo, and F. Noé, Ab initio quantum chemistry with neural-network wavefunctions, *Nat. Rev. Chem.* 7, 692–709 (2023).

- [7] G. Carleo, I. Cirac, K. Cranmer, L. Daudet, M. Schuld, N. Tishby, L. Vogt-Maranto, and L. Zdeborová, Machine learning and the physical sciences, *Rev. Mod. Phys.* 91, 045002 (2019).
- [8] J. Pavlus, The computer scientist who builds big pictures from small details (2024), *Quanta Magazine*.
- [9] M. Schuld and F. Petruccione, *Machine Learning with Quantum Computers* (Springer International Publishing, 2021).
- [10] S. Thais, Physics and the empirical gap of trustworthy AI, *Nat. Rev. Phys.* 6, 640–641 (2024).
- [11] J. Jumper, R. Evans, A. Pritzel, T. Green, M. Figurnov, O. Ronneberger, K. Tunyasuvunakool, R. Bates, A. Židek, A. Potapenko, et al., Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold, *Nature* 596, 583 (2021).
- [12] Y. Saplakoglu, How AI revolutionized protein science, but didn't end it (2024), *Quanta Magazine*.
- [13] K. Cybiński, J. Enouen, A. Georges, and A. Dawid, Speak so a physicist can understand you! TetrisCNN for detecting phase transitions and order parameters (2024), arXiv:2411.02237 [quant-ph].
- [14] S. Farquhar, J. Kossen, L. Kuhn, and Y. Gal, Detecting hallucinations in large language models using semantic entropy, *Nature* 630, 625–630 (2024).
- [15] R. Patil, Can LLMs reason and plan? Exploring Blockworld, *Mystery Blockworld* (2024), Medium.
- [16] J. P. Zwolak, J. M. Taylor, R. W. Andrews, J. Benson, G. W. Bryant, D. Buterakos, A. Chatterjee, S. Das Sarma, M. A. Eriksson, E. Greplová, M. J. Gullans, F. Hader, T. J. Kovach, P. S. Mundada, M. Ramsey, T. Rasmussen, B. Severin, A. Sigillito, B. Undseth, and B. Weber, Data needs and challenges for quantum dot devices automation, *npj Quantum Inf.* 10, 105 (2024).
- [17] M. Krenn and A. Zeilinger, Predicting research trends with semantic and neural networks with an application in quantum physics, *PNAS* 117, 1910–1916 (2020).

# Bilard protonowy w LHC

## Proton Billiards at the LHC

Rafał Staszewski\*

Instytut Fizyki Jądrowej PAN

**Abstrakt.** Rozpraszanie elastyczne proton-proton przy wysokich energiach jest procesem o prostej kinematyce, lecz zaskakująco złożonej dynamice. Pomiar tych procesów w zderzaczach cząstek wymaga specjalnie zaprojektowanych detektorów oraz nietypowych warunków pomiarowych. W artykule opisuję fizykę procesów elastycznych oraz metodę eksperymentalną pomiaru wykonanego w ramach Współpracy ATLAS na akceleratorze LHC. Przedstawiam kluczowe elementy analizy danych, a także omawiam konsekwencje uzyskanego wyniku dla naszego rozumienia oddziaływań silnych.

**Słowa kluczowe:** LHC, ATLAS, rozpraszanie elastyczne, proton, twierdzenie optyczne, całkowity przekrój czynny, pomeron, odderon

**Abstract.** Proton-proton elastic scattering at high energy is a process with simple kinematics but surprisingly complex dynamics. Measurements of these processes at particle colliders require dedicated detectors and unusual measurement conditions. In the article, I describe the physics of elastic processes and the experimental method in the context of the measurement performed by the ATLAS Collaboration at the LHC accelerator. I present the key elements of the data analysis and discuss the consequences of the obtained results for our understanding of the strong interactions.

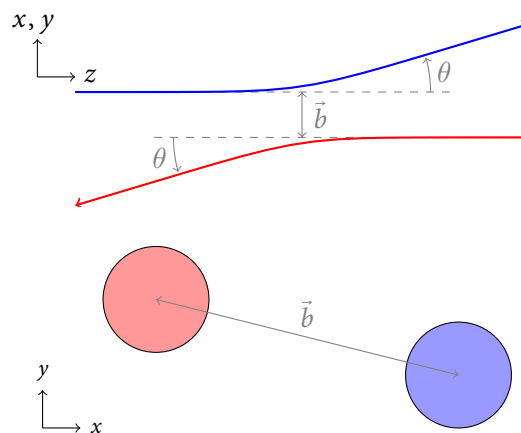
**Keywords:** LHC, ATLAS, elastic scattering, proton, optical theorem, total cross section, pomeron, odderon

### 1. Rozpraszanie elastyczne

W bilard grał prawie każdy. Uderzając kijem w białą bilę mamy za zadanie wbić do łuz bile innych kolorów. Zderzenia kul bilardowych są klasycznym przykładem zderzeń sprężystych, czyli takich, w których zachowany jest nie tylko całkowity pęd, ale również całkowita energia kinetyczna. Zderzenia sprężyste występują również w świecie kwantowym, choć w tym kontekście częściej używa się nazwy *rozpraszanie elastyczne*. Pomiar własności takich procesów jest jedną z podstawowych metod badania cząstek elementarnych i ich oddziaływań. Wykorzystuje się ją w badaniach prowadzonych w akceleratorze LHC w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN w Szwajcarii. Akcelerator ten, choć uruchomiony przede wszystkim z myślą o odkrywaniu nowych cząstek, umożliwia również pomiary procesów rozpraszania elastycznego przy najwyższych energiach dostępnych w warunkach laboratoryjnych. W badania takie, prowadzone w ramach eksperymentu ATLAS [1], zaangażowana jest grupa z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Niniejszy artykuł opisuje pomiar rozpraszania elastycznego w zderzeniach proton-proton przy sumarycznej energii w układzie środka masy równej 13 TeV [2].

Kinematyka oddziaływania elastycznego jest bardzo prosta w układzie środka masy – pędy cząstek zmie-

niają kierunek, ale nie zmieniają swoich wartości (długości wektora). Kąt  $\theta$  pomiędzy prędkością początkową i końcową nazywany jest kątem rozproszenia. Ważną wielkością jest parametr zderzenia  $b$ , który definiuje się jako odległość poprzeczną między początkowymi torami cząstek. Definicje tych wielkości pokazane zostały na rys. 1.



Rys. 1. Definicje podstawowych wielkości charakteryzujących rozpraszanie elastyczne: parametru zderzenia i kąta rozproszenia

W przeciwieństwie do zderzeń kul na stole bilardowym, elastyczne zderzenia protonów,  $pp \rightarrow pp$ , zachodzą w trzech wymiarach. Aby w pełni scharakteryzować

\*ORCID: 0000-0001-7708-9259

konkretny przypadek takiego oddziaływania potrzebne są dwa kąty, nie tylko polarny kąt rozproszenia  $\theta$ , ale i kąt azymutalny  $\varphi$ . W eksperymentach przy najwyższej energii, na przykład w akceleratorze LHC, ale i w wielu starszych akceleratorach, wiązki protonowe często nie są spolaryzowane. Wtedy rozkład kąta  $\varphi$ , jako zmiennej losowej, jest jednorodny i nie daje żadnej informacji o samym oddziaływaniu. Cała informacja o dynamice procesu jest zawarta w rozkładzie kąta  $\theta$ . Z uwagi na to, że wartość kąta rozproszenia jest różna w różnych układach odniesienia, w praktyce zamiast niego używa się tak zwanej zmiennej  $t$  Mandelstama, zdefiniowanej jako kwadrat zmiany czteropędu cząstki podczas rozproszenia

$$t = (P_k - P_p)^2, \quad (1)$$

gdzie  $P_p$  jest czteropędem początkowym, a  $P_k$  czteropędem końcowym jednego z protonów (obojętnie którego). Zmienna ta jest kwadratem czterowektora, a więc niezmiennikiem przekształceń Lorentza.

W układzie środka masy wartość zmiennej  $t$  wyraża się wzorem

$$t = -2p^2(1 - \cos \theta), \quad (2)$$

gdzie  $p$  jest wartością pędu cząstki (w tym układzie odniesienia wartość ta jest równa dla obu cząstek i nie zmienia się podczas oddziaływania). Dla małych kątów, a takie są najczęściej badane, można zastosować przybliżenie  $t = -p^2\theta^2$ .

Warto zwrócić uwagę, że wartość zmiennej  $t$  jest zawsze mniejsza lub równa zero. Dlatego często dla wygody przedstawia się wykresy nie w funkcji  $t$ , ale w funkcji  $|t|$  lub  $-t$ . Równie często używa się określeń *małe*  $t$  lub *duże*  $t$ , mając na myśli wartości bezwzględne: *małe*  $|t|$  i *duże*  $|t|$ .

Oprócz prostej i lorentzowsko niezmienniczej definicji, ważną zaletą zmiennej  $t$  jest jej bliski związek z pędem poprzecznym, czyli rzutem pędu na płaszczyznę prostopadłą do osi zderzenia. W fizyce cząstek standardową konwencją jest wybór układu współrzędnych o osi z wzdłuż kierunku zderzenia, a osiami  $x$  i  $y$  w płaszczyźnie poprzecznej, tak jak zostało to pokazane na rys. 1. Wtedy

$$|t| \approx p^2\theta^2 \approx p_T^2 = p_x^2 + p_y^2, \quad (3)$$

gdzie  $\vec{p}_T = (p_x, p_y)$  jest pędem poprzecznym wybranej cząstki.

Związek (3) jest bardzo istotny, ponieważ w zastosowanym układzie odniesienia składowe  $p_x$  i  $p_y$  pędu poprzecznego są zmiennymi sprzężonymi do składowych  $b_x$  i  $b_y$  parametru zderzenia. W ramach mechaniki kwantowej oznacza to, że amplituda rozproszenia w reprezentacji pędowej,  $T(\vec{p}_T)$ , jest związana z amplitudą

w reprezentacji położeniowej<sup>1</sup>. Związek ten ma postać transformacji Fouriera

$$T(\vec{p}_T) = \int T(\vec{b}) e^{i\vec{p}_T \cdot \vec{b}} d^2b. \quad (4)$$

W sytuacji niespolaryzowanych wiązek, amplituda  $T(\vec{p}_T)$  zależy jedynie od  $t$ , a nie zależy od  $\varphi$ . Podobnie  $T(\vec{b})$  zależy jedynie od  $b$ , ale nie od kierunku  $\vec{b}$ . Wygodnie wtedy stosować amplitudy będące funkcją jednej zmiennej

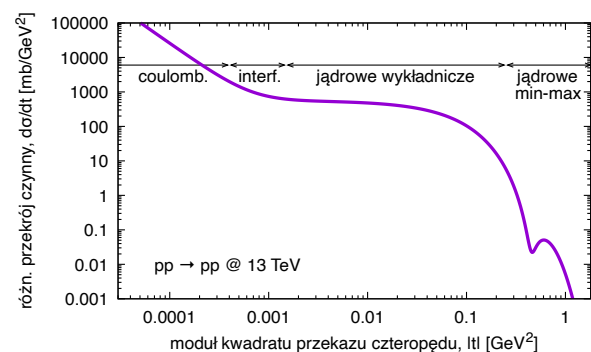
$$T(\vec{p}_T) \rightarrow T(t), \quad T(\vec{b}) \rightarrow T(b). \quad (5)$$

Te amplitudy związane są ze sobą przez, zbliżoną do transformacji Fouriera, transformację Hankla

$$T(t) = \int_0^\infty db b T(b) J_0(b\sqrt{t}). \quad (6)$$

W mechanice klasycznej wartość parametru zderzenia jednoznacznie wyznacza kąt rozproszenia, czyli wartość zmiennej  $t$ . Im większy parametr zderzenia, tym mniejszy kąt rozproszenia i mniejsze  $|t|$ . Dokładna postać tej zależności jest konsekwencją określonej struktury wewnętrznej protonu. W mechanice kwantowej związek parametru zderzenia z  $t$ , dany wzorami (4) i (6), jest bardziej subtelny i ma charakter statystyczny. Można natomiast powiedzieć, że małe wartości  $b$  (średnio) prowadzą do dużych wartości  $|t|$  (również średnio). Nie zachodzi natomiast bezpośredni związek między kątem rozproszenia a parametrem zderzenia w poszczególnych przypadkach rozpraszania. Informacja o strukturze przestrzennej protonu jest zawarta w amplitudzie  $T(b)$ .

## 2. Mechanizmy oddziaływania



Rys. 2. Przykładowy rozkład kwadratu przekazu czteropędu w procesie  $pp \rightarrow pp$  przy energii zderzenia 13 TeV, w układzie środka masy

Przykładowy rozkład zmiennej  $t$  jest pokazany na rys. 2. Tutaj warto wyjaśnić opis osi pionowej. Jest to róż-

1. W artykule przyjęta została konwencja, w której to samo oznaczenie stosowane jest do matematycznie różnych, ale blisko związanych, funkcji, a ich rozróżnienie jest jednoznacznie dokonywane na podstawie argumentu.



niczkowy przekrój czynny dla zmiennej  $t$ ,  $d\sigma/dt$ . Przekrój czynny jest wielkością powszechnie używaną w fizyce jądrowej oraz fizyce cząstek i jest on niezależną od warunków eksperymentalnych miarą prawdopodobieństwa zajścia procesu fizycznego o określonym stanie początkowym i końcowym. Różniczkowy przekrój czynny ma się do przekroju czynnego, tak jak gęstość prawdopodobieństwa do prawdopodobieństwa, tzn.

$$\int_{\Omega} \frac{d\sigma}{dt} dt = \sigma_{\Omega}, \quad (7)$$

gdzie  $\Omega$  jest dowolnym podzbiorem możliwych wartości  $t$ , a  $\sigma_{\Omega}$  jest przekrojem czynnym na rozpraszanie elastyczne z parametrem  $t \in \Omega$ . Różniczkowy przekrój czynny związany jest z amplitudą rozproszenia wzorem<sup>2</sup>

$$\frac{d\sigma}{dt} = |T(t)|^2. \quad (8)$$

Skomplikowany kształt rozkładu  $t$  jest skutkiem dość złożonej dynamiki oddziaływań elastycznych wysokoenergetycznych protonów. W przypadku zderzeń badanych w omawianym eksperymencie, rozpraszanie charakteryzujące się najmniejszymi wartościami zmiennej  $t$  ( $|t| \ll 7 \cdot 10^{-4} \text{ GeV}^2$ , co odpowiada kątom rozpraszania  $\theta \ll 4 \text{ } \mu\text{rad}$ ) jest przede wszystkim skutkiem odpychania ładunków elektrycznych protonów, czyli zwykłego *oddziaływania coulombowskiego*. Wkład ten można z bardzo dobrą dokładnością obliczyć w ramach elektrodynamiki kwantowej<sup>3</sup>

$$T_C(t) = -\frac{2\sqrt{\pi}\alpha G_E^2(t)}{t}, \quad (9)$$

gdzie  $G_E(t)$  jest elektrycznym czynnikiem kształtu (ang. *electric form factor*) protonu, a  $\alpha$  jest stałą struktury subtelnej.

Przy większych kątach rozproszenia (czyli  $|t| \gg 7 \cdot 10^{-4} \text{ GeV}^2$ ) dominującym staje się mechanizm oddziaływania jądrowego silnego, określane w tym kontekście jako *oddziaływanie jądrowe*. Jeśli ograniczymy się dodatkowo do niezbyt dużych wartości  $|t|$ ,  $|t| \lesssim 0,1 \text{ GeV}^2$ , amplituda jądrowa daje się w dobrym przybliżeniu opisać funkcją wykładniczą

$$T_N(t) = Ae^{-B|t|/2}, \quad (10)$$

co prowadzi do wykładniczej postaci wyrażenia na róż-

niczkowy przekrój czynny

$$\frac{d\sigma_N}{dt} = |A|^2 e^{-B|t|}. \quad (11)$$

W zakresie pośrednim, przy  $|t| \sim 7 \cdot 10^{-4} \text{ GeV}^2$ , amplitudy oddziaływania coulombowskiego i jądrowego mają podobną wartość bezwzględną. Umożliwia to obserwację efektów ich interferencji.

Dla  $|t|$  pomiędzy 0,1 a 1  $\text{GeV}^2$  różniczkowy przekrój czynny ma charakterystyczną strukturę z lokalnym minimum i maksimum (ang. *dip and bump*). Są one skutkiem zjawiska analogicznego do dyfrakcji światła widzialnego na małej przeszkodzie, na przykład na cienkim drucie, kiedy część padającej fali jest absorbowana, a pozostała część interferuje z sobą samą. Z tego podobieństwa bierze się nazwa używana często dla oddziaływania elastycznego – proces dyfrakcyjny. W omawianym kontekście, absorpcją są procesy nieelastyczne, czyli takie, w których stan końcowy składa się z innych cząstek niż stan początkowy, na przykład  $pp \rightarrow n\pi^+\pi^0\pi^0\pi^+\pi^-p$ . Konkretny kształt struktury minimum i maximum wynika z kształtu amplitudy rozpraszania  $T_N(b)$ , która jest z kolei związana ze strukturą przestrzenną protonu.

Przy najwyższych wartościach  $|t|$ ,  $|t| \gg 1 \text{ GeV}^2$ , proces przechodzi w reżim *oddziaływań twardych*, kiedy to, paradoksalnie, oddziaływania silne stają się bardzo słabe<sup>4</sup>. Oczekuje się, że w tym reżimie proces będzie można modelować teoretycznie za pomocą perturbacyjnej chromodynamiki kwantowej (ang. *perturbative quantum chromodynamics* – pQCD).

### 3. Twierdzenie optyczne i parametr $\rho$

Konsekwencją unitarności ewolucji układu kwantowego, jakim są oddziałujące cząstki, jest związek pomiędzy rozpraszaniem elastycznym a procesami nieelastycznymi. W zastosowaniu do oddziaływania jądrowego ma on postać *twierdzenia optycznego*

$$\sigma_{\text{tot}} = 4\sqrt{\pi} \text{Im}T_N(0), \quad (12)$$

gdzie  $\text{Im}T_N(0)$  jest urojoną częścią amplitudy rozpraszania pod kątem zero, a  $\sigma_{\text{tot}}$  jest całkowitym przekrojem czynnym, czyli przekrojem czynnym na jakiegokolwiek silne oddziaływanie przy tym samym stanie początkowym. Wliczają się do niego zarówno jądrowe procesy elastyczne, jak również wszystkie możliwe jądrowe procesy nieelastyczne.

2. Konkretna postać tego i innych wzorów użytych w artykule zależy od wybranej konwencji normalizacji amplitud.

3. Należy dodać, że w literaturze rozważana jest *faza coulombowska*, czyli niewielka faza zespolona pojawiająca się w amplitudzie coulombowskiej, kiedy cząstki oddziałują nie tylko elektromagnetycznie, ale i silnie. Efekt ten nie jest tożsamy z omawianym dalej efektem interferencji. Jego istnienie nie jest jednak powszechnie przyjmowane, dlatego został on pominięty we wzorze (9).

4. Za teoretyczne wyjaśnienie tej własności oddziaływań silnych jako rezultatu *asymptotycznej swobody chromodynamiki kwantowej* przyznana została w 2004 roku Nagroda Nobla dla Davida Grossa, H. Davida Politzera i Franka Wilczka. (Wykład noblowski Franka Wilczka w przekładzie Piotra Chankowskiego: *Postępy Fizyki* 56 (4) 154 (2005) – przyp. red.).

Twierdzenie optyczne pozwala wyrazić parametr  $A$  ze wzoru (10) przez całkowity przekrój czynny

$$A = \frac{(\rho + i)\sigma_{\text{tot}}}{4\sqrt{\pi}}. \quad (13)$$

Parametr  $\rho$  jest stosunkiem części rzeczywistej do urojonej jądrowej amplitudy rozpraszania pod kątem zero ( $t = 0$ )

$$\rho = \frac{\text{Re}T_N(0)}{\text{Im}T_N(0)}. \quad (14)$$

Dla wartości  $|t|$  wystarczająco dużych, by móc pominąć oddziaływanie coulombowskie, ale wystarczająco małych, by rozkład był z dobrym przybliżeniem wykładniczy, otrzymujemy

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{(1 + \rho^2)\sigma_{\text{tot}}^2}{16\pi} e^{-B|t|}. \quad (15)$$

Wartość  $\rho$  jest rzędu 0,1, więc ma ona niewielki wpływ na różniczkowy przekrój czynny w tym zakresie. Zaniedbując  $\rho$  otrzymujemy

$$\sigma_{\text{tot}}^2 \approx 16\pi \left. \frac{d\sigma}{dt} \right|_{t \rightarrow 0}. \quad (16)$$

Rozpraszania pod kątem zero, czyli dla  $t = 0$ , nie można zmierzyć w eksperymentach wykorzystujących zderzające się wiązki. Nie można zatem bezpośrednio wyznaczyć wartości amplitudy dla  $t = 0$ , a tym bardziej jej urojonej części. Można jednak wyznaczyć  $\sigma_{\text{tot}}$  poprzez pomiar  $d\sigma/dt$  dla  $|t| > 0$  i ekstrapolację do  $t = 0$ . Stanowi to jedną z głównych motywacji pomiaru opisanego w tym artykule.

Wartość całkowitego przekroju czynnego w zderzeniach proton-proton jest jedną z podstawowych wielkości charakteryzujących oddziaływania silne. Jednak przy obecnym stanie wiedzy nie da się jej obliczyć teoretycznie z zasad pierwszych (tj. wykorzystując bezpośrednio QCD). Wprawdzie przyjmuje się, że chromodynamika kwantowa jest poprawną teorią oddziaływań silnych, ale wciąż nie są znane metody obliczania wartości  $\sigma_{\text{tot}}$  w tej teorii. A wielkość ta pełni niezwykle istotną rolę z punktu widzenia modelowania różnych oddziaływań protonów przy wysokich energiach. Modelowanie takie wykorzystuje się np. przy poszukiwaniu *nowej fizyki*, czyli zjawisk nie przewidywanych przez obecny Model Standardowy fizyki cząstek, ale też w astrofizyce cząstek, przy analizie wielkich pęków atmosferycznych wytwarzanych przez promieniowanie kosmiczne.

Pozostaje jeszcze pytanie, skąd znamy wartość parametru  $\rho$ . Jak wiadomo, w mechanice kwantowej prawdopodobieństwa zajścia różnych procesów zależą jedynie od modułu amplitudy i nie da się z nich wyznaczyć jej części rzeczywistej i urojonej. Jeżeli jednak mamy do czynienia z interferencją dwóch amplitud, moduł ich sumy

zależy od względnej zespolonej fazy pomiędzy nimi. Fazę amplitudy można zatem wyznaczyć, mierząc jej interferencję z inną amplitudą, którą możemy obliczyć teoretycznie. Właśnie z taką sytuacją mamy do czynienia tutaj. Różniczkowy przekrój czynny jest dany sumą amplitudy coulombowskiej i jądrowej

$$\frac{d\sigma}{dt} = |T_C(t) + T_N(t)|^2. \quad (17)$$

Interferencja jest najlepiej widoczna, gdy obie amplitudy mają porównywalne wielkości, czyli  $|t|$  w okolicach  $7 \cdot 10^{-7} \text{ GeV}^2$ . Pomiar  $d\sigma/dt$  w tym zakresie umożliwia wyznaczenie parametru  $\rho$ , a jego wartość rzeczywiście okazuje się być rzędu 0,1.

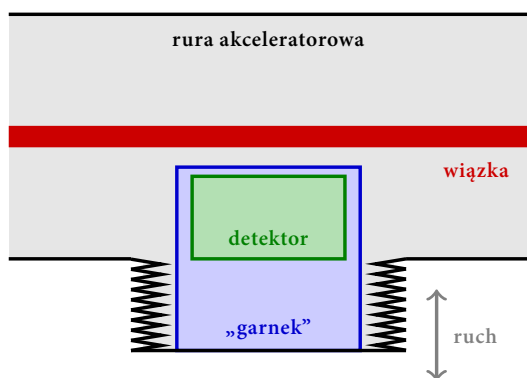
Drugim sposobem na uzyskanie informacji na temat  $\rho$  są relacje dyspersji. Wynikają one z własności analityczności i unitarności amplitud rozpraszania. Wiążą one ze sobą wartości tych amplitud przy różnych energiach zderzenia. Między innymi wyrażają część rzeczywistą amplitudy całką<sup>5</sup> z jej części urojonej.

#### 4. Eksperyment akceleratorowy

Pomiar rozpraszania elastycznego w akceleratorze LHC nie jest łatwy. Konieczna jest rejestracja protonów rozproszonych pod kątem nawet pojedynczych mikroradianów, czyli dziesięciotysięcznych części stopnia. Tymczasem przy standardowych warunkach pracy akceleratora, wiązki w punkcie przecięcia, czyli tam, gdzie zachodzą oddziaływania protonów, mają rozmycie kątowe rzędu 30  $\mu\text{rad}$ . Oznacza to, że nie da się odróżnić protonu rozproszonego elastycznie pod tak małym kątem od protonu, który nie uległ zderzeniu. Można temu jednak zaradzić poprzez specjalne ustawienie pól w magnesach kwadrupolowych kształtujących wiązki. Jest to tak zwana specjalna optyka akceleratora. Używa się tutaj terminu *optyka*, ponieważ magnesy kwadrupolowe w akceleratorze działają podobnie jak soczewki – skupiają i rozpraszają wiązkę.

W standardowej optyce akceleratora dąży się do maksymalnego skupienia wiązek w punkcie zderzenia, aby zmaksymalizować szansę na zaobserwowanie rzadkich procesów. Skutkuje to jednak dużym rozmyciem kątowym wiązek. Jeśli wiązki będą mniej skupione, to rozmycie kątowe będzie mniejsze, zwiększy się za to przekrój poprzeczny wiązek. W LHC rozmiar ten jest typowo rzędu 10  $\mu\text{m}$ . Przy specjalnej optyce wynosi niemalże milimetr, a rozmycie kątowe maleje do 0,2  $\mu\text{rad}$ .

5. Całkujemy tu po energii zderzenia od progu kinematycznego do nieskończoności.



Rys. 3. Schemat rzymskiego garnka

Sama możliwość odróżnienia protonu rozproszonego od protonów wiązki nie wystarcza. Trzeba jeszcze taki rozproszony proton zarejestrować. Tu pojawia się kolejna trudność. Proton pozostaje wewnątrz rury próżniowej akceleratora, ponieważ kąt rozproszenia jest bardzo mały. Co więcej, przez długi czas znajduje się wewnątrz samej wiązki, ponieważ wiązki są teraz szerokie.

Aby móc zarejestrować takie protony, korzysta się z techniki tzw. rzymskich garnków<sup>6</sup>. Detektory umieszczone są wewnątrz rury akceleratora w stalowym naczyniu. Precyzyjny silnik krokowy umożliwia przysuwanie detektora w pobliże wiązki na czas pomiaru. Wcześniej, gdy wiązka jest wstrzykiwana do akceleratora i rozpędzana, detektory są odsunięte na bezpieczną odległość.

Stalowy garnek stanowi ochronę ultrawysokiej próżni akceleratora odgradzając ją od wtórnej próżni otaczającej detektory. Wtórna próżnia w niewielkiej objętości rzymskiego garnka nie musi być aż tak wysokiej jakości jak główna próżnia i znacznie łatwiej ją uzyskać. Garnek umożliwia również fizyczny dostęp do detektorów bez naruszania głównej próżni. Schemat rzymskiego garnka pokazany jest na rys. 3.

Detektory ATLAS-ALFA [3], czyli układ eksperymentalny omawianego pomiaru, zaprezentowany został na rys. 4. Składa się z czterech stacji. Każda stacja składa się z dwóch rzymskich garnków: jednego dosuwanego do wiązki od dołu i drugiego dosuwanego od góry. Aby móc precyzyjnie mierzyć bardzo małe kąty rozproszenia protonów, detektory umieszczone zostały w odległości ponad 200 metrów od punktu zderzenia i dosunięte na zaledwie jeden milimetr od wiązki.

Detektor ma kilka części. Najważniejszą z nich jest detektor główny, którego zadaniem jest pomiar położenia przelatujących protonów. Składa się on z 20 warstw włókien scyntylacyjnych. Włókna mają przekrój kwa-

dratowy o boku długości 0,5 mm. Cząstka naładowana przelatująca przez takie włókno wytwarza w nim impulsy światła (scyntylacje), które propagując się wzdłuż włókna docierają do wielokanałowego fotopowielacza. Sygnał z każdego kanału jest odczytywany i digitalizowany (za pomocą urządzeń, które konwertują sygnał analogowy na informację cyfrową – przyp. red.). Wiedząc które włókna zostały „zapalone”, dostajemy informację o położeniu cząstki. Na rysunku 5 pokazane zostały zdjęcia elementów użytego układu doświadczalnego.

Wspomniana wcześniej optyka akceleratora jest kluczowa nie tylko dla samej możliwości pomiaru, ale również przy wyznaczaniu kąta rozproszenia ze zmierzonego położenia protonu. Gdyby pomiędzy punktem zderzenia a detektorem nie było żadnych pól, współrzędne poprzeczne położenia protonu w detektorze ( $x$ ,  $y$ ) byłyby równe

$$\begin{aligned} x &= x_0 + L \operatorname{tg} \theta_x \approx x_0 + L \cdot \theta_x, \\ y &= y_0 + L \operatorname{tg} \theta_y \approx y_0 + L \cdot \theta_y, \end{aligned} \quad (18)$$

gdzie  $(x_0, y_0)$  to współrzędne poprzeczne miejsca oddziaływania,  $L$  to odległość wzdłuż osi z pomiędzy punktem oddziaływania i detektorem, a kąty  $\theta_x$  i  $\theta_y$  dane są wzorami<sup>7</sup>

$$\begin{aligned} \theta_x &= \theta \cos \varphi, \\ \theta_y &= \theta \sin \varphi. \end{aligned} \quad (19)$$

Jeśli trajektoria protonu przechodzi przez pole magnetyczne, równania (18) nie są już prawdziwe. Kiedy rozwiązujemy równania ruchu w polu magnetycznym okazuje się jednak, że trajektorie protonów rozproszonych elastycznie spełniają podobne, ale ogólniejsze równania

$$\begin{aligned} x &= \alpha_x x_0 + L_{\text{eff},x} \cdot \theta_x, \\ y &= \alpha_y x_0 + L_{\text{eff},y} \cdot \theta_y. \end{aligned} \quad (20)$$

Parametry  $L_{\text{eff},x}$  i  $L_{\text{eff},y}$  są często określane mianem odległości efektywnej i razem z parametrami  $\alpha_x$  i  $\alpha_y$  zależą od zastosowanej optyki. W omawianym pomiarze odległość geometryczna  $L$  dalszych stacji wynosi 245 m, natomiast odległości efektywne mają w przybliżeniu wartości  $L_{\text{eff},x} = 33$  m i  $L_{\text{eff},y} = 320$  m. Warto zwrócić uwagę na znaczącą różnicę pomiędzy  $L_{\text{eff},x}$  i  $L_{\text{eff},y}$ . Wynika ona z własności magnesów kwadrupolowych, które skupiając wiązkę w kierunku  $x$  rozpraszają ją w kierunku  $y$  lub na odwrót.

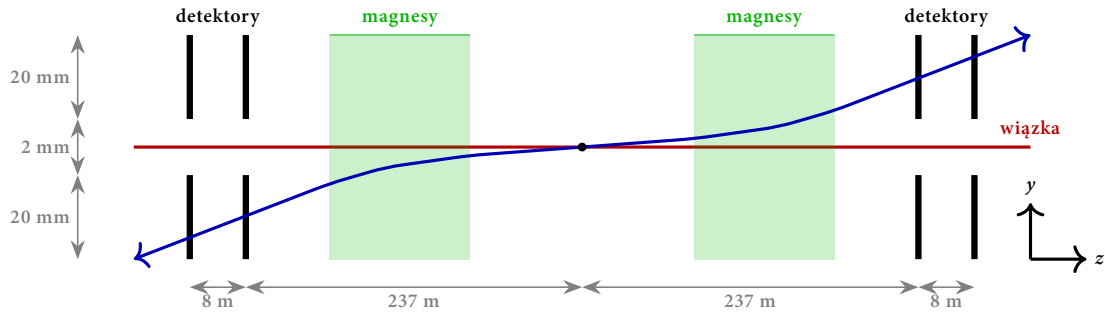
## 5. Analiza danych

Analiza danych wykorzystuje własności rozpraszania elastycznego. Jak wspomniano wcześniej, kinematyka pojedynczego przypadku takiego oddziaływania jest w pełni

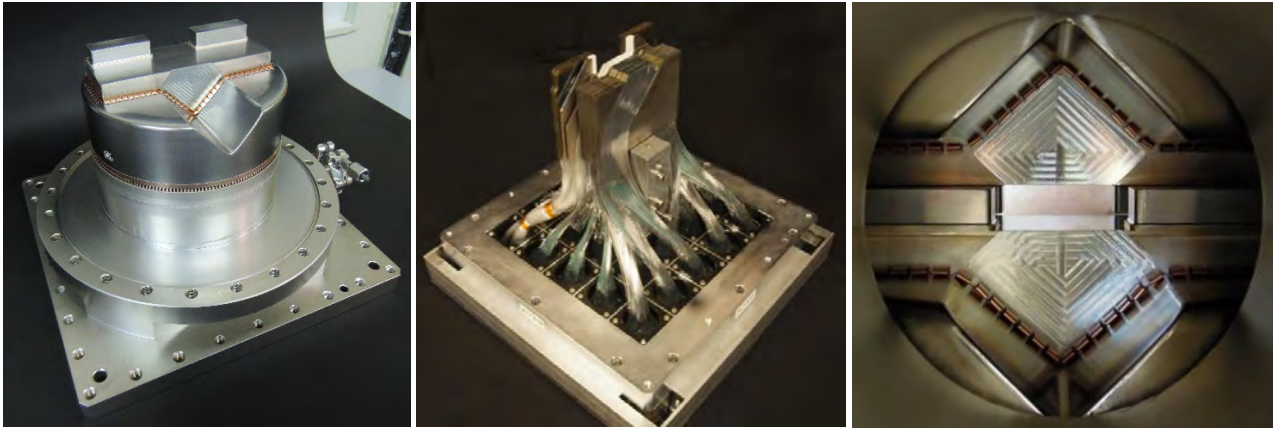
6. Nazwa pochodzi od grupy fizyków, która jako pierwsza zastosowała tę technikę w latach 70. XX w. w akceleratorze ISR w CERN, oraz od kształtu głównej części urządzenia przypominającej stalowy garnek kuchenny.

7. Ścisłe rzecz biorąc, z uwagi na rozmycie kątowe zderzających się wiązek, kąty  $\theta$  i  $\varphi$  w tych wzorach są kątami nachylenia trajektorii w punkcie zderzenia, a nie bezpośrednio kątami rozproszenia. Dla uproszczenia rozróżnienie to zostało tu pominięte.





Rys. 4. Schemat układu eksperymentalnego detektorów ATLAS-ALFA. Kolorem czarnym zaznaczono stacje detektorowe, kolorem zielonym – magnesy kwadrupolowe, kolorem czerwonym – wiązkę protonową, kolorem niebieskim – protony rozproszone elastycznie

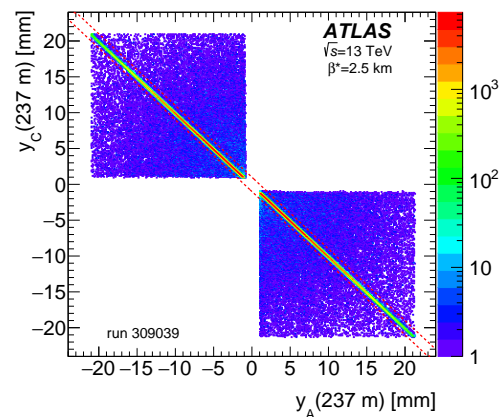


Rys. 5. Zdjęcia elementów układu ALFA. Od lewej: rzymski garnki, detektor scyntylacyjny wkładany do garnka, widok dwóch detektorów – górnego i dolnego – z perspektywy wiązki protonowej ([3] oraz materiały Collaboration ATLAS-ALFA)

scharakteryzowana dwoma parametrami:  $\theta$  i  $\varphi$  (alternatywnie:  $\theta_x$  i  $\theta_y$ ). Tymczasem zastosowany układ doświadczalny pozwala na niezależny pomiar ośmiu wielkości charakteryzujących każdy przypadek, tj. współrzędnych  $x$  i  $y$  w każdej z czterech stacji detektorowych (rys. 4), zatem mierzone współrzędne muszą być silnie skorelowane.

Najprostszą korelacją jest ta występująca pomiędzy położeniami obu mierzonych protonów. Dwa rozproszone protony mają przeciwne pędy, a współrzędne położenia mierzone po lewej i prawej stronie będą miały zbliżone wartości, ale przeciwne znaki, ponieważ układ odniesienia związany z systemem detektorów jest w dobrym przybliżeniu układem środka masy zderzenia. Taka bardzo silna antykorelacja składowych  $y$  położenia obu protonów pokazana została na rys. 6. Jest to korelacja, a nie ścisła zależność, ponieważ dochodzą niepewności pomiarowe, które mogą być niezależne dla każdej mierzonej wielkości.

Korelacje takie wykorzystuje się, aby wybierać przypadki rozpraszania elastycznego, a odrzucać tło, czyli przypadki, które na pierwszy rzut oka mogą sprawiać wrażenie, że pochodzą z rozpraszania elastycznego, ale w istocie takimi nie są. Źródłem tła mogą być procesy nieelastyczne oraz *halo wiązki*, czyli protony, które znajdują się daleko od jej środka.

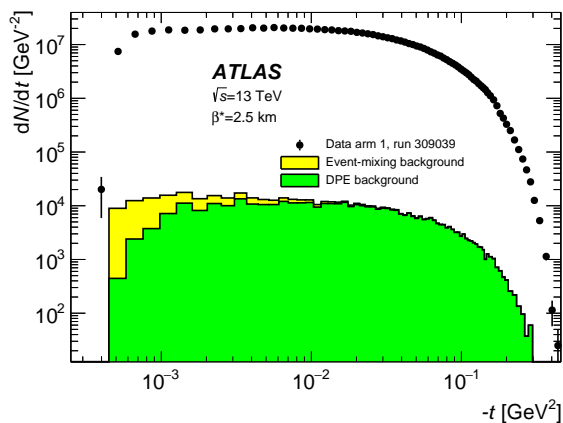
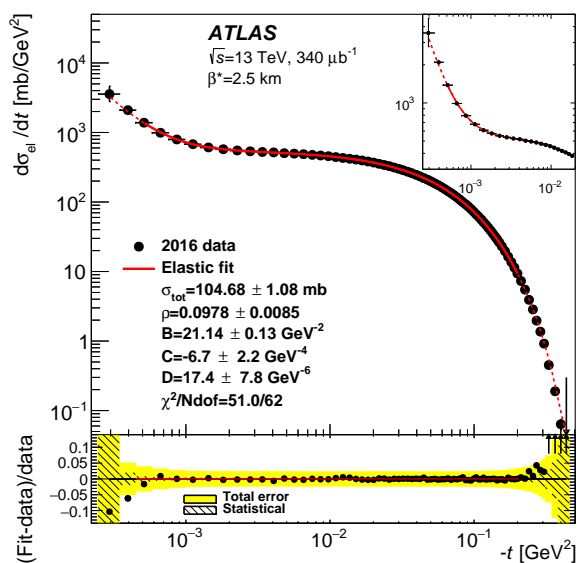


Rys. 6. Korelacja pomiędzy współrzędną pionową położenia protonów zarejestrowanych po prawej ( $y_C$ ) i lewej ( $y_A$ ) stronie punktu oddziaływania w detektorach oddalonych o 237 m. Czerwone przerywane linie wskazują zastosowaną selekcję. Kolorowa skala wskazuje liczbę zarejestrowanych przypadków [2]

Antykorelacje położenia protonów mierzonych po lewej i prawej stronie mogą być wykorzystane również przy wyznaczaniu kąta rozproszenia. Oba protony mają przeciwne skierowane pędy, ale to samo początkowe położenie. Biorąc różnicę mierzonych składowych położenia po obu stronach, wkłady od położenia początkowego eliminują się. Przykładowo dla współrzędnej  $x$

$$x_L - x_R = 2L_{\text{eff},x}\theta_x. \quad (21)$$



Rys. 7. Rozkład  $t$  uzyskany bezpośrednio z pomiaru [2]Rys. 8. Rozkład  $t$  po wszystkich poprawkach [2]

Z pomiaru położenia obu rozproszonych protonów można więc wyznaczyć kąt rozproszenia.

Znając kąt rozproszenia i energię wiązki, możemy ze wzoru (2) wyliczyć wartość zmiennej  $t$ . Zestawiając wszystkie zarejestrowane i zakwalifikowane jako sygnał przypadki można utworzyć rozkład tej zmiennej. Na rysunku 7 pokazany jest taki właśnie rozkład uzyskany przy wykorzystaniu detektorów ATLAS-ALFA. Otrzymany wynik znacząco różni się od rozkładu prawdziwego, czyli takiego, jaki uzyskano by dysponując idealnym układem pomiarowym oraz nieskończoną liczbą przypadków. W omawianym pomiarze głównym źródłem błędów są niedoskonałości układu, a więc efekty systematyczne. Są różne źródła tych niedoskonałości:

1. Jeśli proton znajduje się zbyt blisko wiązki, albo jeśli uderzy w rurę lub inny element akceleratora zanim dotrze do detektora, nie będzie mógł być zarejestrowany. Ten efekt nazywany jest akceptancją geometryczną.

2. Nawet jeśli proton dotarł do detektora, to mógł nie zostać prawidłowo zarejestrowany z powodu zawsze obecnej, choć niewielkiej, niewydajności.
3. Kąt rozproszenia mierzony jest ze skończoną zdolnością rozdzielczą. Wynika to zarówno ze skończonej przestrzennej zdolności rozdzielczej samych detektorów, jak i z niezerowej rozbieżności kątowej wiązek. Skończona zdolność rozdzielcza pojedynczego pomiaru powoduje z kolei systematyczne wypłaszczenie mierzonego rozkładu<sup>8</sup>. Dla stromych rozkładów, a taki właśnie jest mierzony rozkład  $t$ , efekt ten może stać się dość istotny.
4. Zarówno położenie detektorów względem wiązki, jak i pola magnetyczne, z których wyznacza się wielkość parametrów  $L_{eff,x}$  i  $L_{eff,y}$ , nie są znane absolutnie dokładnie.
5. Zawsze pozostaje jakaś część tła, której nie udało się odrzucić.
6. Aby z liczby zebranych przypadków rozpraszania otrzymać przekrój czynny, konieczna jest znajomość świetlności akceleratora scałkowanej po okresie prowadzenia pomiarów. Scałkowana świetlność to miara ilości zebranych danych i jest zależna od rozmiarów i prądów zderzających się wiązek oraz czasu zbierania danych. Jej wartość jest wynikiem osobnego pomiaru i jako taka jest znana ze skończoną dokładnością.

Celem pomiaru jest uzyskanie informacji o rozkładzie prawdziwym. Wpływ błędów systematycznych można w dużej części precyzyjnie określić z użyciem symulacji komputerowych. Znając ten wpływ, na zmierzony rozkład nakłada się poprawki mające te błędy zniwelować. Jeżeli precyzyjne określenie błędu nie jest możliwe, szacuje się jego prawdopodobną wielkość i uwzględnia w niepewności wyniku końcowego.

Na rysunku 8 pokazany jest rozkład po wszystkich poprawkach, czyli różniczkowy przekrój czynny dla zmiennej  $t$ . Porównanie z rozkładem niepoprawionym (rys. 7) pokazuje, że uwzględnienie wszystkich poprawek jest kluczowe.

## 6. Wyniki i ich interpretacja

Aby ze zmierzonego rozkładu wydobyć interesujące własności oddziaływań silnych, wykonuje się dopasowanie modelu do danych. Zastosowany model jest dany wzorem (17). Występująca w nim amplituda  $T_C$  opisana jest wyrażeniem (9) i nie ma żadnych wolnych parametrów,

8. Zdolność rozdzielcza ma wartość skończoną, więc na pomiar rozkładu dla ustalonej wartości  $t_0$  ma wpływ otoczenie  $t_0$ . Matematycznie należy tu myśleć o splocie rozkładu prawdziwego ze zdolnością rozdzielczą, skutkującym jego rozmyciem.

a amplituda  $T_N$  wynika ze wzorów (10) i (13)

$$T_N(t) = \frac{\sigma_{\text{tot}}(\rho + i)}{4\sqrt{\pi}} e^{-B|t|/2}. \quad (22)$$

Wolnymi, podlegającymi dopasowaniu parametrami są tu:  $\sigma_{\text{tot}}$ ,  $B$  i  $\rho$ . Warto zwrócić uwagę na zależność od  $\rho$ . Różniczkowy przekrój czynny dany wzorem (17) ma trzy człony: człon coulombowski (dany przez  $|T_C|^2$ ), człon jądrowy (dany przez  $|T_N|^2$ ) oraz człon interferencyjny pomiędzy  $T_C$  i  $T_N$ . Człon coulombowski jest niezależny od parametru  $\rho$ . Człon jądrowy jest proporcjonalny do  $1 + \rho^2$ , a ponieważ  $\rho^2 \ll 1$ , wpływ  $\rho$  jest tu niewielki. Natomiast człon interferencyjny jest do  $\rho$  wprost proporcjonalny. Obecność tego właśnie członu odpowiada za czułość różniczkowego przekroju czynnego na wartość parametru  $\rho$ .

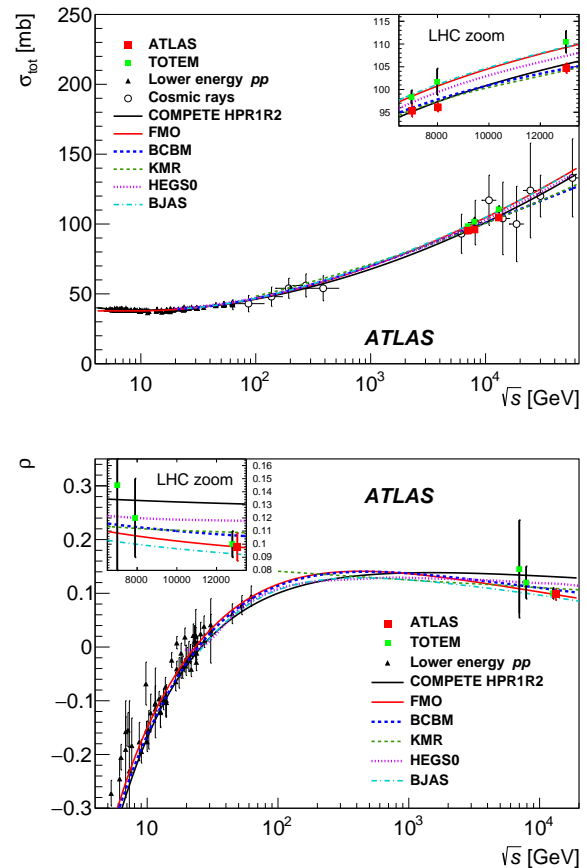
Dopasowanie wykonywane jest metodą najmniejszych kwadratów z uwzględnieniem korelacji pomiędzy niepewnościami poszczególnych punktów. Na przykład cały rozkład jest wprost proporcjonalny do świetlności, więc niepewność związana z wyznaczeniem tej wielkości wpływa na wszystkie punkty rozkładu w jednakowy sposób. Korelacja między niepewnościami różnych punktów jest stuprocentowa. Nieuwzględnienie tej korelacji miałyby znaczący wpływ na uzyskany wynik dopasowania, w szczególności na niepewność parametru  $\sigma_{\text{tot}}$ . Podobne, choć już nie tak silne, korelacje występują dla wszystkich źródeł niepewności systematycznej.

Najważniejszym wynikiem są uzyskane z dopasowania wartości  $\sigma_{\text{tot}}$  i  $\rho$  dla oddziaływań  $pp$  przy energii 13 TeV w układzie środka masy

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} &= 104,7 \pm 1,1 \text{ mb},^9 \\ \rho &= 0,098 \pm 0,011. \end{aligned}$$

Głównym źródłem końcowego błędu pomiarowego  $\sigma_{\text{tot}}$  są niepewności systematyczne związane z wyznaczaniem całkowitej świetlności oraz położenia detektorów względem wiązki. Wyznaczona wartość parametru  $\rho$  zależy również od wyboru konkretnego modelu amplitudy jądrowej  $T_N(t)$ .

Na rysunku 9 zestawiono powyższe wyniki z innymi pomiarami oraz z modelami teoretycznymi. Pierwszą interesującą obserwacją jest to, że całkowity przekrój czynny rośnie wraz z energią zderzenia. Jest to fakt znany i stosunkowo dobrze opisywany przez różne modele teoretyczne. Można o tym efekcie myśleć jak o puchnięciu protonu. Jest to spowodowane tym, że przy wyższej energii większe jest skrócenie Lorentza protonów w kierunku



Rys. 9. Wyniki pomiarów całkowitego przekroju czynnego  $\sigma_{\text{tot}}$  (górny wykres) oraz parametru  $\rho$  (dolny wykres) w funkcji energii zderzenia w układzie środka masy,  $\sqrt{s}$ , wraz z przewidywaniami różnych modeli teoretycznych [2]

ich ruchu, przez co zderzenie trwa krócej. Im krótszy czas oddziaływania, tym bardziej jest ono czułe na krótkotrwałe fluktuacje kwantowe – powstawanie wirtualnych kwarków, antykwarków i gluonów wokół protonu.

Drugim ważnym wnioskiem, jaki można wyciągnąć porównując pokazane na rys. 9 dane i przewidywania teoretyczne jest to, że model COMPETE [4] nie może jednocześnie opisać zmierzonych wartości całkowitego przekroju czynnego  $\sigma_{\text{tot}}$  i parametru  $\rho$ . Model ten wykorzystuje dwa kluczowe założenia:

1. Dla wysokich energii zderzenia ( $\sqrt{s} > 1$  TeV),  $\sigma_{\text{tot}}$  rośnie ze wzrostem energii jak jej logarytm do kwadratu<sup>10</sup>.
2. Przy energii dążącej do nieskończoności, oddziaływania silne protonów z protonami oraz protonów z antyprotonami stają się takie same, to znaczy całkowite przekroje czynne w oddziaływań  $pp$  i  $p\bar{p}$  stają się równe asymptotycznie.

Niezgodność wyniku doświadczalnego z modelami wykorzystującymi te założenia oznacza, że (a) wzrost  $\sigma_{\text{tot}}$

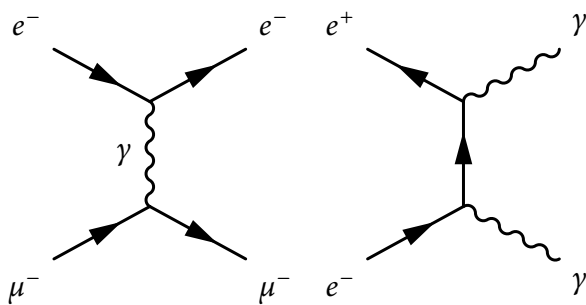
9. Barn (b) – jednostka przekroju czynnego stosowana w fizyce jądrowej i fizyce cząstek elementarnych: 1 b = 10–28 m<sup>2</sup>, 1 mb = 10<sup>3</sup> b; 1 barn to w przybliżeniu pole powierzchni przekroju jądra atomu uranu (przyj. red.).

10. Wysycając ograniczenie Froissarta.

z energią znacznie zwalniać lub (b) oddziaływanie  $pp$  różni się asymptotycznie od oddziaływań  $p\bar{p}$ . W tym drugim przypadku kluczowym pojęciem jest *odderon*.

## 7. Odderon

W ramach perturbacyjnej kwantowej teorii pola, reakcje zachodzące pomiędzy cząstkami można interpretować jako skutek wymiany między nimi innych cząstek. Na przykład rozpraszanie elektromagnetyczne między elektronem a mionem zachodzi dzięki wymianie fotonu. Anihilacja pary  $e^+e^-$  w parę fotonów to z kolei wymiana elektronu. Procesy te przedstawione zostały na rys. 10 w postaci diagramów Feynmana.



Rys. 10. Przykładowe diagramy Feynmana:  $e\mu \rightarrow e\mu$  (z lewej),  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$  (z prawej). Linie po lewej stronie każdego z diagramów reprezentują cząstki w stanie początkowym, linie po prawej stronie – w stanie końcowym

Wydawałoby się naturalne, by opis oddziaływania jako wymiany zastosować również do zderzeń hadronów, czyli cząstek oddziałujących silnie: protonów, neutronów, pionów, kaonów, ... Na przykład reakcja  $\pi^+n \rightarrow \pi^0p$  mogłaby zachodzić poprzez wymianę pionu  $\pi^+$ . Jednak hadronów mogących pośredniczyć w takiej reakcji jest wiele, w szczególności mogą to być cząstki o wysokich spinach. Model teoretyczny opisujący takie wymiany nie jest poprawny, ponieważ występuje w nim naruszenie unitarności. Okazuje się, że problem znika, jeśli zamiast wymiany pojedynczej cząstki, w obliczeniach uwzględnimy wymianę całej rodziny nieskończenie wielu cząstek o podobnych własnościach – takich samych liczbach kwantowych, ale różnych spinach i masach. Taką właśnie rodzinę cząstek nazywa się *trajektorią*.

Przy wysokich energiach zderzających się cząstek, takich jak osiągnęte w LHC, wiodący wkład do rozpraszania protonów wnosi trajektoria *pomeronu*. W przeciwieństwie do innych trajektorii tworzonych przez hadrony znane z eksperymentów, istnienie pomeronu zostało zapostulowane teoretycznie, aby wyjaśnić wspomniany wcześniej wzrost całkowitego przekroju czynnego z energią zderzenia. Współcześnie przyjmuje się, że trajektorię pomeronu tworzą cząstki zwane *glueballami* lub *gluoniami* – hadronami składającymi się jedynie z gluonów (nie licząc powstających na chwilę, w wyniku fluktuacji kwantowych, par kwark-antkwark).

Obecnie nie mamy jasnej odpowiedzi dotyczącej istnienia i własności glueballi, więc tym bardziej ich związek z pomeronom nie jest pewny.

Ważną cechą pomeronu jest jego dodatnia parzystość ładunkowa. Konsekwencją tego jest, że przy wysokich energiach, kiedy to wnoszony przez nią wkład do amplitudy rozpraszania jest dominujący, amplituda rozpraszania  $T_P$  jest taka sama w zderzeniach  $pp$ , jak w zderzeniach  $p\bar{p}$ . Na pierwszy rzut oka może to wydawać się dziwne, ale należy pamiętać, że rozważania dotyczą jedynie oddziaływania silnego, więc znak ładunku elektrycznego nie gra tutaj roli. Dodatkowo, wraz z rosnącą energią struktura protonów i antyprotonów staje się zdominowana przez gluony, więc protony i antyprotony stają się coraz bardziej podobne do siebie.

I tutaj pojawia się *odderon*. Jest to hipotetyczna trajektoria podobna do pomeronu, ale o ujemnej parzystości. Konsekwencją jest to, że przyczynki  $T_O$  wnoszone przez wymianę odderonu do amplitud rozpraszania  $pp$  i  $p\bar{p}$  mają przeciwne znaki. Warto nadmienić, że chromodynamika kwantowa sugeruje istnienie odderonu, ponieważ przewiduje, że gluony mogą tworzyć układy zarówno o parzystości dodatniej, jak i ujemnej.

Uwzględniając wymianę pomeronu jak i odderonu, amplitudy oddziaływań  $pp$  i  $p\bar{p}$  wynoszą

$$\begin{aligned} T_N^{pp} &= T_P + T_O, \\ T_N^{p\bar{p}} &= T_P - T_O. \end{aligned} \quad (23)$$

Istnienie odderonu oznacza, że oddziaływania  $pp$  i  $p\bar{p}$  będą się różnić nawet przy asymptotycznych energiach.

## 8. Podsumowanie

Rozpraszanie elastyczne jest kinematycznie najprostszym procesem zachodzącym w zderzeniach proton-proton, jednak jego dynamika jest zaskakująco złożona. W oddziaływaniu silnym mamy do czynienia ze zjawiskami o naturze dyfrakcyjnej, odzwierciedlanymi przez minima i maksima obserwowane w mierzonych rozkładach kątowych. Bardzo istotne jest twierdzenie optyczne wiążące amplitudę rozpraszania elastycznego z całkowitym przekrojem czynnym. Ponadto, dla bardzo dużych wartości  $t$  oczekuje się przejścia w reżim perturbacyjny, a dla małych wartości pojawiają się efekty oddziaływań elektromagnetycznych oraz zjawiska interferencji pomiędzy oddziaływaniem elektromagnetycznym i silnym.

W pomiarach prowadzonych w akceleratorze LHC zastosowano dedykowany układ eksperymentalny ATLAS-ALFA. Pomiary kątów rozpraszania rzędu pojedynczych mikroradianów wymagały zastosowania detektorów umieszczonych ponad 200 metrów od punktu zderzenia i zaledwie jeden milimetr od wiązki, co było możliwe dzięki technice rzymskich garnków. Niezbędne też było użycie specjalnej optyki akceleratora LHC.

Wynikiem badań są podstawowe wielkości opisujące oddziaływania silne, w szczególności  $\sigma_{\text{tot}}$  i  $\rho$ . Ich znajomość jest niezwykle istotna dla celów praktycznych, takich jak modelowanie zderzeń przy wysokich energiach. Dostarczają one również wiedzy na temat oddziaływań silnych przy asymptotycznych energiach. W szczególności mogą wskazywać na istnienie odderonu, jednak tylko jako argument pośredni<sup>11</sup>.

### Podziękowania

Bardzo dziękuję prof. Marioli Kłusek-Gawendzie, prof. Januszowi Chwastowskiemu oraz dr. Maciejowi Lewickiemu za cenne uwagi dotyczące artykułu.

Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu badawczego SONATA BIS nr 2021/42/E/ST2/00350 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

---

11. Czytelników zainteresowanych tematem zachęcam do zapoznania się z artykułem [5], w którym zaprezentowano pomiary obszaru minimum i maksimum rozkładu  $t$  w procesach elastycznych, w których również można obserwować wpływ odderonu.

### Literatura

- [1] ATLAS Collaboration, “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”, JINST 3, S08003 (2008).
- [2] ATLAS Collaboration, “Measurement of the total cross section and  $\rho$ -parameter from elastic scattering in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, Eur. Phys. J. C 83, 441 (2023).
- [3] S. Abdel Khalek et al., “The ALFA Roman Pot Detectors of ATLAS”, JINST 11, P11013 (2016).
- [4] J. R. Cudell, V. V. Ezhela, P. Gauron, K. Kang, Y. V. Kuyanov, S. B. Lugovsky, E. Martynov, B. Nicolescu, E. A. Razuvaev, N. P. Tkachenko (COMPETE), “Benchmarks for the forward observables at RHIC, the Tevatron Run II and the LHC”, Phys. Rev. Lett. 89, 201801 (2002).
- [5] D0 and TOTEM Collaborations, “Odderon Exchange from Elastic Scattering Differences between  $pp$  and  $p\bar{p}$  Data at 1.96 TeV and from pp Forward Scattering Measurements”, Phys. Rev. Lett. 127, 062003 (2021).



---

# Nontrivially realized simple symmetries of a simple system

## Proste symetrie prostego układu nietrywialnie realizowane

Piotr Chankowski\*

Faculty of Physics, University of Warsaw

---

**Abstract.** Using the example of a particle moving in infinite space under the influence of a constant in space but possibly time dependent force we discuss the application of the Noether theorem and its implications for the classical and quantum versions of the theory of such a system.

**Keywords:** Symmetries, Noether theorem, classical mechanics, quantum mechanics, central charges

**Abstrakt.** Na przykładzie cząstki poruszającej się w nieskończonej przestrzeni pod wpływem siły niezależnej od położenia, ale niekoniecznie niezależnej od czasu, omawiam zastosowanie twierdzenia Noether i jego konsekwencje dla klasycznej i kwantowej teorii układu fizycznego.

**Słowa kluczowe:** symetrie, twierdzenie Noether, mechanika klasyczna, mechanika kwantowa, ładunki centralne

---

### 1. Introduction

It is often glibly repeated that homogeneity of space understood as symmetry of a given mechanical system with respect to its translations in space, implies conservation of the linear momentum (of the considered mechanical system). While in most cases this is indeed so, we want to point out here that this is not universally true and the conserved quantity associated with a symmetry is unambiguously given by the Noether theorem. Similarly it is usually taken for granted that in quantum mechanics operators realizing a symmetry of a given physical system commute with the system's Hamiltonian and have, therefore, direct bearing on the energy spectrum. This again is not always so and it is the purpose of this note to discuss these issues on an example of a very simple physical system. The system is a particle of mass  $m$  moving under the influence of a constant in space, but possibly time-dependent force. The symmetries which will be considered are translations in space and (Galilean) boosts. The example is thus extremely simple and can easily be discussed in classes on classical and quantum mechanics.

### 2. Classical Mechanics and Noether theorem

In classical mechanics one speaks of a symmetry of a given physical system if, after it is subjected to an operation  $S$  (active view), it “works” the same way as before the operation. The mathematical expression of this operational definition is that the variables parametrizing the state of the original system and of the transformed one satisfy the same equations of motion. For instance, if  $\mathbf{r}(t)$  is a trajectory of a pointlike mass  $m$  in the gravitational field  $-GMm\mathbf{r}(t)/|\mathbf{r}(t)|^3$  of a mass  $M$  fixed at the origin of the space, i.e. a trajectory satisfying the equation  $m\ddot{\mathbf{r}}(t) = -GMm\mathbf{r}(t)/|\mathbf{r}(t)|^3$ , then the trajectory  $\mathbf{r}'(t)$  which is obtained by rigidly rotating in space the original trajectory  $\mathbf{r}(t)$  by any angle around any axis passing through the center of the force will also satisfy the same Newton's equation:  $m\ddot{\mathbf{r}}'(t) = -GMm\mathbf{r}'(t)/|\mathbf{r}'(t)|^3$ . Rotations are therefore (continuous) symmetries of this system and one knows that the associated conserved quantity is the angular momentum  $\mathbf{L} = m\mathbf{r}(t) \times \dot{\mathbf{r}}(t)$ .

In general, conserved quantities associated with continuous symmetries of physical systems, the equations of motion of which follow from the Hamilton's stationary action principle (see e.g. [1]), are unambiguously given by the Noether theorem which says that to each one-parameter family of continuous symmetries of the system corresponds one constant of motion. In the invo-

---

\*ORCID: 0000-0002-8897-3426

\*\*e-mail: chank@fuw.edu.pl

ked example the Lagrangian of the particle moving in the gravitational field simply does not change under (infinitesimal) rotations  $\mathbf{r}(t) \rightarrow \mathbf{r}'(t) = \mathbf{r}(t) + \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{r}(t)$  of the trajectory:  $L(\mathbf{r}', \dot{\mathbf{r}}') = L(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}})$ . This means that also the value  $I$  of the action obtained for a given trajectory and the action value  $I'$  obtained for the rotated trajectory are equal. Consequently, if  $I$  is stationary for some trajectory it must be also stationary for its rotated counterpart. The conserved quantity follows then immediately by considering the equality  $I' - I = 0$  expanded to the first order in the parameters  $\boldsymbol{\theta}$  of the rotation. The equality  $I' = I$  is, however, too strong a condition.  $I'$  is stationary whenever  $I$  is also if the Lagrangian transforms into a total time derivative of a function depending only on the trajectory  $\mathbf{r}(t)$ . In such cases  $I' = I + \Delta I$  but because one admits only trajectories with fixed ends, the term  $\Delta I$  does not invalidate the conclusion that if  $I$  is stationary for some trajectory,  $I'$  is also such for the transformed one and again the conserved quantity is identified by considering the equality  $I' - I - \Delta I = 0$  expanded to the first order in the parameters of the transformation.

In agreement with the operational understanding of symmetries explained above, if a particle moves under the influence of a (possibly time-dependent but) constant in space force  $\mathbf{F}(t)$ , translations are symmetries of the system because the translated trajectory satisfies the same equation of motion. It is, however, also clear that the linear momentum  $\mathbf{p} = m\dot{\mathbf{r}}(t)$  is not constant, contrary to the standard statement quoted in the introduction. Since translations form a continuous group of symmetries, a conserved quantity should, however, exist. To find it, one has to apply the Noether theorem. The action  $I$  corresponding to the considered physical system reads

$$\begin{aligned} I[\mathbf{r}] &= \int_{t_0}^{t_1} dt L(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) \\ &= \int_{t_0}^{t_1} dt \left[ \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{r}}^2 + \mathbf{r} \cdot \mathbf{F}(t) \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Under translations  $\mathbf{r}(t) \rightarrow \mathbf{r}'(t) = \mathbf{r}(t) + \mathbf{a}$

$$\begin{aligned} L(\mathbf{r}', \dot{\mathbf{r}}', t) &= \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{r}}^2 + (\mathbf{r} + \mathbf{a}) \cdot \mathbf{F}(t) \\ &= L(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) + \frac{d}{dt} \int_{t_0}^t dt' \mathbf{a} \cdot \mathbf{F}(t') \\ &\equiv L(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) + \frac{d}{dt} X(t), \end{aligned} \quad (2)$$

and, therefore,

$$I' \equiv \int_{t_0}^{t_1} dt L(\mathbf{r}', \dot{\mathbf{r}}', t) = I[\mathbf{r}] + \int_{t_0}^{t_1} dt \frac{d}{dt} X(t). \quad (3)$$

This, as explained above, still ensures that  $\mathbf{r}'(t)$  is a solution of the equations of motion if  $\mathbf{r}(t)$  is, because if the

trajectory  $\mathbf{r}(t)$  is a stationary point for  $I$  so is  $\mathbf{r}'(t)$  for  $I'$ .

Following the Noether theorem, the corresponding conservation law is obtained by considering an infinitesimal transformation  $\mathbf{r}' = \mathbf{r} + \delta\mathbf{r}$  and writing the above equality expanded to the first order in  $\delta\mathbf{r}$  in the form

$$\begin{aligned} 0 &= I' - I - \int_{t_0}^{t_1} dt \frac{d}{dt} \delta X(t) \\ &= \int_{t_0}^{t_1} dt \left[ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{r}} \cdot \delta\mathbf{r} + \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}} \cdot \frac{d}{dt} \delta\mathbf{r} - \frac{d}{dt} \delta X(t) \right] + \dots \\ &= \int_{t_0}^{t_1} dt \left\{ \left[ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{r}} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}} \right] \cdot \delta\mathbf{r} \right. \\ &\quad \left. + \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}} \cdot \delta\mathbf{r} - \delta X(t) \right] \right\} + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

Thus, with  $\delta\mathbf{r} = \delta\mathbf{a}$  and  $\delta X(t) = \delta\mathbf{a} \cdot \mathbf{F}(t)$ , if  $\mathbf{r}(t)$  satisfies the Euler-Lagrange equations, (so that the first square bracket vanishes) the conserved quantity associated with the symmetry with respect to translations of the system is given by the content of the second square bracket. The conserved quantity is, thus, not the momentum  $\mathbf{p} \equiv m\dot{\mathbf{r}}$  but

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}} - \int_{t_0}^t dt' \mathbf{F}(t') = m\dot{\mathbf{r}}(t) - \int_{t_0}^t dt' \mathbf{F}(t') \\ &\equiv \mathbf{p}(t) - \int_{t_0}^t dt' \mathbf{F}(t'). \end{aligned} \quad (5)$$

This is an obvious answer which probably can readily be guessed at by any student unbiased by the considerations of Landau & Lifshitz [2] of the homogeneity of space (as a condition for the translational invariance) which according to these authors is equivalent to the independence of the Lagrangian  $L$  on  $\mathbf{r}$ . (That the obtained conserved quantity is not very useful in the classical theory is another story.)

Whether the constant in space force  $\mathbf{F}$  varies with time or not, (Galilean) boosts are also symmetries of the considered system. Indeed, the boosted form  $\mathbf{r}'(t) = \mathbf{r}(t) + \mathbf{V}t$  of the solution

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(t_0) + v(t_0)(t - t_0) + \int_{t_0}^t dt' \int_{t_0}^{t'} dt'' \frac{\mathbf{F}(t'')}{m}, \quad (6)$$

of the Newtonian equation of motion  $m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}(t)$  is also the solution of this equation. Although the concomitant conserved quantity is rarely mentioned in textbooks on mechanics (in [2] the symmetry with respect to the boosts is only used to constrain the possible form of the Lagrangian of a free particle) it too can be found by applying the Noether theorem. To this end one considers again the action (1) and the change of the Lagrangian

$L(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t)$  under a boost

$$\begin{aligned} L(\mathbf{r}', \dot{\mathbf{r}}', t) &= L(\mathbf{r} + \mathbf{V}t, \dot{\mathbf{r}}' + \mathbf{V}, t) \\ &= \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{r}}'^2 + m \dot{\mathbf{r}}' \cdot \mathbf{V} + \frac{1}{2} m \mathbf{V}^2 + (\mathbf{r} + \mathbf{V}t) \cdot \mathbf{F}(t) \\ &= L(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) + \frac{d}{dt} \left[ m \mathbf{r} \cdot \mathbf{V} + \frac{1}{2} m \mathbf{V}^2 t \right. \\ &\quad \left. + \int_{t_0}^t dt' t' \mathbf{F}(t') \cdot \mathbf{V} \right]. \quad (7) \end{aligned}$$

It is crucial that the quantity  $X$ , defined as the content of the square bracket, depends only on  $\mathbf{r}(t)$  and  $t$  (and not on  $\dot{\mathbf{r}}(t)$ ) owing to this, if  $\mathbf{r}(t)$  is a stationary point for  $I$  so is  $\mathbf{r}'(t)$  for  $I'$  because the variations  $\delta \mathbf{r}(t)$  one admits vanish at  $t = t_0$  and  $t = t_1$  (the variations of the velocity are not bound).

As follows from the Noether theorem, conserved is the quantity

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}} \cdot \delta \mathbf{r} - \delta X = m \dot{\mathbf{r}} \cdot \delta \mathbf{V} t - m \mathbf{r} \cdot \delta \mathbf{V} - \int_{t_0}^t dt' t' \mathbf{F}(t') \cdot \delta \mathbf{V}. \quad (8)$$

Because  $\delta \mathbf{V}$  is arbitrary, the conserved vector is

$$\mathbf{K} = t \mathbf{p}(t) - m \mathbf{r}(t) - \int_{t_0}^t dt' t' \mathbf{F}(t'). \quad (9)$$

The constancy of  $\mathbf{K}$  can be checked directly using the explicit solution (6) of the equation of motion and the obvious solution for  $\mathbf{p}(t)$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= t \left( \mathbf{p}(t_0) + \int_{t_0}^t dt' \mathbf{F}(t') \right) \\ &\quad - m \left( \mathbf{r}(t_0) + \frac{\mathbf{p}(t_0)}{m} (t - t_0) + \int_{t_0}^t dt' \int_{t_0}^{t'} dt'' \frac{\mathbf{F}(t'')}{m} \right) \\ &\quad - \int_{t_0}^t dt' t' \mathbf{F}(t'). \quad (10) \end{aligned}$$

To see that  $\mathbf{K}$  is indeed constant, it is sufficient to integrate by parts

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^t dt' t' \mathbf{F}(t') &= \int_{t_0}^t dt' t' \frac{d}{dt'} \int_{t_0}^{t'} dt'' \mathbf{F}(t'') \\ &= \left[ t' \int_{t_0}^{t'} dt'' \mathbf{F}(t'') \right]_{t_0}^t - \int_{t_0}^t dt' \int_{t_0}^{t'} dt'' \mathbf{F}(t''). \quad (11) \end{aligned}$$

Thus,  $\mathbf{K}(t) = t_0 \mathbf{p}(t_0) - m \mathbf{r}(t_0)$ .

Both conserved quantities,  $\mathbf{Q}$  and  $\mathbf{K}$ , will play the role of the symmetry generators in the quantum version of the theory of the considered system.<sup>1</sup>

### 3. Quantum Mechanics

Given that symmetries are so important in modern physics (for instance relativistic quantum field theory can be formulated [9] by imposing the requirements of Poincaré symmetry on the theory of interacting particles formulated in the second quantization formalism) it is somewhat surprising to realize that the proper general definition of a symmetry is usually not found in standard quantum mechanics textbooks like [3, 5] and even in books entirely devoted to symmetries like [6]. Even if giving a definition is attempted, it is usually restricted to symmetry operations represented in the Hilbert space by operators which commute with the system's Hamiltonian (see e.g. [7, 8]). Weinberg [9] who devoted an otherwise very interesting and enlightening section to symmetries gives a rather misleading definition (adopting implicitly the passive view) by saying that “A symmetry transformation is a change in our point of view that does not change the result of possible experiments. If an observer  $\mathcal{O}$  sees a system in a state represented by a ray  $\mathcal{R}$  or  $\mathcal{R}_1$  or  $\mathcal{R}_2, \dots$ , then an equivalent observer  $\mathcal{O}'$  who looks at the *same* system will observe it in a different state represented by a ray  $\mathcal{R}'$  or  $\mathcal{R}'_1$  or  $\mathcal{R}'_2, \dots$ , respectively but the two observers must find the same probabilities:  $P(\mathcal{R} \rightarrow \mathcal{R}_n) = P(\mathcal{R}' \rightarrow \mathcal{R}'_n)$ ” and quotes the Wigner result that such transformations are in the Hilbert space represented by unitary (or antiunitary) operators  $U$  satisfying the requirement<sup>2</sup>  $|(U\Psi|U\Psi_n)| = |(\Psi|\Psi_n)|$  ( $\Psi, \Psi_n, \Psi', \Psi'_n$  are Hilbert space vectors belonging to the rays  $\mathcal{R}, \mathcal{R}_n$  or  $\mathcal{R}'$  and  $\mathcal{R}'_n$ , respectively). That at least some element is missing in this definition is evident if one takes the unitary operator  $U = \exp(-ia \cdot \hat{\mathbf{P}})$  ( $\hat{\mathbf{P}}$  is the momentum operator and  $\mathbf{a}$  an arbitrary vector) which according to this definition would represent a symmetry of, say, the system formed by an electron moving in the Coulomb field of a static positive charge.

In fact the missing element is found only in the Schiff textbook [10] from which one can learn that the definition of a symmetry in quantum mechanics is essentially the same as in the classical theory: a symmetry operation  $S$  is any such operation that after performing it on the system its “working” remains unchanged. In the language of the quantum mechanics it means that if the state vector  $|\Psi(t)\rangle$  of the original system satisfies the Schrödinger equation

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \hat{H}(t) |\Psi(t)\rangle \quad (12)$$

the state vector  $U_S(t) |\Psi(t)\rangle$  representing the system on

1. Of course, they play a similar role also classically, generating symmetry transformations through the appropriate Poisson brackets.

2. We use capital characters  $\Psi$  instead of  $\psi$  to stress that these considerations are general and apply also to relativistic quantum field theories.

which the operation  $S$  has been performed satisfies the Schrödinger equation

$$i\hbar \frac{d}{dt} (U_S(t)|\Psi(t)\rangle) = \hat{H}(t)U_S(t)|\Psi(t)\rangle, \quad (13)$$

with the same Hamiltonian  $\hat{H}$ . Compared to the definition given in [10] we have explicitly indicated a possible time dependence of the symmetry operator  $U_S$  because even if the symmetry operation itself is the same, no matter at which instant it is performed, the operator representing it may depend on time as is the case of the symmetries considered here. From the definition given here it follows that if  $U(t_2, t_1)$  is the (Schrödinger picture) evolution operator<sup>3</sup> associated with the Hamiltonian  $\hat{H}$  of the system, such that  $|\Psi(t_2)\rangle = U(t_2, t_1)|\Psi(t_1)\rangle$ , then from (12) and (13) it follows that an operator  $U_S(t)$  represents a possible symmetry operation  $S$  if

$$U_S(t_2)U(t_2, t_1) = U(t_2, t_1)U_S(t_1). \quad (14)$$

In most cases when the Hamiltonian of the system does not depend explicitly on time,  $U(t_2, t_1) = \exp(-i/\hbar(t_2 - t_1)\hat{H})$ , and  $U_S$  is independent of time, this condition is satisfied because  $[U_S, \hat{H}] = 0$ . In such cases the symmetry represented by  $U_S$  has direct consequences for the Hamiltonian spectrum, but as we want to point out, this is not the most general possibility.

In the case of the simple system considered in this note canonical quantization allows to identify operators ( $\hat{1}$  is the unit operator)

$$\hat{Q} = \hat{\mathbf{p}} - \hat{1} \int_{t_0}^t dt' \mathbf{F}(t'), \quad (15)$$

$$\hat{K} = t\hat{\mathbf{p}} - m\hat{\mathbf{r}} - \hat{1} \int_{t_0}^t dt' t' \mathbf{F}(t'), \quad (16)$$

which despite being explicitly depend on time are the Schrödinger picture operators (the operators  $\hat{\mathbf{r}}$  and  $\hat{\mathbf{p}}$  are time independent), as the generators of space translations and boosts. It is convenient already at this point to write down the commutation relations defining the algebra formed by the operators  $\hat{Q}$ ,  $\hat{K}$  and the Hamiltonian  $\hat{H}$

$$\hat{H}(t) = \frac{\hat{\mathbf{p}}^2}{2m} - \hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{F}(t), \quad (17)$$

which, when the force is constant, is the generator of the time translation symmetry.<sup>4</sup> Using the standard rules

3. Do not confuse symmetry operators  $U_S(t)$  with the evolution operator  $U(t_2, t_1)$  which has, however, two time arguments.

4. If  $\mathbf{F}$  does not depend on time, the classical trajectory  $\mathbf{r}'(t) = \mathbf{r}(t - \tau)$  is obviously the solution of the equation of motion  $m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}$ , provided  $\mathbf{r}(t)$  is and, because then the Lagrangian does not depend then on time explicitly, the Hamiltonian is a constant of motion, as is well known from classical mechanics; similarly,  $|\psi'(t)\rangle = |\psi(t - \tau)\rangle = e^{i\tau\hat{H}/\hbar}|\psi(t)\rangle$  is obviously the solution of the Schrödinger equation with the time independent Hamiltonian, if  $|\psi(t)\rangle$  is.

$[\hat{r}^i, \hat{p}^j] = i\hbar\delta^{ij}\hat{1}$ , etc. one easily finds the commutators:

$$\begin{aligned} [\hat{Q}^i(t), \hat{Q}^j(t')] &= 0, \\ [\hat{K}^i(t), \hat{Q}^j(t')] &= -i\hbar m\delta^{ij}\hat{1}, \\ [\hat{H}(t), \hat{Q}^i(t')] &= -i\hbar F^i(t)\hat{1}, \\ [\hat{K}^i(t), \hat{K}^j(t')] &= i\hbar m(t - t')\delta^{ij}\hat{1}, \\ [\hat{H}(t), \hat{K}^i(t')] &= i\hbar\hat{p}^i - i\hbar t' F^i(t)\hat{1}. \end{aligned} \quad (18)$$

The unitary operators

$$\begin{aligned} U_Q(\mathbf{a}, t) &= \exp\left(-\frac{i}{\hbar}\mathbf{a} \cdot \hat{Q}(t)\right), \\ U_K(\mathbf{V}, t) &= \exp\left(-\frac{i}{\hbar}\mathbf{V} \cdot \hat{K}(t)\right), \end{aligned} \quad (19)$$

should realize on the Hilbert space vectors  $|\psi\rangle$  representing quantum states of the considered system finite (active) symmetry transformations of space translations and boosts. More precisely, in agreement with the definition of a symmetry formulated above, if  $|\psi(t)\rangle$  is an evolving in time as dictates the Schrödinger equation (12) with the Hamiltonian (17) state-vector of the system (of the particle), then  $U_Q(\mathbf{a}, t)|\psi(t)\rangle$  and  $U_K(\mathbf{V}, t)|\psi(t)\rangle$  should be the evolving with the time state-vectors of the, respectively, translated in space and boosted systems. That is,  $U_Q(\mathbf{a}, t)|\psi(t)\rangle$  and  $U_K(\mathbf{V}, t)|\psi(t)\rangle$  should also be solutions of the same Schrödinger equation. To see that e.g.

$$i\hbar \frac{d}{dt} (U_Q(\mathbf{a}, t)|\psi(t)\rangle) = \hat{H}(t) (U_Q(\mathbf{a}, t)|\psi(t)\rangle), \quad (20)$$

holds if  $|\psi(t)\rangle$  is a solution of the Schrödinger equation, it is sufficient to check that the relation

$$i\hbar \frac{d}{dt} U_Q(\mathbf{a}, t) = [\hat{H}(t), U_Q(\mathbf{a}, t)], \quad (21)$$

and the analogous relation with  $U_K(\mathbf{V}, t)$  do hold. To demonstrate this, we first notice, that the derivative on the left hand side is computed by expanding the operator  $U_Q(\mathbf{a}, t)$

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{d}{dt} U_Q(\mathbf{a}, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(-\frac{i}{\hbar}\right)^n \sum_{k=0}^{n-1} (\mathbf{a}\hat{Q})^k \left[i\hbar \frac{d}{dt} \mathbf{a} \cdot \hat{Q}(t)\right] (\mathbf{a}\hat{Q})^{n-1-k}. \end{aligned} \quad (22)$$

On the other hand, computing the commutator on the right hand side upon using the standard rule  $[A, B^n] = [A, B]B^{n-1} + B[A, B]B^{n-2} + \dots + B^{n-1}[A, B]$  one obtains:

$$\begin{aligned} &[\hat{H}(t), U_Q(\mathbf{a}, t)] \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(-\frac{i}{\hbar}\right)^n \sum_{k=0}^{n-1} (\mathbf{a}\hat{Q})^k [\hat{H}(t), \mathbf{a}\hat{Q}(t)] (\mathbf{a}\hat{Q})^{n-1-k}. \end{aligned} \quad (23)$$

As the structures of the right hand sides of the formulae (22) and (23) are formally identical, the equalities

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{d}{dt} [\mathbf{a} \cdot \hat{\mathbf{Q}}(t)] &= -i\hbar \mathbf{a} \cdot \mathbf{F}(t) \hat{1} \\ &= [\hat{H}(t), \mathbf{a} \cdot \hat{\mathbf{Q}}(t)], \\ i\hbar \frac{d}{dt} [\mathbf{V} \cdot \hat{\mathbf{K}}(t)] &= i\hbar (\mathbf{V} \cdot \hat{\mathbf{p}} - t \mathbf{V} \cdot \mathbf{F}(t) \hat{1}) \\ &= [\hat{H}(t), \mathbf{V} \cdot \hat{\mathbf{K}}(t)], \end{aligned} \quad (24)$$

which can be directly checked to hold (the commutators on the right hand sides are just the equal-time versions of the ones given in (18)), are sufficient to prove that the requisite relations do indeed hold. Moreover, as the commutator  $[\hat{H}(t), \mathbf{a} \cdot \hat{\mathbf{Q}}(t)]$  is a  $c$ -number, one can sum the series to obtain<sup>5</sup>

$$i\hbar \frac{d}{dt} U_Q(\mathbf{a}, t) = [\hat{H}(t), U_Q(\mathbf{a}, t)] = -\mathbf{a} \cdot \mathbf{F}(t) U_Q(\mathbf{a}, t). \quad (25)$$

The second equality will be useful in displaying the role of  $U_Q(\mathbf{a}, t)$  as far as the Hamiltonian spectrum is concerned.

It is also instructive to show that the observables represented by the Hermitian operators  $\hat{\mathbf{Q}}$  and  $\hat{\mathbf{K}}$  are constants of motion even though the operators themselves do not commute with the Hamiltonian. To this end it is most convenient to go over to the Heisenberg picture in which vectors representing states of the system do not change with time and the whole time dependence is carried by the Heisenberg picture  $\hat{O}_H(t)$  counterparts of the Schrödinger operators  $\hat{O}$ . The Heisenberg picture operators are defined by

$$\hat{O}_H(t) = U^\dagger(t, t_0) \hat{O}(t) U(t, t_0), \quad (26)$$

where it has been assumed that the Schrödinger and Heisenberg pictures coincide at  $t = t_0$ . To demonstrate the conservation of the quantities (observables) represented by the operators  $\hat{\mathbf{Q}}$  and  $\hat{\mathbf{K}}$  it suffices, therefore, to find the Heisenberg picture counterparts of these operators and to check their time independence.

If the force  $\mathbf{F}$  is not constant, finding the explicit form of the operator  $U(t, t_0)$  is not easy. However this is not necessary. In the considered quantum theory there are two basic operators: the position  $\hat{\mathbf{r}}$  and the momentum  $\hat{\mathbf{p}}$  operators; all other operators, including  $\hat{\mathbf{Q}}$  and  $\hat{\mathbf{K}}$ , can be built out of these two. (In other words  $\hat{\mathbf{r}}$  and  $\hat{\mathbf{p}}$  form the basis of the algebra of operators of the considered theory.) It is therefore sufficient to find the Heisenberg form of  $\hat{\mathbf{r}}_H(t)$  and  $\hat{\mathbf{p}}_H(t)$ . This can be done by exploiting the

fact that in the considered case the most general form of the classical solution depending on the initial data is known explicitly.<sup>6</sup> Taking  $t_0$  as the moment at which the Schrödinger and the Heisenberg pictures coincide and promoting  $\mathbf{r}(t_0)$  and  $\mathbf{p}(t_0)$  to Schrödinger picture operators  $\hat{\mathbf{r}}$  and  $\hat{\mathbf{p}}$  one obtains<sup>7</sup>

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{r}}_H(t) &= U^\dagger(t, t_0) \hat{\mathbf{r}} U(t, t_0) \\ &= \hat{\mathbf{r}} + \frac{\hat{\mathbf{p}}}{m} (t - t_0) + \hat{1} \int_{t_0}^t dt' \int_{t_0}^{t'} dt'' \frac{\hat{\mathbf{F}}(t'')}{m}, \\ \hat{\mathbf{p}}_H(t) &= U^\dagger(t, t_0) \hat{\mathbf{p}} U(t, t_0) \\ &= \hat{\mathbf{p}} + \hat{1} \int_{t_0}^t dt' \mathbf{F}(t'). \end{aligned} \quad (27)$$

It is straightforward to check that these Heisenberg picture operators satisfy the Heisenberg equations of motion

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \hat{O}_H(t) &= \frac{i}{\hbar} [\hat{H}^H(t), \hat{O}_H(t)] \\ &+ U^\dagger(t, t_0) \frac{\partial \hat{O}(t)}{\partial t} U(t, t_0), \end{aligned} \quad (28)$$

in which  $\hat{H}^H(t)$  is the Heisenberg picture counterpart of the Hamiltonian and the last term, frequently but somewhat misleadingly denoted by the symbol  $(\partial \hat{O}(t)/\partial t)_H$  or even  $\partial \hat{O}_H(t)/\partial t$ , is just the transformation to the Heisenberg picture of the time derivative of the Schrödinger picture operator. Computing the commutator in the right hand side of the Heisenberg equation (28) using the trick

$$[\hat{H}^H(t), \hat{O}_H(t)] = U^\dagger(t, t_0) [\hat{H}(t), \hat{O}(t)] U(t, t_0), \quad (29)$$

one easily finds that the right hand sides of the equations satisfied by  $\hat{\mathbf{r}}_H(t)$  and  $\hat{\mathbf{p}}_H(t)$  read (in these cases the term  $(\partial \hat{O}(t)/\partial t)_H = 0$ )

$$\frac{\hat{\mathbf{p}}_H(t)}{m} \equiv \frac{\hat{\mathbf{p}}(t)}{m} + \hat{1} \int_{t_0}^t dt' \frac{\mathbf{F}(t')}{m}, \quad \text{and} \quad \mathbf{F}(t), \quad (30)$$

respectively. This is precisely what is obtained by differentiating with respect to time the explicit forms (27) of  $\hat{\mathbf{r}}_H(t)$  and  $\hat{\mathbf{p}}_H(t)$ .

5. As the analogous commutator of  $\hat{H}(t)$  with  $\mathbf{a} \cdot \hat{\mathbf{K}}$  is not a  $c$ -number, the derivative and of  $U_K(\mathbf{V}, t)$  and its commutator with  $\hat{H}(t)$  cannot be written in a similarly compact form.

6. The possibility of using the known solutions  $q^i(t) = q^i(t, q_0, p_0)$ ,  $p_i(t) = p_i(t, q_0, p_0)$  of the classical Hamilton's equations of motion to find directly the form of the Heisenberg picture operators relies implicitly on the fact that the initial data  $q_0^i$  and  $p_{i0}$  are good canonical variables (the function generating the canonical transformations from  $q^i(t)$ ,  $p_i(t)$  to  $q_0^i$  and  $p_{i0}$  is the appropriately understood action  $I$ ): if the system is quantized by promoting  $q_0^i$  and  $p_{i0}$  to the Schrödinger picture operators satisfying the standard commutation relations the relations  $q^i(t) = q^i(t, q_0, p_0)$ ,  $p_i(t) = p_i(t, q_0, p_0)$  in which  $q_0^i$  and  $p_{i0}$  are now operators become just the Heisenberg picture operators.

7. These relations determine  $U(t, t_0)$  only up to a (possibly time dependent) phase factor but are sufficient for our purpose.



The Heisenberg picture counterparts of the space-translations and boosts generators (15) and (16) are then given by

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{Q}}_H(t) &= U^\dagger(t, t_0) \hat{\mathbf{Q}}(t) U(t, t_0) \\ &= \hat{\mathbf{p}}_H(t) - \hat{1} \int_{t_0}^t dt' \mathbf{F}(t'),\end{aligned}\quad (31)$$

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{K}}_H(t) &= U^\dagger(t, t_0) \hat{\mathbf{K}}(t) U(t, t_0) \\ &= t \hat{\mathbf{p}}_H(t) - m \hat{\mathbf{r}}_H(t) - \hat{1} \int_{t_0}^t dt' t' \mathbf{F}(t').\end{aligned}\quad (32)$$

That  $\hat{\mathbf{Q}}_H(t)$  is in fact not dependent on time is readily seen by substituting in it the explicit form of  $\hat{\mathbf{p}}_H(t)$ . Showing that neither is  $\hat{\mathbf{K}}_H(t)$  boils down, after using in the right hand side the explicit forms of  $\hat{\mathbf{p}}_H(t)$  and  $\hat{\mathbf{r}}_H(t)$ , to the same manipulations which showed that classically the quantity  $\mathbf{K}$  is constant. Of course the same follows by checking that the right hand sides of the Heisenberg equations of motion (28) of  $\hat{\mathbf{Q}}_H(t)$  and  $\hat{\mathbf{K}}_H(t)$  vanish (the terms  $(\partial \hat{O}(t)/\partial t)_H$  are crucial for this). In more complicated theories, in which obtaining explicit forms of the Heisenberg picture operators is not possible, it is precisely checking (with the help of the trick (29) which makes it possible to use the properties of the Schrödinger picture operators which are always given) that the right hand side of the relevant Heisenberg equation of motion vanishes that tells us that a given (Hermitian) operator represents a quantity that is a constant of motion for a given system. For instance, it is in this way that in models of quantum field theory one checks the constancy of the observables represented by operators generating boosts.

Since the operators  $\hat{\mathbf{Q}}$  and  $\hat{\mathbf{K}}$ , despite representing conserved observables, do not commute with the Hamiltonian, the symmetries of the system they generate do not need to have direct implications for the energy spectrum of the system (at a fixed instant of time, if the force  $\mathbf{F}$  is not time independent). Nevertheless, in the considered simple situation the spectrum of the system translated in space is related to the original one. Indeed, using the obtained commutator (25) one easily finds that if  $\hat{H}(t)|\psi_E(t)\rangle = E(t)|\psi_E(t)\rangle$ , then

$$\begin{aligned}\hat{H}(t)U_Q(\mathbf{a}, t)|\psi_E(t)\rangle \\ = (E(t) - \mathbf{a} \cdot \mathbf{F}(t)) U_Q(\mathbf{a}, t)|\psi_E(t)\rangle.\end{aligned}\quad (33)$$

In other words, action the space translation operator  $U_Q(\mathbf{a}, t)$  on a Hamiltonian eigenvector<sup>8</sup> yields another

eigenvector but corresponding to another value of the system's energy: the energy of a Hamiltonian (instantaneous) eigenstate translated in space by  $\mathbf{a}$  is shifted by  $-\mathbf{a} \cdot \mathbf{F}(t)$  compared to the energy of the original state. This is easy to understand: in classical physics it is the force  $\mathbf{F}$  which matters and not the potential  $V(\mathbf{r})$  which can be changed by adding to it any (constant in space) function of time without affecting the system's motion. In the quantum theory it is the potential that replaces the force, but physical are in fact only differences of energies which are insensitive to changes of the potential by a (time dependent) constant. The system translated by  $\mathbf{a}$  should have the same absolute energies as the original one if instead of  $V = -\mathbf{r} \cdot \mathbf{F}$  it were placed in the potential  $V' = -(\mathbf{r} - \mathbf{a}) \cdot \mathbf{F}$ . Thus energies of the translated system with respect to the modified Hamiltonian would be the same as energies of the original system with respect to the original Hamiltonian and, hence, are shifted by  $-\mathbf{a} \cdot \mathbf{F}$  with respect to the original Hamiltonian.

Finally it is good to notice that the commutation relations of the generators of the symmetries: space translations, boosts and translations in time (if the Hamiltonian is time independent), obtained directly from the rules of composition of symmetry operations assuming that the group of these symmetries is realized in the Hilbert space nonprojectively are different than the ones found here.<sup>9</sup> This only shows that the symmetry group is represented projectively for algebraic reasons:<sup>10</sup> in some of the commutators there appear central charges (terms proportional to the unit operator). If symmetries of a system form the full Galileo group, the central charges in the commutators  $[\hat{H}, \hat{\mathbf{Q}}]$  and  $[\hat{H}, \hat{\mathbf{K}}]$  are forbidden by the Jacobi identities involving the generators of the rotations. Rotations, however, are not symmetries in the considered case and it is for this reason that the additional (with respect to the only one in the commutator  $[\hat{Q}^i, \hat{K}^j]$  which is allowed by the Jacobi identities involving generators of the full Galileo group and does appear in all known realizations of this group by operators in Hilbert spaces) central charges are possible. To be more precise: the operators  $\hat{\mathbf{J}}$  of the angular momentum can, of course, be constructed in the considered case and the Jacobi identities involving them are satisfied (they are algebraic relations which must always hold independently of the question of symmetries), but the forms of the commutators of  $\hat{\mathbf{J}}$

8. The considered Hamiltonian has in fact no eigenvectors in the proper Hilbert space (of normalizable states). Its spectrum is continuous and its (instantaneous) eigenvectors corresponding to energies  $E$  are generalized vectors (elements of the space dual to the proper Hilbert space) given in the position representation by the appropriate Airy (or Bessel) functions [4].

9. The procedure of finding the commutators of the symmetry generators on the basis of the composition rule of symmetry transformations is given e.g. in [9].

10. Even if the Hilbert space representation of the algebra of the symmetry group generators is free from central charges, the symmetry group itself may still be represented projectively for topological reasons, as happens with the rotation and Poincaré groups.

with the generators  $\hat{Q}$  and  $\hat{K}$  are different from those they would have, if they generated good symmetries: the operators  $\hat{Q}$  and  $\hat{K}$ , when acted upon by the operators of rotations, do not transform as true vectors (their parts proportional to the unit operator do not rotate) and it is for this reason that the Jacobi identities involving the operators  $\hat{J}$  do not forbid the central charges found in the commutators of the true generators (obtained with the help of the canonical quantization from the Noether theorem) of the symmetries of the system.

**Note added.** After writing this paper I became aware of the work [11] which discusses the same problem using the same example but formulating the Noether theorem in the framework of the Hamiltonian action principle rather than the Lagrangian one. Its authors do not, however, state explicitly the general condition for the existence of a symmetry of a quantum system and do not relate the algebra of the symmetry generators of the discussed system to the algebra of the Galileo group generators. For this reasons I believe that the present text may still be of some pedagogical value.

#### Literatura

- [1] R.P. Feynman, R.B. Leighton and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading Massachusetts, 1963.
- [2] L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Mechanics*, Fizmatlit, 2002.
- [3] L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Quantum Mechanics*, Fizmatlit, 2002.
- [4] L. Schiff, *Quantum Mechanics*, 3rd ed., McGraw-Hill Book Company, 1968; L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Kwantovaja Mechanika*, Fizmatlit, 2002.
- [5] A. Messiah, *Quantum Mechanics*, Dover Books on Physics, 2014.
- [6] J.P. Elliot and P.G. Dawber, *Symmetry in Physics*, The Macmillan Press Ltd, London 1979.
- [7] E. Merzbacher, *Quantum Mechanics*, John Wiley and Sons, 1970.
- [8] K. Konishi, G. Paffuti, *Quantum Mechanics, A New Introduction*, Oxford University Press, 2009.
- [9] S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields*, Vol. I, The Press Syndicate of the University of Cambridge, 1995.
- [10] L. Schiff, *Quantum Mechanics*, McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [11] D.B. Iyela and J. Govaerts, arXiv:2107.03831 [math-ph].

# Mirosław Łoś (1956-2024)

Maria Dobkowska

nauczycielka fizyki, Oddział Warszawski Polskiego Towarzystwa Fizycznego



Mirosław Łoś (archiwum autorki)

Mirosław Łoś ukończył studia na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii UMCS w Lublinie na kierunku fizyka – specjalność nauczycielska. W 2008 otrzymał świadectwo ukończenia studiów podyplomowych dla nauczycieli w zakresie matematyki na Wydziale Matematyki, Informatyki i Mechaniki UW. Od 1984 pracował nieprzerwanie jako nauczyciel fizyki i matematyki w Szkole Podstawowej im. Prezydenta Gabriela Narutowicza w Cząstkowie Mazowieckim. Od 2002 był nauczycielem dyplomowanym. Po wygaśnięciu ery gimnazjów dodatkowo uczył fizyki w LO w Nowym Dworze Mazowieckim. Ponadto był wieloletnim, cenionym doradcą metodycznym z zakresu matematyki i przyrody w Mazowieckim Samorządowym Centrum Doskonalenia Nauczycieli: <https://mscdn.home.pl/mscdn2018/index.php/pl/allcategories-pl-pl/41-warszawa-pozostale/270-miroslaw-los>

Mirosław Łoś był laureatem wielu nagród resortowych i przyznawanych przez władze lokalne, dwukrotnie otrzymał nagrodę PTF dla wyróżniających się nauczycieli. W latach 2000-2006 pracował w czasopiśmie dla nauczycieli *Fizyka w szkole* jako redaktor działów, a także jako redaktor prowadzący i merytoryczny wersji internetowej tego czasopisma. Od momentu powstania Centrum Nauki Kopernik aktywnie uczestniczył w projektach edukacyjnych; był prezydentem i uczestnikiem cy-

klicznej konferencji Pokazać–Przekazać. W latach 2006-2013 brał udział w pracach Komisji Nauczania Fizyki w Szkołach ZG PTF, a od 2014 był członkiem Kapituły Nagród PTF dla wyróżniających się nauczycieli, natomiast w latach 2018-2021 był członkiem Zarządu Głównego PTF.

To moje wspomnienie o Mirku nie będzie jego biografią, ponieważ nie mam odpowiedniej wiedzy ani materiałów. Znałam go jako popularyzatora fizyki, twórcę materiałów pomocniczych dla uczniów i nauczycieli, a także jako otwartego i życzliwego człowieka, po prostu przyjaciela. Gdy w 2017 kandydował do Zarządu Głównego PTF tak określił m.in. swoje zainteresowania i cele działania: *podnoszenie jakości nauczania fizyki w szkołach oraz zwiększanie pozycji fizyki w edukacji jako niezbędnego elementu kanonu wykształcenia współczesnych ludzi, a także: podniesienie pozycji zawodowej nauczycieli w związku z ich rolą w wyborze przez uczniów dalszych kierunków kształcenia oraz w utrzymaniu wysokiego poziomu nauczania fizyki w coraz trudniejszych warunkach.* I rzeczywiście dla Mirka popularyzacja fizyki i podnoszenie jakości nauczania były bardzo ważne. Zнали go polscy nauczyciele fizyki dzięki jego aktywnemu udziałowi jako prowadzącego zajęcia i wykłady podczas zjazdów, konferencji, seminariów i kursów dla nauczycieli fizyki. Jest autorem ogromnej liczby materiałów pomocniczych, publikacji i artykułów dotyczących nauczania fizyki i przedmiotów przyrodniczych takich jak: przedmiotowy system oceniania i plan wynikowy dla nauczycieli fizyki w gimnazjum, podręczniki multimedialne do fizyki dla gimnazjum czy zastosowanie aktywizujących metod nauczania w pracy dydaktycznej nauczyciela. W każdej ze swoich aktywności, a było ich poza nauczaniem wiele, skupiał się na pomocy nauczycielom w udoskonalaniu warsztatu pracy, a uczniom w przyswajaniu wiedzy. Biorąc udział w piknikach i festiwalach naukowych, gdzie wraz z uczniami prezentował ciekawe eksperymenty, przekonywał uczestników tych wydarzeń, że fizyka jest ciekawa i warto się nią zainteresować. Sam nieustannie starał się być na bieżąco zarówno w tym,

co dzieje się w naukach przyrodniczych, jak i w dydaktyce tych przedmiotów. Odbił około 1000 godzin kursów związanych z wykorzystaniem komputera i technologii informacyjnej (IT) w nauczaniu. Brał udział w kursach dla nauczycieli uaktualniających wiedzę z fizyki i astronomii, m.in.:

- trzytygodniowy kurs „High School Teacher 2005” w CERN w Genewie,
- tygodniowy kurs „Aktualny stan badań nad fuzją termojądrową w kontekście nauczania fizyki w szkołach” w Oxfordzie i Culham w Wielkiej Brytanii,
- tygodniowy kurs dla nauczycieli w U.S.Space and Rocket Center w Huntsville AL,
- tygodniowe warsztaty astronomiczne dla edukatorów w Europejskim Centrum Badań Kosmicznych i Technologii, Nordwijk, Holandia.



Mirosław Łoś i Maria Dobkowska na kursie w USA (archiwum autorki)

Poznałam Mirosława w połowie lat 90. XX w. podczas jednej z konferencji dla nauczycieli fizyki i zauważyłam, że – podobnie jak ja – przywiązuje wielką wagę do aktywnego uczestnictwa uczniów w lekcjach fizyki i że dla niego „lekcja bez pokazu czy doświadczenia to stracona lekcja”. Okazało się też, że metoda projektu jako jeden ze sposobów aktywizujących uczniów do samodzielnego badania zjawisk w przyrodzie, interesuje nas oboje. Wprowadzenie metody obowiązkowych projektów uczniowskich w gimnazjum stało się jednak dla nauczycieli trudnym problemem. Nauczyciele fizyki w Polsce nie byli przygotowani do realizowania projektów, więc Mirek podczas warsztatów w MSCDN próbował przekonywać, że metoda ta jest interesująca i pomaga uczniom zdobywać wiedzę. Przez kilkanaście lat istnienia Ogólnopolskiego Seminarium Dydaktyki Fizyki, organizowanego przez PTF we współpracy z Wydziałem Fizyki UW, Mirek był wykładowcą i prezerem ciekawych rozwiązań dydaktycznych w praktyce szkolnej. Na zajęcia Seminarium zapraszano też nauczycieli, którzy prezentowali zrealizowane przez siebie interesujące projekty. Po powstaniu gimnazjów Mirosław przekonywał nauczycieli fizyki do

pracy metodą projektów, podpowiadając przykłady projektów ciekawych i wartościowych dydaktycznie.

Kiedy Mirek przestał być doradcą metodycznym, nadal prowadził warsztaty, czasami z autorką niniejszego wspomnienia, podczas których prezentował najnowsze rozwiązania wspomagające nauczanie fizyki, takie jak np. zastosowanie w praktyce lekcyjnej technologii informacyjnej, a później smartfonów czy wreszcie ostatnio kodowania. Prowadzone przez niego zajęcia cieszyły się dużym zainteresowaniem, ponieważ zawsze był doskonale przygotowany, prowadził je w przyjacielskiej atmosferze i przynosił ciekawe pomoce naukowe, które gromadził uczestnicząc w międzynarodowych konferencjach i festiwalach. Organizatorem europejskich festiwali w formule *nauczyciele – nauczycielom* jest Europejska Organizacja Science on Stage z siedzibą w Berlinie. Będąc kilkakrotnie członkiem polskiej delegacji na te festiwale, Mirek miał okazję prezentować swoje ciekawe projekty edukacyjne europejskim nauczycielom przedmiotów przyrodniczych, ale także poznawał i podpatrywał, co ciekawego robią inni. Wracał z każdego takiego wyjazdu z głową pełną nowych pomysłów i z nową energią do przekazywania tego polskim nauczycielom. Na festiwalach Science on Stage można było nawiązać kontakty, które potem owocowały powstawaniem międzynarodowych grup nauczycieli przedmiotów przyrodniczych zaangażowanych w tworzenie materiałów pomocniczych dla nauczycieli. Mirek był zaangażowany w prace takich zespołów, ceniono jego wiedzę i doświadczenie. Efekty pracy tych grup były i są nadal prezentowane w formie zeszytów zawierających materiały pomocnicze i scenariusze zajęć ukazujące, jak można ciekawie realizować interdyscyplinarne projekty w czasie lekcji lub w ramach zajęć pozalekcyjnych. Broszury zawierające te materiały są dostępne na platformie Science on Stage Europe.

Oboje uważaliśmy, że bardzo ważne w nauczaniu są doświadczenia przeprowadzone na lekcjach w formie pokazów lub samodzielnej pracy badawczej uczniów, zatem zdecydowaliśmy się filmować doświadczenia i publikować te materiały jako pomoc dla nauczyciela. Zaprojektowane przez nas eksperymenty wykonywali uczniowie z naszych szkół, profesjonalni operatorzy zaś filmowali ich przebieg. Zarejestrowane wyniki liczbowe przeprowadzanych pomiarów pozwalały nauczycielom, pomimo braku niezbędnych przyrządów w szkole, uzupełniać lekcje o pokazy rzeczywistych doświadczeń; nauczyciel mógł tam też znaleźć przydatne komentarze teoretyczne i metodyczne. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne opublikowały serię tych filmów, które wydane na kasetach VHS i płytach CD, a także dostępne online, zalecane były jako materiały pomocnicze do podręczników i obejmowały



wszystkie działy podstawy programowej nauczania fizyki.

W Cząstkowie Mazowieckim, gdzie Mirosław Łoś przez wiele lat pracował jako nauczyciel fizyki, pozostał w pamięci tych, którzy z nim pracowali, jak i tych, których uczył, jako wyjątkowy człowiek, doskonały nauczyciel i wychowawca. Swoją pasją zarażał uczniów i ich rodziców, co obserwowaliśmy np. podczas Festiwalu Nauki Małego Człowieka na Politechnice Warszawskiej. Co roku na tym festiwalu stoisko szkoły, w której uczył Mirosław, cieszyło się dużym zainteresowaniem; doskonale przygotowani uczniowie zaciekawiali dzieci prezentując interesujące eksperymenty, zachęcali je do wspólnej „fizycznej” zabawy. Mirosław zgłaszał też udział jego szkoły w kolejnych edycjach Pikniku Naukowego organizowanego przez Polskie Radio i Centrum Nauki Kopernik i ta szkoła otrzymywała zawsze prestiżowe miejsce na swoje stanowisko, na którym uczniowie przedstawiali ciekawe pokazy i eksperymenty. To miejsce było zawsze wyjątkowe i oblegane, młodzież wspaniale się sprawdzała objaśniając eksperymenty i zapraszając odwiedzających do aktywnego w nich udziału.

Mirek był także pomysłodawcą i organizatorem gminnego konkursu na uczniowski eksperyment fizyczny lub przyrodniczy i udawało mu się corocznie zachęcać szkoły z pobliskich miejscowości do wzięcia w nim udziału. Odbyło się aż osiemnaście edycji tego konkursu, który trwał nieprzerwanie do 2020 roku. Wyjątkowym wydarzeniem był zawsze finał konkursu, na który do tej gminnej szkoły przyjeżdżali ze swoimi pokazami wybitni naukowcy i popularyzatorzy fizyki, doceniając w ten sposób zaangażowanie organizatora i przede wszystkim biorącej udział w konkursie młodzieży; dzięki Mirkowi w szkole prezentowali pokazy fizyczne pracownicy Centrum Nauki Kopernik, Polskiej Akademii Nauk i Uniwersytetu Warszawskiego. Sukces tego konkursu z wieloletnią tradycją był możliwy dzięki temu, że Mirosław kochał swoją pracę, życzliwie i z uwagą traktował uczniów, angażował się nie licząc czasu, który poświęcał na pracę z uczniami. Mirek był znany wśród polskich nauczycieli fizyki, a ze względu na profesjonalizm i doświadczenie był dla nich wielkim autorytetem. Bardzo często występował na konferencjach, prowadził warsztaty i wykłady, pozostawił wiele ważnych publikacji.

Ostatnim naszym wspólnym przedsięwzięciem było zorganizowanie Sesji Dydaktycznej podczas Nadzwyczajnego Zjazdu Fizyków Polskich odbywającego się w roku 2020 w Warszawie z okazji 100-lecia istnienia PTF.

Mirek był nie tylko doskonałym dydaktykiem o szerokiej wiedzy, ale też dobrym i miłym kolegą, nigdy nie odmawiał pomocy, chociaż miał wiele zajęć; był pogodny i dowcipny, o nikim nie mówił źle.

**Był moim przyjacielem.**

#### Udział Mirosława Łośa w Festiwalach Science on Stage

- Science on Stage 1, 2005 CERN, Genewa, Szwajcaria
- Science on Stage 2, 2007, Grenoble, Francja
- First national Science on Stage-Festival Berlin, 2008
- Science on Stage Festival, 2011, Kopenhaga, Dania; podczas festiwalu Mirosław Łoś wspólnie z autorką wspomnienia prowadzili warsztaty Visible–invisible; New technologies in science teaching, które zostały wysoko ocenione w ewaluacyjnych materiałach pofestiwalowych Project Catalogue, Science on Stage Festival, Copenhagen 16-19 April 2011, opis warsztatów: Maria Dobkowska, Mirosław Łoś Visible–invisible; New technologies in science teaching
- Science on Stage Festival 2013, Ślubice-Frankfurt (Oder)

#### Wybrane publikacje w formie zeszytów, biuletynów, materiałów konferencyjnych oraz opublikowane w internecie

1. Łoś Mirosław, Dobkowska Maria *Experiments from a Pupils' Competitions*, Science on Stage 2. Book of Project Summaries and National Reports. EIROforum European Science Teachers Initiative (ESTI), 2-6 kwietnia 2007, Grenoble, Francja.
2. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław: *Zastosowanie nowych narzędzi (kamera na podczerwień, termowizja) w nauczaniu przedmiotów przyrodniczych – jak motywować uczniów do nauki i pokonywać bariery w nauczaniu*, XVI Ogólnopolski Zjazd PSNPP „Fascynujący Wszechświat”. Streszczenia prezentacji pod red. Józefiny Turło, Polskie Stowarzyszenie Nauczycieli Przedmiotów Przyrodniczych, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztynskie Planetarium i Obserwatorium Astronomiczne, Olsztyn, 12-13 września 2009.
3. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław, *Effective teaching physics with IT – several examples of lessons using the animation, simulation, interactive exercises and movies with infrared camera*. Program and abstracts 9<sup>th</sup> International Conference on Computer Based Learning In Science – Modeling and Simulation in Inquiry-Oriented Learning Environments, OEIiZK, Warszawa, 4-7 lipca 2010.
4. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław, „Ciekawa fizyka z komputerem”, *Nauczanie Przedmiotów Przyrodniczych* tom 14 (2/2005), Polskie Stowarzyszenie Nauczycieli Przedmiotów Przyrodniczych.
5. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław, „Ciekawa fizyka z komputerem – warsztaty, *Pomagamy Uczyć* 1/2005, WSiP.
6. Łoś Mirosław, Dobkowska Maria *Experiments from a Pupils' Competitions* Science on Stage 2. Book of

- Project Summaries and National Reports. EIROforum European Science Teachers Initiative (ESTI), 2-6 kwietnia 2007, Grenoble, Francja.
7. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław *Influence of new tools (e.g. infrared camera) on the effectiveness of teaching in natural science*, Science on Stage Berlin 2008. Festival documentation Science on Stage Deutschland 2008: [http://science-on-stage.de/?p=4\\_1\\_3](http://science-on-stage.de/?p=4_1_3)
  8. Materiały z konferencji CBLIS 2010 [http://www.cblis2010.waw.pl/files/detailed\\_schedule\\_sessions.pdf](http://www.cblis2010.waw.pl/files/detailed_schedule_sessions.pdf)
  9. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław, *Kamera na podczerwień w nauczaniu przedmiotów przyrodniczych*. Portal edukacyjny WSiP, dział Edukacja Interaktywna 2008: <http://www.wsipnet.pl/edukacja/index.html?did=5&id=65>
  10. Project Catalogue, Science on Stage Festival, Copenhagen 16-19 April 2011, opis prowadzonych warsztatów "Visible-invisible; New technologies in science teaching" Maria Dobkowska, Mirosław Łoś.
  11. Materiały pomocnicze dla nauczycieli przedmiotów przyrodniczych przygotowane przez grupę nauczycieli z krajów europejskich w formule *teachers for teachers*, wydawane w formie zeszytów oraz opublikowane w wersji elektronicznej na platformie Science on Stage.eu: iStage „ICT in Science Teaching” 2012, iStage 2 „Smartphones in Science Teaching” 2014.
  12. Mirosław Łoś *Badaj, odkrywaj i myśl krytycznie – eksperymenty przyrodnicze warunkiem zrozumienia praw przyrody* w ramach Akademii Profesjonalnego Nauczyciela, MSCDN, Warszawa 2014.

#### Multimedia

1. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław, *Ciekawa fizyka w doświadczeniach*, płyta CD, WSiP S. A. Warszawa, marzec 2004.
2. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław, *Ciekawa fizyka. Ciekawe doświadczenia fizyczne*, kasetka VHS, WSiP S. A. Warszawa, marzec 2005.
3. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław, *Ciekawa fizyka. Ciekawe eksperymenty fizyczne. Zakres gimnazjum i szkół ponadgimnazjalnych*. Płyta VCD, WSiP Warszawa 2006.
4. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław *Fizyka i astronomia, gimnazjum cz. 1. Filmy, animacje, doświadczenia, ćwiczenia uczniowskie* WSiP, 2008.
5. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław *Fizyka w gimnazjum cz. 2 Animacje, interakcje, doświadczenia, ćwiczenia uczniowskie – film*, WSiP, 2009.
6. Dobkowska Maria, Łoś Mirosław, *Ciekawa fizyka*, WSiP, seria złożona z 3 płyt CD; każda płyta zawiera sfilmowane doświadczenia, animacje, interakcje, propozycje doświadczeń do samodzielnego wykonania przez ucznia, tablice fizyczne i słowniczek terminów fizycznych oraz scenariusz lekcji. Ta sama seria jako *Bliżej fizyki* wydawana przez WSiP od 2009 jako załącznik do podręcznika.

## Marianna (Maryla) Kraińska-Miszczak (1934–2024)

Józef Szudy\*

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Instytut Fizyki UMK



Niezwykle zasłużona dla polskiego środowiska fizyków optycznych Marianna Kraińska-Miszczak zmarła 13.06.2024., została pochowana na cmentarzu w Marysinie Wawerskim. Choć oficjalnie miała na imię Marianna, to lubiła gdy ją przyjaciele nazywali Marylą.

Urodziła się 09.04.1934 w Radziłowie, wsi (do 1870 roku posiadającej prawa miejskie) położonej na historycznym Mazowszu w województwie podlaskim, w powiecie grajewskim. W Grajewie uczęszczała do liceum ogólnokształcącego, w którym w roku 1951 uzyskała świadectwo maturalne. W tym samym roku rozpoczęła studia na kierunku fizyka na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Warszawskiego (UW). Szczęśliwie się złożyło, że dzięki energii prof. Stefana Pieńkowskiego, kierownika Katedry Fizyki Doświadczalnej, a także zaraz po wojnie rektora UW, doprowadzono w tym czasie do końca odbudowę zdevastowanego przez niemieckich okupantów gmachu fizyki przy ul. Hożej 69. W szczególności ukończono remont dużej auli, w której Maryla już

na pierwszym roku studiów mogła słuchać wykładów kursowych. Należała do tego pokolenia studentów, które miało okazję uczyć się na drugim roku na legendarne wykłady fizyki doświadczalnej samego Pieńkowskiego z pięknymi pokazami doświadczeń fizycznych, przygotowywanymi przez jego asystentów. Jednym z nich był Tadeusz Skaliński, późniejszy opiekun jej pracy magisterskiej, na podstawie której w 1955 roku otrzymała tytuł magistra.

W tym samym roku Maryla rozpoczęła pracę na stanowisku asystenta w Katedrze Fizyki Doświadczalnej UW, kierowanej po śmierci Pieńkowskiego formalnie przez Jerzego Pniewskiego, a faktycznie przez Skalińskiego, wtedy jeszcze magistra. Włączyła się wówczas w nurt prowadzonych tam badań spektroskopowych, które obejmowały eksperymenty dotyczące pompowania optycznego i podwójnego rezonansu (magnetyczno-optycznego). Była to nowa tematyka w ośrodku warszawskim, którą Skaliński zainicjował po powrocie ze stażu naukowego w laboratorium twórcy tej dziedziny Alfreda Kastlera w Paryżu. Pierwsze wyniki swych badań dotyczących atomu potasu opublikowała w pracy „Orientation of potassium atoms by optical pumping” (*Biul. PAN*, t.14, s. 223 (1966)). Dwie kolejne „Level crossing experiment on  $5^2P_{3/2}$  state of rubidium” (wspólnie z Ireną Bany, *Biul. PAN*, t. 14, s. 659 (1966)) oraz „Optical pumping and level crossing in alkali metal atoms” (*Biul. PAN*, t. 15, s. 595 (1967)) były poświęcone badaniom doświadczalnym dotyczącym spektroskopii przecinania poziomów w atomach metali alkalicznych. Uzyskane w tych badaniach wyniki stanowiły podstawę analiz teoretycznych, które następnie były podjęte w ośrodku warszawskim. Ponadto wyniki tych badań weszły w skład pracy doktorskiej Maryli *Pompowanie optyczne i przecinanie poziomów w parach potasu*, na podstawie której 23.01.1967 otrzymała dyplom doktora nauk fizycznych. Promotorem jej pracy był, wówczas już profesor, Tadeusz Skaliński. W następnym roku Maryla brała aktywny udział w międzynarodowej konferencji na temat pompowania optycznego i kształtu atomowych linii widmowych *Opti-*

---

\*ORCID: 0000-0001-7048-5435

*cal Pumping and Atomic Line Shapes* (OPALS), która odbyła się w Warszawie w dniach 25-30.06.1968, wygłaszając referat dotyczący wyników zawartych w jej pracy doktorskiej. W konferencji tej uczestniczyło wielu wybitnych fizyków optycznych z całego świata, wśród nich Alfred Kastler, który dwa lata wcześniej otrzymał nagrodę Nobla.

W następnych latach Maryla nawiązała współpracę z profesorem Ennio Arimondo z Pizy i wspólnie z nim rozwinęła ambitny program obejmujący prowadzenie badań doświadczalnych struktury nadsubtelnej stanu  $5^2P_{3/2}$  izotopu rubidu  $^{85}\text{Rb}$  przy użyciu metody *level crossing*. Wyniki tych eksperymentów zostały opublikowane w ich wspólnej pracy w *Journal of Physics B* (t. 8, s. 1613 (1975)). Następnie kontynuując współpracę z Arimondo opublikowała wraz z nim i Giovannim Moruzzim w czasopiśmie *Physics Letters A* (t. 326, s. 68 (1979)) artykuł „Rf shift for quantum transitions in optically pumped  $^{41}\text{K}$  vapour”, w którym opisano wyniki ich badań dotyczących wpływu pola o częstotliwości radiowej na przesunięcia przejść kwantowych w pompowanych optycznie parach potasu  $^{41}\text{K}$ . Badania zainicjowane w ramach współpracy z grupą włoską z Pizy, Maryla kontynuowała potem samodzielnie w swym warszawskim laboratorium na Hożej, analizowała pompowanie optyczne izotopu rubidu  $^{85}\text{Rb}$  stosując linię  $D_2$  o polaryzacji  $\pi$ . Wyniki tych analiz przedstawiła w dwóch pracach, które ukazały się w *Journal of Physics B* (t.12, s. 555 (1979) oraz t. 12, s. L.205 (1979)). Weszły one w skład jej rozprawy habilitacyjnej *Orientacja atomów alkalicznych światłem spolaryzowanym liniowo  $\pi$* , na podstawie której 08.10.1979 otrzymała stopień doktora habilitowanego nauk fizycznych.

Należy podkreślić, że oprócz prowadzenia prac naukowo-badawczych Maryla była aktywnym nauczycielem akademickim kierując przez wiele lat Drugą Pracownią Fizyczną Wydziału Fizyki UW. Do jej zasług w zakresie dydaktyki fizyki trzeba także zaliczyć to, że przetłumaczyła z angielskiego na język polski znakomity podręcznik Gordona Kemble'a Woodgate'a *Elementary atomic structure* (polski tytuł *Struktura atomu*, PWN, 1974), który do dziś cieszy się dużą popularnością wśród studentów i wykładowców na wszystkich wyższych uczelniach w Polsce.

Po habilitacji Maryla przeprowadziła ważny eksperyment, w którym dokonała pomiarów różnic natężeń składowych kołowo spolaryzowanej fluorescencji atomów metali alkalicznych wzbudzonej światłem spolaryzowanym liniowo (polaryzacja  $\pi$ ). To ciekawe doświadczenie zostało opisane w jej artykule „Decoupling in the  $^2P_{3/2}$  state and the  $D_2$  fluorescence of alkali metal atoms”, opublikowanym w *Optics Communications* (t. 38, s. 255 (1981)). W tym czasie Maryla nawiązała współpracę z Małgorzatą Głódź z Instytutu Fizyki PAN dotyczącą ba-

dań struktury nadsubtelnej różnych atomów. Wspólnie przeprowadziły nowatorskie eksperymenty, w których zastosowały metodę dudnień kwantowych z jednoczesnym wzbudzeniem dwufotonowym do wyznaczania stałych struktury nadsubtelnej i czasów życia stanów  $6^2D_{3/2}$  i  $6^2D_{5/2}$  izotopu potasu  $^{39}\text{K}$  oraz stanu  $6^2D_{3/2}$  izotopu potasu  $^{41}\text{K}$ . Wyniki tych eksperymentów zostały opisane w dwóch pracach, z których jedna „Hyperfine interaction constants and lifetime of the  $6^2D_{3/2}$  and  $6^2D_{5/2}$  states of the  $^{39}\text{K}$  measured by quantum beat method” została opublikowana w *Journal of Physics B* (t. 18, s. 1515 (1985)), druga zaś „Lifetime and hyperfine structure constants of the  $6^2D_{3/2}$  state in  $^{41}\text{K}$ ” w *Physics Letters A* (t. 110, s. 203 (1985)).

Maryla i Małgorzata Głódź kontynuowały współpracę w kolejnych latach dostarczając wielu niezwykle wartościowych rezultatów. Obie badaczki skupiły wówczas swoją uwagę na wysoko wzbudzonych poziomach rubidu, odpowiadających większym wartościom głównej liczby kwantowej  $n$ . Stosując metodę dudnień kwantowych w zerowym polu magnetycznym, przeprowadziły najpierw pomiary struktury nadsubtelnej dla poziomu  $10^2D_{5/2}$  izotopu  $^{87}\text{Rb}$ . Wyniki tych pomiarów zostały opisane w artykule opublikowanym w *Journal of Physics B* (t. 20, s. L541 (1987)). Następnie skupiły swoje zainteresowanie na trzech stanach izotopu rubidu  $^{87}\text{Rb}$ , odpowiadających głównej liczbie kwantowej  $n = 11, 12$  i  $13$ . Te stany wzbudzano za pomocą dwufotonowej absorpcji z pojedynczego podpoziomu nadsubtelnego stanu podstawowego, a następnie analizowano fluorescencję  $n^2D_{5/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ , co umożliwiło badaczkom wyznaczenie stałych oddziaływań magnetycznych dipolowych i elektrycznych kwadrupolowych w stanach  $n^2D_{5/2}$  badanego izotopu rubidu. Opis tego nowatorskiego eksperymentu wraz z wynikami pomiarów jest przedstawiony w pracy Małgorzaty Głódź i Marianny Kraińskiej-Miszczak „Measurements of magnetic-dipole and electric-quadrupole interaction constants of the 11, 12 and 13  $^2D_{5/2}$  states in  $^{87}\text{Rb}$  by the quantum-beat method” opublikowanej w *Journal of Physics B* (t. 22, s. 3109 (1989)). Kolejne eksperymenty dotyczyły stanów  $n^2D_{3/2}$  ( $n = 10, 11, 12$ ) izotopu  $^{87}\text{Rb}$  (*Physics Letters A*, t. 160, s. 85 (1991)) oraz stanów  $10^2D_{3/2}$  i  $11^2D_{3/2}$  izotopu  $^{85}\text{Rb}$  (*Acta Physica Polonica A*, t. 83, s. 161 (1993)). Ostatnia z tego cyklu prac, która ukazała się w 1994 roku, zawierała wyniki pomiarów parametrów struktury nadsubtelnej stanów  $9^2P_{3/2}$  i  $9^2D_{3/2}$  izotopu  $^{85}\text{Rb}$  rubidu (*Acta Physica Polonica A* t. 86, s. 343 (1994)).

Wymienione wyżej prace wzbudziły wielkie zainteresowanie i zapewniły międzynarodowe uznanie duetowi, jaki stanowiły Maryla Kraińska-Miszczak i Małgorzata Głódź. Miarą tego uznania jest fakt, że wyniki przeprowadzonych przez nie eksperymentów zostały szczegółowo



omówione w niedawno opublikowanym artykule przeglądowym w prestiżowym wydaniu *Journal of Physical and Chemical Reference Data* (t. 51, s. 043102 (2022)), którego autorami są Maria Allegrini i Ennio Arimondo z Università di Pisa oraz Luis A. Orozco z University of Maryland.

Od początku swej pracy na Hożej Maryla należała do Polskiego Towarzystwa Fizycznego, pełniąc w okresie jednej kadencji funkcję zastępcy sekretarza Zarządu Oddziału Warszawskiego PTF. Była członkiem Komitetu Organizacyjnego Międzynarodowej Konferencji OPALS, zorganizowanej w 1968 roku przez prof. Tadeusza Skałińskiego. Nie szczędziła swojego czasu dla działań mających znaczenie dla całego – nie tylko warszawskiego – środowiska naukowego. Dowodem na to jest jej udział (w latach 1986-1991) w pracach zespołu prof. Zdzisława Wilhelmięgo, kierownika Centralnego Programu Badań

Podstawowych, obejmującego znaczną część badań w zakresie nauk fizycznych prowadzonych w końcówce ery PRL i na początku III Rzeczypospolitej. Pamiętam z tego okresu Marylę jako osobę energicznie wspierającą środowisko fizyków optycznych z różnych ośrodków w Polsce w ich staraniach o przyznanie odpowiedniego finansowania. W ostatnich latach XX w. Maryla przystąpiła do Sekcji Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej (FAMO) Komitetu Fizyki PAN. Uczestniczyła w historycznym posiedzeniu tej Sekcji (03.09.1999), które zdecydowało o powstaniu w Toruniu Krajowego Laboratorium FAMO.

W 2002 roku Maryla przeszła na emeryturę. Smutno nam, gdy sobie teraz uświadomiamy, że Maryla odeszła już na zawsze. Jednak pamięć o Niej pozostanie wśród nas.

## Danuta Makowiec (1957-2024)



Danuta Makowiec z nagrodą im. prof. Karola Taylora (fot. Marek Makowiec)

Środowiska zajmujące się szeroko rozumianymi układami złożonymi boleśnie odczuły odejście w pełni sił twórczych naszej koleżanki profesor Danuty Makowiec kierowniczkii Zakładu Metod Matematycznych Fizyki w Instytucie Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego. Poniższa mozaika osobistych/emocjonalnych wspomnień przedstawia sylwetkę Danki i jej wpływ na nasze środowiska oczami każdego z nas z osobna i wszystkich razem. Niżej podpisany miał zaszczyt i przyjemność współorganizować tę spontaniczną akcję wynikającą z potrzeby serc i umysłów. Chcieliśmy dać świadectwo, jak niezwykłą osobowością była profesor Makowiec oraz jakim wsparciem i inspiracją było spotkanie jej na naszych drogach życiowych.

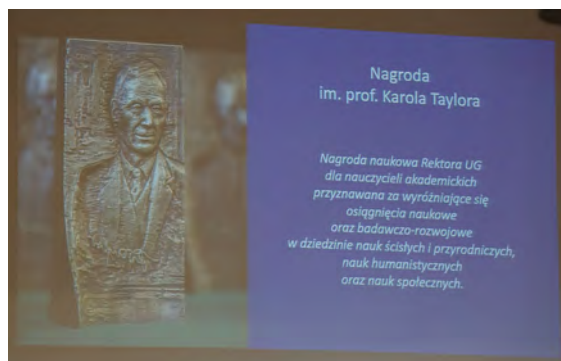
Niech mi wolno będzie (jako przewodniczącemu Sekcji Fizyka w Ekonomii i Naukach Społecznych (FENS) Polskiego Towarzystwa Fizycznego) przedstawić tu własne (bardzo wycinkowe) wspomnienie związane z aktywnością Danki w naszym środowisku.

Nasze drogi skrzyżowały się w pierwszej dekadzie tego stulecia, w okresie „rączkowania” Sekcji FENS w ramach PTF oraz świeżo utworzonej specjalności Metody Fizyki w Ekonomii (Ekonofizyka) na Wydziale Fi-

zyki Uniwersytetu Warszawskiego. Mogę powiedzieć, że wsparcie Danki w obu tych przedsięwzięciach było nadzwyczaj ważne zarówno od strony merytorycznej, jak i pragmatycznej.

W tamtym okresie moje zainteresowania były skierowane na dynamiczne przemiany fazowe – tematyka ta wydawała mi się szczególnie atrakcyjna także w kontekście wyzwań pochodzących spoza tradycyjnie rozumianej fizyki. Mam tutaj na myśli obszary, które dzisiaj należą już do ekonofizyki i socjofizyki, a wtedy były dopiero w wieku „niemowlęcym”. Z tamtego właśnie okresu pochodzi publikacja Danki z Piotrem Gnacińskim [1] dotycząca obecności oscylacji logarytmiczno-periodycznych na giełdzie i publikacja [2] z powyższym oraz Wiesławem Miklaszewskim, wskazująca na możliwość zastosowania podejść perkolacyjnych w tym obszarze. Prace te (wpisując się w zasadniczy nurt publikacji ekonofizycznych) uprzytomniły mi rzecz dzisiaj oczywistą, że istnieje wiele metod fizyki (zwłaszcza z obszaru fizyki statystycznej czy teorii układów dynamicznych) przygotowanych/otwartych do zastosowań wykraczających daleko poza samą tradycyjnie rozumianą fizykę. Ta interdyscyplinarna aktywność Danki była na tyle wspierająca, że w rezultacie umożliwiła mi zorganizowanie specjalności ekonofizycznej na Wydziale Fizyki UW w roku 2006.

W kontekście Sekcji FENS, trzeba podkreślić, że Danka była wybierana do Zarządu Sekcji w kolejnych kadencjach, poczynając od powstania Sekcji w roku 2004, i stała się od początku jej filarem. Wymownym wyrazem tej aktywności może być niezwykle udane 6. Ogól-



Definicja nagrody im. prof. Karola Taylora (fot. Marek Makowiec)

nopolskie Sympozjum Fizyka w Ekonomii i Naukach Społecznych (FENS) zorganizowane przez nią na Uniwersytecie Gdańskim w roku 2012 (<http://science24.com/event/fens2012/>). Pozwolę sobie przywołać jeden z głównych celów, jakie przyświecały temu Sympozjum, dobrane oddający interdyscyplinarne zainteresowania Danuty: Prezentacje metodyk i metodologii wywodzących się z nauk fizycznych, wykorzystujących modelowanie matematyczno-statystyczne oraz technologie informatyczne w naukach ekonomicznych (ekonofizyka) i społecznych (socjofizyka).

Muszę przyznać, że nie zdawałem sobie sprawy, jak bogate, wielokierunkowe były zainteresowania Danki. Uprzytomniłem to sobie dopiero teraz przeglądając nadesłane notki wspomnieniowe. Dlatego cieszę się, że niniejszy numer *Postępów Fizyki* chociaż w części przybliży czytelnikom fascynującą osobowość Danuty Makowiec.

[1] Piotr Gnaciński, Danuta Makowiec: *Another type of log-periodic oscillations on Polish stock market*. *Physica A* 344(1-2), 322-325 (2004).

[2] Danuta Makowiec, Piotr Gnaciński, Wiesław Miklaszewski: *Amplified imitation in percolation model of stock market*. *Physica A* 331(1-2) 269-278 (2004).

Ryszard Kutner

(Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski)

ryszard.kutner@fuw.edu.pl



Poznaliśmy się na początku lat 90. XX w. Ja byłem wtedy jeszcze asystentem w Instytucie Matematyki UG. Zacząłem tam pracować w 1990 po skończeniu studiów matematycznych na Uniwersytecie Wrocławskim. Moja praca magisterska dotyczyła nieprzemiennego rachunku prawdopodobieństwa. Po przyjeździe do Gdańska chciałem kontynuować badania dotyczące nieprzemiennych struktur matematycznych. Przez zupełny przypadek dowiedziałem się, że podobnymi tematami interesuje się wówczas docent Adam Majewski z IFTiA. Z czasem zaczęliśmy współpracować, a ja zacząłem być częstym gościem „za kratą”. I tak poznałem Dankę, wtedy jeszcze panią doktor, z którą od czasu do czasu zamienialiśmy słowo mijając się na korytarzu.

W roku 1998 byłem świeżo upieczonym doktorem matematyki (moim promotorem był prof. Majewski), a w Gdańsku przygotowywaliśmy się do dużej konferencji, której byliśmy gospodarzami. Była to kolejna z cyklu konferencji Quantum Probability. Współorganizatorami tej konferencji byli prof. Robert Alicki i prof. Adam Majewski (obaj z Gdańska) oraz prof. Marek Bożejko z Wrocławia (promotor mojej pracy magisterskiej). My z Danką byliśmy w lokalnym komitecie organizacyjnym

i zajmowaliśmy się wszelkimi drobiazgami organizacyjnymi, dbaliśmy o to, żeby projektor był sprawny, żeby wszyscy uczestnicy mieli zakwaterowanie czy też żeby programy zostały wydrukowane itp. Siłą rzeczy spędziliśmy ze sobą trochę czasu. Pamiętam rozmowy z tamtego czasu. Jako starsza koleżanka z fizycznego instytutu Danką wprowadzała mnie w meandry świata fizyki matematycznej. Dowiedziałem się, że interesuje się ekonofizyką, a jej prace dotyczą badania rynków finansowych metodami które pochodzą z teorii układów dynamicznych. To były początki rynku papierów wartościowych w Polsce. Jej badania wydały mi się bardzo ciekawe. Uderzyła mnie wtedy jej życzliwość i chęć pomocy.

W roku 2005 przenieśliśmy się z Instytutu Matematyki do IFTiA. Przydzielono mi pokój sąsiadujący z pokojem Danki. Od teraz widywaliśmy się na co dzień. Nie prowadziliśmy wspólnych badań. Moje zainteresowania oscylowały wokół matematycznych metod teorii informacji kwantowej, w szczególności odwzorowań dodatnich. W tym czasie Danką zajmowała się już automatami komórkowymi, z czasem zaczęła współpracować ze specjalistami ze świata medycznego. Zaczęła być znana jako badaczka zajmująca się modelowaniem matematycznym pracy serca. Jej pozycję potwierdzało organizowane przez nią seminarium Hard Heart w IFTiA, w którym uczestniczyło wielu naukowców z Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego, Politechniki Gdańskiej, a także z ośrodków naukowych spoza Trójmiasta. Pełniąc funkcję Kierownika Zakładu Metod Matematycznych Fizyki była moim bezpośrednim przełożonym. W latach 2007-2010 sprawowała funkcję prodziekana ds. studenckich. Nominację profesorską odebrała z rąk Prezydenta RP w roku 2012.

Czasami rozmawialiśmy, ot tak po koleżeńsku, w przerwach między zajęciami, najczęściej na korytarzu. Bo w IFTiA tak już jest, że rozmawia się na korytarzu. Różne to były rozmowy, nie zawsze o sprawach naukowych. Czasami opowiadałem o moich dzieciach, czasami wymienialiśmy się opiniami o polityce, o sytuacji na uczelni i wielu innych bardziej lub mniej ważnych sprawach. Oboje byliśmy raczej skowronkami, wcześniej przychodziliśmy do pracy i żartobliwie licytowaliśmy się, „kto wygrał”, pojawiając się wcześniej w Instytucie.

W roku 2017 nasi koledzy z Wydziału zajmujący się teorią informacji kwantowej odnieśli wielki sukces. Pod wodzą prof. Marka Żukowskiego zdobyli finansowanie Fundacji na rzecz Nauki Polskiej dla swojego projektu międzynarodowej agendy badawczej. W wyniku tego część z nich zaczęła pracować w Międzynarodowym Centrum Teorii Technologii Kwantowych przy Uniwersytecie Gdańskim. Zwolniło się stanowisko Dyrektora Instytutu, które dotychczas zajmował prof. Żukowski. W wyniku jednogłośnie poparcia wszystkich pracowników Danką została nowym Dyrektorem. Miałem zaszczyt

być w tym czasie jej zastępcą. Nie było to długie dyrektorowanie. Szybko zorientowała się, że nie jest w stanie pogodzić swoich badań z obowiązkami administracyjnymi. Mimo to, w krótkim czasie zdołała uporządkować wiele spraw. W roku 2018 objąłem stanowisko po niej i wtedy doceniłem ogrom pracy, którą wykonała.

A potem nastąpiła pandemia Covid 19. Przestaliśmy się widywać, bo nie wolno nam było przychodzić do pracy, a zajęcia ze studentami prowadziliśmy zdalnie. Od czasu do czasu spotykaliśmy się online na platformie Teams. To był trudny czas dla nas wszystkich, który odbił się na nas piętnem, z radością więc przyjmowaliśmy zdejmowanie kolejnych obostrzeń, możliwość przychodzenia do pracy i prowadzenia zajęć ze studentami „twarzą w twarz”.

Wtedy dowiedzieliśmy się, że Danka jest ciężko chora. Wtedy jeszcze nie wiedzieliśmy, co jej dokładnie dolega, ale domyślaliśmy się, że sytuacja jest poważna. Później wieści zaczęły dochodzić. Cieszyliśmy się, że jej walka z chorobą początkowo była pomyślna. Mimo konieczności kontynuowania uciążliwej terapii zaczęła pojawiać się w pracy.

W roku 2022 została uhonorowana Nagrodą Naukową Rektora Uniwersytetu Gdańskiego im. Profesora Karola Taylora. Jest to wyróżnienie naukowe najwyższej rangi na Uniwersytecie Gdańskim.

Niestety, mimo jej ogromnej determinacji i silnej woli walki, choroba pokonała Dankę. Został po niej pusty pokój obok mojego i nie ma już z kim się ścigać, kto będzie pierwszy w pracy...

*Marcin Marciniak*  
(Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki,  
Uniwersytet!Gdański)  
marcin.marciniak@ug.edu.pl

#### *Od całek Feynmana do modelowania serca*

Wiadomość o śmierci Danusi Makowiec zaskoczyła mnie, mimo że nie była niespodziewana. Ponad trzy lata obserwowałem jej zmagania z chorobą. Paradoksalnie był to w jej działalności naukowej i dydaktycznej okres wzmożonej aktywności. Spotykałem ją w tym okresie w Instytucie Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki Uniwersytetu Gdańskiego, gdzie oboje byliśmy zatrudnieni, stosunkowo rzadko, raz, może dwa razy w tygodniu, głównie, wtedy gdy prowadziła zajęcia dydaktyczne. Sprawiała wrażenie osoby bardzo żywotnej, chociaż bardzo zeszczupiała. Pracowała przeważnie zdalnie, ale bardzo wydajnie.

Danusię poznałem w drugiej połowie lat 70. XX w. Studiowaliśmy wtedy na kierunku Fizyka na Wydziale

Matematyki, Fizyki i Chemii UG. Była znakomitą studentką, co zostało uhonorowane Czerwoną Różą, prestiżową nagrodą z bogatymi tradycjami, przyznawaną najlepszym studentom i kołom naukowym na Pomorzu od 1962 roku. Specjalizowała się w fizyce teoretycznej.

Po ukończeniu studiów magisterskich rozpoczęła swoją karierę naukową od studiów doktoranckich, też na UG. Opiekował się nią prof. Robert Alicki. Rezultatem ich współpracy były m.in. prace [1] prezentujące wyniki z teorii całek po trajektoriach Feynmana. Artykuły te były kanwą rozprawy doktorskiej Danusi.

Po uzyskaniu stopnia doktora samodzielnie sterowała swoją aktywnością naukową, współpracując z dziesiątkami koleżanek i kolegów z całego świata. Była obdarzona wyjątkowym darem zjednywania sobie ludzi, więc naukowcy i studenci chętnie z nią współpracowali oraz wchodzili z nią i jej mężem Markiem w serdeczne prywatne relacje. Zajmowała się przede wszystkim modelami układów złożonych i ich zastosowaniami nie tylko w fizyce. Badane układy symulowała za pomocą automatów komórkowych. Szczególnie dużo uwagi poświęciła automatom komórkowym Tooma. Cykl prac, np. [2] na temat tego modelu stanowił jej rozprawę habilitacyjną, którą przedstawiła Radzie Wydziału Fizyki UJ. Za pomocą automatów komórkowych symulowała również ruch drogowy i do ostatniej chwili węzeł zatokowo-przedsińkowy serca, np. [3].

Jednak najbardziej okazałą cześć jej dorobku stanowią prace dotyczące analizy szeregów czasowych. Dane do analizy takich szeregów miały charakter ekonomiczny, np. notowania giełdowe [4], oraz przede wszystkim medyczny, np. odstępy RR pomiędzy dwoma kolejnymi załamkami R w zapisie EKG, które pozyskiwała od zaopieczonych pracowników Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego uczestniczących również w ich analizie i publikowaniu wyników, np. [5]. Stosowała różnorodne metody badania tych szeregów, od tradycyjnych statystycznych, przez graficzne [6] po entropowe [7], multifraktałne [8] i uczenie maszynowe [9]. Zajmowała się również modelami deterministycznymi, opisującymi różne aspekty pracy serca za pomocą równań różniczkowych, np. [10].

O bogactwie zainteresowań Danusi świadczą prace z dalekich od głównego nurtu jej zainteresowań dziedzin, np. z astrofizyki [11], teorii chaosu kwantowego [12] i biologii matematycznej (badała model Penny biologicznego starzenia [13]).

Danusia była przede wszystkim naukowczynią, ale również pracownikiem IFTiA angażującym się aktywnie w działalność organizacyjną i dydaktyczną. Pełniła z wyjątkową empatią funkcję prodziekana ds. studenckich swojego macierzystego wydziału świetnie dogadując się ze studentami, w których problemy głęboko się



wczuwała. Przez pewien czas kierowała również pracami IFTiA, gdy jednogłośnie została wybrana na stanowisko dyrektora.

Prawie o wszystkich nauczycielach akademickich mówi się, że sumiennie wykonują swoje obowiązki dydaktyczne, co na ogół niewiele znaczy. W wypadku Danusi słowo sumiennie to za mało. Zawsze podziwiałem jej umiejętność, dzisiaj bardzo cenioną, włączania studentów do jej bieżącej działalności naukowej. Pod jej kierunkiem i przy jej udziale powstało chyba kilkanaście artykułów i komunikatów konferencyjnych, których autorami lub współautorami byli studenci.

Jej działalność dydaktyczna sprowadzała się nie tylko do prowadzenia zajęć. W okresie swojej fascynacji zastosowaniami metod fizyki statystycznej w ekonomii wystąpiła z inicjatywą utworzenia na UG kierunku Ekonofizyka. Opracowała stosowny program studiów i uzgodniła szczegóły kooperacji z wydziałami ekonomicznymi. Niestety jej wysiłki zbiegły się z poważnym spadkiem naboru na kierunek fizyka, więc musieliśmy zrezygnować z uruchomienia tego interdyscyplinarnego kierunku.

Sukcesem natomiast zakończył się udział Danusi w tworzeniu kierunku Fizyka medyczna na UG. Jej dorobek naukowy w tej dziedzinie i współpraca z GUM były kluczowe w początkowej fazie prac nad utworzeniem tego kierunku. Od momentu jego uruchomienia prowadziła na nim zajęcia, opiekowała się licencjatami i magistrantami. Jej kompetencje naukowe i dydaktyczne były również wykorzystywane w procesie dydaktycznym na międzywydziałowym kierunku Bioinformatyka UG. W czasie swojej kariery zawodowej uzyskiwała tak poważne wyniki i umiejętności informatyczne, że w momencie tworzenia kierunku Informatyka na UG mogła wejść na pewien czas w skład jego minimum kadrowego.

Była pomysłodawcą cyklu międzynarodowych, rocznych spotkań naukowych Summer Solstice Conference poświęconych *układom złożonym*, które odbywały się w latach 2009-2023 (z wyjątkiem przerwy związanej z pandemią w latach 2020 i 2021). Wykazując się olbrzymim talentem organizacyjnym i zaangażowaniem, zorganizowała wraz ze współpracownikami pierwszą z nich w Gdańsku na UG w roku 2009 oraz dwie następne w latach 2018 i 2022. Doświadczenie organizacyjne zdobyła wcześniej, pełniąc ważną funkcję w zespole przygotowującym 37. Zjazd Fizyków Polskich w roku 2003.

Przez wiele ostatnich lat była liderem grupy Hard Heart skupiającej naukowców trójmiejskich (UG, GUM, PG), a także z różnych ośrodków polskich i zagranicznych, którzy modelowali i analizowali za pomocą narzędzi matematycznych rozmaite aspekty pracy serca i in-

nych organów. Członkowie grupy w czasie trwania roku akademickiego spotykali się co dwa tygodnie lub częściej w IFTiA. Każde spotkanie otwierało zawsze wystąpienie jednego z kilkunastu członków grupy lub zaproszonego gościa, które było wstępem do pogłębionej, często nadzwyczaj długiej dyskusji, moderowanej przez Danusię. Z czasem te seminaria stały się wizytówką IFTiA. Nawet w okresie pandemii odbywały się regularnie, tyle że zdalnie lub hybrydowo.

Tematyka naukowa, którą się zajmowała, wymagała bardzo zaawansowanych obliczeń komputerowych. Początkowo baza komputerowa IFTiA była żadna albo bardzo uboga. Danusia i inni pracownicy IFTiA musieli walczyć o środki na zakup sprzętu. Gdy nam się to udało na przełomie lat 80. i 90. XX w., zdecydowaliśmy się na zakup stacji roboczej HP, który niestety wymagał otrzymania zgody COCOM. Przygotowaliśmy stosowną dokumentację, w której opisaliśmy naszą działalność naukową, w tym automaty komórkowe (*cellular automata*), będące w tym czasie głównym polem działalności naukowej Danusi. Ku naszemu zaskoczeniu ten temat wzbudził wątpliwości urzędników COCOM (*Coordinating Committee for Multilateral Export Control*, Komitet Koordynacyjny Wielostronnej Kontroli Eksportu), którym skojarzył się z rodzącą się wówczas telefonią komórkową, będącą wtedy technologią objętą embargiem. Pamiętam, że Danusia musiała napisać elaborat wyjaśniający, do czego dokładnie używa tego pojęcia/obiektu informatycznego.

Obserwowałem i współuczestniczyłem w karierze naukowej oraz zawodowej Danusi jako kolega, współpracownik, przełożony i podwładny przez cały okres jej trwania. Myślę, że mimo jej przedwczesnego zakończenia, można jej działalność naukową nazwać bardzo owocną, wręcz bardzo efektywną. Świadczą o tym liczba cytowań, szczególnie prac interdyscyplinarnych z pogranicza fizyki i medycyny, oraz uznanie, jakim się cieszyła wśród kolegów i współpracowników.

Prywatnie była osobą ciepłą, pełną empatii, koleżeńską, bezkonfliktową i uczynną. Szkoda, że odeszła tak wcześnie.

- [1] R. Alicki, D. Makowiec, *J. Phys. A* **18** (1985) 3319, **20** (1987) 1075.
- [2] D. Makowiec, *J. Phys. A* **25** (1992) 1441, *Physica A* **172** (1991) 291, **234** (1996) 435, *Phys. Rev. E* **55** (1997) 6582, **56** (1997) 5195, **60** (1999) 3787.
- [3] D. Makowiec, *Int. J. Mod. Phys. C* **21** (2010) 107.
- [4] D. Makowiec, P. Gnaciński, W. Miklaszewski, *Physica A* **331** (2004) 269, D. Makowiec **334** (2004) 36, P. Gnaciński, D. Makowiec, **344** (2004) 322.
- [5] D. Makowiec, *et al*, *Physica A* **369** (2006) 632, **388** (2009) 3486.

- [6] A. Dudkowska, D. Makowiec, *Physica A* **336** (2004) 174
- [7] D. Makowiec, *et al*, *Entropy* **17** (2015) 1253.
- [8] D. Makowiec, *et al*, *Physiol. Meas.* **32** (2011) 1681, *EPL*, **94** (2011) 68005.
- [9] D. Makowiec, J. Wdowczyk, *Entropy* **21** (2019) 21.
- [10] A. Dudkowska, D. Makowiec, *J. Math. Biol.* **57** (2008) 111.
- [11] R. Alicki, E. Z. Musielak, J. Sikorski, D. Makowiec, *Astrophys. J.* **427** (1996) 919.
- [12] R. Alicki, D. Makowiec, W. Miklaszewski, *Phys. Rev. Lett.* **77** (1996) 838.
- [13] D. Makowiec, *Physica A* **245** (1997) 99, **289** (2001) 208, D. Makowiec, J. Dąbkowski, M. Groth, **273** (1999) 169, D. Makowiec, D. Stauffer, M. Zieliński, *Int. J. Mod. Phys. C* **12**, (2001) 1067.

Wiesław Miklaszewski  
(Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki,  
Uniwersytet Gdański)  
wieslaw.miklaszewski@ug.edu.pl

Dankę Makowiec poznałem pod koniec lat 70. XX w. Byłem wtedy młodym adiunktem w Zakładzie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Gdańskiego. Danka, studentka fizyki, już wtedy dała się poznać jako osoba pilna i bystra. Wyróżniający się studenci wyższych lat studiów zwyczajowo wybierali fizykę teoretyczną jako ten dział fizyki, w ramach którego zamierzali pisać pracę dyplomową. Danka wybrała fizykę teoretyczną i to jej zmatematyzowaną wersję.

Zatrudniona jako asystent, rozpoczęła swoje badania poświęcone analizie wybranych układów dynamicznych. Konsekwencją tego wyboru był jej doktorat dotyczący analizy wybranych układów dynamicznych. Był napisany z wykorzystaniem nowoczesnego aparatu matematycznego. Będąc pracownikiem Zakładu Fizyki Matematycznej w IFTiA (Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki) Danka brała aktywny udział w instytutowych seminariach. Jej naukowe zainteresowania nadal były poświęcone badaniom ewolucji wybranych układów, przy czym jej głównym narzędziem były teraz *automaty komórkowe*. (Przypomnijmy, że automaty komórkowe to koncepcja wprowadzona przez Johna von Neumanna jako uproszczony model fizyki świata rzeczywistego.) Badania te zaowocowały bardzo dobrą habilitacją, którą miałem przyjemność recenzować.

Modele automatów komórkowych są blisko związane z komputerową analizą układów dynamicznych. Stąd naturalnym w rozwoju naukowym Danki stało się zastosowanie analizy komputerowej do wybranych modeli

medycznych, głównie modeli związanych z kardiologią. W tym czasie na Wydziale Mat-Fiz-Inf i w IFTiA kształtowała się koncepcja nowego kierunku studiów: fizyka medyczna. Jak czas pokazał, studia te powstały, znalazły uznanie i cieszą się zainteresowaniem. Można więc powiedzieć, że prace naukowe Danki były bardzo związane ze zmieniającym się profilem fizyki na Uniwersytecie Gdańskim.

Wspomniane powyżej badania zaowocowały bardzo solidną profesurą Danuty Makowiec, którą jako dziekan, miałem przyjemność procedować.

Profesor Danuta Makowiec była nie tylko znakomitą uczoną, wybitną specjalistką, ale także osobą, która niezwykłą życzliwość godziła z wysokimi wymaganiami naukowymi. Była cenioną i szanowaną opiekunką naukową młodego pokolenia, świetną organizatorką pracy zespołowej. Jej życzliwość, pracowitość budziła szacunek i uznanie w środowisku akademickim, co między innymi zaowocowało powierzeniem jej ważnych funkcji: prodziekana ds. kształcenia i dyrektora IFTiA.

Władysław Adam Majewski  
(Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytet  
Gdański)  
fizwam@gmail.com

Dankę Makowiec (wtedy Boryszewską) poznałem jeszcze w czasie naszych wspólnych studiów na kierunku fizyki ówczesnego wydziału MatFizChem Uniwersytetu Gdańskiego. Niewątpliwie do głębszej znajomości przyczyniły się wspólne zainteresowania. Obydwoje wybraliśmy specjalizację fizyka teoretyczna. Było dużo wspólnych wykładów i zajęć. Ja pisałem pracę dyplomową u prof. Jana Furtaka, a Danka o ile pamiętam, u dzisiejszego prof. Roberta Alickiego. Uczestniczyliśmy również obydwój w obozie naukowym naszego roku w Chałupach, gdzie z powodzeniem prowadziliśmy pomiary hałasu na półwyspie Helskim.

Po studiach nasze drogi trochę się rozeszły. Danka rozpoczęła pracę w Zakładzie Fizyki Teoretycznej, gdzie wspinała się po stopniach kariery naukowej i dydaktycznej. Ja zacząłem pracę w Katedrze i Zakładzie Fizyki i Biofizyki ówczesnej Akademii Medycznej w Gdańsku, gdzie moje zainteresowania powędrowały automatycznie w stronę zastosowań medycznych oraz technicznych (ukończyłem równoległe informatykę na Politechnice Gdańskiej).

Nasze drogi naukowe ponownie się spotkały, gdy okazało się, że oboje interesujemy się zastosowaniami fizyki i matematyki w medycynie. I to jest ten aspekt działalności Danki, na który chciałbym zwrócić uwagę w tych krótkich wspomnieniach.

Po doktoracie i stażu zagranicznym (jeszcze w XX w.) zaangażowałem się w cykl konferencji KKZMBM (Krajowa Konferencja Zastosowań Matematyki w Biologii i Medycynie). Pierwsza KKZMBM odbyła się w Zakopanem w 1995 roku. Ja pierwszy raz wziąłem czynny udział w IV KKZMBM w 1998 roku w Zwierzyńcu. Konferencje te były dla mnie bardzo ciekawe, dotyczyły bowiem interesujących mnie (a jak się okazało później również Dankę) zagadnień dotyczących zastosowań wyrafinowanych metod matematycznych do rozwiązywania problemów w medycynie i biologii. Co ważniejsze podczas konferencji można było wysłuchać bardzo ciekawych referatów opisujących nie tylko czystą matematykę, ale też problemy matematyczne do rozwiązania w medycynie i biologii (od immunologii po rozrost drzew) oraz poszerzyć swoją wiedzę z zakresu biologii i medycyny. W kolejnych latach konferencje były organizowane w różnych miejscach atrakcyjnych pod względem turystycznym, co nie było bez znaczenia. W roku 2009 zostałem członkiem Komitetu Naukowego KKZMBM, a w 2013 sam zorganizowałem kolejną konferencję z tego cyklu w Jastrzębiej Górze. I właśnie w 2013 roku Danka, jako *invited speaker* wygłosiła referat *Pacemaker rhythm by cellular automata*. Wystąpienie Danki spotkało się z dużym zainteresowaniem, chociaż trzeba przyznać, że nasze prezentacje (tzn. prezentacje fizyków) odbiegały od typowych prezentacji matematycznych, w których autorzy skupiali się na ścisłym matematycznym podejściu w stylu twierdzenie, dowód itd. Po tej konferencji nasza współpraca rozwinęła się. W 2016 roku w Sandomierzu Danka pojawiła się z referatem: D. Makowiec, Z. Struzik; *Tensor of self-transfer entropy in estimates of changes in heart rhythm related to aging*, a od roku 2017 prof. Danuta Makowiec została członkiem Komitetu Naukowego naszej konferencji.

Kontynuowaliśmy tę naszą współpracę na wielu polach. Brałem parę razy udział w spotkaniach grupy Hard Heart na Uniwersytecie Gdańskim, wygłaszając referat na spotkaniu w 2013. Często kontaktowaliśmy się, wprawdzie głównie telefonicznie, ale nie tylko, w sprawach naukowych i dydaktycznych, jak również prywatnych. Danka podsyłała mi kandydatów na doktorantów (choć w praktyce niewiele z tego wyszło, ale to zdecydowanie wina studentów). Konsultowaliśmy się wzajemnie, szczególnie podczas otwierania specjalizacji Fizyka medyczna na UG.

Na koniec chciałbym wspomnieć również o częstych spotkaniach w Gdańskiej Filharmonii Bałtyckiej (Danka z mężem Markiem, a ja z żoną Anią), gdzie razem zgłębiałiśmy tajniki muzyki klasycznej (głównie podczas Gdańskiej Jesieni Pianistycznej). Pamiętam do dzisiaj nasze dyskusje podczas oceny utworów wybitnych polskich kompozytorów, takich jak Krzysztof Penderecki czy Witold Lutosławski.

Wspominam Dankę jako wspaniałego naukowca, ale też wspaniałego życzliwego mi człowieka, na którego zawsze można było liczyć.

Piotr Boguś  
(Katedra Fizyki i Biofizyki,  
Gdański Uniwersytet Medyczny)  
piotr.bogus@gumed.edu.pl

*A remarkable scientist, physicist and a friend*

It was late in the afternoon of 22 April 2010 that I received my first email from Danuta. I did not expect that this would be the start one of the most exciting and fruitful collaborations of my career. Danuta asked about our then recent work on the heteroscedasticity of heart rate [1]. I responded immediately even though I was at the point of departure from Tokyo due to my frequent travelling to Taiwan at the time. Things clicked immediately: Danuta most kindly invited me to Gdansk in September 2010. After exchanging just a few emails with her, it transpired, that the scope of subjects to discuss was just begging for such a visit.

Indeed, Danuta contacted me at the best possible moment, when I was looking for new collaborators in the field of cardiophysics [2]. She had been working in this field for some time, since the early 2000's. Her first publication in this area concerned the Seidel-Herzel model [3]. This was a very good start, followed by her publications on long-range correlations [4] and multifractality [5, 6] in heart rate, all these subjects overlapping with my areas of interest and publications.

At the time, Danuta was becoming fascinated by the application of network approaches to the analysis of time series [7, 8, 9, 10]. We started to work on records of heart rate variability (HRV) after heart transplant [11]. This resulted in several manuscripts and the subject was continued for a number of years [12, 13]. Danuta was truly an exceptional person in her devotion to science and in turning highest level science into publications.

But perhaps the luckiest moment of the start of our collaboration came when we decided to apply for an NCN grant for her collaboration with me. At times, it felt like a family effort to prepare this proposal – Danuta and Marek (who never minded driving 800 km in one go) returning from a conference in the south of Poland “dropped in on the way” to Gdansk to the house of my parents, where I was on holiday, to discuss the details of the proposal. Followed by several near sleepless nights and days of hard work, the proposal was ready. And it received funding, which substantially helped our concerted efforts to collaborate. Coincidentally the name of the grant was musically themed too (HARMONIA) as were

many of the NCN grants at the time (2012) and possibly to this day.

Music apart, now writing this ‘in memoriam’ I can hardly believe that so much happened so quickly, to such depths of friendship and collaboration – simply an unforgettable lifetime experience. The truly familial attitude of Danuta was complemented by her husband Marek, who was her constant companion and support. Every time I visited Gdansk I was warmly invited to their house, which was filled with thousands of owls, thousands of stories, tons of joy and fun! Not to forget cakes – yes, the cakes (brand name withheld ;-)).

Network analysis of time series structure was not the only advanced method Danuta put into practice. She was constantly pursuing new methodologies. We had many discussions when new ideas were just popping up. When I came up with an idea of generalised index, she immediately wrote some of the formulas and proposed an alternative interpretation. This is why there are two publications with very similarly sounding titles but very different albeit complementary content [14, 15].

And there were endless other ideas which we explored together. Danuta encouraged me to embark on methods of symbolic analysis of time series. While this approach stemmed from the work on network representations of time series complexity, we explored entropy properties of symbolic representations. This resulted in a number manuscripts well received in scientific community [16, 17, 18].

Danuta’s determination was truly admirable. She genuinely intended to work towards utilising scientific research for medical practice. Since I have often leaned towards a more “pure” science, she consistently “pushed” our work towards applied physics. I still remember how she expressed her motivation “to somehow help these people” when I presented something pretty abstract. I think that from perspective of several years of our collaboration, this was a very good setup for productively balancing both points of view.

I thoroughly enjoyed her enthusiasm and dedication to exploring new ideas. This was accompanied by some very hard work on her side. She genuinely liked programming and data analysis. And she was not afraid of a challenge. When Python emerged as a platform of choice, she “jumped” on it. And she fought through Matlab, at roughly the same time – she disliked it but had the will and determination to overcome the learning curve to make it work. Essentially, in the later years of our collaboration she was juggling platforms and programming languages, full of remarkable enthusiasm. This was always done with complete rigour, which led to us writing more and more advanced manuscripts together. Based

on her meticulous effort, there are too many to mention, so here I mention but a few representative ones in order to highlight some of the key areas of our work together.

Danuta had a favourite field that she did not want to put on a shelf even when our work on heart rate analysis was going at full speed and demanded huge amounts of effort from her. This field was automata. This subject was one of the last that we discussed together and turned into a couple of remarkable manuscripts. We had huge plans for following them up, sadly, after an unfairly rejected grant proposal, the momentum was lost, never to return again. I genuinely believe that had we been granted some minimum funding for this work on modelling of the sinoatrial node (SAN) using advanced hybrid automata [19, 20, 21], we would have substantially developed this emerging direction of cardiophysics. It was still a few years left before I learned of Danuta’s illness.

Danuta continued working on her beloved field of physics methods for medicine while bravely fighting with brutal illness. Slowly, I witnessed her heartbreaking admissions that she has less and less strength to do what she loved so much... Everyone who knew her knows how much science lost with her passing. For me she was an exceptional person. Sadly, we never published some of the most advanced work. Perhaps I will manage to complete it, but without discussions with Danuta it will not be fun anymore.

- [1] [https://www.researchgate.net/publication/5851798\\_Estimator\\_of\\_a\\_non-Gaussian\\_parameter\\_in\\_multiplicative\\_log-normal\\_models](https://www.researchgate.net/publication/5851798_Estimator_of_a_non-Gaussian_parameter_in_multiplicative_log-normal_models)
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Cardiophysics>
- [3] [https://www.researchgate.net/publication/5781034\\_SeidelHerzel\\_model\\_of\\_human\\_baroreflex\\_in\\_cardiorespiratory\\_system\\_with\\_stochastic\\_delays](https://www.researchgate.net/publication/5781034_SeidelHerzel_model_of_human_baroreflex_in_cardiorespiratory_system_with_stochastic_delays)
- [4] [https://www.researchgate.net/publication/222410456\\_Long-range\\_dependencies\\_in\\_heart\\_rate\\_signals-revisited](https://www.researchgate.net/publication/222410456_Long-range_dependencies_in_heart_rate_signals-revisited)
- [5] [https://www.researchgate.net/publication/251251345\\_Autonomic\\_heart\\_rate\\_control\\_by\\_multifractal\\_tools](https://www.researchgate.net/publication/251251345_Autonomic_heart_rate_control_by_multifractal_tools)
- [6] [https://www.researchgate.net/publication/231153944\\_Reading\\_multifractal\\_spectra\\_Aging\\_by\\_multifractal\\_analysis\\_of\\_heart\\_rate](https://www.researchgate.net/publication/231153944_Reading_multifractal_spectra_Aging_by_multifractal_analysis_of_heart_rate)
- [7] [https://www.researchgate.net/publication/269656728\\_Community\\_Structure\\_in\\_Network\\_Representation\\_of\\_Increments\\_in\\_Beat-to-beat\\_Time\\_Intervals\\_of\\_the\\_Heart\\_in\\_Patients\\_After\\_Heart\\_Transplantation](https://www.researchgate.net/publication/269656728_Community_Structure_in_Network_Representation_of_Increments_in_Beat-to-beat_Time_Intervals_of_the_Heart_in_Patients_After_Heart_Transplantation)



- [8] [https://www.researchgate.net/publication/264085041\\_Visualization\\_of\\_short-term\\_heart\\_period\\_variability\\_with\\_network\\_tools\\_as\\_a\\_method\\_for\\_quantifying\\_autonomic\\_drive](https://www.researchgate.net/publication/264085041_Visualization_of_short-term_heart_period_variability_with_network_tools_as_a_method_for_quantifying_autonomic_drive)
- [9] [https://www.researchgate.net/publication/257602422\\_Complexity\\_of\\_the\\_heart\\_rhythm\\_after\\_heart\\_transplantation\\_by\\_entropy\\_of\\_transition\\_network\\_for\\_RR-increments\\_of\\_RR\\_time\\_intervals\\_between\\_heartbeats](https://www.researchgate.net/publication/257602422_Complexity_of_the_heart_rhythm_after_heart_transplantation_by_entropy_of_transition_network_for_RR-increments_of_RR_time_intervals_between_heartbeats)
- [10] [https://www.researchgate.net/publication/269297585\\_Network\\_approach\\_to\\_increments\\_of\\_RR-intervals\\_for\\_visualization\\_of\\_dynamics\\_of\\_cardiac\\_regulation](https://www.researchgate.net/publication/269297585_Network_approach_to_increments_of_RR-intervals_for_visualization_of_dynamics_of_cardiac_regulation)
- [11] [https://www.researchgate.net/publication/276034858\\_Transition\\_Network\\_Entropy\\_in\\_Characterization\\_of\\_Complexity\\_of\\_Heart\\_Rhythm\\_After\\_Heart\\_Transplantation](https://www.researchgate.net/publication/276034858_Transition_Network_Entropy_in_Characterization_of_Complexity_of_Heart_Rhythm_After_Heart_Transplantation)
- [12] [https://www.researchgate.net/publication/300425889\\_Network\\_tools\\_for\\_tracing\\_the\\_dynamics\\_of\\_heart\\_rate\\_after\\_cardiac\\_transplantation](https://www.researchgate.net/publication/300425889_Network_tools_for_tracing_the_dynamics_of_heart_rate_after_cardiac_transplantation)
- [13] [https://www.researchgate.net/publication/297656450\\_Visualization\\_of\\_Heart\\_Rate\\_Variability\\_of\\_Long-Term\\_Heart\\_Transplant\\_Patient\\_by\\_Transition\\_Networks\\_A\\_Case\\_Report](https://www.researchgate.net/publication/297656450_Visualization_of_Heart_Rate_Variability_of_Long-Term_Heart_Transplant_Patient_by_Transition_Networks_A_Case_Report)
- [14] [https://www.researchgate.net/publication/311243845\\_Multistructure\\_index\\_in\\_revealing\\_complexity\\_of\\_regulatory\\_mechanisms\\_of\\_human\\_cardiovascular\\_system\\_at\\_rest\\_and\\_orthostatic\\_stress\\_in\\_healthy\\_humans](https://www.researchgate.net/publication/311243845_Multistructure_index_in_revealing_complexity_of_regulatory_mechanisms_of_human_cardiovascular_system_at_rest_and_orthostatic_stress_in_healthy_humans)
- [15] [https://www.researchgate.net/publication/276076382\\_Generalised\\_heart\\_rate\\_statistics\\_reveal\\_neurally\\_mediated\\_homeostasis\\_transients](https://www.researchgate.net/publication/276076382_Generalised_heart_rate_statistics_reveal_neurally_mediated_homeostasis_transients)
- [16] [https://www.researchgate.net/publication/308842521\\_Causal\\_relationships\\_in\\_the\\_variability\\_of\\_cardiovascular\\_system\\_evoked\\_by\\_orthostatic\\_stress\\_by\\_transfer\\_entropy](https://www.researchgate.net/publication/308842521_Causal_relationships_in_the_variability_of_cardiovascular_system_evoked_by_orthostatic_stress_by_transfer_entropy)
- [17] [https://www.researchgate.net/publication/276857701\\_Entropic\\_Measures\\_of\\_Complexity\\_of\\_Short-Term\\_Dynamics\\_of\\_Nocturnal\\_Heartbeats\\_in\\_an\\_Aging\\_Population](https://www.researchgate.net/publication/276857701_Entropic_Measures_of_Complexity_of_Short-Term_Dynamics_of_Nocturnal_Heartbeats_in_an_Aging_Population)
- [18] [https://www.researchgate.net/publication/314269901\\_Complexity\\_of\\_cardiovascular\\_rhythms\\_during\\_head-up\\_tilt\\_test\\_by\\_entropy\\_of\\_patterns](https://www.researchgate.net/publication/314269901_Complexity_of_cardiovascular_rhythms_during_head-up_tilt_test_by_entropy_of_patterns)
- [19] [https://www.researchgate.net/publication/330378347\\_Heart\\_Rhythm\\_Insights\\_Into\\_Structural\\_Remodeling\\_in\\_Atrial\\_Tissue\\_Timed\\_Automata\\_Approach](https://www.researchgate.net/publication/330378347_Heart_Rhythm_Insights_Into_Structural_Remodeling_in_Atrial_Tissue_Timed_Automata_Approach)
- [20] [https://www.researchgate.net/publication/332212017\\_Hybrid\\_Automata\\_Approach\\_in\\_Modeling\\_the\\_Role\\_of\\_Pathways\\_Between\\_Sinoatrial\\_Node\\_the\\_Heart\\_Pacemaker\\_and\\_Atrium](https://www.researchgate.net/publication/332212017_Hybrid_Automata_Approach_in_Modeling_the_Role_of_Pathways_Between_Sinoatrial_Node_the_Heart_Pacemaker_and_Atrium)

- [21] [https://www.researchgate.net/publication/330844022\\_Impact\\_of\\_Limits\\_in\\_Pathways\\_Between\\_Sinoatrial\\_Node\\_and\\_Atrium\\_on\\_Heart\\_Rhythm\\_by\\_Timed\\_Automata\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/330844022_Impact_of_Limits_in_Pathways_Between_Sinoatrial_Node_and_Atrium_on_Heart_Rhythm_by_Timed_Automata_Model)

Zbigniew R. Struzik  
(The University of Tokyo)  
z.r.struzik@p.u-tokyo.ac.jp

Danutę Makowiec poznałem będąc studentem czwartego roku fizyki na Uniwersytecie Gdańskim. Korzystałem wówczas z pracowni komputerowej z komputerem UNIX-owym pracującym pod systemem operacyjnym HP-UX. Do stacji roboczej podłączony był jako terminal komputer klasy PC XT z dyskiem twardym 20 MB. Dysk ten często się zacinał, co uniemożliwiało uruchomienie komputera. Na szczęście naprzeciwko pracowni znajdował się gabinet Danusi. Jedynie Danusia potrafiła długopisem uruchomić dysk twardy i z jej pomocy często korzystałem.

Na początku XXI w. Danuta Makowiec interesowała się ekonofizyką. Zorganizowała cykl seminariów w których udział, oprócz fizyków, brali także ekonomiści z Uniwersytetu Gdańskiego. We współpracy z Danutą opublikowaliśmy artykuł *Another type of log-periodic oscillations on Polish stock market* [1]. Zidentyfikowaliśmy nowy typ oscylacji wartości indeksów WIG i WIRR na Giełdzie Papierów Wartościowych w Warszawie. Zaobserwowane przez nas oscylacje utrzymywały się przez okres około jednego roku. Opis matematyczny odkrytych oscylacji odpowiada zjawiskom krytycznym w fizyce. Ten sam typ oscylacji opisuje np. trzęsienia ziemi. Publikacja ta była cytowana 33 razy.

Danusia była zawsze otwarta na kontakty z innymi naukowcami, często z dziedzin odległych od fizyki teoretycznej. Organizowała seminaria i konferencje, w których uczestniczyłem lub pomagałem w ich organizacji. Zawsze była życzliwym człowiekiem, do którego można było zwrócić się o pomoc.

- [1] Gnaciński P., Makowiec D., 2004, *Physica A*, **344**, 322.

Piotr Gnaciński  
(Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki, Wydział  
Matematyki, Fizyki i Informatyki, Uniwersytet Gdański)  
piotr.gnacinski@ug.edu.pl

Danuta Makowiec – jedna z najważniejszych postaci w moim życiu. Z perspektywy czasu i oddalenia chcę zobaczyć ją i napisać o niej jak najbardziej obiektywnie, zbliżyć się do uniwersalnej prawdy na jej temat. Rozmawiam z ludźmi, przeczesuję dawne notatki, szukam we własnej dziurawej pamięci. Ostatecznie muszę pogodzić

się z faktem, że dysponuję tylko tym z czego zbudowany jest świat opowieści, czyli subiektywnym obrazem Danusi przefiltrowanym przez moje doświadczenia, moją drogę życiową i, siłą rzeczy, obciążony błędem konfirmacji. Dlatego też w roku 2024 piszę o niej Danusia, chociaż zanim się nią stała była dla mnie Panią Profesor, a później Danką. Pisząc ten tekst jestem w wieku Danusi, kiedy spotkałam ją po raz pierwszy. Dopiero teraz mam szansę zrozumieć ją bardziej jako badaczkę. Danusia dołożyła swoje ważne cegiełki do ogólnej podstawowej wiedzy budowanej przez ludzkość. Zbudowała też środowisko sprzyjające przyjaznej dyskusji i wymianie idei. Z mojego punktu widzenia równie ważnym aspektem jej pracy akademickiej było wspieranie młodego pokolenia w dążeniu do dojrzałości. Na moim własnym przykładzie mogę opisać relację mistrz–uczeń, którą Danusia zbudowała ze mną. Kilkuletnią pracę prof. Makowiec z jej doktorantką mogę zobrazować znów jedynie subiektywnie podsumowując efekty, które ostatecznie osiągnęłam.

Do naszego spotkania poprowadziły nas podobne potrzeby. Danusia miała silnie rozwiniętą ciekawość poznawczą, wybierała tematy badań które wynikały z jej szerokich zainteresowań i, jak sądzę, sprawiały jej przyjemność. Połączył nas zapal do tej samej idei, w tym przypadku była to idea rozpalająca ciekawość badaczy w latach 90. XX w. – szukania porządku w pozornie nieuporządkowanych systemach. To było paliwo umożliwiające naszą kilkuletnią bliską współpracę, której owocem było kilka artykułów [1-6] i moja praca doktorska.

Moje zainteresowanie złożonością rozpoczęło się od lektury dwóch książek: *Czy Bóg gra w kości* (I. Stewart, 1996) i *Granice złożoności* (P. Coveney i R. Highfield, 1997). W podobnym czasie, jako studentka na Wydziale Fizyki i Matematyki UG, trafiłam na wykład dr. hab. Andrzeja Posiewnika dotyczący chaosu deterministycznego. Możliwość praktycznego zastosowania teorii złożoności była dla mnie najciekawszym jej aspektem, zwłaszcza w kontekście układów biologicznych. W ten sposób rozpoczęłam pracę w niewielkiej grupie badawczej, gdzie przygotowywałam pracę magisterską. Moim promotorem był Andrzej Posiewnik a współpracownikiem i kolegą Jakub Dąbkowski. W tym okresie nie miałam okazji współpracować osobiście z prof. Makowiec, ale jako że uczestniczyła ona w dyskusjach i pracach nad nieliniowymi układami dynamicznymi w Instytucie Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki UG [8], miała pośredni wpływ również na moje pierwsze badania. W ramach pracy magisterskiej miałam pierwszy kontakt z danymi biomedycznymi, były to szeregi czasowe interwałów RR pozyskane dzięki współpracy mojego promotora z dr. n. med. Andrzejem Kubasikiem, kierownikiem Zakładu Diagnostyki Chorób Serca Akademii Medycznej w Gdańsku.

Po ukończeniu studiów skupiłam się na życiu rodzinnym i podjęłam pracę poza Akademią. Po kilku latach jednak ciekawość rozpalona w czasie studiów, chęć zrozumienia i zbadania złożoności układów, wspaniała teoria, której zaledwie dotknęłam przy pisaniu pracy magisterskiej, skierowały mnie do Instytutu Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki UG. Danuta Makowiec przyjęła mnie jako swoją pierwszą doktorantkę i w ten sposób rozpoczęła się nasza wspólna droga badawcza. Profesor zaprosiła też do współpracy prof. dr. hab. med. Andrzeja Rynkiewicza z I Kliniki Kardiologii Akademii Medycznej w Gdańsku. W ten sposób poznałam jego (wówczas) doktoranta Rafała Gałąskę, z którym współpracowałam blisko podczas prac nad moim doktoratem. W tym czasie mogłam po raz pierwszy doświadczyć dobrodziejstwa wynikającego z bardzo ważnej kompetencji i cechy charakteru Danusi, tj. otwartości i zapraszania do badań szerokiej grupy ludzi, dzięki czemu możliwe było zbudowanie interdyscyplinarnej grupy badaczy wspierających się wzajemnie w dążeniu do wspólnego celu.

Jaką osobą była Danusia Makowiec? Na pewno wielowymiarową, a ja miałam okazję poznać tylko kilka z nich.

Profesor Danuta Makowiec – wspierająca mentorka, nie pozwalająca na przeciętność, pchająca do doskonałości, pokazująca drogę, stawiająca pytania. Krytyka, którą od niej dostawałam i ciągle podnoszona poprzeczka były najlepszymi prezentami, treningiem przed kolejnymi coraz trudniejszymi wyzwaniem, które podejmowałam później już sama.

Danka, dziewczyna z głową pełną pomysłów. Dziewczyna, która będąc nastolatką wyszła poza strefę komfortu, opuściła dom rodzinny i wyruszyła do miasta, żeby studiować nieoczywisty dla kobiety, trudny kierunek. Dziewczyna, która osiągnęła w świecie akademickim najwyższy możliwy tytuł naukowy. Osiągnęła, ponieważ swój talent i inteligencję połączyła z dziecięcą ciekawością świata, pracowitością i wytrwałością ważną zwłaszcza w sytuacjach trudnych, a takie pojawiają się na drodze każdego.

Danusia, szczególnie mi bliska kobieta rozumiejąca prozę życia codziennego, ale nie pozwalająca mi uczynić zeń wymówkę. Wierząca w mój potencjał bardziej, niż ja sama. Niepozwalająca mi na to, żebym przestała realizować marzenia naukowe, za co jestem jej szczególnie wdzięczna. Chciałabym oddać jej przynajmniej część tej dobrej energii, którą od niej dostawałam. Wiem, że z kolei ona dostała ją od innych, a ja mam obowiązek przekazywać wiedzę, metody pracy i energię twórczą kolejnym młodym osobom, na których życiowej drodze się znalazłam. Danusia dzieliła się swoimi zasobami, chciała żeby szły dalej w świat. To jest nieczęsto spotykana odwaga

i wiara w ludzi, że można i trzeba uwalniać swoje pomysły bez zbytniego przywiązywania się do ich autorstwa.

Danusia była – odkąd ją poznałam – i nadal jest dla mnie wzorem, do którego chcę się choć trochę zbliżyć. Wiem, że to wszystko co od niej dostałam – przede wszystkim relacja, którą z perspektywy czasu ośmielałam się nazwać przyjaźnią intelektualną – pozwoliło mi się rozwinąć i dojść do miejsca, w którym teraz jestem i które mi się podoba. Mając obecnie własne doświadczenia takich przyjaźni z moimi z kolei studentkami i studentami, wiem, że czasami to działa w dwie strony. I mam cichutką nadzieję, że dla Danusi – mojej mentorki – inwestycja w mój rozwój była również w pewnym stopniu rozwijająca.

To wspomnienie dedykuję moim studentkom i studentom, z którymi staram się dzielić zasobami otrzymanymi od wszystkich moich nauczycieli i mentorów, profesorek i profesorów z Polski i świata, środowiska IFTIA, a najwięcej od Danuty Makowiec.

- [1] Dudkowska A., Makowiec D., Sleep and wake phase of heart beat dynamics by artificial insymmetrised patterns (2004) *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 336 (1-2), pp. 174-180.
- [2] Makowiec D., Gałaska R., Dudkowska A., Rynkiewicz A., Zwierz M., Long-range dependencies in heart rate signals-revisited (2006) *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 369 (2), pp. 632-644.
- [3] Makowiec D., Dudkowska A., Zwierz M., Gałaska R., Rynkiewicz A., Scale invariant properties in heart rate signals, (2006) *Acta Physica Polonica B*, 37 (5), pp. 1627-1639.
- [4] Gałaska R., Makowiec D., Dudkowska A., Koprowski A., Chlebus K., Wdowczyk-Szulc J., Rynkiewicz A. Comparison of wavelet transform modulus maxima and multifractal detrended fluctuation analysis of heart rate in patients with systolic dysfunction of left ventricle (2008) *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 13 (2), pp. 155-164.
- [5] Dudkowska A., Makowiec D., Seidel-Herzel model of human baroreflex in cardiorespiratory system with stochastic delays (2008) *Journal of Mathematical Biology*, 57 (1), pp. 111 – 137.
- [6] Makowiec D., Dudkowska A., Gałaska R., Rynkiewicz A. Multifractal estimates of monofractality in RR-heart series in power spectrum ranges (2009) *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 388 (17), pp. 3486-3502.
- [7] Makowiec D., Dudkowska A., Gałaska R., Rynkiewicz A., Wdowczyk-Szulc J., Monofractality in RR heart rate by multifractal tools (2009) *Acta Physica Polonica B*, 40 (5), pp. 1527-1547.
- [8] Makowiec, Danuta, and Andrzej Posiewnik. Analysis of nonlinear Schrödinger equation for spin, *Physics Letters A* 207.1-2 (1995): 37-41.
- [9] H. Seidel, H. Herzel, Bifurcations in a nonlinear model of the baroreceptor-cardiac reflex, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Volume 115, Issues 1-2, 1998, pp.145-160.

*Aleksandra Dudkowska*  
(Instytut Budownictwa Wodnego  
Polskiej Akademii Nauk)



Nasza współpraca z Danutą rozpoczęła się od planu powołania interdyscyplinarnego seminarium, które łączyłoby gdańskich uczonych różnych specjalności zainteresowanych studiami nad dynamiką rytmu serca. I tak, od października 2008 roku, w gościnnych progach Instytutu Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki Uniwersytetu Gdańskiego rozpoczęły się cotygodniowe spotkania. O ile w pierwszym roku działalności miały one charakter bardziej szkoleniowy, z referatami magistrantek i doktorantek, o tyle już w kolejnym roku akademickim 2008/2009 przeobraziły się w regularne seminarium naukowe pod nazwą Hard Heart [1].

Seminarium prowadzone było przez Danutę, a nasze wsparcie polegało przede wszystkim na sugerowaniu od czasu do czasu tematów i prelegentów. Wspomnieć należy o znaczącej roli organizacyjnej w tym przedsięwzięciu doktorantki Danuty – mgr Doroty Wejer, która była m. in. odpowiedzialna za prowadzenie strony internetowej. Z perspektywy czasu uznać można, że seminarium Hard Heart było znaczącym wydarzeniem naukowym w środowisku gdańskim, w czym wielką zasługą Danuty, która potrafiła sprawnie nim administrować i przyciągać wartościowych wykładowców.

Danuta była osobą o niezwykle szerokich horyzontach naukowych. Ten fakt znajdował odbicie w bogatej i różnorodnej tematyce seminarium, która mając układ sercowo-naczyniowy jako motyw przewodni, wychodziła niekiedy daleko poza ten zakres. Dyskutowaliśmy oczywiście o badaniu zmienności rytmu serca u pacjentów z chorobami układu sercowo-naczyniowego, ale także o różnorodnych metodach matematycznych stosowanych lub możliwych do zaaplikowania w kardiologii, o miarach złożoności, teorii chaosu, wykorzystaniu uczenia maszynowego. Czasem zajmowaliśmy się fizjologią, a w szczególności regulacją układu sercowo-naczyniowego i oddychania. Innym razem uwaga poświęcona była problematyce pomiaru wielkości biofizycznych i przygotowaniu danych do analiz. Lista możliwych do dyskusji tematów praktycznie nie była zamknięta.

Danuta miała wyjątkowy dar inicjowania współpracy i łączenia naukowców z odległych światów. Nasze spotkania stały się forum wymiany myśli i źródłem inspiracji dla szerokiej grupy matematyków, fizyków, inżynierów, fizjologów i lekarzy zarówno ze środowiska gdańskiego, jak i spoza niego. Zasięg seminarium był międzynarodowy, co dotyczyło słuchaczy i prelegentów, w tym wielu wybitnych gości z zagranicy.

Z inicjatywy Danuty, jeszcze przed pandemią Covid seminarium odbywało się w formie hybrydowej, co umożliwiała uczestnictwo również przedstawicielom odległych ośrodków. Niejako wyprzedziło ono ideę uczelni Farenheita, stając się forum interdyscyplinarnej współpracy między trzema głównymi uczelniami Trójmiasta: Gdańskim Uniwersytetem Medycznym, Uniwersytetem Gdańskim i Politechniką Gdańską [2].

Danuta była naukowczynią, której bardzo zależało na dogłębnym zrozumieniu badanych problemów, na dotarciu do ich sedna i odkryciu wszelkich niuansów studiowanych zjawisk. Dlatego często seminaria przekształcały się w burzliwe dyskusje, w których usiłowaliśmy spojrzeć na dane zagadnienie z perspektywy różnych dziedzin nauki. W pamięci pozostaną nader interesujące sesje z prof. Tomaszem Wierzbą z GUM, który w odpowiedzi na pytania nasze i Danuty z wielką pasją i zaangażowaniem tłumaczył zawile mechanizmy fizjologiczne leżące u podłoża badanych przez nas zjawisk. Fakt, że Danuta zawsze witała nas, jak w domu, kawą i ciastkami (bardzo często – makowcem!) sprzyjał długim i wartościowym wymianom myśli.

Wymiernym efektem seminarium były rozprawy doktorskie i habilitacyjne o interdyscyplinarnym charakterze oraz publikacje naukowe, powstałe na kanwie referatów. Były one poświęcone przede wszystkim wykorzystaniu najnowszych metod nieliniowych w opisie, diagnozowaniu i prognozowaniu m. in. omdleń, nadciśnienia, udaru, migotania przedsionków czy też niewydolności serca, w tym badania chorych po transplantacji serca. Wyniki, które wykuły się w ramach naszych spotkań prezentowaliśmy też na licznych konferencjach krajowych i międzynarodowych, a szczególnie nam bliskie były znakomite warsztaty Cardiology meets Physics and Mathematics odbywające się w ramach Konferencji Asocjacji Elektrokardiologii Nieinwazyjnej i Telemedycyny Polskiego Towarzystwa Kardiologicznego w Zakopanem (znane jako Kasprowisko a wcześniej Kościelisko) oraz renomowane konferencje pod patronatem ESGCO (European Study Group on Cardiovascular Oscillations). Trzeba też dodać, że po ważnych konferencjach Danuta zawsze organizowała specjalne spotkanie, żeby przedyskutować najciekawsze doniesienia. Podobnie, po każdych wakacjach cykl seminariów zaczynał się od „remanentu”, ponieważ od uprawiania nauki nie ma przerw i na początku

roku akademickiego wracaliśmy z nowymi inspiracjami i planami do omówienia.

Danuta widziała potrzebę kształcenia młodych ludzi, którzy mieliby zarówno wykształcenie ścisłe, jak i wiedzę o procesach fizjologicznych. Z jej inicjatywy powstało Laboratorium Elektrofizjologiczne, w którym studenci Fizyki Medycznej UG mają możliwość pracy z aparaturą do rejestracji sygnałów takich jak EKG, puls, oddech czy EEG (czyli właśnie tych, o których dyskutowaliśmy na seminariach), zarówno w praktyce klinicznej, jak i w badaniach naukowych. Dzięki temu absolwent Fizyki medycznej zna „od podszewki” sprzęt i charakterystykę tego typu sygnałów medycznych.

Danuta posiadała szeroki krąg współautorów [3], a wśród osób, z którymi współpracowała w ostatnich latach szczególnie intensywnie, byli: prof. Zbigniew Struzik, dr Joanna Wdowczyk i mgr Dorota Wejer. My również mieliśmy szczęście współdziałać z Danutą, wspólnie poszerzając stan wiedzy z pogranicza medycyny, fizyki i matematyki. Wspomnijmy tu, bardzo szkicowo, o wybranych wynikach uzyskanych przez Danutę w ramach tej współpracy.

Jednym z ważnych kierunków badań było zastosowanie różnorodnych metod nieliniowych do porównania nocnej zmienności rytmu serca u zdrowych osób i u pacjentów po przeszczepieniu serca, co pozwala na unikalną (ze względu na zniszczenia połączeń nerwowych w trakcie przeszczepu) możliwość oceny wpływu układu autonomicznego na regulację rytmu serca (seria prac z prof. Z. Struzikiem i kardiologami z GUM, m. in. z dr. J. Wdowczyk i prof. M. Gruchałą). W szczególności zaobserwowano, że, paradoksalnie, większa zmienność rytmu serca wiąże się z gorszym rokowaniem u pacjentów z przeszczepionym sercem [4].

Omdlenia stanowią duży problem społeczny i kliniczny; prace z Danutą to jedne z pierwszych systematycznych badań obejmujących analizę zmienności rytmu serca w trakcie *testów pochyleniowych*, w których zastosowano miary złożoności oparte na entropii i dynamice symbolicznej, do zaproponowania wyjaśnienia ich mechanizmu [5, 6, 7].

Wspólnie z Danutą badaliśmy również niezwykle ciekawe zjawisko asymetrii rytmu serca, związane z różnym rozkładem przyspieszeń i zwolnień. Pogłębiającą analizę tego fenomenu przy użyciu wzorców porządkowych przedstawiliśmy w pracy [8].

Starzenie się organizmu wciąż jest procesem, który wymyka się kompleksowemu opisowi. Za pomocą odpowiednio dobranych narzędzi geometrycznych zespół kierowany przez Danutę zidentyfikował związane z wiekiem zmiany w dynamice rytmu serca: od dużej różnorodności w wieku 20 lat, po silną antypersystencję zbliżoną do



dynamiki wahadła, która staje się dominująca u osób po osiemdziesiątym roku życia [9].

Jednym z ciekawszych osiągnięć zespołu Danuty jest konstrukcja i wykorzystanie w analizie rytmu serca i ciśnienia tętniczego nowego narzędzia matematycznego, *indeksu MI (multistructure index)* będącego miarą służącą do oceny struktury zwolnień i przyspieszeń rytmu serca i ciśnienia. MI jest uogólnieniem istniejących miar stosowanych do badania asymetrii rytmu serca, ale ma uniwersalny charakter i może być wykorzystywany w analizie dowolnych serii czasowych [10].

We współpracy naukowej dwie cechy Danuty wyróżniały ją szczególnie: po pierwsze była ona wielką erudytką, zawsze na bieżąco ze wszystkimi najnowszymi doniesieniami naukowymi, które nieustannie śledziła. Co ważne, opis nawet bardzo skomplikowanych metod fizycznych potrafiła przełożyć na język zrozumiały dla medyków. Jednocześnie sama starała się jak najlepiej poznać złożone mechanizmy regulacji układu sercowo-naczyniowego. Po drugie, wielkie wrażenie robiła jej niezwykła rzetelność i staranność w prowadzonych badaniach. Stoi nam przed oczyma Danuta pochylona nad setkami wydrukowanych stron z wykresami EKG i ciśnienia, które były przez nią najpierw skrupulatnie przeglądane i oceniane, diagram po diagramie, zanim sięgała po narzędzia do automatycznej analizy. Dzięki takiemu podejściu zatwierdzone przez nią do dalszych badań dane cechowały się najwyższym poziomem wiarygodności.

Danuta z wielkim zapałem i energią włączała się w różne inicjatywy i zawsze można było na nią liczyć. Tak było np. w projekcie *Centrum Zastosowań Matematyki* realizowanym na PG. Danuta nie tylko zgodziła się zostać członkinią rady naukowej, ale aktywnie współuczestniczyła w planowaniu i realizacji różnych ambitnych przedsięwzięć akademickich [11].

Nasza znajomość z Danutą miała wymiar nie tylko naukowy, ale też prywatny i niejednokrotnie mieliśmy wielką przyjemność spotykać się z nią i jej mężem Markiem (z wykształcenia również fizykiem) na niwie towarzyskiej. Jej przedwczesne odejście jest bolesną stratą, którą trudno zaakceptować. Czasami, gdy zmagamy się z jakimś trudnym naukowym problemem, wciąż przychodzi nam na myśl, żeby zadzwonić do Danuty i zapytać o jej opinię... Pozostanie ona w naszej pamięci jako świetny naukowiec i wspomniały człowiek.

- [1] Seminarium Hard Heart, <https://hardheart.ug.edu.pl>
- [2] Entropia w badaniach kardiologicznych, film z cyklu „Nauka to ludzie” <https://naukatoludzie.gumed.edu.pl/entropia-w-badaniach-kardiologicznych>
- [3] Danuta Makowiec, profil na ResearchGate, <https://www.researchgate.net/profile/Danuta-Makowiec/research>

- [4] J. Wdowczyk, D. Makowiec, M. Gruchała, D. Wejer, Z.R. Struzik, Dynamical landscape of heart rhythm in long-term heart transplant recipients: A way to discern erratic rhythms, *Front. Physiol.* 9:274, 2018.
- [5] B. Graff, G. Graff, D. Makowiec, A. Kaczkowska, D. Wejer, S. Budrejko, D. Kozłowski, K. Narkiewicz, Entropy measures in the assessment of heart rate variability in patients with cardiodepressive vasovagal syncope, *Entropy* 17(3), 1007-1022, 2015.
- [6] D. Makowiec, D. Wejer, B. Graff, Z.R. Struzik, Dynamical pattern representation of cardiovascular couplings evoked by head-up tilt test, *Entropy* 20(4): 235, 2018.
- [7] D. Wejer, B. Graff, D. Makowiec, S. Budrejko, Z.R. Struzik, Complexity of cardiovascular rhythms during head-up tilt test by entropy of patterns, *Physiol. Meas.* 38(5):819-832, 2017.
- [8] G. Graff, B. Graff, A. Kaczkowska, D. Makowiec, J. M. Amigo, J. Piskorski, K. Narkiewicz and P. Guzik, Ordinal pattern statistics for the assessment of heart rate variability, *Eur Phys J-Spec. Top.* 222, 525-534, 2013.
- [9] D. Makowiec, D. Wejer, A. Kaczkowska, M. Żarczyńska-Buchowiecka, ZR Struzik, Chronographic Imprint of Age-Induced Alterations in Heart Rate Dynamical Organization, *Front. Physiol.* 2015;6:201.
- [10] D. Makowiec, B. Graff, Z.R. Struzik, Multistructure index characterization of heart rate and systolic blood pressure reveals precursory signs of syncope, *Sci. Rep.* 7(1): 419, 2017.
- [11] A. Bartłomiejczyk, G. Graff, O Centrum Zastosowań Matematyki, *Math. Appl.* 41(2), Article 2, 2013.

Beata Graff

(Klinika Nadciśnienia Tętniczego i Diabetologii  
Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego)

[beata.graff@gumed.edu.pl](mailto:beata.graff@gumed.edu.pl)

Grzegorz Graff

(Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej  
Politechniki Gdańskiej)

[grzegorz.graff@pg.edu.pl](mailto:grzegorz.graff@pg.edu.pl)

Profesor Danutę Makowiec poznałam w 2013 roku dzięki znajomości z prof. Grzegorzem Graffem i jego żoną dr Beatą Graff. Wymiana refleksji z Grzegorzem na temat moich zainteresowań analizą sygnałów biomedycznych przy konferencyjnym ognisku w Będlewie zaowocowała dla mnie szczerą relacją naukową z gdańskim środowiskiem zainteresowanym analizą sygnałów, skupionym wokół Danki, która tworzyła w tym czasie grupę Hard Heart.

Danka zaprosiła mnie na seminarium, żebym opowiedziała o sygnałach rejestrowanych przy testach pochyleniowych przeprowadzanych na urządzeniu Task Force Monitor. Spotkanie było długie i pomimo upływu czasu mam z niego jedno wyraźne wspomnienie Danki, która słuchała z uwagą, robiła notatki. Dla mnie, młodej wówczas osoby, takie skupienie i docenienie mojej pracy było ogromnym wyróżnieniem. A Danka właśnie taka była, skoncentrowana na prelegencie niezależnie od tego czy był wybitnym specjalistą, czy początkującym badaczem. Dla Danki ważne było, co ma do powiedzenia. Podczas konferencyjnych sesji też skrupulatnie notowała, a w pokonferencyjnych seminariach wracała do wystąpień, wskazywała, co było ciekawe i czego trzeba się nauczyć. Ciągle chciała się uczyć, nie przechodziła obojętnie wobec nowych propozycji analiz, nowych metod. Czasem w luźniej rozmowie mówiła, co by chciała poznać, spróbować, wykorzystać i w krótkim czasie zrobiła na ten temat seminarium. Temat zgłębniony, przeanalizowany i profesjonalnie skomentowany. Imponowała nam wszystkim tym zapalem, siłą i pracowitością. W czasie kiedy zakładała Hard Heart, seminaria i spotkania na uczelniach odbywały się tylko stacjonarnie; dla mnie dojazd do Gdańska co środę nie był możliwy, więc łączyłam się z grupą przez Skype. Dzisiaj to normalny sposób organizowania spotkań, wówczas było to pionierskie rozwiązanie i jestem za nie Dance bardzo wdzięczna. Mam głębokie przekonanie, że gdyby nie grupa Hard Heart, to moje naukowe losy potoczyłyby się inaczej; możliwość stałego kontaktu z intensywnie pracującym zespołem, dyskusja i wymiana doświadczeń była dla mnie ogromnym wsparciem w realizacji własnych projektów. Zainspirowana grupą Hard Heart sama organizuję w mojej Katedrze seminaria. Zdalnie uczestniczyła w nich również Danka.

Poza kontaktem w grupie widywałyśmy się również na konferencjach i wówczas był czas także na rozmowy bardziej osobiste, trochę o życiu, trochę o kłopotach. Z tych konferencyjnych, prywatnych spotkań mam w głowie i na zdjęciach Dankę i jej męża Marka, który był przy niej zawsze i trudno by było nie zauważyć wyjątkowości ich wzajemnej relacji niezmiennej w zdrowiu i w chorobie.

Choroba... Właśnie choroba, która przedwcześnie zabrała nam Danusię, była dla niej trudnym doświadczeniem, ale ona się nie poddawała, pokazywała nam wszystkim, że choroba nie zwalnia z niczego, że nadal należy robić to, co się kocha... Do końca.

Nasze ostateczne spotkanie było dla mnie wyjątkowe, Danka przyjechała z Markiem na konferencję, którą organizowałam w Bydgoszczy. Pomimo prośb, by po prostu była i nie trudziła się przygotowaniem prezentacji, postawiła na swoim i opowiedziała o badaniach i pomysłach, wzbudzając jak zawsze zainteresowanie słuchaczy.

Po konferencji napisała do mnie bardzo budujący osobisty list, trochę jak przesłanie i pożegnanie. W Sylwestra wymieniliśmy się zdjęciami i życzeniami. Danka napisała: „Obyśmy za rok mogli razem świętować”. Nie będziemy. W moich wspomnieniach pozostanie jako silna, mobilizująca do działania kobieta, dla której problemy, to wyzwania i inspiracje.

Katarzyna Buszko  
(Katedra Biostatystyki i Teorii Układów Biomedycznych,  
Wydział Farmaceutyczny,  
Collegium Medicum w Bydgoszczy UMK)  
buszko@cm.umk.pl



These are memories of Anna Lawniczak and Bruno Di Stefano collaboration, friendship, and deep appreciation of the remarkable scientific contributions of prof. dr. hab. Danuta Makowiec from the University of Gdansk, whose life, sadly, was cut short. However, Danuta's scientific influence, inspiration, and indomitable spirit will continue to stay with us.

We first met Danuta Makowiec and her husband, Marek, at the 6th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (ACRI 2004), held in Amsterdam, the Netherlands, from October 25-28, 2004. From that initial encounter, we quickly realized that Danuta and we shared many common research interests, particularly in modelling complex systems using various discrete methodologies. Danuta made many significant and influential contributions, mentoring and inspiring countless young researchers in complex systems research.

We, Anna and Bruno, are spouses, but we have been also research collaborators and share a passion and interest for modelling complex systems using various discrete methodologies. The collaborative part of our research, so far, has included cognitive agents, agent-based systems models, and cellular automata applied to autonomous robots, data communication networks, highway traffic, and the spread of epidemics, to name some.

Upon meeting with Danuta and Marek in 2004 we immediately found many scientific topics of common interest, and we shared the belief that modelling complex systems using discrete methodologies was a very important and promising research direction for many scientific fields and practical applications in the digital age. We felt that this methodology should be better recognized than it was at that time. We met again at other conferences and, eventually, we organized conferences together. Specifically, we conceived, implemented, ran and oversaw running the Summer Solstice International Conference on Discrete Models of Complex Systems.

Danuta felt that having a conference on the longest day of the year would bring some magic of the day and additional inspiration to the meetings. Bruno said to Danuta that this day is the *Summer Solstice*, and this is how the *Summer Solstice, International Conference on Discrete Models of Complex Systems* was conceived, during the discussions and musing at the Automata conference, the June's sun in Bristol in 2008.

For the following year we worked tirelessly on bringing the musings into reality and making sure that the conference would materialize in Gdansk, Poland, on June 22-24, 2009. The actual Summer Solstice in Gdansk was on Sunday, June 21, 2009, at 11:15 AM. However, we considered the Conference dates "to be close enough". This type of approximation was applied also in subsequent years. For instance, in Nancy, France, the Conference took place on June 16-18, 2010. These approximations were due to practicalities related to booking meeting rooms or avoiding conflicts with other conferences.

The Summer Solstice Conference has become much more than an annual event. Over the years, it has established itself as a vital forum for the exchange of ideas, collaborations, and advancements in the field of discrete modelling of complex systems. The conference has fostered a community of scholars, scientists, and engineers exploring and pushing the boundaries of knowledge in many areas Danuta was so passionate about. The conference's unique blend of intellectual rigour and informal camaraderie has made it a key event for researchers across the globe, providing an inclusive space where both established academics and emerging scholars could share their latest findings and insights. It is this open, yet focused environment that has enabled the Summer Solstice Conference to contribute significantly to the fields of discrete modelling and studying dynamics of complex systems, interdisciplinary physics, applied mathematics and beyond. The conference's broad spectrum of scientific inquiry and innovation has also become an inspiring platform for young researchers and graduate students, fostering mentorship – a cause Danuta deeply cared about.

Danuta was a trailblazer in interdisciplinary physics, contributing significantly to fields such as econophysics, sociophysics and medical physics of the heart. She was a visionary researcher with a passion for exploring the dynamics of complex systems, and how to model them using diverse methodologies.

In March 2021 Danuta informed us that she was diagnosed with cancer. We kept in touch with her frequently and followed the evolution of her therapy and disease. Our virtual meetings with Danuta consisted of three parts: a personal one when we discussed health issues, a scientific one when we talked about science and research, and an organizational one when we talked often

about some details of future Solstice conferences. Despite the disease, Danuta continued to be extremely active in her professional work and she continued to work until the end. We admired her resilience, drive and determination. We also admired Marek's devotion and support given to Danuta during this very difficult period in their life. Then, sadly, on April 25, 2024, we learned with great sadness that Danuta passed away. However, her optimistic and inspiring spirit stays with us.

Danuta's unwavering dedication, even in the face of personal illness, ensured that the conference survived through challenging times such as the COVID-19 pandemic. Her determination serves as an enduring reminder of the importance of this conference. As we reflect on her scientific contributions and her role in shaping the scientific discourse, it becomes clear that continuing the Summer Solstice Conference is not just a tribute to Danuta, but a continuation of her work and her scientific vision. By sustaining the conference, we ensure that Danuta's legacy as a scientist endures, as the conference provides future generations of researchers with the opportunity to expand upon the groundbreaking work Danuta pioneered. The conference provides a venue to continue exploring the potential of discrete modelling of complex systems to address challenges in fields ranging from medicine to economics, to engineering, and social science, to name a few.

Considering all this, we believe it is more important than ever to keep the Summer Solstice Conference alive. It is our collective responsibility to preserve this platform for scientific inquiry and innovation, honouring the memory of Prof. Danuta Makowiec contributions and all that she stood for. The conference will continue to be a beacon for those who are passionate about using discrete models to explore the complexities of our world.

### Summer Solstice Conferences 2009-2023

The 13<sup>th</sup> Summer Solstice, Florence, Italy, April 12-14, 2023 (<https://solstice2023.complexworld.net/homepage>)

The 12<sup>th</sup> Summer Solstice Seminar in Gdansk on May 28, 2022

The 11<sup>th</sup> Summer Solstice, Dresden, Germany, July 15-17, 2019 (<https://solstice2019.loria.fr/index.html>)

The 10<sup>th</sup> Summer Solstice, Gdansk, Poland, June 25-27, 2018, (<https://summersolstice2018.ug.edu.pl/>)

The 9<sup>th</sup> Summer Solstice, Catania, Italy, June 21-23, 2017

The 8<sup>th</sup> Summer Solstice, Aveiro, Portugal, June 20-22, 2016 (<https://cssociety.org/events/59>)

The 7<sup>th</sup> Summer Solstice, Toronto, Canada, June 17-19, 2015 (<https://www.fields.utoronto.ca/programs/scientific/14-15/complexsys15/>)

The 6<sup>th</sup> Summer Solstice, Ljubljana, Slovenia, June 22-25, 2014 (<http://www-fl.ijs.si/~tadic/Workshops/Solstice14/?page=home>)

The 5<sup>th</sup> Summer Solstice, Warszawa, Poland, June 27-29, 2013

The 4<sup>th</sup> Summer Solstice, Arcidosso, Italy, June 26-29, 2012

The 3<sup>rd</sup> Summer Solstice, Turku, Finland, June 06-10, 2011

The 2<sup>nd</sup> Summer Solstice, Nancy, France, June 16-18, 2010

The 1<sup>st</sup> Summer Solstice, Gdansk, Poland, June 22-24, 2009

### Proceedings of Summer Solstice International Conference on Discrete Models of Complex Systems

1. A.T. Lawniczak, D. Makowiec, B.N. Di Stefano, Editors of *Proceedings of the 2009 Summer Solstice, First International Conference on Discrete Models of Complex Systems*, Gdańsk, Poland, June 22-24, 2009, Acta Physica Polonica B Proc. Supplement, Vol. 3, No. 2, 2010, pp 251-494, [https://www.actaphys.uj.edu.pl/index\\_n.php?I=S&V=3&N=2](https://www.actaphys.uj.edu.pl/index_n.php?I=S&V=3&N=2)
2. N. Fatès, Editor of *Proceedings of the 2010 Summer Solstice, The 2<sup>nd</sup> International Conference on Discrete Models of Complex Systems*, Nancy, France, June 16-18, 2010, Acta Physica Polonica B Proc. Supplement, Vol. 4, No. 2, 2011, pp 115-265, [https://www.actaphys.uj.edu.pl/index\\_n.php?I=S&V=4&N=2](https://www.actaphys.uj.edu.pl/index_n.php?I=S&V=4&N=2)
3. M. Stannet, D. Makowiec, A.T. Lawniczak, B.N. Di Stefano, Editors of *The Proceedings of the Satellite Workshops of Unconventional Computing 2011: the 4<sup>th</sup> International Workshop on Physics and Computation; the 3<sup>rd</sup> International Hypercomputation Workshop; 2011 Summer Solstice, the 3<sup>rd</sup> International Conference on Discrete Models of Complex Systems*, TUCS Lecture Notes, No 14, June 2011, Painosalama Oy, Turku, Finland 2011.
4. D. Makowiec, A.T. Lawniczak, B.N. Di Stefano, Editors of *Proceedings of the 2011 Summer Solstice, The 3<sup>rd</sup> International Conference on Discrete Models of Complex Systems*, Turku, Finland, June 06-10, 2011, Acta Physica Polonica B Proc. Supplement, Vol. 5, No. 1, 2012, pp. 1-190, [https://www.actaphys.uj.edu.pl/index\\_n.php?I=S&V=5&N=1](https://www.actaphys.uj.edu.pl/index_n.php?I=S&V=5&N=1)
5. A. Krawiecki, Editor of *Proceedings of the 2013 Summer Solstice, The 5<sup>th</sup> International Conference on Discrete Models of Complex Systems*, Warszawa, Poland, June 27-29, 2013, Acta Physica Polonica B Proc. Supplement, Vol. 7, No. 2, 2014, pp. 233-408, [https://www.actaphys.uj.edu.pl/index\\_n.php?I=S&V=7&N=2](https://www.actaphys.uj.edu.pl/index_n.php?I=S&V=7&N=2)
6. H. Fukś, A.T. Lawniczak, Editors of *Proceedings of the 2015 Summer Solstice, The 7<sup>th</sup> International Conference on Discrete Models of Complex Systems*, The Fields Institute, Toronto, Canada, June 17-19, 2015, Acta Physica Polonica B Proc. Supplement, Vol. 9, No. 1, 2016, pp.1-146, [https://www.actaphys.uj.edu.pl/index\\_n.php?I=S&V=9&N=1](https://www.actaphys.uj.edu.pl/index_n.php?I=S&V=9&N=1)
7. D. Makowiec, D. Wejer, Editors of *Proceedings of the 2018 Summer Solstice, The 10<sup>th</sup> International Conference on Discrete Models of Complex Systems*, Gdansk, Poland, June 25-27, 2018, Acta Physica Polonica B Proc. Supplement, Vol. 12, No. 1, 2019, pp. 1-155, [https://www.actaphys.uj.edu.pl/index\\_n.php?I=S&V=12&N=1](https://www.actaphys.uj.edu.pl/index_n.php?I=S&V=12&N=1)
8. D. Makowiec, A. Deutsch, N. Fatès, Editors of *Proceedings of the 2019 Summer Solstice, The 11<sup>th</sup> International Conference on Discrete Models of Complex Systems*, Dresden, Germany, July 15-17, 2019, Physica D: Nonlinear Phenomena, Special Issue, 2021, <https://www.sciencedirect.com/journal/physica-d-nonlinear-phenomena/special-issue/10JG9L87X1D>

Anna T. Lawniczak  
(University of Guelph, Canada)  
alawnicz@uoguelph.ca

Bruno Di Stefano  
(Nuptek Systems Ltd., Toronto, Canada)  
bruno.distefano@nupteksystems.com



I have had the occasion to meet Danuta Makowiec several times because I am a regular participant to the meetings of the European Study Group on Cardiovascular Oscillations (ESGCO) having been a member of the ESGCO board since 2002 and the ESGCO President since 2012. Danuta Makowiec was an assiduous and active presence to the ESGCO meetings.

We spent several hours together during those meetings discussing about her favorite research topics, that are mine as well, at the border between cardiovascular physiology and biomedical signal processing.

During her entire professional life, Danuta Makowiec has been particularly interested in estimating noninvasively autonomic function from heart rate and arterial pressure variability series with the very practical aim to describe situations favoring postural syncope during orthostatic challenge [1-10] and alterations of the cardiac control after heart transplantation [11-15].

I remember with pleasure our discussions because she followed a very rigorous and comprehensive scientific approach that requires a deep knowledge of physiology, the design of experimental protocols and data collection procedures and the selection of the most appropriate signal processing techniques to reach the final purpose. Therefore, our discussions were not limited to



a single aspect of the problem, but we spanned several contexts and issues including the relevance of collaborations with physicians, the critical issue of having practical clinical objectives and the importance of defining all the details of analysis when designing a new approach or modifying an already existent method. She was particularly careful in any step of the research process. She was fascinated by methodological topics such as the quantification of complexity of physiological mechanisms and assessment of directionality of the interactions faced via the most advanced techniques of time series analysis such as symbolic and entropy-based methods [1-15].

My main regret is not to have searched with more determination for a direct collaboration with her and the group of researchers working with her in Gdansk to take advantage of her rigor, signal processing ability and possibility of acquiring interesting sets of data useful for the characterization of cardiac autonomic control in different pathological populations.

- [1] D. Wejer, A. Kaczkowska, D. Makowiec, Z.R. Struzik, B. Graff, G. Graff, S. Budrejko, D. Kozłowski, K. Narkiewicz, Temporal changes in complexity of cardiovascular regulation during head-up tilt test by entropic measures of fluctuations of heart period intervals and systolic blood pressure, 8th Conference of the European Study Group on Cardiovascular Oscillations (ESGCO), 2014.
- [2] B. Graff, G. Graff, A. Kaczkowska, D. Makowiec, S. Budrejko, D. Kozłowski, K. Narkiewicz, Ordinal pattern statistics for RR intervals during head-up tilt test in patients with the history of vasovagal syncope, 8th Conference of the European Study Group on Cardiovascular Oscillations (ESGCO), 2014.
- [3] D. Makowiec, W. Miklaszewski, Z.R. Struzik, Accelerations and decelerations in heart rhythm differentiate vasovagal sensitive humans, *Comput Cardiol*, 42:1017-1020, 2015.
- [4] B. Graff, D. Wejer, L. Faes, G. Graff, D. Makowiec, K. Narkiewicz, The use of Transfer Entropy method for the assessment of cardiovascular regulation during head-up tilt test, *Auton Neurosci.: Basic Clin*, 192, P101-102, 2015.
- [5] D. Wejer, L. Faes, D. Makowiec, Causal relationships in the variability of cardiovascular system evoked by orthostatic stress by transfer entropy, 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015.
- [6] D. Makowiec, A. Kaczkowska, A. Kaczkowska, D. Wejer, M. Żarczyńska-Buchowiecka, Z.R. Struzik, Entropic measures of complexity of short-term dynamics of nocturnal heartbeats in an aging population, *Entropy*, 17(3), 1253-1272, 2015.
- [7] B. Graff, G. Graff, D. Makowiec, A. Kaczkowska, D. Wejer, S. Budrejko, D. Kozłowski, K. Narkiewicz, Entropy measures in the assessment of heart rate variability in patients with cardiodepressive vasovagal syncope, *Entropy*, 17(3), 1007-1022, 2015.
- [8] D. Wejer, B. Graff, D. Makowiec, S. Budrejko, Z.R. Struzik, Complexity of cardiovascular rhythms during head-up tilt test by entropy of patterns, *Physiol Meas*, 38(5):819-832, 2017.
- [9] D. Makowiec, B. Graff, Z.R. Struzik, Multistrukture index characterization of heart rate and systolic blood pressure reveals precursory signs of syncope, *Sci Rep*, 7(1): 419, 2017.
- [10] D. Makowiec, D. Wejer, B. Graff, Z.R. Struzik, Dynamical pattern representation of cardiovascular couplings evoked by head-up tilt test, *Entropy*, 20(4): 235, 2018.
- [11] D. Makowiec, Z. Struzik, B. Graff, J. Wdowczyk-Szulc, M. Żarczyńska-Buchowiecka, M. Gruchala, A. Rynkiewicz, Complexity of the heart rhythm after heart transplantation by entropy of transition network for RR-increments of RR time intervals between heartbeats, 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013.
- [12] D. Makowiec, Z.R. Struzik, B. Graff, M. Żarczyńska-Buchowiecka, J. Wdowczyk, Transition network entropy in characterization of complexity of heart rhythm after heart transplantation, *Acta Physica Polonica B*, 2014, 45(8): 1771-1782, 2014.
- [13] D. Makowiec, J. Wdowczyk, M. Gruchala, Z.R. Struzik, Network tools for tracing the dynamics of heart rate after cardiac transplantation, *Chaos, Solitons & Fractals*, 90, 101-110, 2016.
- [14] J. Wdowczyk, D. Makowiec, M. Gruchala, D. Wejer, Z.R. Struzik, Dynamical landscape of heart rhythm in long-term heart transplant recipients: A way to discern erratic rhythms, *Front. Physiol.* 9:274, 2018.
- [15] D. Makowiec, J. Wdowczyk, M. Gruchala, Variability of heart rate variability indexes for estimates of left ventricular hypertrophy in subjects shortly after a heart transplant, 12th Conference of the European Study Group on Cardiovascular Oscillations (ESGCO), 2022.

*Alberto Porta*

*(Department of Biomedical Sciences for Health,  
University of Milan,*

*Department of Cardiothoracic, Vascular Anesthesia and  
Intensive Care, IRCCS Policlinico San Donato)*

*alberto.porta@unimi.it*



Nazwisko Danuty Makowiec nie było mi obce gdzieś od połowy lat 90. XX w. Znałem jej wczesne wyniki dotyczące klasyfikacji automatów komórkowych [2, 3], a także chaosu w automatach komórkowych [1]. Później przeczytałem jej prace o probabilistycznych automatach komórkowych, a zwłaszcza o regule Tooma [4, 5, 6]. Interesowały mnie wówczas zjawiska krytyczne w automatach komórkowych, ale sam głównie zajmowałem się przypadkami jednowymiarowymi. Danuta była natomiast jednym z pionierów badania takich zjawisk w dwóch wymiarach [8, 7].

Mój pierwszy kontakt z Danutą miał jednak miejsce dopiero w 2004 i był pewnym zbiegiem okoliczności. Zostałem wówczas zaproszony, aby wygłosić wykład na konferencji AUTOMATA 2004 w Karlsruhe, którą zorganizował Thomas Worsch. Niestety musiałem w ostatniej chwili odwołać mój wykład z powodów osobistych, czego bardzo żałowałem, bo przeglądając program konferencji zobaczyłem wiele ciekawych tytułów prezentacji. Jeden z wykładów szczególnie mnie zainteresował, była to prezentacja Danuty Makowiec *New challenges in cellular automata due to net topology*. Napisałem do Niej z zapytaniem, czy przypadkiem nie mogłaby mi przysłać slajdów z tego wykładu. Odpowiedź dostałem niemal natychmiast, a ku mojemu miłemu zaskoczeniu Danuta zaprosiła mnie w dodatku na następną edycję konferencji AUTOMATA, którą właśnie zaczynała organizować. Tym sposobem w czerwcu 2005 znalazłem się w Gdańsku i poznałem Danutę osobiście. Bardzo ciepło wspominam ten wyjazd, zostałem wówczas przez Danutę i jej męża Marka przyjęty z prawdziwie polską tradycyjną gościnnością.

Dwa lata później współorganizowaliśmy z Anną T. Lawniczak AUTOMATA 2007 w Toronto i zaprosiliśmy Danutę. Wówczas już zajmowała się modelami kardiologicznymi i na konferencji zaprezentowała model działania rozrusznika serca oparty na automatach komórkowych. Był to model wykorzystujący pewne uogólnienie czy też raczej modyfikację automatu Greenberga-Hastingsa [9]. Pamiętam, że model Danuty bardzo mnie zaintrygował, bo choć zajmowałem się automatami komórkowymi już od ładnych paru lat, to ich zastosowanie w tak bardzo realistycznym modelu biologicznym było dla mnie czymś zupełnie nowym.

W czerwcu 2009 Danuta zorganizowała w Gdańsku pierwszą konferencję o dyskretnych modelach układów złożonych, która miała się potem przerodzić w cykl Summer Solstice International Conference on Discrete Models of Complex Systems. Miałem przyjemność uczestniczyć w tym spotkaniu. Wybrałem się wówczas do Gdańska z żoną i czwórką małych dzieci, co było pewnym wyzwaniem, ale dzięki pomocy i gościnności Danuty i Marka wszystko odbyło się bez problemów. Patrząc

z perspektywy piętnastu lat na historię konferencji Summer Solstice mogę powiedzieć, że był to doskonały pomysł Danuty (i Anny Lawniczak), prawdziwy strzał w dziesiątkę. *Układy złożone* to bardzo szeroka a jednocześnie "rozdrobiona" dziedzina, w którą zaangażowani są badacze z bardzo nieraz odległych od siebie dyscyplin. Summer Solstice umożliwiło wymianę idei i nawiązanie cennych kontaktów na bardzo otwartym forum, bez sztywnych ograniczeń programowych. Jednocześnie pozostało konferencją na małą skalę, o niemal "rodzinnej" atmosferze. Współorganizowałem z Danutą, A. Lawniczak, B. Di Stefano i M. Cojocar u jedną z konferencji z tej serii w Toronto w 2015, a także uczestniczyłem w kilku innych. Zawsze było to dla mnie wspaniałe doświadczenie i zawsze przywoziłem do domu wiele pomysłów do dalszej pracy naukowej. Mam nadzieję, że konferencje Summer Solstice będą kontynuowane i pozostaną trwałym elementem dorobku Danuty – bardzo zachęcam młodszych kolegów i koleżanki do podjęcia wysiłku w tym kierunku.

Ostatni raz widziałem się z Danutą w Gdańsku w maju 2022. Było to tuż po pandemii, kiedy mało kto jeszcze miał odwagę organizować konferencje naukowe "twarzą w twarz". Korzystając z okazji, że dwaj członkowie grona założycielskiego Summer Solstice, Nazim Fathès (Nancy) i Franco Bagnoli (Florence), mieli właśnie przyjechać do Gdańska, Danuta podjęła wyzwanie i zorganizowała Summer Solstice Seminar. Kiedy dostałem wiadomość o tym spotkaniu, bez wielkiego namysłu kupiłem bilet lotniczy i poleciałem do Gdańska. Wówczas to dowiedziałem się o chorobie Danuty.

Wiadomość o jej odejściu była bardzo bolesna dla wszystkich, którzy ją znali. Dla mnie to strata tym bardziej dotkliwa, że dzięki Danucie mogłem utrzymywać więzi naukowe z krajem rodzinnym. Zawsze mogłem na nią liczyć: czy kiedy potrzebowałem pomocy w recenzji jakiejś pracy, czy kiedy potrzebowałem wydobyć z polskich bibliotek jakiś zapomniany stary artykuł. Danuta była jedną z najbardziej bezinteresownych i szczerze oddanych nauce osób, jakie kiedykolwiek znałem.

Wszystkim będzie nam jej bardzo brak. *Requiescat in pace.*

- [1] D Makowiec. Chaos in networks of 2-dimensional homogeneous cellular automata. *Physica A*, 172(3):291–301, 1991.
- [2] D Makowiec. Remarks on the rule classification of symmetrical 2-dimensional homogeneous cellular automata. *Physica A*, 176(3):430–446, 1991.
- [3] D Makowiec. The classification of homogeneous and symmetrical cellular automata. *Acta Physica Polonica B*, 23(4):299–311, 1992.

- [4] D Makowiec. Probabilistic approach to the dynamics of deterministic homogeneous and symmetrical 2-dimensional cellular automata. *Physica A*, 199(2):299–317, 1993.
- [5] D Makowiec. Chaos in cellular automaton systems with Toom rule. *Physica A*, 234:435–442, 1996.
- [6] D Makowiec. Toom probabilistic cellular automata stationary states via simulations. *Acta Physica Polonica B*, 29(6):1599–1607, 1998.
- [7] D Makowiec. Critical properties of Toom cellular automata. *Acta Physica Polonica B*, 30(8):2533–2545, 1999.
- [8] D Makowiec. Stationary states of Toom cellular automata in simulations. *Phys. Rev. E*, 60(4, A):3787–3796, 1999.
- [9] Danuta Makowiec. Cellular automata model of cardiac pacemaker. *Acta Physica Polonica B*, 39(5):1067–1085, 2008.

Henryk Fuks  
(Brock University, St. Catharines, Canada)  
hfuks@brocku.ca



In this set of obituaries published to commemorate Professor Danuta Makowiec, this text may seem a little exceptional. This is because we have not had any common publications, or grants, and even have not shared exactly the same scientific interests. Nevertheless, I intend to remind the community of physicists Danuta's continuous efforts to initiate and organize a series of symposia called Summer Solstice Conferences on Discrete Models of Complex Systems. For more than a decade, these events, not too large in terms of the number of participants and focused only on selected topics in complex systems science, provided a unique forum for presenting new results, exchanging ideas, or just meeting each other in person for a growing but still not oversized group of researchers from different countries.

The idea of the Summer Solstice Conference series was conceived at Automata 2008, in Bristol, UK. Discussions among participants, where the main role was played by Danuta Makowiec, Anna Lawniczak, Bruno Di Stefano, and Nino Boccara, were concluded by the decision to organize a conference with the main focus on discrete models of complex systems. It was Danuta's suggestion to fix the date of the first conference in the vicinity of the longest day of the year (summer solstice) to bring some magic of the day and provide more daylight for discussions and meetings; in the following years, this term has always been at least approximately complied. Next year, mainly due to the efforts of Danuta and Bruno Di Stefano, the first Summer Solstice Conference was

eventually organized in Gdansk, Poland, on June 22-24, 2009 (just after the summer solstice on Sunday, June 21). Because of the scientific interests of the organizers most of the contributed talks were devoted to the theory and applications of cellular automata (CA) in modeling complex systems; however, other topics were also included in the schedule.

In the following years, the conference took place in different European countries and Canada: in 2010 in Nancy, France; in 2011 in Turku, Finland (as a satellite to the Unconventional Computing conference); in 2012 in Arcidosso, Italy; in 2013 in Warsaw, Poland; in 2014 in Ljubljana, Slovenia; in 2015 in Toronto, Canada; in 2016 in Aveiro, Portugal; in 2017 in Catania, Italy; the 10th jubilee conference again in Gdansk, Poland; in 2019 in Dresden, Germany. Proceedings of these conferences were published mostly in *Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement* (2009- 2011, 2013, 2015, 2018 meetings), but also in a special issue of *Physica D* (2019 meeting). To a large extent due to the efforts and personal contacts of Danuta, a group of frequent participants and organizers of the successive conferences appeared, including such recognized scientists as Franco Bagnoli, Andreas Deutsch, Nazim Fatès, Rolf Hoffmann, Pietro Liò, Jose F. Mendes, Raul Rechtman, Andrea Rapisarda, and Bosiljka Tadic, to list only a few. Unfortunately, the 2020 Summer Solstice Conference scheduled to take place in Cambridge, UK, had to be canceled due to pandemic restrictions. The tradition of the Summer Solstice Conferences was partly renewed by the Summer Solstice 2022 Seminar which took place in Gdansk, Poland, on May 28. Despite deteriorating health, Danuta still acted as the head of the organizing committee and presented a talk on synchronization in CA modeling cardiac tissue.

Danuta first invited me to participate in the 2011 Summer Solstice Conference in Turku, Finland (where the proximity of the summer solstice could be most clearly seen: the sun almost did not set and days were extremely hot for this latitude). Since then I had an opportunity to participate in most of the consecutive meetings as well as to co-organize the 2013 Conference in Warsaw. Over time, the conference has expanded in terms of the number of participants and the scope. Of course, CA remained the main topic, with contributions from Danuta and her collaborators comprising applications of CA to modeling activity of the heart tissue, in particular the sinoatrial node (the heart pacemaker) and the atria. However, other subjects were also present, e.g., agent-based and other discrete models in socio- and econophysics, complex networks, and discrete stochastic models, to list only a few; for example, I used to present results of Monte Carlo simulations and analytic investigations of various Ising-like models. As the conference organizer, Danuta

has always been open to new ideas and trends in the physics of complex systems; a brief summary of her broad interests can be found in the foreword for the 2019 Conference Proceedings [A. Deutsch, N. Fatès, D. Makowiec, *Physica D* 436, 133328 (2022)]. She also warmly welcomed both experienced and young scientists who then became active researchers in this vast area, including my colleagues Prof. Agata and Piotr Fronczak, Dr. Andrzej Grabowski, Dr. Tomasz Gradowski, Dr. Maciej Mrowiński, and Dr. Michał Lepek from Warsaw University of Technology.

But from the Summer Solstice conferences, and our many other scientific and personal contacts, I would like to recollect Danuta not only as a physicist who made significant contributions, among others, to the field of CA and their applications in medicine, and as a conceiver and *spiritus movens* of a successful and important series of symposia on various aspects of the science of complex systems. Also, I would like to recollect her as she was in her spare time between and after the conference sessions, a friendly, warm-hearted, and open-minded person with many interests in history, literature, excursions, etc. I still have in mind Danuta, often accompanied by her husband Marek, enjoying the small pleasures of life, such as a dinner with friends in a sheltered restaurant close to the fishing harbor in Aveiro, Portugal, visiting the remains of the ancient theatre in Taormina and wandering in the narrow streets of medieval Syracuse at Sicily, and climbing in the Tatra mountains on other occasions. I accepted news about her serious illness and premature decease with disbelief and deep sorrow. Danuta, a scientist so active in physics and a person so much engaged in life, by her passing away left behind an emptiness that is impossible to fill in.

*Andrzej Krawiecki*  
(Faculty of Physics, Warsaw University of Technology)  
andrzej.krawiecki@pw.edu.pl



Trudno coś napisać o Danucie, ponieważ była zjawiskiem. Z wielu powodów. Pierwszy i najważniejszy jest taki, że fizyka była jej pasją, fascynacją, sposobem na życie. Kiedy już raz weszła na stopnie kariery akademickiej poczuła się na nich, i nie bez powodu, jak w domu.

W domu jest czas na to, żeby wspólnie cieszyć się nowymi pomysłami i ich realizacją, żeby dzielić się tym, co kto ciekawego w fizyce odnalazł, żeby tworzyć wspólnotę wokół tych znalezisk i wspólnotę ludzi dzielących się radością. Podobnie czujących, choć różnie myślących. Ludzi, dla których praca fizyka nie zaczyna się o ósmej po to, by skończyć się o szesnastej. Ludzi, którzy czasem

gdzieś wychodzą, ale zawsze wracają. W różnych miejscach, w różnych konfiguracjach, ale zawsze razem. Taki układ złożony, czasami oddziaływania lokalnie przyciągające, czasami odpychające, ale niewątpliwie wszyscy razem tworzą zespół statystyczny, kolektyw, asymptotycznie zbieżny zbiór trajektorii, słowem atraktor. No a jak wiemy z fizyki, entropia takiego układu rośnie powoli, ale skutecznie do nieskończoności.

Fascynacje naukowe Danki, jak sięgnę pamięcią, były zawsze twarde i miękkie jednocześnie. Twarde, gdyż nie unikały złożonej matematyki w analizie sygnału chaotycznego. A miękkie, ponieważ często były kolorowe, po prostu chciały się podobać. Kto powiedział, że prawda w fizyce ma być nudna i brzydka, skoro może być ciekawa i kolorowa? I zawsze wносиła Danką coś ciekawego, jakiś nowy sposób patrzenia na trajektorię. A to nieodwracalność, a to jakieś skalowanie. Tematy jak trajektorie, czasem odchodziły czasem wracały.

A pod spodem bardzo często był człowiek. Człowiek, który nawet nie był świadom tego, jak wymyślnie koziołki fika jego rytm serca, przepuszczony przez matematyczną „maszynkę do mięsa”. Człowiek, którego autonomiczny układ nerwowy właśnie się zastanawiał czy odrzucić przeszczep serca czy nie, narażając swojego nosiciela na bezpośrednie zagrożenie życia. Przyznacie Państwo, że przy tak zdefiniowanej skali problemu nie da się pracować od 8 do 16. Człowiek, którego czasem można było spotkać osobiście, kiedy przyszło się do gabinetu w poradni za wcześnie albo wyszło za późno. Człowiek pozornie taki sam jak dwudziestu, trzydziestu, czasem pięćdziesięciu podobnych do niego ludzi, a jednak często noszący w swoim rytmie serca ponurą przepowiednię nadciągającego problemu.

Tematy, które atakowała Danką, do dziś stanowią nierozwikłaną zagadkę. Trochę pomaga w jej rozwiązaniu uczenie maszynowe, zwane na wyrost sztuczną inteligencją. Podpowiada, z sięgającą 90% czułością i swoistością, które cechy sygnału EKG decydują o bezpieczeństwie arytmicznym pacjentów. Trochę pomaga telemedycyna, pozwalająca spojrzeć na życie pacjenta przez szersze niż w latach 80. XX w. okno. W końcu pierwsze zapisy z monitorowania to były autentyczne rolki taśmy magnetycznej kręcące się w rejestratorze. A pierwszą innowacją było użycie kasety magnetycznej, którą można było przewinąć na zwykłym Grundigu. Ba, można było przy odrobinie szczęścia nagrać dwa zapisy holterowskie na jedną taśmę, ku rozpaczy oglądającego je kardiologa. Trochę pomaga, ale za nas dylematów nie rozwiąże, gdyż dalej autonomiczny układ nerwowy jest trudnym przeciwnikiem.

I czemu złoty kluczyk do jego zrozumienia ma dać właśnie fizyka? Popatrzmy na łuki odruchowe w fizjologii. Każdy z nich stanowi przyczynową odpowiedź na



konkretny bodziec. Jeśli bodziec będzie widoczny w EKG, kiedy na przykład pacjent wstał z łóżka, to w odpowiedzi rytm jego serca przyspieszył, żeby zapewnić odpowiednie ciśnienie krwi w tętnicach szyjnych. Zatem mamy tu złamanie symetrii związane z każdą zorientowaną w czasie relacją przyczynowo-skutkową. I wystarczy znaleźć dobrą procedurę matematyczną, która nam wyciągnie tę wiedzę z analizowanego sygnału.

Warto też zauważyć translacyjny charakter takiej pracy: trzeba znać się nie tylko na fizyce, matematyce, analizie sygnału, trzeba jeszcze rozumieć kontekst kliniczny, mechanizmy fizjologiczne, podłoże biochemiczne, choroby współistniejące i ich wpływ, wpływ wieku i płci oraz stopnia nasilenia badanego schorzenia. Klasyczna twarda fizyka jest pod wieloma względami bezpieczniejsza, gdyż, co do zasady, człowiek porusza się w obszarze, zgodnym ze swoim zawodem wyuczonym. A w naszych układach złożonych, kiedy układem złożonym jest praktycznie wszystko? Dziś dla specjalistów AI jest to tak zwana wiedza dziedzinowa, od której lubią mieć ekspertów, żeby samemu nie musieć jej zgłębiać. Kiedy Danka przyszła pierwszy raz do szpitala po zapisy holterowskie nie miała takiego komfortu i nikt z nas nie miał. Z uwagi na tę konsekwentną interdyscyplinarność Danka była wypróbowanym towarzyszem rozpraw doktorskich, które recenzowała surowo ale sprawiedliwie. I co niemniej ważne, terminowo. Z tego tytułu była w murach Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej częstym gościem, czy fizycznie czy zdalnie.

Zjawisko zwane Danką Makowiec istniało w otoczeniu ludzi, tam się materializowało i tam wchodziło w interakcje. Tam również ciągnęło za sobą ogon młodych ludzi zafascynowanych jego osobowością i niekonwencjonalnymi metodami. I w tym kontekście chciałbym przywołać historię o tym, jak Danka została matką założycielką pewnej tradycji. Otóż regularnie korzystaliśmy z gościnności Asocjacji Elektrokardiologii Nieinwazyjnej i Telemedycyny Polskiego Towarzystwa Kardiologicznego na konferencjach w Kościelisku–Kasprowisku. Danka gościła tam regularnie, podobnie jak inny gdański niespokojny duch i nieodżałowany druh – prof. Tomasz Wierzbę.

I po którejś z tych konferencji Danka zapytała w swoim stylu: słuchajcie, a może byśmy przy okazji tej konferencji zrobili spotkania przyjaciół? W ten sposób powstała tradycja międzynarodowych warsztatów Cardiology Meets Physics and Mathematics, dla których nazwę wymyślił kolejny uczestnik fermentu intelektualnego wokół analizy rytmu serca, tj. prof. Rafał Baranowski z Anina. A że prof. Jan Żebrowski, wieloletni *spiritus movens* naszego warszawskiego środowiska fizyków zajmujących się zastosowaniami w kardiologii, przyprowadził ze sobą takiego młodego, który się jeszcze wtedy

dobrze zapowiadał, to uradzili, żeby go dać na przewodniczącego, i tak już zostało na następne szesnaście lat. Dziś inicjatywa Danki ogniskuje środowisko i każdy albo na warsztaty przyjeżdża albo wie, że musi przedstawić jakiś ważny powód nieobecności, ponieważ tam się po prostu bywa. Sama Danka bywała wiele lat, bywali jej wychowankowie, jej współpracownicy i przyjaciele. Czasem też nie bywała, wszak i tak w życiu bywa. Ale nie mam wątpliwości, że kiedy patrzyła jak się rozwija jej dzieło, to cieszyła się, że to środowisko, to spotkanie jest takie jak ona: ogniskuje wokół siebie ruch i jest pełne pasji i pełne emocji w stosunku do tego, co każdy z nas robi, nie patrząc na to, czy już minęła ósma i czy nie nadciągnęła szesnasta. Druga w nocy to przed szesnastą czy po szesnastej? A jak wiadomo, prace kliniczne w Polsce, nie wiedzieć czemu, powstają najczęściej właśnie o tej porze.

Trudno jest w kilku słowach opisać kilka dekad pełnych żaru intelektualnego, nowych odkryć i fascynacji, dzielonych z takimi zjawiskami jak Danka.

I tak sobie myślę z perspektywy metafizycznej, że i tam, gdzie Ona jest, można znaleźć wiele ciekawych problemów fizycznych. Ciekawych bo i sam człowiek jest ciekawy. Ciekawych jak Danka.

Teodor Buchner  
(Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki)  
teodor.buchner@pw.edu.pl



*Gwiazda, która nigdy nie gwiazdorzyła*

Patrzę teraz na grupowe zdjęcie zrobione w trakcie 36 Zimowej Szkoły Fizyki Teoretycznej Exotic Statistical Physics, która odbyła się w lutym 2000 w Łądku-Zdroju. Widzę wiele znajomych twarzy, w tym Danusię z charakterystyczną burzą kruczoczarnych włosów. Nie pamiętam jednak zupełnie tego spotkania, chociaż pamiętam, że Danusia zajmowała się w tym czasie modelem starzenia biologicznego Penny. W tamtym czasie takie interdyscyplinarne zastosowania fizyki statystycznej to była jeszcze, zgodnie z nazwą szkoły, egzotyka. Danusia była jedną z pionerek tej egzotyki w Polsce – cichą i skromną pionerką, może dlatego nie pamiętam tamtego spotkania.

Zawsze zadziwia mnie ludzka pamięć... Spośród wszystkich zdarzeń zapamiętujemy jedynie okruchy, często zdawałoby się zupełnie przypadkowe. Tak samo jest z moimi wspomnieniami o Danusi. Pierwszy okrucuch pamięci to listopadowy poranek 2015 roku w Rzeszowie i wspólne śniadanie w restauracji hotelowej podczas szóstego zjazdu sekcji Fizyka w Ekonomii i Naukach Społecznych (FENS) Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Byłam wtedy świeżo po rehabilitacji nogi złamanej podczas jazdy na nartach, a Danusia oznajmiła mi, że zaczęła

biegać po lesie 4-5 kilometrów dziennie. Z tego, co pamiętam, jej mąż Marek towarzyszył jej podczas tych biegów, ale sam nie biegał, tylko jeździł za nią na rowerze. Choć być może coś pokręciłam, bo pamięć bywa ulotna. Dlaczego zapamiętałam właśnie to śniadanie? Może dlatego, że była to bardzo miła rozmowa z fizyczką, którą ceniłam, a może dlatego, że ta informacja o bieganiu mnie zaskoczyła. Zresztą Danusia często mnie zaskakiwała chyba przez ten kontrast, który w sobie miała. Z jednej strony wydawała mi się niezwykle spokojna, wyciszona i nieśmiała, a z drugiej strony posiadała ogromne pokłady odwagi, energii i pasji, co ujawniało się szczególnie, gdy zaczynała mówić o swoich badaniach.

Kolejny okruch pamięci to wspólny wieczorny spacer po Rzeszowie i rozmowa o naszych pasjach zawodowych. Danusia zajmowała się wówczas rozwijaniem narzędzi sieciowych do śledzenia dynamiki pracy serca u pacjentów po przeszczepach na podstawie zapisu EKG, co pozwalało między innymi na nieinwazyjne monitorowanie rozwoju arytmii. Tematem zmienności rytmu serca zajęła się już wiele lat wcześniej i pozostała mu wierna do końca. Pamiętam, że podczas tamtego wieczornego spaceru opowiadała o swojej współpracy z kardiologami i planach na przyszłość. Pomyślałam wtedy, że właśnie tak powinna wyglądać nauka – w prawdziwie interdyscyplinarnych zespołach, pracujących nad rozwiązaniem ważnych problemów, które rzeczywiście mają wpływ na ludzkość. Danusia nie „robiła” nauki „na niby”, dla sławy, poklasku, czy wskaźników naukometrycznych. Robiła to co ważne. Przynajmniej ja tak to odbierałam i zawsze mnie to inspirowało.

Trzeci okruch pamięci to moje ostatnie spotkanie z Danusią w trakcie ubiegłorocznego Zjazdu Fizyków Polskich w Gdańsku. Wydawało mi się, że bez sensu przyjechałam, bo ostatnio już właściwie nie robię fizyki tylko układy społeczne. Ale wysłuchanie wykładu Danusi to było cudowne przeżycie i pamiętam, że pomyślałam wtedy, że dla tego jednego wykładu warto było przyjechać. Teraz myślę, że warto też było tam pojechać dla wspólnego obiadu z Danusią na dziedzińcu Politechniki Gdańskiej i naszej rozmowy, niestety już ostatniej.

To są okruchy, które jakoś najbardziej utkiły w mej pamięci, ale spotkanie z Danusią było znacznie więcej. Nigdy z nią naukowo nie współpracowałam, ale mimo to Danusia była i zawsze będzie dla mnie wielką inspiracją, badaczką, która robiła wielkie i ważne rzeczy, a przy tym cudowną, ciepłą i skromną kobietą. Była prawdziwą gwiazdą, a jednak nigdy nie gwiazdorzyła.

Katarzyna Weron (Sznajd-Weron w publikacjach)  
(Wydział Zarządzania, Politechnika Wroclawska)  
katarzyna.weron@pwr.edu.pl

*Gdy wydepczemy wszystkie ścieżki lata  
Gdy nam nie starczy cię wysokich drow  
Gdy już poznamy sens naszego świata  
To przeprawimy się na drugi brzeg...  
[...]*

*I tylko czasem łódź z przeciwka cicho  
Tego się przecież nie spodziewał czelek  
Jak my podobnych co zuchwale płyną  
Po dniach skończonych na swój drugi brzeg*

Andrzej Sikorowski  
*Ballada o drugim brzegu*

Poznałyśmy się w połowie lat 90. XX w, na jednym z pierwszych Sympozjów Fizyki Statystycznej im. Mariana Smoluchowskiego organizowanych w Zakopanem przez prof. Andrzeja Fulińskiego. Danka uczestniczyła w ponad dwudziestu odsłonach tej cyklicznej konferencji, z czasem zachęcając do udziału w niej coraz większą grupę własnych współpracowników i wychowanków. Nazwa „sympozjum” dobrze oddawała klimat spotkań w międzynarodowym gronie – dyskusje wokół referatów wygłaszanych w ciągu dnia trwały do późnych godzin wieczornych, a często przenoszone były na szlaki górskie, bo wspólne wędrowanie po Tatrach sprzyjało wymianie myśli. Nierzadko uczestnicy zjawiali się na Sympozjum w towarzystwie rodziny i dzieci. Danka przyjeżdżała na te spotkania z mężem Markiem. Stanowili dla nas krakusów perfekcyjny układ „dwóch ciał” – wzór pary i przyjaciół, wnoszących dobre fluidy, emanujących humorem, spokojem i otwartością. Wielokrotne wystąpienia Danuty na Sympozjum, ale także jej wykłady przygotowywane na Zjazdy Fizyków Polskich oraz sesje Komisji Układów Złożonych PAU poświęcone były strategii modelowania agentowego w zastosowaniu do badania zjawisk biologicznych, fraktalnej analizie szeregów czasowych i sygnałów fizjologicznych.

Ze szczególnym zainteresowaniem Danka współpracowała z grupą lekarzy i fizyków medycznych analizujących sygnały biomedyczne pochodzące z zapisów EKG, skupiając się na porównawczej statystyce zmienności rytmu serca u osób zdrowych i chorych. Jak podkreślała w swoich pracach, rytm skurczów serca jest rezultatem wzajemnych oddziaływań niezliczonych jednostek strukturalnych oraz regulacyjnych pętli sprzężeń zwrotnych, które funkcjonując w różnorodnych skalach czasowych i przestrzennych umożliwiają organizmowi sprawną reakcję na zmieniające się bodźce. Ta nieustanna zmienność sekwencji sygnałów powoduje trudność w wyznaczeniu odpowiednich, miarodajnych deskryptorów własności badanych szeregów fizjologicznych. Stanowiła wyzwanie, do którego Danka zaprzęgała cały arsenał miar złożoności starając się ujawnić specy-



fikę dynamiki skurczów serca i powiązać ją z wykryciem stanów patologicznych.

Jej współpraca z zespołami krajowymi i zagranicznymi zajmującymi się podobnymi zagadnieniami skupiała uwagę środowisk medycznych, z biegiem czasu przynosząc wiele obiecujących wyników opublikowanych i dyskutowanych w renomowanych czasopismach naukowych.

W 2009 roku Danuta Makowiec i Anna Lawniczak z University Guelph w Kanadzie zdecydowały się zorganizować w Gdańsku Summer Solstice Conference poświęconą teorii i numerycznemu modelowaniu układów złożonych. Pomysł okazał się trafiony; w kolejnych latach pod egidą obu pań kilkanaście konferencji tego typu odbyło się w Ameryce Północnej i wielu krajach Europy, przyciągając badaczy zainteresowanych dziedziną i rozwijanymi technikami.

W latach 2012-2015 Danuta zaangażowana była w projekt Centrum Zastosowań Matematyki na Politechnice Gdańskiej. Jako rozpoznawalny ekspert w zakresie metod matematycznych i fizyki statystycznej powołana została do Rady Naukowej Centrum inicjując i współorganizując serię warsztatów oraz konferencji szkoleniowych poświęconych zastosowaniom narzędzi matematycznych w ekonomii, gospodarce i medycynie.

Przywiązywała wielką wagę do nauczania przez molarne budowanie wiedzy własnej, stałą konfrontację nowych pomysłów i zastosowań metod informatycznych

przy zachowaniu rygoru matematyki i logicznego wnioskowania.

Danka była nieprawdopodobna w swoim spokoju, oddaniu pasji naukowej i uporze walki. Mimo ciężkiej, wyniszczającej choroby postępującej od 2021 roku potrafiła budzić nadzieję w sobie i u innych, nie rezygnowała z prowadzenia zajęć dydaktycznych na uczelni ani z aktywności badawczej. Przyjmowała zaproszenia do wygłoszenia wykładów na seminariach Centrum Badania Układów Złożonych im. M. Kaca, posiedzeniach Komisji Układów Złożonych w Polskiej Akademii Umiejętności, konferencjach krajowych i zagranicznych. Nie zwalniała tempa, nie szczędziła czasu swoim podopiecznym doktorantom, nie odmawiała przygotowania ocen eksperckich. I stale pracowała nad rozwijanymi przez siebie projektami. Udzielały się nam jej entuzjazm, niestrudzony zapał i serdeczność, z jaką traktowała ludzi.

Dla wielu z nas pozostanie w pamięci jako wzór naukowca i nauczyciela akademickiego, przykład pasjonatki fizyki i wspaniałego Przyjaciela.

Do zobaczenia Danusiu na drugim brzegu!

*Ewa Gudowska-Nowak*  
(Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego, WFAiIS, UJ,  
Małopolskie Centrum Biotechnologii, UJ)  
ewa.gudowska-nowak@uj.edu.pl



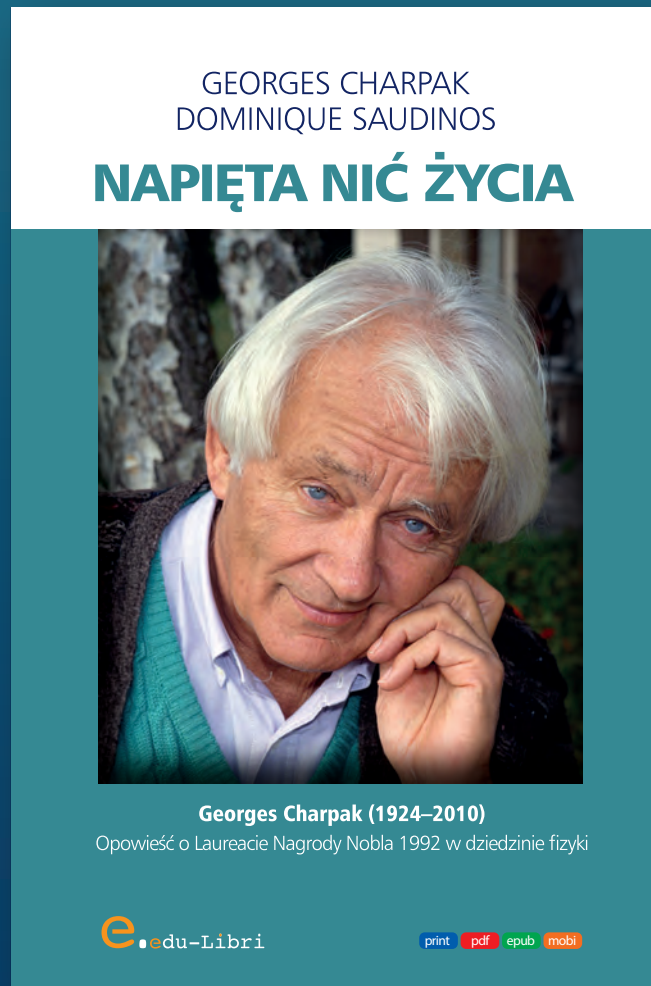
Danuta i Marek Makowiec na szczycie Świnicy podczas Sympozjum Smoluchowskiego w 2000 roku (fot. Marek Makowiec)



# Georges Charpak (1924–2010)

Opowieść o Laureacie Nagrody Nobla 1992 w dziedzinie fizyki

(z języka francuskiego przełożyła Dorota Ostrowska-Furmanek)



- **Napięta nić** między shtetlem na Ukrainie a Francją.
- **Napięta nić** między skromnym światem polskich żydowskich emigrantów a światem najbardziej wyrafinowanej nauki.
- **Napięta nić** całego życia, z zawsze jasnym celem.
- **Napięta nić** – czasem aż do zerwania – między tysiącem pomysłów, tysiącem działań i tysiącem potrzeb.
- **Napięte nici** w wielodrutowej komorze proporcjonalnej.



## Wprowadzenie do wydania polskiego\*

Georges Charpak – uczonec, nauczyciel, wizjoner, pasjonat, geniusz laboratorium aparaturowego, przebojowy organizator i animator, poszukiwacz wyzwań badawczych, towarzysz i dusza spotkań towarzyskich, szarmancki mężczyzna, mentor, przyjaciel. Georges miał wiele twarzy, których różne konfiguracje ukazywał zależnie od sytuacji. Każdy mógł go odbierać inaczej. Niewątpliwie jednak każdy dostrzegał w nim po prostu człowieka kochającego życie i niezwykle ciekawego świata i ludzi. Był uwielbiany przez młodych współpracowników w CERN. Młodzież z całego świata ciągnęła do jego zespołu naukowego. Każdy wiedział, że pod wodzą Georges'a nie grozi nuda i rutyna pracy. Wręcz przeciwnie – negasnący wodosпад pomysłów Mistrza, chociaż mógł oszalać młodych adeptów nauki, wyzwał nieustający entuzjazm do pracy. Praca w jego grupie nobilitowała. Na pytanie „czym zajmujesz się w CERN?” od niechcenia rzucona odpowiedź „pracuję w grupie Charpaka” natychmiast ustalała pozycję tego, który mógł tak powiedzieć.

Georges'a poznałem w 1982 roku, gdy wyjechałem z Uniwersytetu Warszawskiego na trzymiesięczny staż naukowy do CERN. Rok wcześniej przysłał mi imienne zaproszenie, o które wystąpił mój ówczesny mentor na Wydziale Fizyki UW Staszek (Stan) Majewski (Georges wspomina o nim w książce). Formalności wyjazdowe trwały tak długo, że nowa rzeczywistość stanu wojennego zamknęła sprawę wyjazdu, jak się wydawało, ostatecznie. Jakimś cudem jednak moje odwołanie od anulowania wyjazdu zostało pozytywnie rozpatrzone i z nowiutkim paszportem pojechałem w nieznane w lutym 1982 roku. Georges był wtedy na safari i oglądał słonie w Afryce. Gdy zjawił się w laboratorium wykonywałem żmudne pomiary zlecone przez Fabio Sauli'ego. *Jestem Georges Charpak. A ty kim jesteś i co tu robisz?* zapytał. Pamiętam, że starałem się nieporadnie wyjaśnić moje pomiary sprzężeń fotonowych i jonowych w detektorze gazowym. Georges'a niezbyt to zaciekało, chwilę porozmawialiśmy i poszedł sobie. Nie znosił rutyny i systematyki, a szybko uznał, że nic spektakularnego z moich pomiarów nie wyniknie. Jednak gdy kilka miesięcy później wyjeżdżał na konferencję do Nowosybirsk i szukał tematu, właśnie moje wyniki stały się tematem jego wystąpienia. Nieźle jak na początek – pierwsza publikacja z Charpakiem.

Kiedy dowiedział się, że przyjechałem z Polski, zaczęliśmy intensywnie rozmawiać – wtedy jeszcze po angielsku. Żywo interesował się, jak wyglądają realia stanu wojennego, jak żyją ludzie, jakie są nastroje. Znał nazwiska osób, które wtedy znała cała Polska. W CERN pracowała wówczas dość liczna grupa Polaków, którzy zastanawiali się nad swoją przyszłością. Georges pomagał tym, którzy postanowili „pozostać” bez gwarancji prawa pobytu, a tym bardziej – pracy w zawodzie. Wykorzystywał swoją pozycję w CERN i we francuskich instytucjach naukowych. Bardzo niepokoił się, gdy postanowiłem wrócić do kraju i deklarował wszelką pomoc. Od tej pory nasze relacje stały się przyjacielskie i bliskie – znalazłem się w grupie Charpaka.

Tradycją grupy Charpaka były piątkowe spotkania *pain vin et fromage*<sup>1</sup> na koniec tygodnia pracy. Takie były wówczas obyczaje i nikogo to nie dziwiło. W CERN pracowano w dawnym, swobodnym stylu francuskim. Czy ten styl wzmacniał sukcesy naukowe? Niewykluczone. W spotkaniach uczestniczyli wszyscy, którzy akurat byli na miejscu. Rozmawiano po francusku, czasami przechodząc na angielski w geście kurtuazji wobec cudzoziemców. Georges był duszą towarzystwa i mistrzem anegdot, które opowiadał soczystym francuskim. Nie było wyjścia – by być „w towarzystwie” trzeba było nauczyć się francuskiego. Georges był niedościgłym wzorcem – językiem francuskim posługiwał się z wielkim aktorskim talentem. *Je suis Gaulois!*<sup>2</sup> mawiał czasami na imprezach kameralnych. Podobno na międzynarodowej konferencji gdzieś w świecie swoje wystąpienie zaczął po francusku i dopiero po dziesięciu minutach zorientował się, że słuchacze nic nie rozumieją, więc płynnie przeszedł na angielski. Nikt ze słuchaczy nie zwrócił Georges'owi uwagi, że mówi niezrozumiale – wszyscy pewnie zostali zahipnotyzowani melodią jego głosu i aktorskim kunsztem.

Georges Charpak urodził się 8 marca 1924 roku. W administracyjnych dokumentach związanych z uzyskaniem przez niego obywatelstwa francuskiego w 1946 roku wpisano jako datę urodzin 1 sierpnia 1924 roku i ta data jest w oficjalnym obiegu. Georges żartował, że administracja francuska odmłodziła go o pięć miesięcy, umożliwiając późniejsze przejście na emeryturę w CERN. A beczyność nie znosił. Był niepokieszony, gdy we wrześniu 1989 roku musiał przejść na emeryturę. Musiał, ponieważ takie zasady obowiązują w CERN – pracodawcy Georges'a

\*Przedruk za zgodą edu-Libri – wydawcy tłumaczenia z języka francuskiego. Podstawa przekładu: Georges Charpak, Dominique Saudinos *La vie à fil tendu* Éditions Odile Jacob, 1993.

1. chleb, wino i sery (tłum. z j. francuskiego).

2. Jestem Galem! (tłum. z j. francuskiego)

od 1959 roku. W CERN przejście na emeryturę następowało automatycznie z chwilą ukończenia 65 lat, niezależnie od pozycji, zasług czy zaszeregowania pracownika. Pamiętam podniosłe seminarium w głównym audytorium CERN dla uhonorowania Georges'a. Przemawiali jego przyjaciele: Léon Lederman, Richard Garwin, Jean Saudinos, Carlo Rubia i inni, z którymi zetknęły go zawodowe zainteresowania. Wystąpienia były merytoryczne, acz w tonie przyjaznej anegdoty w swobodnej atmosferze. Na koniec przemówił Georges. Mówcą był wspaniałym – duża charyzma i siła przekonywania, a jednocześnie lekki, żartobliwy ton. Potrafił uwieść każde grono słuchaczy. Mówił wówczas o swoich planach naukowych i pomysłach na sposoby detekcji promieniowania jonizującego, które miały zrewolucjonizować kilka obszarów badań doświadczalnych. Żartował, że poszukując środków na realizację pomysłów częściej będzie spotykać się z bardzo bogatymi wdowami. Nadal marzył i autentycznie, z tą samą co zwykle energią, wierzył, że dokona jeszcze rzeczy niezwykłych. Ci, którzy go bliżej znali, widzieli jednak, że to nie ten sam Georges. Wiedział, że pewna bogata w sukcesy epoka jego kariery związana z CERN dobiega końca. Jeszcze wieczorem bawiliśmy się w gronie jego przyjaciół i bliskich współpracowników w gospodzie w Echenevex, a od następnego dnia Georges miał w CERN tylko gabinet, czasami współdzielony z którymś z młodszych współpracowników, i prawo do części czasu pracy sekretarki.

Pionierskie prace Georges'a Charpaka nad detektorami promieniowania jonizującego zrewolucjonizowały sposób prowadzenia eksperymentów w CERN i innych laboratoriach akceleratorowych. Komory pęcherzykowe odeszły do lamusa, gazowe komory iskrowe również. Wielodrutowe komory proporcjonalne (*Multiwire Proportional Chamber*) i gazowe komory dryfowe, wykonywane masowo według jego pomysłu z 1968 roku w skali odpowiedniej do dużych eksperymentów, stały się podstawowym narzędziem badawczym na kolejne dziesięciolecie. Georges trafił ze swoimi wynalazkami w odpowiedni czas – wszystko, co można było zmierzyć za pomocą powolnych komór pęcherzykowych zostało już właściwie zmierzone, a dokonywanie dalszych odkryć wymagało detektorów działających milion razy szybciej z możliwością komputerowego przetwarzania informacji. Georges mawiał: *Pracowałem nad wieloma rodzajami detektorów. Niektóre z nich były bardzo eleganckie, chociaż nieprzydatne*. Gazowe komory proporcjonalne były zarówno eleganckim, jak niezwykle cennym narzędziem w naukach doświadczalnych. Georges skutecznie wykorzystał swoją wiedzę o procesach powstawania i przepływu ładunku elektrycznego w gazie w chwili, gdy postęp technologiczny w mikroelektronice umożliwił stosowanie tysięcy linii przetwarzania sygnałów elektrycznych

z pojedynczego detektora. Od tej pory Georges zyskał niekwestionowaną pozycję światowego lidera w eksperymentalnej fizyce cząstek. Komory proporcjonalne nazywano powszechnie komorami Charpaka. Użytkownicy tych komór zorganizowali nawet cykliczną konferencję im poświęconą – Vienna Wire Chamber Conference, której Georges był stałym, teoretycznie honorowym, ale w praktyce niezwykle aktywnym gościem – zawsze starał się zaprezentować jakąś nowinkę własnego autorstwa.

Georges nie znosił pracy w wielkich zespołach naukowych, w których rządziły reguły hierarchii i obowiązków raportowania. Dlatego nie włączał się w prace coraz liczniejszych zespołów badawczych w CERN, które z konieczności przyjmowały dość sztywne formy i reguły organizacyjne. Pozostawał „swobodnym elektronem” prowadzącym autorskie badania nad nowymi detektorami w swoim laboratorium. Wszyscy wiedzieli, że do Georges'a można zawsze zwrócić się o radę i pomoc. Nigdy nie odmawiał. Stawał się przeschęśliwy, gdy ktoś zwracał się do niego z ambitnym, nierozwiązywalnym problemem. Bardzo liczył, że jego dokonania posłużą do eksperymentowania przy Wielkim Zderzaczu Hadronów (*Large Hadron Collider*, LHC). Doznał jednak zawodu. Ekstremalne wymagania aparaturowe przy LHC usunęły trochę w cień jego ulubione techniki detekcyjne, chociaż klasyczne komory dryfowe we współczesnej wersji technicznej wchodzi w skład złożonych zestawów aparatury LHC. Jego przewidywania z 1992 roku dotyczące ewolucji badawczych projektów akceleratorowych spełniły się w niewielkim stopniu.

Lata 1989–1992 były dla Georges'a trudne. Poszukiwał miejsca i możliwości sprawdzenia pomysłów, których mu nigdy nie brakowało. Wierzył, że może dużo nowego, być może przełomowego wnieść do diagnostyki przemysłowej i badań biomedycznych. Odnowił swoje wcześniejsze związki z *École supérieure de physique et de chimie industrielles (ESPCI)* w Paryżu, gdzie dyrektorem był wówczas Pierre-Gilles de Gennes, późniejszy laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1991 roku, a jednym z laboratoriów kierował jego przyjaciel – Jacques Lewiner. To tu Maria Skłodowska i Pierre Curie mieli swoje laboratorium, a na dziedzińcu jest oznaczone miejsce, gdzie stała szopa, w której przerzucali rudę uranu. Razem z Lewinerem podjęli wyzwanie znalezienia komercyjnego zastosowania detektorów Charpaka. Georges zaangażował się też w stworzenie interaktywnej komory gazowej do demonstracji oddziaływania promieniowania naturalnego z materią w pawilonie CERN na Światowej Wystawie EXPO'92 w Sewilli. Ten temat pozwolił mu wrócić do laboratorium w CERN i wyraźnie dodał energii. Dla mnie współpraca z nim w tym przedsięwzięciu popularyzującym wiedzę o promieniowaniu, w którym wszyscy jesteśmy stale zanurzeni, nie mając na ogół tej świadomości

mości, była dużą frajdą. Laboratorium Wydziału Fizyki UW było wówczas głównym miejscem rozwijania pomysłów Charpaka w obszarze biomedycznym. Pamiętam nasz spacer w Sewilli w ostatnich dniach EXPO jesienią 1992. Georges był w znakomitym nastroju, widząc duże zainteresowanie młodzieży naszym „żywym” eksponatem. Opowiadał o swoich planach upowszechniania wiedzy wśród dzieci poprzez doświadczenia. Omówiliśmy dalsze wspólne prace i rozstaliśmy się przekonani, że mamy plan na przyszłość. Miesiąc później wszystko się zmieniło. Georges Charpak dostał Nobla z fizyki i to przeniosło go w zupełnie inny wymiar. Dopiero następnego dnia po ogłoszeniu nazwiska laureata udało mi się do Georges’a dodzwonić z gratulacjami. Z wielką radością powtarzał: *Je l’ai fait!*<sup>3</sup> I wspólnej radości nie było końca. Znow był w towarzystwie. Wszystkie laboratoria Francji stały się dla niego dostępne. Wszyscy chcieli z nim rozmawiać i słuchali go jak wyroczni. Uwielbiał to.

---

3. Dokonałem tego! (tłum. z j. francuskiego)

Ciekawostka: w filmie *Les palmes de Monsieur Schutz* nakręconym w 1997 roku i opowiadającym historię odkrycia promieniotwórczych właściwości radu przez Marię Skłodowską-Curie i Pierre’a Curie, w role wozaków przywożących zamówiony węgiel wcielili się dwaj nobliści – Pierre-Gilles de Gennes i Georges Charpak.

Charpak nie opowiadał o okresie wojny i trudnego dzieciństwa. Wypierał kwestie traumatyczne i starał się żyć przyszłością. Myślał pozytywnie. Jeśli już opowiadał przy winie o latach trudnych, mówił w sposób lekki i żartobliwy. Podobno w Dachau odpowiadał za porządek w składzie grabi, które były narzędziem pracy więźniów. Od tamtej pory znienawidził prace ogrodnicze. O traumatycznych szczegółach tego okresu dowiedziałem się dopiero z tej książki.

Georges Charpak – człowiek fascynujący, przede wszystkim człowiek wolny, który nigdy nie poddawał się przeciwnościom losu. Miał w życiu wiele szczęścia, ale szczęściu intensywnie pomagał.

*Wojciech Dominik, Wydział Fizyki UW*

---

# Kronika Polskiego Towarzystwa Fizycznego

## Profesor Henryk Witała laureatem Medalu Faddeeva

W 2024 roku prof. Henryk Witała, wybitny fizyk związany z Uniwersytetem Jagiellońskim, został uhonorowany prestiżowym Medalem Faddeeva. Jest to jedno z najwyższych wyróżnień w dziedzinie fizyki kilku ciał, przyznawane za wyjątkowy wkład w rozwój tej dziedziny nauki. Medal<sup>1</sup> i nagrodę w wysokości 2500 USD wręczono Profesorowi podczas *The 23rd International Conference on Few-Body Problems in Physics* (wrzesień 2024, Pekin).



Laureat rozpoczął studia fizyczne na Uniwersytecie Jagiellońskim w 1971 roku, a ukończył je w 1976 z wyróżnieniem *magna cum laude*. Swoją karierę naukową związał z Instytutem Fizyki UJ, gdzie przeszedł kolejne szczeble akademickie, od asystenta, przez doktora, adiunkta, po profesora zwyczajnego (1995). Badania prof. Witały koncentrują się na teorii układów kilku nukleonów, a szczególnie na zastosowaniu równań Faddeeva w opisie układów trzech nukleonów. Współpraca z prof. Walterem Glöckle z Uniwersytetu w Bochum w Niemczech, zapoczątkowana w latach 80. XX w., stała się kluczowym momentem jego kariery naukowej. To właśnie wtedy poświęcił się badaniom nad fizyką kilku nukleonów, co zaowocowało wieloma przełomowymi pracami. Jego osiągnięcia naukowe, w tym precyzyjne rozwiązywanie równań Faddeeva z uwzględnieniem sił trójnukleonowych, zrewolucjonizowały sposób, w jaki rozumiemy oddziaływania jądrowe. Profesor Witała jest również współautorem kluczowych prac dotyczących sił chiralnych, które mają fundamentalne znaczenie dla

współczesnej fizyki jądrowej. Jego badania nie tylko przyczyniły się do zrozumienia złożonych procesów w jądrach atomowych, ale także dostarczyły nowych narzędzi teoretycznych, które są obecnie wykorzystywane przez naukowców na całym świecie. Medal jest dowodem uznania dla wyjątkowego wkładu prof. Witały w fizykę kilku nukleonów, zwłaszcza za: pierwsze rozwiązanie równań Faddeeva w przestrzeni ciągłej z realistycznymi siłami dwunukleonowymi, pierwsze rozwiązanie równań Faddeeva w przestrzeni ciągłej z realistycznymi siłami dwu- i trójnukleonowymi oraz pierwsze rozwiązanie relatywistycznych równań Faddeeva z realistycznymi siłami dwu- i trójnukleonowymi, a także za liczne zastosowania stanów rozpraszania trójcząstkowego w procesach z udziałem trzech nukleonów. Jego prace były wielokrotnie cytowane i nagradzane, a on sam jest uważany za jednego z czołowych ekspertów w swojej dziedzinie. W 2012 roku społeczność naukowa uhonorowała go specjalnym numerem czasopisma *Few-Body Systems*, poświęconym jego osiągnięciom. Dokonania prof. Henryka Witały (<https://engage.aps.org/gfb/honors/prizes-awards/faddeev-medal>) są inspiracją dla przyszłych pokoleń naukowców. Serdecznie gratulujemy Laureatowi tego wyjątkowego wyróżnienia i życzymy dalszych sukcesów na polu naukowym.

Medal Faddeeva ustanowiony został w roku 2016, wspólnie przez Topical Group on Few-Body Systems & Multiparticle Dynamics (GFB) of the American Physical Society oraz European Research Committee on Few-Body Problems in Physics. Nazwany na cześć wybitnego matematyka i fizyka teoretycznego Ludwiga Faddeeva (1934-2017), jest przyznawany co trzy lata naukowcowi lub naukowcom, którzy znacząco przyczynili się do rozwoju fizyki układów kilku ciał czy to dokonując przełomowych badań, czy też za kluczowe osiągnięcia w tej dziedzinie.

Roman Skibiński  
Jacek Golak

(Wydział Fizyki, Astronomii  
i Informatyki Stosowanej UJ)

---

1. The Award Group is the manufacturer of the medal.



**Europejskie Laboratorium Fizyki Cząstek (CERN)** powstało w 1954 roku, polscy fizycy zaś prowadzili tam badania już pod koniec lat 50. XX w. W 1964 Polska zyskała status członka obserwatora w Radzie CERN, a w 1991 stała się pełnoprawnym współgospodarzem tego ośrodka badawczego. Z okazji siedemdziesięciolecia powstania CERN, znajdującego się pod Genewą, w polskich miastach można było od kwietnia do października 2024 oglądać multimedialną wystawę *CERN – Accelerating Science*, która przynosi zwiedzającym w fascynujący świat fizyki cząstek oraz labirynty akceleratorów, detektorów i biur CERN. Wystawa składa się z 3 części poświęconych chronologii powstawania wszechświata, cząstkom elementarnym, pracy fizyków, budowie akceleratora oraz wpływowi badań fizyków na kształt współczesnej technologii. Oglądamy tu fragmenty prototypów magnesów, użytych do budowy LHC, materiały filmowe dotyczące powstania wszechświata, skal długości, transmisji danych eksperymentalnych czy budowy i działania akceleratora. Nie brakuje również elementów interaktywnych, jak zaaranżowane biuro cernowskiego naukowca, które umożliwia przemianę ścian pomieszczenia w ekrany wyświetlające filmy oraz symulacje pokazujące zjawiska fizyczne w praktyce (np. ciemną materię, grawitację, model standardowy), interaktywny ekran umożliwiający zadawanie pytań pracownicy CERN, panel pozwalający na „odkrywanie” nowych cząstek po wybraniu energii wiązki oraz akceleratora, portal społecznościowy dla cząstek elementarnych, trójwymiarowe modele i opisy wnęk rezonansowych, magnesów dipolowych i kwadrupolowych, sterowane za pomocą krążków magnetycznych, a także ekrany dotykowe z opisami mikroświata oraz odkryć technologicznych, które zmieniły nasz świat. Dla nieco młodszych uczestników przewidziano kącik zabaw, w którym mogą bawić się układankami związanymi z historią wszechświata czy budową LHC. Wystawie towarzyszą plansze prezentujące polski wkład w osiągnięcia CERN, a w wielu miastach także prezentacje miejscowych ośrodków badawczych zaangażowanych w fizykę cząstek i ciężkich jonów.

Oficjalne otwarcie Wystawy z udziałem przedstawicieli Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz władz Politechniki Warszawskiej, Uniwersytetu Warszawskiego i Narodowego Centrum Badań Jądrowych odbyło się 07.06.2024 w Warszawie. Rektor PW Krzysztof Zarembo podkreślił w swoim wystąpieniu, jak inspirującym środowiskiem pracy jest CERN: *To miejsce niezwykle, mekka, do której trafiają ludzie, którzy mają ogromną pasję badania podstawowych tajemnic natury. Tam ma się przeświadczenie, że robi się rzeczy dla człowieka bardzo ważne. Odkrywamy, jaka jest struktura materii, jakie prawa rządzą różnymi oddziaływaniami. To, co jest*

*dla mnie fascynujące, to to, że jak już odpowiemy na jakieś pytanie, pojawiają się następne.* Wystawę kolejno pokazywano w Chorzowie (15-25.04.2024), Krakowie (11-26.05.2024), Warszawie (08.06-02.07.2024), Gdańsku (20.07-26.08.2024) w Poznaniu (07-23.09.2024) oraz we Wrocławiu (05-21.10.2024).

**Częstochowa.** Oddział Częstochowski PTF zakończył tegoroczny cykl pokazowych doświadczeń z fizyki dla przedszkoli oraz uczniów szkół podstawowych i średnich, mający na celu popularyzację fizyki i nauk ścisłych wśród dzieci i młodzieży. W roku akademickim 2023/2024 pracownicy naukowo-dydaktyczni Politechniki Częstochowskiej oraz Uniwersytetu Jana Długosza w Częstochowie przeprowadzili 39 spotkań, w trakcie których m.in. zamrozili pół kopy jajek, paczkę żarówek i niezliczoną ilość kwiatków i chrupek zużywając do tego celu hektolitry ciekłego azotu. W pokazach wzięło udział prawie 3000 uczestników z ponad 50-ciu placówek oświatowych nie tylko z Częstochowy, ale także z Kleszczowa, Jaskrowa, Blachowni, Rudnik, Rędzin, Goleniowa, Kłobucka, Myszkowa, Poczesnej, Krzepic, Zawiercia, Bełchatowa, Bytomia i Olkusza. Podczas zajęć w przystępny sposób prezentowano i wyjaśniano zjawiska fizyczne zachodzące w otaczającym nas świecie, głównie z zakresu termodynamiki, mechaniki, optyki, elektryczności i magnetyzmu. Zajęcia cieszyły się bardzo dużym zainteresowaniem, o czym świadczy szeroki pozytywny oddźwięk w mediach społecznościowych placówek oświatowych, których uczniowie brali udział w pokazach.

#### MARZEC 2024

**Warszawa.** Finał 28. Konkursu Fizycznego Politechniki Warszawskiej odbył się 02.03.2024 w audytorium Gmachu Fizyki PW. 45 uczniów szkół średnich zmierzyło się z czterema pytaniami z zakresu fizyki inżynierskiej. Laureatami zostało dwóch uczniów liceów warszawskich (XIV Liceum im. Stanisława Staszica, VIII Liceum im. Władysława IV), uczeń VII LO im. Adama Mickiewicza w Poznaniu) oraz uczeń III LO im. Marynarki Wojennej RP w Gdyni. Do tegorocznej edycji konkursu zgłosiło się o ok. 100 osób więcej niż do poprzedniej, co wskazuje na rosnące zainteresowanie fizyką i studiami inżynierskimi.

**Gdańsk.** Czy można połączyć fizykę ze sztuką? Ależ oczywiście! *Szukając przestrzeni* to nazwa wystawy obrazów otrzymanych za pomocą mikroskopu elektronowego oraz rzeźb zainspirowanych tymi obrazami. Wystawie towarzyszyła fuzja rzeźby i wizualizacji obrazów na rzeźbie (VJ), animacja oraz prezentacja wirtualnej rzeczywistości (VR) na podstawie obrazów. W marcu

2024 wystawa gościła w Kunszcie Wodnym na Targu Rakowym w Gdańsku, natomiast w kwietniu i maju br. prezentowana była w Gmachu Głównym Politechniki Gdańskiej. Wystawa została zorganizowana przez Instytut Nanotechnologii i Inżynierii Materiałowej PG, Akademię Sztuk Pięknych w Gdańsku oraz gdański Instytut Kultury Miejskiej.

#### KWIECIEŃ 2024

**Warszawa.** 19.04.2024 w Narodowym Centrum Badań Jądrowych odbyło się seminarium finałowe, które rozstrzygnęło XIX edycję konkursu Fizyczne Ścieżki. W jego trakcie dziewiętnaścioro uczniów przedstawiło łącznie czternaście prac: po pięć w kategoriach praca naukowa oraz pokaz zjawiska fizycznego i cztery w kategorii esej. W kategorii praca naukowa I miejsce zdobyła Lena Kulczycka (Kraków), II – Adam Ciupa (Piotrków Trybunalski), III – Natalia Krajewska, Michał Starczewski, Mateusz Karaszewski (Płock). W kategorii pokaz zjawiska fizycznego I miejsce (ex aequo) zdobyli Miłosz Jurczak (Jelenia Góra) oraz zespół Andrzeja Baranowskiego i Tymona Pelowskiego (Bydgoszcz), na III miejscu znalazł się zespół z Sanoka w składzie: Szymon Sitek, Jakub Fedak, Jakub Pietrzkiwicz. W kategorii esej I miejsce przypadło Antoniemu Jachniewiczowi (Warszawa), II – Magdalenie Listek (Kraków), III (ex aequo) – Marcie Dydak (Warszawa) i Zuzannie Podolak (Katowice).

**Warszawa.** Wykładem otwartym Jarosława Rybusińskiego *Pociąg do fizyki, czyli o nauce na kolei słów kilka* zainaugurowany został projekt Materia i energia czyli fizyka na kolei realizowany przez Stację Muzeum we współpracy z Polskim Towarzystwem Fizycznym. Wykład nie tylko odkrył przed uczestnikami tajemnice działania pociągów, ale także wprowadził ich w świat podstawowych zasad fizyki. Dzięki pokazom i eksperymentom mogli zobaczyć, jak te zasady działają w praktyce i jak wpływają na codzienne technologie. Była to świetna okazja, by nauczyć się fizyki w interaktywny i angażujący sposób. Porozumienie między PTF i Stacją Muzeum, podpisane 25.04.2024, obejmuje przygotowanie od nowego roku szkolnego cyklu lekcji muzealnych z zakresu fizyki na kolei.

**Poznań.** Instytut Fizyki Molekularnej PAN pod patronatem honorowym Oddziału Poznańskiego PTF prowadzi cykl wykładów Fizyka warta Poznania. Punktem wyjścia do rozważań podczas wykładu *Dlaczego samoloty (nie) latają?*, który odbył się 11.04.2024, były wypadki lotnicze znane fanom serialu dokumentalnego

*Katastrofa w przestworzach.* W prosty sposób dr Piotr Graczyk wytłumaczył na czym polega siła nośna, jak ważny jest środek ciężkości i opowiedział o podstawowych pojęciach, takich jak ciśnienie i prędkość; przedstawił także ciekawostki techniczne dotyczące samolotów pasażerskich i wojskowych. 23.05.2024 podczas wykładu *Szkoło metaliczne – szkło, metal, a może... plastik?* dr hab. Zbigniew Śniadecki zabrał widzów do świata ciekawych i przydatnych materiałów, badanych w IFM PAN. W tytułowych szklach metalicznych nie występuje uporządkowanie dalekiego zasięgu. Jednak występujące w nich uporządkowanie atomów w tzw. bliskim otoczeniu oraz brak niektórych cech charakterystycznych dla stopów krystalicznych prowadzi do bardzo zaskakujących właściwości, okazuje się bowiem, że można je formować podobnie jak plastik, przy czym szkło metaliczne jest bardziej wytrzymałe i odporne na korozję niż stal; charakteryzuje się także wysoką przenikalnością magnetyczną. Omówione zostały właściwości metali o strukturze amorficznej oraz możliwe zastosowania tego rodzaju materiałów, które mogą zawładnąć przyszłością wielu dziedzin przemysłu. 06.06.2024 słuchacze dowiedzieli się od dr. hab. Macieja Urbaniaka *Jak magnesy wirusy łapać pomagają.* Skuteczne zapobieganie rozprzestrzenianiu się chorób wymaga znajomości stanu zdrowotnego populacji. Jednym ze sposobów jego określenia jest małoinwazyjne badanie krwi, wydzielin ustrojowych itd. Standardowo testy przeprowadza się w warunkach laboratoryjnych, jednak obecnie coraz bardziej powszechne są testy typu laboratorium czipowego nawet takie, które pacjent przeprowadzać może samodzielnie, podobnie jak stosowane od dziesięcioleci testy glukozowe. W ostatnich latach wiele wysiłku poświęca się opracowaniu metod kontrolowanego transportu badanych materiałów w skali submilimetrowej. Jednym z rozwiązań jest wykorzystanie miniaturowanych (o grubościach rzędu setnych części mikrometra) magnesów wraz z magnetycznymi kulkami o rozmiarach rzędu mikrometrów, które potrafią selektywnie przyłączać do swojej powierzchni poszukiwane wskaźniki choroby, np. wirusy. Ruchem takich kulek można sterować z mikrometrową precyzją wykorzystując zewnętrzne pole magnetyczne. Doktor Urbaniak opowiedział, jak stosując nowoczesne metody nanotechnologii stara się opracowywać nowe cienkowarstwowe materiały do zastosowań w diagnostyce medycznej.

**Katowice.** Katowice są Europejskim Miastem Nauki 2024 i w związku z tym na Wydziale Nauk Ścisłych i Technicznych Uniwersytetu Śląskiego odbyły się pewne ciekawe wydarzenia. Instytut Fizyki zaangażował się w działania podczas *Tygodnia Nowych Technologii* (15-21.04.2024), m.in. w inaugurację wystawy *Accelerating*

*Science* (15-25.04.2024) poświęconej działalności CERN. Wykład inauguracyjny na temat badań prowadzonych w CERN wygłosił prof. Jan Kisiel, specjalnym gościem zaś był red. Wiktor Niedzicki, który opowiedział o inteligentnych materiałach. W kolejnych dniach odbyły się m.in.: wykład prof. Katarzyny Schmidt *Nowe technologie w badaniach nad materią jądrową*, debata *Nanotechnologia szansa czy zagrożenie?* prowadzona przez prof. Annę Bajorek oraz sesja krótkich wystąpień młodych naukowców i dyskusja (w tym Q&A) na temat kompetencji pracowników w przyszłości, przy udziale pracodawców – przedstawicieli amerykańskich firm technologicznych. Odbyły się również wykłady i warsztaty związane z chemią, inżynierią materiałową, medycyną, informatyką, muzyką oraz psychologią. 10.06.2024 rozpoczął się *Tydzień Kryształów* w ośrodku katowickim. Były to wykłady wybitnych krajowych i zagranicznych specjalistów, np. *Jak hodujemy kryształy materiałów innych niż sól kuchenna i cukier?* (prof. Tomasza Klimczuka), *Od bałaganu do porządku i z powrotem* (red. Wiktora Niedzickiego), *Co wspólnego mają kryształy z powstaniem materii ożywionej, pojęciem masy i upływem czasu?* (prof. Janusza Gluzy); ponadto odbyły się wystawy i warsztaty dla uczniów oraz rozstrzygnięcie kolejnej edycji Ogólnopolskiego Konkursu Wzrostu Kryształów, a także gry terenowe, mające na celu zainteresowanie uczestników ekscytującym pięknem świata kryształów.

**Wrocław.** W dniach 26-28.04.2024 we Wrocławiu odbyło się sympozjum Sekcji Fizyki Oddziaływań Fundamentalnych Polskiego Towarzystwa Fizycznego *Various faces of QCD* zorganizowane przez Polskie Towarzystwo Fizyczne oraz Inkubator Doskonałości Naukowej Uniwersytetu Wrocławskiego/Centrum Symulacji Supergęstych Płynów (w ramach Inicjatywy Doskonałości – Uczelni Badawczej). W sali im. prof. Jana Rzewuskiego zebrało się grono czołowych ekspertów w celu prezentacji najnowszych postępów w kwantowej chromodynamice (QCD). Na program naukowy złożyło się 15 wykładów dotyczących: przejść fazowych w QCD i zjawisk krytycznych, eksperymentów i fenomenologii relatywistycznych zderzeń ciężkich jonów, spektroskopii hadronowej, fizyki małych  $x$ , symulacji QCD na sieci czy gwiazd zwartych. Wśród wykładowców byli prof. Stefana Leupold (Uniwersytet w Uppsala, Szwecja), prof. Marek Gaździcki (Uniwersytet Goethego, Niemcy i Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach), wielu młodych naukowców i 8 doktorantów, którzy mieli wspinała możliwość bezpośredniego kontaktu, w przyjaznej atmosferze, ze światowej klasy naukowcami. Drugiego dnia zorganizowano specjalną sesję z okazji 80. urodzin naszego kolegi, prof. Ludwika Turki, znanego również ze swojej walki o odzyskanie i utrzymanie demokracji

w Polsce. Sympozjum było idealną okazją, by uzmysłowić polskiemu środowisku QCD, że zajmuje ono ważne miejsce na akademickiej mapie Europy i jest inkubatorem młodych, dobrze zapowiadających się talentów (<https://events.ift.uni.wroc.pl/event/72/overview>).

#### MAJ 2024

**Toruń.** *Pizza z Mamutami* to spotkanie zorganizowane 09.05.2024 przez Toruński Oddział PTF. Doktoranci, studenci i sympatycy PTF spotkali się z profesorami Instytutu Fizyki UMK w Toruniu, których żartobliwie nazwaliśmy Mamutami. Wydarzenie było kontynuacją cyklu spotkań, o chwytliwych nazwach, z ciekawymi gośćmi, przy poczęstunku. Przypomnijmy, że wcześniej odbyło się spotkanie *Pierogi z Dinozaurami*, podczas którego prelegentami byli emerytowani profesorowie Instytutu Fizyki UMK. *Pizza z Mamutami* była okazją do posłuchania anegdot i bogatych wspomnień dotyczących tego, jak dawniej prowadzono prace naukowe. Prelegenci dzielili się historiami swoich karier naukowych, a także odnosili ją do warunków współczesnych. Spotkanie umiliła pyszna pizza. Głównymi panelistami byli profesorowie: Andrzej Raczyński, Ryszard Mrugała, Piotr Targowski, Andrzej J. Wojtowicz, Leszek Meissner. Na zakończenie wydarzenia publiczność zadawała pytania i odbyły się swobodne rozmowy.

**Białystok.** Tegoroczny XX Podlaski Festiwal Nauki i Sztuki upłynął pod hasłem *Niczego w życiu nie należy się bać, należy to tylko zrozumieć*. Idąc za tym przesłaniem Marii Curie-Skłodowskiej 14.05.2024 Wydział Fizyki UwB przygotował bogatą ofertę edukacyjną. Sympatycy fizyki jak zwykle nie zawiedli i chętnie wzięli udział w zorganizowanych wydarzeniach. Można było wysłuchać interesujących wykładów, poeksperymentować wspólnie ze studentami oraz zmierzyć się z zagadkami logicznymi, z którymi mierzyła się słynna noblistka. Jak zwykle nie mogło zabraknąć zajęć z astronomii zorganizowanych przez niezawodny Białostocki Oddział Polskiego Towarzystwa Miłośników Astronomii. W tym samym dniu klub Newton, Einstein a teraz My po raz pierwszy uczestniczył w Pikniku Klubów Młodego Odkrywcy. Klubowicze w dwóch grupach wiekowych zaprezentowali działalność klubu, wykonując przy tym zaprojektowane przez siebie proste, ale pouczające eksperymenty fizyczne. Zwieńczeniem aktywności festiwalowej był Rodzinny Piknik Naukowy na Stadionie Miejskim w Białymstoku.

**Wrocław.** 15.05.2024 odbyła się uroczystość nadania tytułu doktora *honoris causa* Politechniki Wrocławskiej

prof. Gérardowi Mourou w uznaniu jego ogromnych osiągnięć dla nauki światowej, w szczególności za opracowanie metody wzmacniania ultrakrótkich optycznych impulsów laserowych o ekstremalnych mocach, za wizjonerską inicjatywę europejskiej naukowej inwestycji ELI (Extreme Light Infrastructure) oraz za wieloletnią współpracę z polskim środowiskiem naukowym. Decyzję o nadaniu tytułu Senat PWr podjął już we wrześniu 2021, jednak pandemia koronawirusa wymusiła przesunięcie uroczystości. Laudację na cześć francuskiego naukowca wygłosił specjalista w dziedzinie fizyki laserów, prof. Krzysztof Abramski, a prof. Mourou przedstawił wykład *Passion for Extreme Light*.

**Lublin.** 16.05.2024 w Instytucie Fizyki UMCS, w ramach zebrania Oddziału Lubelskiego Polskiego Towarzystwa Fizycznego, prof. dr hab. Adam Kisiel z Politechniki Warszawskiej wygłosił wykład *Energetyka jądrowa w Polsce z punktu widzenia uczelni*. Adam Kisiel przedstawił aktualny stan polskiego programu jądrowego w kontekście potrzeb krajowych na tle przemysłu jądrowego w Europie i na świecie. Omówił realizowane, planowane i ogłoszone projekty dotyczące energetyki jądrowej z punktu widzenia ich stopnia zaawansowania oraz rozważanej technologii. Przedstawił głównych interesariuszy polskiego programu jądrowego oraz ich rolę w jego wdrażaniu, w szczególności rolę, jaką w tym procesie odgrywają polskie uczelnie. Przedstawił już realizowane działania oraz możliwości włączenia się kolejnych uczelni w proces dydaktyczny i naukowy związany z energetyką i przemysłem jądrowym.

**Rzeszów.** W dniach 20-27.05.2024 Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej Politechniki Rzeszowskiej gościł prof. Andreyę Varlamovą (Institute for Superconductivity and Innovative Materials of the Italian National Research Council w Rzymie) specjalizującego się w teorii nadprzewodnictwa oraz fizyce w skali nanoskopowej. W swojej karierze naukowej gość współpracował blisko z Alexeim Abrikosowem (laureatem nagrody Nobla z zakresu nadprzewodnictwa i nadciekłości), a także z Lwem Aslamazowem (słynnym popularyzatorem fizyki), współpraca z którym zakończyła się wydaniem książki *Wonders of Physics (Niesamowita Fizyka)*. Wizyta Varlamova stała się okazją do wygłoszenia kilku wykładów: 22.05.2024 było to wystąpienie dotyczące nadprzewodnictwa i termoelektryczności, skierowane do bardziej zaawansowanych pasjonatów fizyki, 23.05.2024 zaś wykład *Physicist in Gastronomy Universe*, skierowany do szerszego grona, łączący obie pasje Profesora – fizykę teoretyczną i kuchnię włoską. Profesor Varlamov wykorzystał swoje wieloletnie

doświadczenie popularyzatora nauki, by w prosty i ciekawy sposób przedstawić nierzadko skomplikowane i wykorzystujące zaawansowane techniki matematyczne modele, które konstruował hobbystycznie i przystępnie, a to aby określić optymalny czas gotowania makaronu, a to by pomóc znajomemu *pizzaiolo* (specjaliście od przygotowywania pizzy) określić maksymalną liczbę pizz możliwych do przygotowania w popularnej restauracji, a to by wyjaśnić, jak to się dzieje, że włoscy bariści przygotowują niesamowicie aromatyczne kawy, ale zupełnie nie radzą sobie ze zwyczajną herbatą. Wykład spodobał się zwłaszcza młodszymi uczestnikami, licealistami i studentami, niektórzy z nich zostali po wykładzie, aby wyjaśnić z wykładowcą pewne wątpliwości czy dopytać o interesujące aspekty referatu.

**Toruń.** 23.05.2024 w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu odbyło się uroczyste Kolokwium Czwartkowe zorganizowane z okazji 110. rocznicy urodzin prof. Kazimierza Antonowicza, na którym prof. Józef Szudy wygłosił referat *Profesor Kazimierz Antonowicz (1914-2003) – pionier rezonansów i fizyki węgla w Polsce*. Tytułowy bohater był fizykiem doświadczalnym (i wieloletnim członkiem PTF), związanym z Uniwersytetem Stefana Batorego w Wilnie oraz Uniwersytetem Mikołaja Kopernika w Toruniu. Uznawany jest za jednego z twórców toruńskiej fizyki doświadczalnej. W ramach doktoratu, w czasach, kiedy jeszcze nie było komputerów, prof. Antonowicz opracował i zbudował specjalny przyrząd pozwalający całkować równanie Schrödingera. W roku 1974 opublikował wyniki badań nad próbkami węgla, w których raz na jakiś czas uzyskiwał wyniki charakterystyczne dla efektu nadprzewodnictwa. Najbardziej zaskakiwało to, iż otrzymywał je w temperaturze pokojowej! Aktualnie prace prof. Antonowicza, a szczególnie ta o nadprzewodnictwie, są często cytowane w międzynarodowych publikacjach. Wydarzenie poprzedziło wspólne wyjście delegacji Toruńskiego Oddziału PTF na cmentarz, by przy grobie Profesora upamiętnić i wspomnieć Jego osobę.

**Gdańsk.** W dniach 23-25.05.2024 na terenie Politechniki Gdańskiej odbywał się Bałtycki Festiwal Nauki, który przyciągnął tysiące odwiedzających. Fizyka przemycana była w postaci otwartych zajęć dla dzieci, młodzieży i dorosłych, a były to m.in. *Fizyka dla smyka* (zajęcia wykładowo-warsztatowe dla przedszkolaków) czy wykłady *Fizyka tenisa stołowego*, *Fizyka (dog) frisbee*, *Ile dla fizyka warte są buty sportowe?* Na zakończenie Festiwalu rozstrzygnięto konkurs *Zbuduj maszynę Goldberga*. Trzyosobowe zespoły miały za zadanie zaprojektować i uruchomić w dniu finału maszynę działającą



na zasadzie domina, która dzięki z góry zaplanowanym przemianom energii pozwala osiągnąć oczekiwany efekt końcowy. Zwycięzcy: Jagoda Jarpułkiewicz, Zofia Onuszek, Piotr Duzinkiewicz będą mogli w ciągu trzech lat podjąć studia na wybranych kierunkach studiów stacjonarnych na Politechnice Gdańskiej z pominięciem konkursu świadectw.

**Wrocław.** Z uwagi na entuzjastyczne przyjęcie ubiegłorocznego Dnia Wrocławskiej Fizyki, Oddział Wrocławski PTF zorganizował kolejne wydarzenie tego rodzaju. Współorganizatorami II DWF były trzy wrocławskie instytucje naukowe zajmujące się od kilkudziesięciu lat naukami fizycznymi, tj. Wydział Podstawowych Problemów PWr, Wydział Fizyki i Astronomii UWr oraz Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN. Gospodarzem wydarzenia, które odbyło się 25.05.2024, była PWr. Tegoroczny DWF zgromadził ponownie kilkadziesiąt osób zawodowo zajmujących się fizyką, w tym sporą grupę studentów, doktorantów i nauczycieli. Imprezę otworzyła przewodnicząca Oddziału Wrocławskiego PTF prof. Ewa Dębowska oraz przedstawiciele współorganizatorów (i fizycy): rektor PWr prof. Arkadiusz Wójs, rektor UWr prof. Robert Olkiewicz oraz dyrektor INTiBS PAN prof. Dariusz Kaczorowski. Wygłoszono trzy wykłady: *Czy możemy nauczyć się neuronową fizyki, czyli o uczeniu maszynowym w nauce* (Jarosław Pawłowski, WPPT PWr), *Nietrywialne własności materiałów topologicznych w pobliżu zera absolutnego* (Tomasz Cichorek INTiBS PAN) oraz *Współczesne możliwości obserwacji mikroświata* (Marek Nowicki WFiA UWr). Po wykładach nastąpiło wręczenie Nagrody II DWF. Ze względu na bardzo wysoki poziom zgłoszeń kapituła zdecydowała o przyznaniu w tym roku nagród ponownie dwum osobom: Agnieszce Jażdżewskiej, studentce studiów II stopnia na UWr, za pracę *Transition to the Haldane phase driven by electron-electron correlations* opublikowaną w *Nature Communications* 14, 8524 (2023) oraz dr. Mateuszowi Dyksikowi z PWr – współautorowi pracy *Polaron Vibronic Progression Shapes the Optical Response of 2D Perovskites*, która ukazała się w *Advanced Science* 11, 2-9 (2023). Z anonimowych ankiet zebranych od uczestników wynika jednoznacznie, że II DWF był imprezą udaną, a środowisko jest głodne takich spotkań.

**Gdańsk.** 26.05.2024 na Górze Gradowej w Gdańsku swoje siły połączyły uczelnie tworzące Związek Uczelni Fahrenheita, tj. Politechnika Gdańska, Uniwersytet Gdański i Gdański Uniwersytet Medyczny. Razem stworzyły tętniące życiem miasteczko naukowe, gdzie odwiedzający mogli wysłuchać wykładów, obejrzeć pokazy czy wziąć udział w warsztatach i konkursach nawiązujących do tematów rozwijanych na

poszczególnych uczelniach. Nie zabrakło oczywiście fizyki – PG i UG przedstawiły uczestnikom pokazy dotyczące ciśnienia, temperatury, magnetyzmu, elektryczności.

#### CZERWIEC 2024

**Zielona Góra.** 01.06.2024 Zielonogórski Oddział PTF we współpracy z Wydziałem Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Zielonogórskiego zorganizował w Szkole Podstawowej nr 26 z Oddziałami Integracyjnymi im. Jana Brzechwy w Zielonej Górze pokaz eksperymentów fizycznych *W magicznym świecie fizyki*. W trakcie pokazu, młodzi naukowcy z najmłodszych klas mogli zobaczyć, a także wykonać proste doświadczenia fizyczne.

**Rzeszów.** W dniach 06-07.06.2024 w Kolegium Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Rzeszowskiego odbyła się XVII Rzeszowska Konferencja Młodych Fizyków, kolejna edycja corocznego wydarzenia, pozwalającego młodym adeptom nauki podzielić się wynikami swoich prac przed szerokim, ale przyjaznym i wyrozumiałym audytorium, co stanowi świetną okazję do szlifowania swoich umiejętności w zakresie publicznych wystąpień naukowych oraz merytorycznego i zrozumiałego komunikowania swoich osiągnięć. Podczas konferencji uczestnicy mogli wysłuchać referatów dotyczących fizyki cząstek elementarnych i wysokich energii, fizyki kwantowej, spektroskopii, fizyki jądrowej, fizyki medycznej czy fizyki środowiska oraz zaprezentować swoje postery. Tegoroczna edycja odbyła się pod patronatem Rzeszowskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Fizycznego, Instytutu Fizyki Uniwersytetu Rzeszowskiego oraz Koła Naukowego Fizyków UR.

**Lublin.** 12.06.2024 w Szkole Podstawowej im. Dzieci Zamojszczyzny w Złójcu odbył się finał XI edycji konkursu Doświadcz fizyki organizowanego we współpracy z Instytutem Fizyki UMCS w Lublinie. Tradycyjnie Oddział Lubelski PTF ufundował nagrody dla uczestników. W konkursie uczniowie z klas 6-8 szkół podstawowych samodzielnie prezentowali przygotowane doświadczenia fizyczne, które można wykonać za pomocą prostych przedmiotów codziennego użytku lub nieskomplikowanych urządzeń i zestawów doświadczalnych. W tym roku do konkursu zgłoszono opisy 36 doświadczeń, z których do drugiego etapu zakwalifikowano 19. Doświadczenia dotyczyły różnych zjawisk fizycznych: własności materii, ruchu i sił w przyrodzie, drgań i fal, elektryczności, optyki. Konkurs integruje młodzież i nauczycieli z okolicznych szkół. Jest zachętą do rozwijania wiedzy z fizyki i przedmiotów ścisłych. Jest także miejscem odkrywania talentów (<https://www.doswiadczfizyki.pl>)

**Zakopane.** W dniach 15-23.06.2024 odbyła się w Zakopanem 64. edycja Krakowskiej Szkoły Fizyki Teoretycznej (Cracow School of Theoretical Physics). Szkoła odbywa się cyklicznie od 1961, kolejne edycje poświęcone są różnym działom fizyki teoretycznej. W myśl hasła przewodniego *From the UltraViolet to the InfraRed: a panorama of modern gravitational physics* w tym roku tematem była grawitacja w różnych skalach energii: kwantowa grawitacja, czarne dziury, zmodyfikowane teorie grawitacji, fale grawitacyjne i ich detekcja, kosmologia i matematyczne aspekty ogólnej teorii względności. W programie znalazły się również liczne wykłady specjalistów z całego świata oraz seminaria prezentowane przez młodych naukowców. Odbyła się także (19.06.2024) specjalna sesja z okazji jubileuszu prof. Michała Praszałowicza, wybitnego fizyka zajmującego się teorią cząstek elementarnych, a także od dwóch dekad *spiritus movens* Krakowskiej Szkoły. Profesor Praszałowicz jest autorem 95 artykułów naukowych poświęconych różnym zagadnieniom teorii i fenomenologii oddziaływań silnych: ewolucji stanów wielogluonowych w granicy wysokich energii, rozpraszaniu silnemu w reżimie wysokiej gęstości partonów, solitonom chiralnym, pentakwarkom i strukturze hadronów, a także opisowi gwiazd neutronowych. Są to prace znane i wysoko cenione przez fizyków zajmujących się badaniem struktury i oddziaływań cząstek elementarnych oraz jąder atomowych. Udział w sesji uświetnili swoimi wystąpieniami profesorowie Andrzej Białas, Larry McLerran, Maciej Nowak, Raju Venugopalan, Anna Staśto i Andrzej Rostworowski. Gratulacje z okazji jubileuszu przesłał Przewodniczący Rady Dyscypliny Nauki fizyczne w Uniwersytecie Jagiellońskim prof. Jacek Golak. Warto odnotować, że w sesji jubileuszowej uczestniczyło dwóch spośród założycieli i uczestników pierwszej Szkoły (1961) – profesorowie Andrzej Białas i Kacper Zalewski.

**Warszawa.** Laureatami tegorocznej edycji prestiżowej Nagrody Copernicus zostali profesorowie Andrzej Udalski z Uniwersytetu Warszawskiego oraz Joachim Wambgans z Uniwersytetu w Heidelbergu za przełomowy wkład w astrofizykę w dziedzinie badań nad soczewkowaniem grawitacyjnym oraz odkrywaniem planet pozasłonecznych. Nagroda przyznawana wspólnie przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej (FNP) i Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) honoruje badaczy za wyjątkowe osiągnięcia w ramach polsko-niemieckiej współpracy naukowej. Profesorowie Udalski i Wambgans od ponad 20 lat kierują pracami, których celem jest badanie planet w innych układach gwiazdowych i które zrewolucjonizowały tę dziedzinę astronomii. Wykorzystanie soczewkowania grawitacyjnego przyniosło

znaczący postęp w wykrywaniu i charakterystyki planet spoza Układu Słonecznego. Umożliwiło to dostrzeżenie planet krążących wokół gwiazd stanowiących soczewki grawitacyjne.

**Łódź.** Członkowie Oddziału Łódzkiego PTF pod przywództwem prof. Tadeusza Wibiga (UŁ) kontynuują popularyzację wiedzy o promieniowaniu kosmicznym. W ramach projektu Kosmos widziany z Łodzi 2 uczniowie szkół średnich budują na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej UŁ detektory do wykrywania promieniowania kosmicznego. Stacja pomiarowa składa się z czterech detektorów scyntylacyjnych wielkości kartki A5 i układu zbierania danych wykrywającego koincydencje. Studenci (pod opieką Michała Karbowiaka) wspierają uczniów w projektowaniu, montażu i kalibracji detektorów, dzieląc się z nimi swoją wiedzą i doświadczeniem. Jednocześnie uczniowie są przygotowani do udziału w programie Zdolny uczeń, świetny student, który zapewnia niezbędne podstawy teoretyczne i praktyczne, które pozwalają im skutecznie realizować zadania projektowe i osiągać imponujące rezultaty. Wstępne wyniki uzyskane za pomocą teleskopu mionów w ramach realizacji projektu CREDO-Maze wskazują na wysoką jakość pomiarów. Detektor oraz układ zbierania danych (DAQ) zaprojektowany i wykonany własnoręcznie przez pracowników Uniwersytetu Łódzkiego Michała Karbowiaka i Tadeusza Wibiga był testowany w kopalni soli, gdzie promieniowanie kosmiczne jest tłumione przez warstwę ziemi i test wypadł doskonale, liczba zliczeń spadła zgodnie z przewidywaniami. Badania wykonane w „układzie teleskopu”, w którym detektory znajdują się jeden nad drugim, wykazały doskonałą efektywność pomiarową teleskopu jako stacji pomiarowej. Pomiar, które w takiej konfiguracji mogą być prowadzone przez uczniów szkół średnich i studentów uczelni, są doskonałym narzędziem dydaktycznym do wprowadzenia w problematykę programistycznej obróbki danych doświadczalnych z wykorzystaniem koincydencji wyników pomiarowych. Problematykę wykorzystania w edukacji projektu CREDO-Maze przedstawiono w opublikowanej ostatnio pracy (<https://doi.org/10.3390/universe10090346>), której współautorami są wspomniani wyżej naukowcy – członkowie Oddziału Łódzkiego PTF.

**Warszawa.** W dniach 24.06-05.07.2024 odbyła się w Warszawie Letnia Szkoła Fizyki. Wydarzenie organizowane przez Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego wraz z Polskim Towarzystwem Fizycznym oraz Miastem Stołecznym Warszawa w ramach akcji Lato w mieście cieszyło się bardzo dużym zainteresowaniem.

sowaniem. Program Letniej Szkoły Fizyki skierowany był do uczniów ostatnich klas szkół podstawowych oraz uczniów szkół ponadpodstawowych zainteresowanych naukami przyrodniczymi, chcących zapoznać się z najnowszymi osiągnięciami nauki w dziedzinie fizyki i astronomii. Organizatorzy na zajęciach chętnie widzieli zarówno młodzież z kół naukowych, jak i uczniów indywidualnych. Wykład inauguracyjny *Krótkie, krótsze i najkrótsze... impulsy laserowe* wygłosił prof. Piotr Fita.

**Lublin.** W dniach 30.06–05.07.2024 na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej (UMCS) w Lublinie odbyła się XI Conference on Nanotechnology (NANO2024) – wydarzenie wpisane w uroczyste obchody rocznicy 80-lecia istnienia UMCS. Jest to cykliczna konferencja naukowa, która w ostatnich latach odbywała się w Krakowie, Wrocławiu, Łodzi, Gdańsku, Poznaniu i Warszawie. Komitet Naukowy konferencji wyróżnił i docenił osiągnięcia naukowców lubelskich uczelni i powierzył Instytutowi Fizyki UMCS w Lublinie organizację tego wydarzenia w roku 2024. Współorganizatorami konferencji był Oddział Lubelski Polskiego Towarzystwa Fizycznego oraz Oddział Lubelski Polskiej Akademii Nauk; w pracach Komitetu Naukowego wzięli udział wybitni naukowcy z polskich uczelni i instytucji naukowych. Tematyka obejmowała najnowsze trendy i osiągnięcia w dziedzinie nanotechnologii, dotyczyła takich zagadnień jak nanoelektronika i nanofotonika, układy niskowymiarowe 1D i 2D, nanokataliza, nanotribologia, podstawy chemiczne i fizyczne nanotechnologii, nanobiotechnologia, nanomedycyna, produkcja i charakterystyka nanomateriałów oraz praktyczne zastosowania nanotechnologii. Zagraniczni uczestnicy reprezentowali 14 światowych ośrodków naukowych z wielu krajów: Niemcy, Włochy, USA, Szwajcaria, Holandia, Hong Kong, Filipiny. 17 polskich instytucji naukowych prowadzących badania w dziedzinie nanotechnologii było reprezentowanych na tej konferencji, w której ogółem uczestniczyło ponad 120 osób. Konferencja odbyła się pod patronatem prezydenta miasta Lublina dr. Krzysztofa Żuka oraz rektora UMCS prof. dr. hab. Radosława Dobrowolskiego. Konferencji towarzyszyła wystawa sprzętu badawczego, aparatury próżniowej, nanomateriałów oraz urządzeń produkcji firm komercyjnych: Measline, nLAB, Precvac, Vaccum, Technosolutions, Uniexport, Specsgroup, Comef. Oprócz bogatego programu naukowego, organizatorzy zapewnili uczestnikom także inne atrakcje, takie jak zwiedzanie Lublina, specjalny koncert w Operze Lubelskiej czy przejażdżka zabytkowymi autobusami (<https://nano2024.umcs.eu>). Kolejna konferencja z tego cyklu odbędzie się w 2026 w Toruniu.

## LIPIEC 2024

**Budapeszt.** W dniach 10–17.07.2024 odbył się w Budapeszcie Międzynarodowy Turniej Młodych Fizyków, z którego polska reprezentacja wróciła ze złotym medalem. Osiągnęła to drużyna licealistów z Klubu Naukowego Fenix, w skład której weszli: Paweł Ptaszek (kapitan), Antoni Kujawski, Zofia Lamęcka i Maksymilian Ogiela. Ich opiekunami byli Jana Turczynowicz, Radosław Waszkiewicz i Łukasz Gładczuk. Podczas finałów turnieju, drużyny prowadzą debaty, w których trzeba zaprezentować własne rozwiązanie wcześniej opracowanych wybranych problemów naukowych i znaleźć luki w rozwiązaniach przeciwnika. W tegorocznej edycji zmierzyły się drużyny z 38 krajów. Naszych złotych medalistów w drodze po medal wspierali: Caladan, Polskie Towarzystwo Fizyczne, Instytut Fizyki PAN, Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej oraz projekt Ochota na Naukę.

**Rzeszów.** W dniach 11–20.07.2024 w Bezmiechowej Górnej na Podkarpaciu odbyła się 15. edycja międzynarodowej szkoły fizyki cząstek elementarnych Trans-European School of High Energy Physics (TESHEP 2024). Wydarzenie odbywało się pod patronatem Sekcji Fizyki Oddziałów Fundamentalnych Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Uczestnikami byli młodzi naukowcy rozpoczynający karierę – studenci i doktoranci, którzy mogli wziąć udział w wykładach dotyczących podstaw fizyki cząstek, seminariach przedstawiających szczegółowo konkretne zagadnienia badawcze oraz zajęciach praktycznych dotyczących statystycznej analizy danych. Istotną częścią szkoły były również zajęcia dyskusyjne w grupach pod opieką wykładowców, które miały pomóc uczestnikom szkoły w przygotowaniu wystąpień dotyczących ich własnych badań. Prezentacje te zostały wygłoszone ostatniego dnia podczas mini konferencji studenckiej. Główni organizatorzy szkoły to: Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, IJCLab w Orsay (Francja), Uniwersytet Rzeszowski oraz Politechnika Rzeszowska przy wsparciu PAN, NuPECC i CERN (<https://teschool24.ijclab.in2p3.fr>).

## SIERPIEŃ 2024

**Gdańsk.** W dniach 01–03.08.2024 Politechnika Gdańska (PG) po raz kolejny uczestniczyła w Strefie Akademii Sztuk Przepięknych (ASP) na festiwalu Po'land'Rock, promując nauki ścisłe i techniczne. Na stoisku PG odbywały się interaktywne pokazy oraz warsztaty przyciągające uczestników w każdym wieku, którzy zdobywali nową wiedzę i odkrywali, że nauka może być fascynująca oraz zrozumiała dla każdego. Oprócz warsztatów

prorowadzone były także wykłady i dyskusje o roli nauki w życiu codziennym oraz jej wpływie na przyszłość. To sprawiło, że młodzi ludzie interesowali się kierunkami studiów na PG, pytali o proces rekrutacji, dostępne ścieżki kształcenia i perspektywy, jakie oferuje uczelnia. Obecność na festiwalu Poland'Rock to część szerszej strategii PG, której celem jest popularyzacja nauk ścisłych i technicznych oraz inspirowanie młodych ludzi do wyboru kariery związanej z nauką i inżynierią.

**Łódź.** W dniach 09-13.08.2024 Centrum Nauczania Matematyki i Fizyki Politechniki Łódzkiej (PŁ) przy współudziale innych jednostek uczelni przeprowadziło XIV już edycję Tygodnia z matematyką, fizyką i chemią na PŁ. 158 uczniów klas maturalnych LO w Poddębicach, I LO w Tomaszowie Mazowieckim, I LO w Sieradzu oraz II LO w Wieluniu wraz z nauczycielami gościło przez tydzień na terenie uczelni uczestnicząc w przygotowanych dla nich zajęciach z matematyki, fizyki laboratoryjnej i chemii. W Laboratorium Fizyki przeprowadzono pokazy ciekawych eksperymentów ze wszystkich działów fizyki wraz z dyskusją i omówieniem obserwowanych zjawisk.

#### WRZESIEŃ 2024

**Warszawa.** W dniach 16-20.09.2024 na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego odbyła się 25th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (HMF-25), będąca wydarzeniem towarzyszącym odbywającej się w Ottawie International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-2024), zainicjowanej przez przez Gottfrieda Landwehra w Würzburgu w 1972. Tematyka HMF-25 skupia się na fizyce układów niskowymiarowych oraz zastosowaniu pól magnetycznych. W czasie konferencji uczestnicy mogli posłuchać 67 referatów oraz obejrzeć 23 plakaty. Konferencję współfinansował Instytut Studiów Zaawansowanych.

**Warszawa.** W dniach 16-19.09.2024 odbyła się na Politechnice Warszawskiej konferencja Fall Meeting of the European Materials Research Society (E-MRS). Tematyka konferencji obejmowała materiały energetyczne, elektronikę, fotonikę, spintronikę, nanomateriały, materiały funkcjonalne i modelowanie. Organizacją konferencji kierowali Jin Hyeok Kim, Małgorzata Lewandowska i Valentin Craciun, a instytucjonalnymi organizatorami były European Materials Research Society, Politechnika Warszawska i Instytut Fizyki PAN.

**Warszawa.** Ósme sympozjum interdyscyplinarne SFINKS odbyło się 18.09.2024 na Politechnice Warszawskiej. Spotkało się 40 uczestników – młodych badaczek i badaczy z polskich i zagranicznych instytu-

cji naukowych zainteresowanych interdyscyplinarnymi zastosowaniami fizyki, od biologii i medycyny, przez sieci złożone, ekonomię, po problemy przeciążenia informacją. Patronami wydarzenia był Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej oraz oddział Warszawski i sekcja FENS Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

**Warszawa.** 21.09.2024 w Gmachu Fizyki Politechniki Warszawskiej odbył się po raz trzeci Festiwal Młodych Inżynierów, który wspólnie organizuje pięć Wydziałów PW: Fizyki, Inżynierii Materiałowej, Mechaniczny Technologiczny, Mechatroniki oraz Zarządzania. Każdy wydział przygotował dla odwiedzających inżynierskie zagadki i zadania, z którymi mogli się zmierzyć uczestnicy festiwalu w różnym wieku. Festiwal Młodych Inżynierów stanowił część 28. Festiwalu Nauki w Warszawie.

**Katowice.** Na terenie Wydziału Nauk Ścisłych i Technicznych chorzowskiego kampusu Uniwersytetu Śląskiego w dniach 09-27.09.2024 odbywała się kolejna edycja interdyscyplinarnych wykładów dla szkół Nauka wokół nas, podczas których zespoły wykwalifikowanych wykładowców i dydaktyków wprowadzają widzów w świat eksperymentalnej pracy naukowców. Dzięki wspólnemu eksperymentowaniu i bogatej interakcji z uczniami cykl cieszy się wyjątkowym zainteresowaniem, a treści, dostosowywane do konkretnej grupy wiekowej odbiorców, pozwalają na poszerzenie perspektywy ponad zakres szkolnej podstawy programowej nauczania przedmiotów ścisłych. Tematem przewodnim pierwszej części było wspólne odkrywanie tajemnic skrajnych temperatur w laboratoriach i kosmosie, a także zmiany właściwości materii w zależności od temperatury. Druga część wyjaśniała tajemnice fizyki materii używanej w kuchni (tępienie się noży, zużycie garnków, kuchnia molekularna: technika sferyfikacji), które były przekazane adeptom przez doświadczonych specjalistów inżynierii materiałowej. Nie zabrakło również części dotyczącej chemii środków czystości.

**Wrocław.** W 2021 roku Politechnika Wrocławska upamiętniła 100-lecie urodzin Stanisława Lema ustanawiając Europejską Nagrodę Naukową jego imienia, przyznawaną corocznie młodym naukowcom studiującym lub prowadzącym badania w Unii Europejskiej. Laureata wybiera kapituła składająca się z wybitnych naukowców z Polski i zagranicy, wspierana przez Tomasza Lema, syna patrona nagrody. [W poprzednich latach nagrodę otrzymali: ekspert w inżynierii genetycznej prof. Randall J. Platt z ETH w Zürichu oraz prof. Samuel Stranks z Uniwersytetu w Cambridge, specjalista w dziedzinie optoelektroniki.] Nagrodę Lema 2023 otrzymał dr Ido Kaminer, profesor nadzwyczajny w Technion – Israel Institute of Technology, pionier w dziedzinie badań nad



interakcją światła ze swobodnymi elektronami, który jako pierwszy pokazał, że promieniowanie swobodnych elektronów może zostać splątane z emitującym je elektronem. Jego prace przetrwały ścieżki do nowych sposobów wykorzystania elektronów w generowaniu promieniowania rentgenowskiego, badaniu spójnych interakcji światło-materia wysokiej rozdzielczości oraz rejestrowaniu dynamiki kwazicząstek fotonicznych. W swojej pracy Ido Kaminer łączy błyskotliwość teoretyka i mistrzostwo eksperymentatora, dzięki czemu rozwinął makroskopową elektrodynamikę kwantową (MQED) w takich nowych układach optycznych, jak materiały hiperboliczne, platformy nanofotoniczne i materiały 2D. Ido Kaminer przeszedł wszystkie etapy edukacji w Technionie. Po obronie doktoratu (2014) przeniósł się na staż podoktorancki do USA, gdzie spędził cztery lata w Massachusetts Institute of Technology. Rozwinął tam zręby teorii MQED. Badania kontynuował po powrocie w 2018 na macierzystą uczelnię, na której pracuje do tej pory. Ido Kaminer jest laureatem wielu nagród i stypendiów: ERC Starting Grant, grant fundacji Moore'a i Schmidt Science Polymath Award 2022, J Krill Prize 2021, Blavatnik Award in Physical Sciences & Engineering za rok 2021, a także Adolph Lomb Medal 2022 – najważniejszej międzynarodowej nagrody dla młodego naukowca zajmującego się optyką. W trakcie uroczystości wręczenia nagrody, statuetki wykonanej przez prof. Przemysława Tyszkiewicza, laureat wygłosił wykład *Shining Light on the Quantum World*, w trakcie którego opowiedział nie tylko o prowadzonych przez siebie projektach, lecz także o swoim dziadku, który zachęcił go do kariery naukowej. Sponsorami i partnerami nagrody Lem Prize 2023 są: Bergman Engineering, Nokia, Fundacja Empiria i Wiedza, PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna SA, PCC Rokita SA oraz PKO Bank Polski.

---

### Z ostatniej chwili

**Warszawa.** 25.11.2024 w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku obchodzono **50. rocznicę funkcjonowania reaktora MARIA**. Ten jedyny działający w Polsce reaktor jądrowy został uruchomiony w grudniu 1974. W uroczystości uczestniczyli przedstawiciele ministerstw i innych centralnych urzędów państwowych, ambasadorzy lub ich reprezentanci, przedstawiciele organizacji samorządu terytorialnego oraz licznych organizacji międzynarodowych związanych z wykorzystywaniem reaktorów jądrowych. Warto tu wspomnieć przemówienie podsekretarza stanu w Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego Andrzeja Szeptyckiego oraz nawiązanie do tradycyjnej polsko-francuskiej współpracy naukowej w wystąpieniu Etienne de Poncis – ambasadora Francji. Zebrani wysłuchali odtworzonego

wystąpienia ambasadora USA Marka Brzezinskiego, który podkreślił udział radiofarmaceutyków produkowanych w reaktorze MARIA w procedurach medycznych realizowanych dla obywateli USA oraz udział USA w powstawaniu energetyki jądrowej w Polsce. Gratulacje złożył prezydent miasta Otwocka Jarosław Margielski, na którego terenie MARIA funkcjonuje, a także przedstawicielka marszałka województwa mazowieckiego Adama Struzika. Listy gratulacyjne nadesłali zwierzchnicy licznych polskich i zagranicznych instytucji, z którymi NCBJ współpracuje.

Reaktor MARIA nie jest jedynym reaktorem jądrowym, który funkcjonował na terenie ośrodka naukowego NCBJ. Historycznie pierwszym (1958) był reaktor EWA (którego pozostałości całkowicie usunięto w 2002 roku), potem zbudowano kilka reaktorów testowych. Budowę reaktora MARIA rozpoczęto w połowie 1970 roku, a stan krytyczny reaktor uzyskał 18.12.1974 o godzinie 0:17. W trakcie eksploatacji reaktor był wielokrotnie modernizowany. Do najważniejszych modernizacji należy proces konwersji paliwa jądrowego. Początkowo eksploatowano uran wysoko wzbogacony (80%) izotopem  $^{235}\text{U}$ , po czym zredukowano to wzbogacenie w dwóch etapach. Obecnie wykorzystywane jest paliwo wzbogacone izotopem  $^{235}\text{U}$  w stopniu poniżej 20%. Użycie tego uboższego paliwa wiązało się z poważnymi zmianami konstrukcyjnymi, zaprojektowanymi i wykonanymi przez personel instytutu (początkowo Instytut Badań Jądrowych, potem Instytut Energii Atomowej, obecnie Narodowe Centrum Badań Jądrowych). Modernizowano także układy chłodzenia, układy bezpieczeństwa i sterowania. Reaktor MARIA nie jest więc zaawansowanym wiekowo urządzeniem, lecz nowoczesnym reaktorem spełniającym wszystkie normy bezpieczeństwa. Trwający program modernizacyjny pozwala snuć plany eksploatacji obejmujące połowę XXI wieku.

MARIA to reaktor badawczy, a nie energetyczny. Dostępne w reaktorze neutrony wykorzystuje się jednak nie tylko do celów naukowych (np. do badań materiałów czy zniszczeń radiacyjnych), ale także do wytwarzania radioizotopów potrzebnych do różnych procedur, w tym diagnostycznych i terapeutycznych. Rozważa się także terapię BNCT (ang. Boron Neutron Capture Therapy), w której neutrony stymulują rozpady promieniotwórcze w tkankach nowotworowych. W reaktorze MARIA wytwarzany jest promieniotwórczy izotop  $^{99}\text{Mo}$ , wykorzystywany w wielu procedurach medycznych. Obecnie 10% światowej produkcji tego izotopu pochodzi z polskiego reaktora. Około 100 tysięcy pacjentów tygodniowo jest diagnozowanych z użyciem radiofarmaceutyków wytwarzanych przez reaktor MARIA.

Tomasz Matulewicz  
(Wydział Fizyki UW)

---



W znanym wszechświecie, wśród (szacunkowo) stu miliardów układów planetarnych ewoluujące życie z pewnością występuje w obfitości. Ta ewolucja jest w każdym przypadku procesem „stawania się”. Od czasów Newtona używamy fizyki, aby dokonywać oceny rzeczywistości. Sama fizyka jednak nie jest w stanie powiedzieć nam, skąd pochodzimy, jak się tu znaleźliśmy i dlaczego nasz świat wyewoluował od organizmów jednokomórkowych do niezwykle złożonej biosfery.



Najnowsza książka **Stuarta Kauffmana** zawiera wyjaśnienie (wykraczające poza wnioski płynące z praw fizyki) procesu przejścia od złożonego środowiska chemicznego do reprodukcji molekularnej, metabolizmu i wczesnych protokomórek oraz dalszej ewolucji w kierunku tego, co uznajemy za życie.

75 LAT

POSTĘPY FIZYKI