

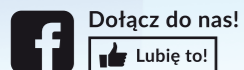
Grzegorz Karwasz Andrzej Karbowski Kamil Fedus

Dydaktyka fizyki współczesnej

# Dydaktyka

fizyki współczesnej

Grzegorz Karwasz  
Andrzej Karbowski  
Kamil Fedus



Lubie to!

[www.wydawnictwoumk.pl](http://www.wydawnictwoumk.pl)

ISBN 978-83-231-4933-0



9 788323 149330



WYDAWNICTWO NAUKOWE  
UNIwersytetu  
MIKOŁAJA KOPERNIKA



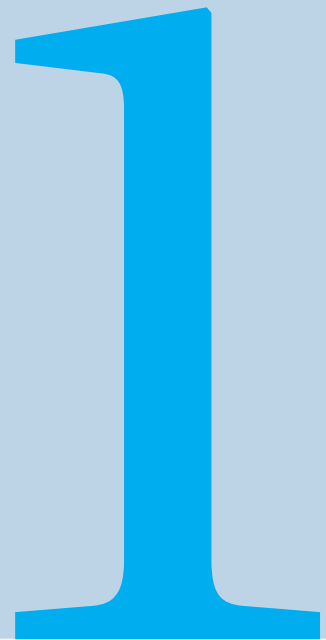


# Spis treści

<b>1. Co to jest fizyka współczesna?</b>	<b>5</b>
1.1. Fizyka kwantowa . . . . .	5
1.2. Teoria względności . . . . .	11
1.3. Zastosowania fizyki współczesnej . . . . .	13
1.4. Struktura podręcznika . . . . .	15
<b>2. Fizyka i astronomia: harmonia sfer</b>	<b>17</b>
2.1. Już starożytni Maltańczycy... . . . .	17
2.2. Kepler: w poszukiwaniu matematycznego piękna . . . . .	21
2.3. Kosmologia . . . . .	26
<b>3. Fizyka i matematyka: kwadratura koła</b>	<b>31</b>
3.1. Skąd się wzięła matematyka? . . . . .	31
3.2. Poszukiwania „porządku” . . . . .	35
3.3. Historia i współczesność matematyki . . . . .	38
<b>4. Klimat, środowisko, energia – czyli o efekcie cieplarnianym</b>	<b>43</b>
4.1. Równowaga termodynamiczna . . . . .	43
4.2. Cykle Milankovicia . . . . .	45
4.3. Sprężenia zwrotne . . . . .	46
4.4. Gazy cieplarniane . . . . .	46
4.5. Antropogeniczny efekt cieplarniany . . . . .	48
<b>5. Klimat i środowisko – alternatywne źródła energii</b>	<b>51</b>
5.1. „Produkcja” energii . . . . .	51
5.2. Źródła energii wolne od węgla . . . . .	52
<b>6. Fala grawitacyjna</b>	<b>57</b>
6.1. Dlaczego fala? . . . . .	57
6.2. Ogólna teoria względności . . . . .	61
6.3. Zadrzała czasoprzestrzeń . . . . .	64
6.4. Inne efekty OTW . . . . .	68
<b>7. Laser – największy(?) wynalazek XX wieku</b>	<b>71</b>
7.1. Zasada działania lasera . . . . .	71
7.2. Laser gazowy He-Ne . . . . .	72
7.3. Zastosowania laserów . . . . .	74
7.4. Podwójna natura światła . . . . .	75

<b>8. Zagadkowe promieniowanie</b>	<b>77</b>
8.1. Promienie Röntgena . . . . .	77
8.2. Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) . . . . .	81
<b>9. Spektroskopia, czyli nauka o duchach</b>	<b>83</b>
9.1. Spektroskopia optyczna . . . . .	84
9.2. Spektroskopia fotoakustyczna . . . . .	85
9.3. Spektroskopia transferu protonu . . . . .	86
<b>10. Od ogniwa Volty do reaktora termojądrowego</b>	<b>89</b>
10.1. Pilna konieczność . . . . .	89
10.2. Ogniwo Volty . . . . .	90
10.3. Ogniwo wodorowe . . . . .	92
10.4. Alternatywy dla energetyki uranowej . . . . .	96
10.5. Reaktor termojądrowy . . . . .	98
<b>11. Rewolucja kwantów i atomów</b>	<b>101</b>
11.1. Hipoteza kwantów światła . . . . .	101
11.2. Efekt fotoelektryczny . . . . .	105
11.3. Spektroskopia atomowa . . . . .	107
11.4. Współczesny obraz atomu . . . . .	108
<b>12. Mechanika falowa</b>	<b>115</b>
12.1. Dualizm korpuskularno-falowy światła . . . . .	115
12.2. Falowa natura materii – hipoteza de Broglie’a . . . . .	117
12.3. Równanie falowe Schrödingera . . . . .	120
12.4. Zasada nieoznaczoności Heisenberga . . . . .	124
<b>13. Podzielić niepodzielny</b>	<b>127</b>
13.1. Promieniowanie $\alpha$ , $\beta$ i $\gamma$ – zarys historyczny . . . . .	127
13.2. Budowa i właściwości jądra atomowego . . . . .	130
13.3. Rozpady promieniotwórcze . . . . .	133
13.4. Rozszczepienie jądra atomowego . . . . .	136
<b>14. Kwarki i skwarki</b>	<b>139</b>
14.1. Kwarki . . . . .	139
14.2. Cząstki niepodzielne i podzielne . . . . .	141
14.3. Podsumowanie . . . . .	143





# Co to jest fizyka współczesna?

Zazwyczaj jako „fizykę współczesną” określa się fizykę XX wieku. Ale jesteśmy już (2024) w jednej czwartej XXI wieku i to wyjaśnienie niedługo nie będzie miało racji bytu. Tradycyjnie też za początek fizyki współczesnej uważa się wykład Maxa Plancka w Niemieckim Towarzystwie Fizycznym w czwartek<sup>1</sup>, 13 grudnia 1900 roku, o godz. 16:30, na którym po raz pierwszy padło sformułowanie „hipoteza kwantów”. Max Planck dla wyjaśnienia dość banalnego zjawiska, jakim jest natężenie kolorów w tęczy, musiał założyć, że światło niesie energię nie w sposób ciągły, ale w porcjach, czyli kwantach.

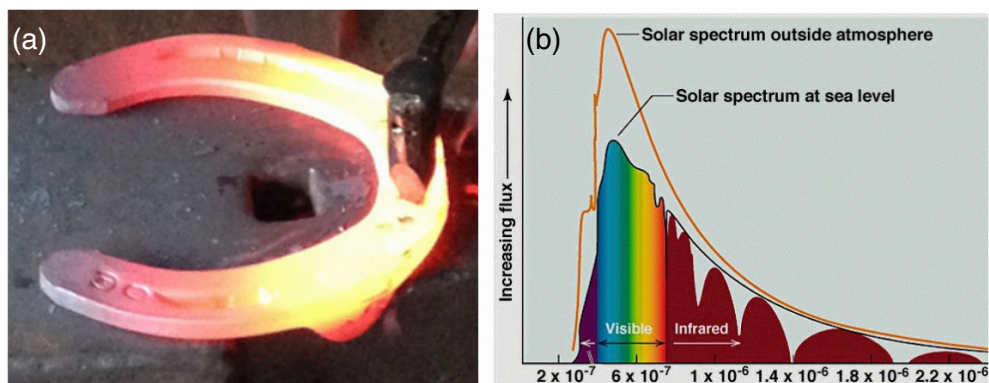
## 1.1. Fizyka kwantowa

### 1.1.1. Max Planck i hipoteza kwantów światła

Max Planck, profesor fizyki teoretycznej w Berlinie, postanowił połączyć dwa nowo powstałe wówczas działy fizyki: fale elektromagnetyczne przewidziane przez równania Maxwella i prawa termodynamiki, sformułowane dopiero co przez Joule’a, Maxwella i Boltzmanna. Były to zupełnie różne dziedziny, ale widmo Słońca (i rozgrzanej podkowy) było zjawiskiem wspólnym: światło to fala elektromagnetyczna i jeśli zmienia się kolor, czyli *widmo*<sup>2</sup>, w zależności od temperatury, to musi być ku temu jakaś przyczyna.

<sup>1</sup> Do niedawna, również w Instytucie Fizyki UMK „kolokwia czwartkowe” rozpoczynały się o godz. 16:30. Zostały one zapoczątkowane przez prof. Aleksandra Jabłońskiego, założyciela Instytutu Fizyki w 1946 roku, a przed II wojną światową stypendystę w Berlinie.

<sup>2</sup> Widmo, czyli obraz, w fizyce oznacza, dla określonego zjawiska, zależność jednej wielkości od innej, najczęściej przedstawioną graficznie. Na rys. 1.1b przedstawiona jest zależność natężenia światła Słońca od długości fali (jednostki względne na osi Y, długość fali w metrach na osi X). Zakres widzialny, od koloru fioletowego do czerwonego to  $0,38 - 0,76 \times 10^{-6}$  m.



Rysunek 1.1. Cała fizyka współczesna zaczęła się od banalnego pytania: dlaczego podkowa zmienia swój kolor w miarę wzrostu temperatury? I podkowa, i powierzchnia Słońca, i włókno wolframowe żarówki emitują światło jak tzw. ciało doskonale czarne (tj. duże pudło z małym otworem). Rozkład natężenia światła emitowanego przez ciało doskonale czarne można opisać wzorem wyprowadzonym przez Maxa Plancka (widmo Słońca na rys. 1.1b jest w przybliżeniu widmem ciała doskonale czarnego - źródło: R. Dambreville <sup>3</sup>)

Było już wiadomo, że materia ma strukturę atomową, a w 1897 roku J. J. Thomson „odkrył”<sup>4</sup> elektron, czyli nośnik (ujemnego) ładunku elektrycznego. Wiadomo też było, z doświadczenia Hertza, że źródłem fali elektromagnetycznej są poruszające się ładunki. Planck założył więc, że źródłem fali elektromagnetycznej w pudle są drgające ładunki – oscylatory. W czarnym pudle, podobnie jak we wnętrzu rezonansowej, mogą powstawać fale stojące o ściśle określonej długości, tak aby na brzegach pudła miały one „węzły” (czyli zerową amplitudę), zob. rozdział 11.

Dla długich fal jasne było, że fale *dłuższe* niż rozmiary pudła w nim się nie „zmieszczą”. Dla fal krótkich takiego ograniczenia nie było. Prowadziło to do tzw. katastrofy w nadfiolecie – nieskończenie wiele energii byłoby niesione przez fale krótkie. Planck musiał więc założyć pewne ograniczenie: energia niesiona przez falę elektromagnetyczną (czyli emitowana przez pojedynczy oscylator) zależy od długości fali  $\lambda$  – im krótsza fala, tym większa porcja energii  $E$ , którą pojedynczy *kwant* światła niesie. Zapisujemy to wzorem, który leży u podstaw fizyki współczesnej:

$$E = h\nu, \quad (1.1)$$

gdzie  $\nu$  jest częstotliwością fali związaną z jej długością  $\lambda$  poprzez zależność  $\nu = c/\lambda$  ( $c$  to prędkość światła). Planck podał też przybliżoną wartość stałej  $h$ , zwanej dziś stałą Plancka. Porcja energii (a w zasadzie iloczyn energii i czasu) niesiona przez światło podana w dżulach jest niewielka:  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  Js. Ale jest to porcja energii, która dla pojedynczego atomu czy cząsteczki jest „właściwa”. Kwant światła fioletowego ( $\lambda = 380$  nm) niesie energię 3,6 eV (w jednostkach elektronowolt<sup>5</sup>), a światła czerwonego ( $\lambda = 760$

<sup>3</sup> Dambreville, Romain. (2014). Nowcasting and very short term forecasting of the global horizontal irradiance at ground level : application to photovoltaic output forecasting. Praca doktorska

<sup>4</sup> To „odkrył” oznacza, że dokonał pomiaru ładunku elektrycznego  $e$  i masy elektronu  $m$ , a w zasadzie jedynie stosunku  $e/m$ , bo na to pozwalał typ przeprowadzonych eksperymentów.

<sup>5</sup> 1 eV jest to energia, jaką zyskuje ładunek jednego elektronu (czyli  $1,6 \times 10^{-19}$ C) przyspieszony różnicą potencjału 1 volta. Różnica potencjału 1 V jest „namacalna”, czyli charakterystyczna dla procesów

nm) energię 1,8 eV.

Założenie o kwantach światła, dziś zwanych fotonami<sup>6</sup>, pozwoliło rozwiązać problem „katastrofy w nadfiolecie” (zob. rozdział 11), a przewidziany rozkład energii fotonów emitowanych przez ciało doskonale czarne okazał się ogólnym prawem fizyki, stosującym się tak do widma Słońca jak do widma fal elektromagnetycznych (w zakresie mikrofal) pochodzących z początku Wszechświata, a do tej pory „pałających” się po przestrzeni kosmicznej.

### 1.1.2. Efekt fotoelektryczny

Pod koniec XIX wieku odkryto doświadczalnie ważne zjawisko, tzw. *efekt fotoelektryczny*. Nieco wcześniej zbudowano źródła wysokiego napięcia (np. tzw. cewkę Ruhmkorffa<sup>7</sup>), nauczono się odpompowywać powietrze ze szklanych ampulek i kontrolować wyładowania elektryczne w gazach, powstały też sztuczne źródła światła, np. łuk elektryczny.

Było już wiadomo, że elektrycznie naładowana kula (ale ładunkiem ujemnym) rozładowuje się pod wpływem oświetlenia (światłem nadfioletowym). Paul Lenard, uczonek niemiecki, zaczął to zjawisko szczegółowo badać w tym samym czasie, kiedy Joseph John Thomson badał wiązki elektronów.

Lenard mierzył energię elektronów emitowanych w próżni przez różne metale oświetlone nadfioletem. Jako źródła światła używał łuku elektrycznego, z elektrodami węglowymi lub cynkowymi. Wyniki badań (1902 r.) były zaskakujące: natężenie emitowanego prądu elektronów zależało od natężenia światła, ale energia elektronów (tzn. potencjał elektryczny, który je skutecznie hamował) zależała tylko od koloru światła (rodzaju elektrod w łuku) i, oczywiście, rodzaju metalu w elektrodach emitujących elektrony (zob. rys. 1.2).

Wyjaśnienie wyników Lenarda podał w 1905 roku Albert Einstein (i za to odkrycie, a nie za teorię względności otrzymał w 1921 roku Nagrodę Nobla). Einstein założył, że nie tylko *emisja* światła zachodzi poprzez kwanty energii, ale że światło *przekazuje* energię również w kwantach. Zakładając (dość oczywiście), że elektrony w metalu są związane i że ta energia wiązania jest dla danego metalu charakterystyczna, można wywnioskować (przy założeniu, że określony kolor światła odpowiada ściśle określonej energii) jak energia kinetyczna wybitych elektronów zależy od energii fotonów. Oznaczając charakterystyczną energię wiązania elektronów w określonym metalu jako  $W$ , można zapisać następującą zależność:

$$h\nu = W + eU, \quad (1.2)$$

gdzie  $U$  jest minimalnym napięciem, przy którym elektrony nie docierają już do anody.

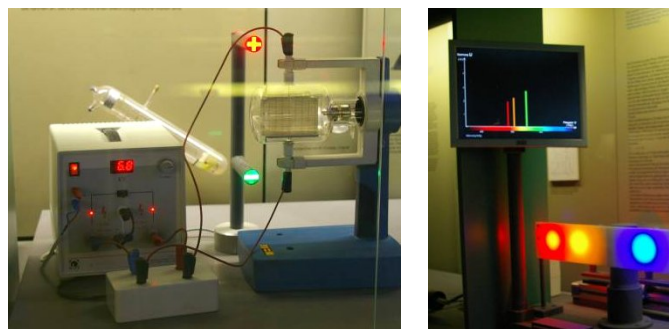
---

atomowych: jest to potencjał wytwarzany przez dwa kawałki metalu Cu i Zn zanurzone w szklance z wodą (czyli ogniwo Volty). Różnica potencjału 13,6 V wyrywa elektron z atomu wodoru (czyli dokonuje jonizacji atomu wodoru): jest to już dość duża energia.

<sup>6</sup> Określenie „foton” nie podobało się Planckowi, który jeszcze kilka lat po wprowadzeniu tego pojęcia (po pracach Einsteina z 1905 roku) protestował.

<sup>7</sup> G. Karwasz, „Zapalacz Ruhmkorffa”, Fizyka i Zabawki, CD-Rom, Soliton, Sopot, 2005, <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/elmag/zapalacz-pl.html> (dostęp 02.03.2022).





Rysunek 1.2. Rekonstrukcja doświadczenia Lenarda z 1902 roku w Muzeum Nauki w Monachium. Ze szklanej ampułki z metalowymi elektrodami w środku usunięto powietrze; jedna z elektrod (zwana katodą) emituje elektrony, o ile zostanie oświetlona; druga z elektrod, anoda, zbiera elektrony emitowane z katody. Do katody przyłożono niewielkie (maksymalnie kilka volt) napięcie dodatnie tak, aby mierzyć energię kinetyczną emitowanych elektronów: mierzy się wielkość napięcia między anodą i katodą, przy którym do anody przestają docierać elektrony. Różne diody laserowe emitują różne kolory: czerwony, żółty, niebieski. Widz wybiera kolor, a automatyczny system pomiarowy zmienia napięcie od zera aż do wartości  $U$ , która hamuje wszystkie wyemitowane z katody elektrony. Na monitorze (u góry na prawym zdjęciu) zaznaczana jest na osi pionowej wielkość tego napięcia hamującego: dla światła niebieskiego jest ona największa. Na osi poziomej oznaczona jest energia kwantów światła różnych kolorów, zgodnie ze wzorem Plancka  $E = h\nu$  (fot. zdjęcia prywatne GK)

### 1.1.3. Skwantowany atom Bohra

Jeśli atomy (oscylatory kwantowe u Plancka) emitują światło w kwantach i w kwantach dochodzą one do powierzchni metalu w doświadczeniu Lenarda (a do powierzchni półprzewodnika w aparatach fotograficznych telefonów komórkowych), to może i *poziomy* energii w atomach też są skwantowane? Tę hipotezę postawił w 1913 roku doktorant w Manchesterze, Duńczyk Niels Bohr.

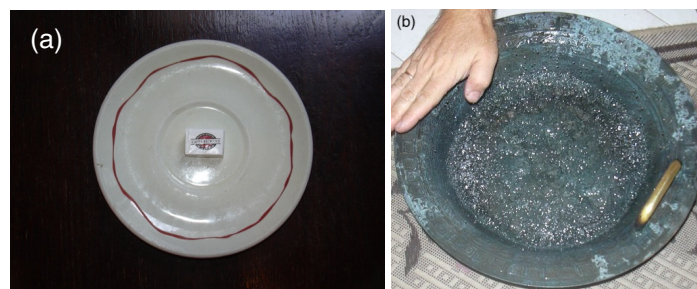
Hipoteza była tym bardziej uzasadniona, że znany był bardzo prosty wzór matematyczny określający położenie (tzn. długość fali) linii widmowych w atomie wodoru: podał go nauczyciel matematyki z Bazylei, Johann Balmer. Wzór tak prosty, aż nie do wiary, że czekał kilkanaście lat na odkrycie. Zapiszemy ten wzór, wiedząc, że  $h\nu$  ma sens energii: energia  $E_n$ , jaką niesie kwant linii widmowej w serii Balmera, wynosi

$$E_n = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (1.3)$$

gdzie  $R$  jest stałą i wynosi w znanych już nam jednostkach  $R = 13,6$  eV. Liczba  $n$  zależy od numeru linii i przyjmuje wartości  $n=3,4,5,6$  począwszy od linii czerwonej, przez turkusową i dwie fioletowe widoczne gołym okiem.

Aby wyjaśnić wzór Balmera, Bohr założył, że nie wszystkie orbity w atomie są dozwolone. Wyprzedzając nieco fakty, powiedzielibyśmy, że dozwolone są tylko te orbity, dla których fala de Broglie'a elektronu jest falą stojącą, jak wzór na spodku w kawiarni w Paryżu, zob. rys.1.3. Bohr podał to w innej postaci, korzystając z wielkości fizycznych znanych w 1913 roku<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Warunek Bohra to kwantowanie momentu pędu elektronu na danej orbicie, zob. rozdział 12.



Rysunek 1.3. (a) Postulat kwantowych orbit elektronu w atomie wodoru można wyprowadzić z warunku „zamykania się” fali stojącej de Broglie’a elektronu na orbicie tak jak w tym talerzyku do kawy w kawiarni Gay-Lussaca w Paryżu. (b) Podobną falę stojącą można wytworzyć w kieliszku z wodą, delikatnie pocierając jej brzeg. Obwód kieliszka drga, zginając się jakby w kwadrat, co widać po „zmarszczkach” na powierzchni wody. Identycznie działająca wykonana z brązu „tybetańska” misa ( źródło: G. Karwasz, zdjęcie prywatne, zob. też „Bohr i (nie) jego postulaty”, w "On the Track of Modern Physics", Uniwersytet w Trento, 2005)<sup>9</sup>

#### 1.1.4. Kwantowa mechanika falowa

Fotony Plancka (i Einsteina) oraz kwantowy model atomu wodoru składają się na to, co fizycy nazywają „starą” teorią kwantów. Model Bohra nie wyjaśniał widm optycznych atomów cięższych niż wodór, a przede wszystkim nie wyjaśniał regularności własności pierwiastków w układzie okresowym Mendelejewa: dlaczego atomy grupują się po 2, 8 lub 18 w linii, czyli w „okresie”?

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
Period 2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
Period 3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
Period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
Period 5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
Period 6	55 Cs	56 Ba	57 La	* 72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
Period 7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	* 104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
				* 58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
				* 90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Rysunek 1.4. Układ okresowy pierwiastków, stan na rok 2024, w jego rozwiniętej postaci. Podobne własności chemiczne powtarzają się najpierw w grupach po 10 atomów (Li- Ne, Na - Ar), później, w miarę przybywania „orbit” w atomie, w grupach po 18 atomów (źródło: Wikipedia<sup>10</sup>)

<sup>9</sup> [http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics\\_is\\_fun/html/bohr-en.html](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/html/bohr-en.html), dostęp 02.03.2022)

<sup>10</sup> [https://pl.wikipedia.org/wiki/Układ\\_okresowy\\_pierwiastków](https://pl.wikipedia.org/wiki/Uk%C5%82ad_okresowy_pierwiastk%C3%B3w) (dostęp 24.05. 2024. Obecnie (2024) najcięższym nazwanym pierwiastkiem jest *oganesson*, nazwany tak na cześć armeńskiego fizyka, Jurija Oganessiana. A element numer 112 to kopernik (łac. *copernicium*. Zob. artykuł G. Karwasz, "Oganesson 118. Czy to już koniec tablicy Mendelejewa?", Fizyka w Szkole, nr 4/2018)

„Stara” teoria kwantów nie wyjaśniała również, dlaczego niektóre gazy, jak argon czy krypton, stają się praktycznie przezroczyste dla elektronów, o ile te mają ściśle określoną energię (0,3 – 0,4 eV). Przypomina to przechodzenie światła przez szkło: szkło jest przezroczyste dla światła widzialnego, a nieprzezroczyste dla światła podczerwonego i nadfioletu. Ale światło jest falą, a elektron – cząstką. No, niezupełnie. Tak jak światło w zjawisku fotoelektrycznym zachowuje się jako cząstka, tak elektron w rozpraszaniu na atomach argonu zachowuje się jak fala: dla ściśle określonej energii przechodzi przez atom praktycznie bez zaburzenia, dokładniej: bez rozpraszania.

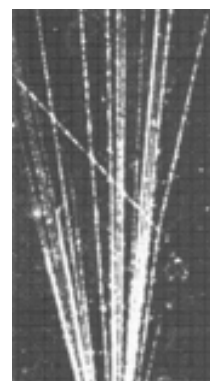
Potrzebne było więc równanie, podobne nieco do równania fali elektromagnetycznej, opisujące ruch elektronu i innych obiektów mikroświata. Przeczytacie o tym więcej w paragrafie 12.2. Umownie, autorzy tego podręcznika nazywają ten dział fizyki „teorią falową”, w odróżnieniu od wcześniejszej „teorii kwantowej”, która lepiej czy gorzej radziła sobie bez równania Schrödingera. Dziś równania kwantowej mechaniki falowej służą do wszystkiego – od poszukiwania nowych półprzewodników do projektowania skutecznych leków i sztucznych barwników.

Równanie falowe Schrödingera pozwoliło określić poziomy energii elektronów w atomie wodoru bez uciekania się do postulatów Bohra. Ale aby wyjaśnić regularności układu Mendelejewa, niezbędna jest jeszcze jedna zasada – tzw. zakaz Pauliego. Mówi on, że na danym orbitalu nie mogą znajdować się więcej niż dwa elektrony (zob. rozdziały 11 i 12). Tak jakby elektrony nawzajem się unikały.

### 1.1.5. Zasada nieoznaczoności i kot Schrödingera

Mechanika kwantowa dostarczyła jeszcze jednej niespodzianki – zasady nieoznaczoności Heisenberga. Rozważając widoczne tory cząstek alfa (zob. rozdział 13) w komorze detekcyjnej, niemiecki fizyk Werner Heisenberg doszedł do wniosku, że możemy określić albo położenie, albo pęd takiej cząstki: tam, gdzie jest ślad, cząstka na pewno była, bo dokonała zderzenia. Tam, gdzie jest przerwa między śladami, cząstka przeleciała i możemy stwierdzić w jakim czasie, czyli określić jej pęd. Rozważania, które prowadził Heisenberg były nieco bardziej skomplikowane, ale obserwacja śladów w komorze Wilsona (rys. 1.5) jest bardzo pouczająca. Zobacz na własne oczy formowanie się śladów trajektorii cząstek w takiej komorze, w doświadczeniach w Katedrze Dydaktyki Fizyki UMK, na stronie internetowej: [dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy\\_2012/20](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/20).

Rysunek 1.5. Ślady cząstek alfa (czyli jąder helu) emitowanych z atomu promieniotwórczego (np. polonu) w komorze Wilsona wypełnionej wodorem. Widać ślad zderzenia: kąt torów mniejszy niż  $90^\circ$  świadczy o zderzeniu cząstki cięższej z cząstką lżejszą (jąder  $^4\text{He}$  z jądrem  $^1\text{H}$ ). Zwraca uwagę, że tory nie są liniami ciągłymi: jest to zbiór punktów. Tam, gdzie cząstka, zderzając się, wybiła elektron z atomu wodoru, jest jasny punkt, tam, gdzie przeleciała bez zderzenia, jest ciemna przerwa. Możemy więc stwierdzić, albo gdzie cząstka była, albo między jakimi punktami przelatowała. Heisenberg ujął to w formie zasady nieoznaczoności (źródło: Haken i Wolf<sup>11</sup>)



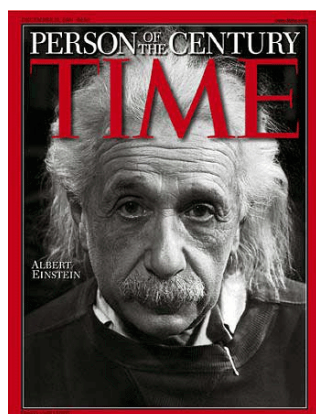


Z samego już równania Schrödingera wynika paradoks. Matematycznie, o ile rozwiązaniem równania mogą być określone funkcje  $\Psi_1$  i  $\Psi_2$ , to również kombinacja liniowa (czyli suma tych dwóch funkcji z odpowiednimi współczynnikami liczbowymi) też może być rozwiązaniem. Rozpad jąder promieniotwórczych jest procesem przypadkowym, a prawdopodobieństwo można wyliczyć z równania Schrödingera zastosowanego do przejścia cząstki alfa przez barierę potencjału. Schrödinger stworzył następujący eksperyment myślowy. Jeśli w klatce umieścimy kota i wycelujemy w niego pistolet podłączony do źródła radioaktywnego, to ponieważ rozpad jądra jest opisany przez *prawdopodobieństwo*, kot będzie *jednocześnie* nieco żywy i nieco martwy.

Paradoks został rozwiązany zupełnie niedawno (2014)<sup>12</sup>. Kot jest nieco żywy i nieco martwy, ale tylko tak długo, jak długo na niego nie spojrzymy. Wówczas jego stan staje się (a może też już był wcześniej?) ściśle określony, jak to argumentował Einstein.

## 1.2. Teoria względności

### 1.2.1. Wiek XX – wiek Einsteina



Rysunek 1.6. Albert Einstein wybrany człowiekiem XX wieku przez magazyn „Time” (grudzień 1999)

W 1999 roku tygodnik „Time” ogłosił wśród czytelników plebiscyt na osobistość XX wieku – wygrał bezapelacyjnie Albert Einstein. W jego czterech artykułach z 1905 roku zawarła się spora część rewolucji naukowej XX wieku. Zagadnienie ruchów stochastycznych w zawieszinach, tzw. *ruchów Browna* stosuje się nie tylko do dyfuzji gazów, ale też do percepcji wizualnej i słuchowej w warunkach hałasu i równowagi statycznej w chorobie Parkinsona. Każdy współczesny telefon jest wyposażony w urządzenie korzystające z efektu fotoelektrycznego. Równanie  $E = mc^2$  nie tylko jest wypisywane na murach, ale stało się również tytułem „kultowego” filmu polskiego na początku XXI wieku.

Wybitność Einsteina polega na tym, że podobnie jak Kopernik nie bał się prostych pytań i niezwykłych na nie odpowiedzi. Po sformułowaniu przez Maxwella praw elektromagnetyzmu można było przewidzieć prędkość światła w próżni:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \quad (1.4)$$

gdzie przenikalność magnetyczna próżni  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ , a przenikalność dielektryczna  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  (w jednostkach takich, że  $c$  podajemy w m/s). Prędkość Ziemi na orbicie wynosi 30 km/s, co stanowi zaledwie ułamek prędkości światła wynoszącej 300 tys. km/s. Ale pochodzący ze Strzelna (k. Torunia) amerykański fizyk Abraham Michelson za pomocą wymyślonej metody postanowił sprawdzić, czy przez pomiar zmiany prędkości

<sup>11</sup> H.Haken i H.C Wolf, *Atomy i kwanty*, PWN 2002

<sup>12</sup> Zob. J. Barrett et al. *Physical Review Letters* 112, 250403 (2014).

światła można zweryfikować ruch orbitalny Ziemi. Wynik doświadczenia przeprowadzonego najpierw w Poczdamie (1881 r.), a następnie powtórnego z większą dokładnością w Cleveland był zaskakujący: nie obserwuje się żadnej zmiany prędkości światła. Uzyskany wynik sugerował, że albo ośrodek, w którym rozchodzi się światło (uważano, że jest to jakiś *eter*) jest pociągany przez kulę ziemską, albo Ziemia spoczywa w kosmosie. Konsternacja! Wymyślono więc wyjaśnienie *ad hoc*: jedno z ramion urządzenia, za pomocą którego Michelson badał prędkość światła w prostopadłych kierunkach, skraca się (!) pod wpływem ruchu. Inną możliwą interpretacją jest, że to czas się wydłuża w poruszających się układzie. Ale dopiero Einstein wyjaśnił to dokładnie.

### 1.2.2. Konsekwencje szczególnej teorii względności

Einstein, z rozważań o energii i pędzie światła wywnioskował (1905 r.), że nie ma powodu, dla którego prędkość światła nie miałaby być stała – niezależnie od ruchu obserwatora<sup>13</sup>. Konsekwencje takiego założenia są zaskakujące: w układach poruszających się (w stosunku do obserwatora) czas płynie wolniej: jednostka czasu się wydłuża w stosunku do pomiaru w „naszym” układzie, a odległości w kierunku ruchu względnego skracają się.

Wzór  $E = mc^2$  pojawił się jako rozwinięcie tych wniosków: energia i masa są równoważne, są to dwie „formy” tej samej materii. Fotony niosą energię, ale zatrzymane nie mają masy; ujemny elektron i jego antycząstka (dodatni pozyton) anihilują, gdy się spotkają: cała masa zamienia się w energię dwóch (lub trzech) fotonów. W syntezie termojądrowej jednego jądra helu z dwóch jąder ciężkiego wodoru, mały ubytek masy przemienia się w ogromną energię wyzwoloną w tej reakcji.

Oczywiście, zasada względności działa „obustronnie”: nam, na peronie, wydaje się, że to pociąg porusza się (a w nim spóźniają się zegary), a podróżnym w pociągu wydaje się, że to dworzec ucieka (i zegar stacyjny się spóźnia). Nie ma więc wyróżnionego układu odniesienia: wszystkie układy poruszające się względem siebie ze stałą prędkością są równoważne.

Kilka lat później (1916 r.) Einstein postawił pytanie, czy zasada ta dotyczy również układów poruszających się ruchem przyspieszonym. Innymi słowy, czy w windzie potrafimy rozróżnić jej ruch przyspieszony od nagłej zmiany przyciągania ziemskiego. Tak, potrafimy! Otóż przyspieszenie windy jest ma kierunek pionowy, natomiast przyciąganie ziemskie skierowane do środka Ziemi. Niby nieduża różnica, ale dwie rzucone kulki będą się poruszały po innych prostych, zob. rozdział 6.

Równanie ogólnej teorii względności jest zaskakująco proste, ale tylko pozornie. W rzeczywistości, jak mówi polski fizyk i kosmolog, ksiądz prof. Michał Heller, jest w tym równaniu 10 tys. składników, z których znamy tylko kilka.

---

<sup>13</sup> Podobnie w wodzie prędkość fal pozostaje stała, niezależnie od ruchu obserwatora czy źródła, ale w tym przypadku mamy materialny ośrodek, w którym fale się rozchodzą; dla fal elektromagnetycznych ośrodkiem jest próżnia.

### 1.2.3. Fizyka i filozofia

Już Arystoteles umieścił swoją *Fizykę* zaraz po *Zachęcie do filozofii*: fizyka od zawsze oddziaływała na naszą wizję o świecie. Rewolucja kopernikańska jest tego przykładem. Ale podobnej rewolucji dokonał Einstein – nie tylko Ziemia nie może być punktem odniesienia, ale również Słońce. Nie ma w kosmosie wyróżnionego układu odniesienia.

Inne konsekwencje filozoficzne dwóch teorii względności są jeszcze bardziej zaskakujące. Ograniczona prędkość światła oznacza, że nie możemy poznać granic Wszechświata – widzimy tylko tak daleko, skąd zdołało od powstania Wszechświata dotrzeć do nas światło (czyli do odległości 13,78 mld lat świetlnych). Kopernik pisał genialnie: „Ziemia, jakkolwiek wielką nie byłaby kulą, niczym jest w porównaniu z rozmiarami Wszechświata, którego granic nie znamy, a być może nawet *znać nie możemy*”.

Kolejną konsekwencją ogólnej teorii względności jest, że Wszechświat miał początek. Wszystko wskazuje na to, że Wszechświat „wystartował” z jednego punktu. A od niedawna (2019) wiemy, że zapewne nie będzie miał końca – rozszerza się coraz szybciej<sup>14</sup>.

Podobnie rewolucyjne, trudne do akceptacji są konsekwencje teorii kwantowych. Opisują one jedynie prawdopodobieństwa, a nie pewność. Obie rewolucje XX wieku „zdezonizowały” przekonania człowieka, że może wszystko wiedzieć. Kosmologia ogranicza naszą wiedzę w zakresie wielkich odległości (rys. 1.7), mechanika kwantowa – obiektów mikroświata.



Rysunek 1.7. Drzeworyt Flammariona z końca XIX wieku miał na celu ośmieszenie myślenia średniowiecznego o granicach wszechświata. W tym samym czasie doświadczenia Michelsona udowodniły poprawność teorii Einsteina (powstała ona 20 lat później): z powodu ograniczonej prędkości światła nie możemy znać granic naszego Wszechświata. Kopernik miał rację (źródło: Wikipedia<sup>15</sup>)

## 1.3. Zastosowania fizyki współczesnej

### 1.3.1. Fizyka w medycynie, komputerze i nawigacji

Niezliczone są zastosowania (i „produkty uboczne”) fizyki współczesnej. Jednym z nich jest Internet, który powstał jako sposób na szybkie przesyłanie danych między laboratoriami cząstek elementarnych. Jeszcze przed II wojną światową wybitny fizyk Wolfgang Pauli uważał zajmowanie się półprzewodnikami za stratę czasu. Tranzystor powstał w Wigilię Bożego Narodzenia 1947 roku, a dziś w układach scalonych jest ich niezliczone mnóstwo.

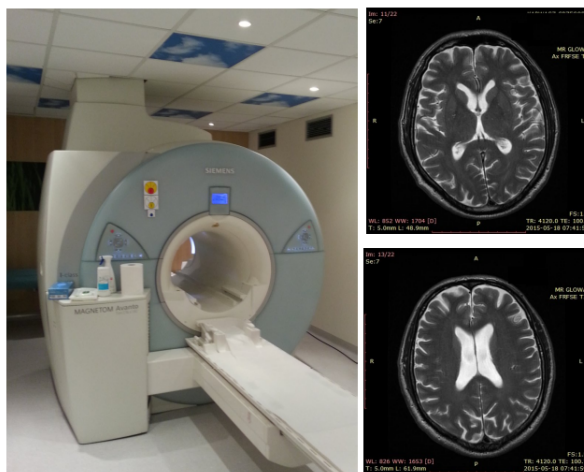
<sup>14</sup> Zob. A. G. Reiss, *Nature Reviews Physics* 2, 10–12 (2020).

<sup>15</sup> [https://pl.wikipedia.org/wiki/Rycina\\_Flammariona](https://pl.wikipedia.org/wiki/Rycina_Flammariona) (dostęp 02.03.2022)



Układy nawigacji satelitarnej „rozeszłyby się” o kilka kilometrów w parę dni, gdyby nie uwzględniały poprawek wynikających z ogólnej i szczególnej teorii względności Einsteina. W inżynierii materiałów korzystamy z promieniowania rentgenowskiego, defektoskopii i dyfrakcji neutronowej, anihilacji pozytonów. Najszerze zastosowania znajduje jednak fizyka współczesna w medycynie (zob. rys. 1.8). Budowa wyposażenia do diagnostyki (tomografów komputerowych, aparatów do rezonansu magnetycznego, tomografów anihilacji pozytonów) dla dużych firm przemysłu elektrycznego stanowi dziś główne źródło przychodu.

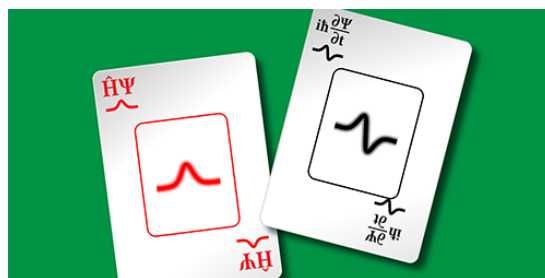
Rysunek 1.8. Zastosowania medyczne fizyki przeżywają ostatnio największy rozwój. Na zdjęciu aparatura do rezonansu magnetycznego. Przesuwając pacjenta (i zmieniając pole magnetyczne) jest możliwe obrazowanie „plasterek po plasterku” mózgu, bez zaglądania do niego. Większe pole magnetyczne (5 T) pozwala wręcz „czytać w myślach”, czyli identyfikować, które obszary mózgu są w danej chwili aktywne (zdjęcia prywatne GK)



### 1.3.2. Fizyka współczesna – nauka *in statu nascendi*

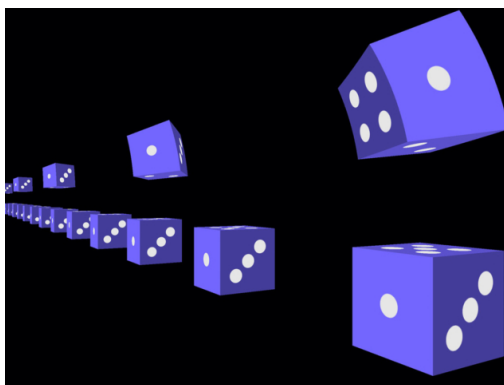
Nikt dziś nie poprawia ani nie kwestionuje rozwiązań równań Maxwella w próżni, a jedynie z nich korzysta dla znalezienia szczególnych konfiguracji pola elektromagnetycznego w określonych urządzeniach. Równanie Schrödingera ciągle jest natomiast rozwiązywane, dla coraz to bardziej skomplikowanych atomów i drobin. Ba, zastosowano je ostatnio (2016) nawet w teorii gry w karty (zob. rys. 1.9).

Rysunek 1.9. Równanie Schrödingera: jego lewa strona, czyli operator energii  $H$  działający na funkcję falową  $\Psi$ , i jego prawa strona, czyli zależna od czasu ewolucja funkcji falowej. Ilustracja z artykułu o zastosowaniu mechaniki kwantowej do teorii gry w karty (źródło: physics.aps.org<sup>16</sup>)



Podobnie ciągle dyskutowana jest teoria względności. Nie myślimy tu bynajmniej o całej rzeszy poprawiaczy tej teorii, kwestionujących niezależność prędkości światła od poruszania się źródła / odbiornika, ale o trwających bardzo trudnych pracach nad znalezieniem kolejnych szczegółowych wyrażen w równaniu ogólnej teorii i nad weryfikacją doświadczalną tych rozwiązań. Spektakularne odkrycie fali grawitacyjnej w dniu 14 września 2015 roku jest tylko częścią tych prac. Wrócimy do zagadnień teorii względności w rozdziale 6.

<sup>16</sup> <http://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.116.128701>, (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 1.10. Relatywistyczna transformacja obiektu poruszającego się z prędkością  $0,9c$  (górną kostką), w porównaniu z kostką spoczywającą w układzie obserwatora. Poruszająca się kostka ulega nie tyle skróceniu, co obrotowi. Rysunek pochodzi z przeglądowego czasopisma Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego *Physics Today* (źródło: physicsworld.com<sup>18</sup>)

Natomiast szczególna teoria względności została doświadczalnie więcej niż zweryfikowana - wręcz stanowi część naszego codziennego świata: energia jądrowa, ewolucja gwiazd, anihilacja antymaterii to wszystkie zjawiska potwierdzające równanie  $E = mc^2$ . Podobnie zostały potwierdzone wzory na wzrost „efektywnej” masy elektronu w miarę zbliżania się jego prędkości do granicy prędkości światła, oraz na wydłużenie czasu życia cząstek elementarnych, tzw. mezonów, powstających w w górnych warstwach atmosfery Ziemi pod wpływem promieniowania kosmicznego<sup>17</sup>.

Ale już wzór na relatywistyczne skrócenie długości ciągle wywołuje trudności interpretacyjne. Ostatnio (2019) pojawiło się pytanie, jak wygląda obiekt trójwymiarowy poddany takiemu skróceniu. Wydaje się, że obraz poruszającego się obiektu jest nie tylko skrócony, ale i obrócony, jak na rys. 1.10.

Definicja fizyki współczesnej powinna więc być rozszerzona o tę część fizyki, która jest nadal dyskutowana. A to może oznaczać, że większa część fizyki należy do współczesnej.

#### 1.4. Struktura podręcznika

Niniejszy podręcznik składa się z 14 wykładów (łącznie z rozdziałem wstępnym) w różnych tematykach fizyki współczesnej – osiągnięciach i zastosowaniach, a także tematykach interdyscyplinarnych. Nie jest to kurs „fizyki współczesnej” ale dydaktyki fizyki współczesnej, czyli ilustracja zagadnień, które mogą potencjalnie zainteresować ucznia. Stąd „wycieczki” w kierunku astronomii, klimatologii czy matematyki. Z tego też względu wykład jest uproszczony – podkreślamy swego rodzaju minimum programowe, takie, aby uczeń (nauczycieli, student) mógł połączyć w całość różne aspekty – naukowe i praktyczne fizyki współczesnej.

W minimum tym są zagadnienia, które od dawna są znane, jak np. kwarkowa struktura mezonów i hadronów. Ale „nasze” kwarki to nie kolorowe kuleczki, jak w in-

<sup>17</sup> B. Rossi, D. B. Hall, *Physical Review* 59, 223 (1941).

<sup>18</sup> <https://physicsworld.com/a/the-invisibility-of-length%e2%80%afcontraction/>, (02.03.2022)

nych podręcznikach, ale „pieski”<sup>19</sup>, w trzech różnych kolorach, z mordkami w lewo lub w prawo, w zależności od znaku ładunku elektrycznego, i o rozmiarach proporcjonalnych do masy kwarku (z drobnym „uproszczeniem”: masa jest proporcjonalna do czwartej potęgi ich rozmiarów liniowych). W całym kursie, jak już to pokazaliśmy w tym rozdziale – korzystamy z daleko posuniętych wizualizacji: samochód „Smart” to nie oryginalny model, ale relatywistycznie skrócony normalny samochód. Fizyka jest zabawą! Zgodnie z naszymi koncepcjami dydaktycznymi – hyperkonstruktywizmu i neo-realizmu, konstruujemy narrację krok po kroku i możliwie często sięgamy do praktycznych przykładów. Tradycyjne podręczniki fizyki współczesne (zob. rys. 1.11) mogą być komplementarne do naszego ujęcia. Celem obecnej książki nie jest kompendium wiedzy – celem jest, jak to pisał wybitny filozof przełomu XX i XXI wieku Edgar Morin, „głowa dobrze zrobiona”, a nie „głowa wypełniona” wiadomościami, które nie tworzą spójnej i operatywnej wiedzy.

Założona prostota narracji ma na celu przekonanie nauczyciela, że nie ma granic wiekowych dla zrozumienia (i zaakceptowania) fizyki współczesnej. Einstein pisał: „wszystko należy wyjaśnić najprościej jak można, ale nie prościej”. My odpowiadamy: „Drogi Albercie, czasem trzeba wyjaśnić prościej, niż można”. Fizyka nie jest nauką dla wybranych: korzysta z niej niemowlak aby sprawdzić, czy przedmioty wyrzucone z kojca same do niego wrócą.

Pożyteczne dla rozbudzenia zainteresowania fizyką są strony internetowe Katedry Dydaktyki Fizyki UMK: [dydaktyka.fizyka.umk.pl](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl). Polecamy również strony powstałe na Uniwersytecie w Trydencie w latach 2003–2004, jako wersja multimedialna wystawy interaktywnej „Na ścieżkach fizyki współczesnej” zorganizowanej przez jednego z autorów (GK) na Zjeździe Fizyków Polskich w Gdańsku we wrześniu 2003 roku: [dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy\\_archiwum/z\\_omegi](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi).

W latach 2005–2006 GK wraz ze współpracownikami z Akademii Pomorskiej w Słupsku realizował projekt UE w panelu „Science and Society” pt. „Physics is Fun”. Wystawy objazdowe (Trydent, Paryż, Berlin, Lubljana, Warszawa), wystawa wirtualna „On the Track of Modern Physics” oraz seria 24 plakatów dydaktycznych stanowiły część, obok „Physics and Toys” tego projektu. Odpowiednie strony internetowe można znaleźć, poczynając od strony: [dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics\\_is\\_fun](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun).

Rysunek 1.11. Okładka L. Lerner, wykładowcy z California State University, 1996 (tu wydanie włoskie z 2002 roku) zawiera fotografię stosu paczek na ręcznym wózku. Czy to ma coś wspólnego z fizyką współczesną? I wózek i zawartość paczek to pomysły XX wieku – lekkie i wytrzymałe stopy, izolacyjne, *piankowe* materiały polimerowe (przypuszczalna zawartość paczek) to produkty nowoczesnej inżynierii materiałowej, a tej nie byłoby bez chemii kwantowej, mikroskopii elektronowej, promieni Röntgena itd.



<sup>19</sup> Inspiracja GK, by nadać elementarnym cząstkom ich "fizjonomię", a nie przedstawiać ich w postaci punktów czy kuleczek, pomysł graficzny dr Tomasz Wróblewski, Akademia Pomorska w Słupsku.

MeV/c<sup>2</sup> dla neutralnego pionu  $\pi^0$  do 11 020 MeV/c<sup>2</sup> dla jednego ze stanów bottomonium<sup>217</sup>. Bariony są na ogół bardzo stabilne. Do barionów należy neutron i proton (czas połowicznego rozpadu protonu jest rzędu 10<sup>33</sup> lat, czyli przekracza o wiele rzędów wielkości wiek Wszechświata – proton jest stabilny!). Z kolei mezony, z których najważniejszy jest tzw. mezon  $\pi$ , wiążący protony z neutronami w jądrze atomowym, są niezwykle krótkotrwałe, a ich czasy życia są rzędu setnych części mikrosekundy.

### 14.3. Podsumowanie

Przedstawiliśmy Państwu krótką "wycieczkę", czyli w staropolskim - wypad, w kierunku fizyki współczesnej. Nazwaliśmy tę książkę "Dydaktyką", bo nie jest to regularny podręcznik przedmiotu zwanego fizyką współczesną (trudno by zakres takiego przedmiotu zdefiniować), ale seria "esejów jak można opowiadać o najnowszych dokonaniach nauki (odkryciach, wynalazkach, zastosowaniach oraz o pytaniach otwartych). Niektóre odnośniki to anegdoty (wymagają sprawdzenia w aktualnych wersjach Wikipedii), inne - części zaawansowanych artykułów z międzynarodowych czasopism.

Ten różny zbiór ma na celu pokazanie, że narracja o fizyce współczesnej musi być wielowątkowa, obrazowa, ciekawa, ba! zagadkowa. Wiele z zagadnień zostało oddzielnie omówione w naszych artykułach w "Fizyce w Szkole", "Chemii w Szkole", "Geografii w Szkole", "Uranii", "Fotonie".

Zagadnieniom fizyki współczesnej poświęcone są dwie bardzo bogate witryny internetowe, obecnie (02.06.2024) na stronach Katedry Dydaktyki Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika (dydaktyka.fizyka.umk.pl):

- 1) "Droga do fizyki współczesnej" powstała jako pokłosie podobnej wystawy obiektowej na Zjeździe Fizyków Polskich w Gdańsku w 2003 roku<sup>218</sup> (współpracownicy - Anna Kamińska, Tomasz Wróblewski, Damian Pliszka, Mirosław Brozis, Monika Jurek z Akademii Pomorskiej w Słupsku),
- 2) "On the Track of Modern Physics", powstała w ramach Projektu UE Science and Society pomiędzy Akademią Pomorską w Słupsku a Uniwersytetem w Trento i Ecole Centrale w Paryżu, w 2005 roku<sup>219</sup>, również z wyżej wymienionymi współpracownikami.

Na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika tematy te zostały rozwinięte w formie wykładów ogólnouniwersyteckich G. Karwasza "Zdobycze i zastosowania fizyki współczesnej", pokazów interaktywnych organizowanych przez Zakład Dydaktyki Fizyki (współpracownicy, oprócz współautorów - Krzysztof Służewski, Waldemar Krychowiak, Krzysztof Rochowicz, Przemysław Miszta, Julia Bruzdowska, Klaudia Gackowska).

Obecna książka powstała w ramach projektu NCBR, współfinansowanego przez UE "Nowoczesne metody nauczania fizyki". Jako że fizyka współczesna, jak pisaliśmy, jest narracją w trakcie pisania, proszę do nas pisać: karwasz@fizyka.umk.pl, kamil@fizyka.umk.pl, akarb@fizyka.umk.pl.

<sup>217</sup> <https://pl.wikipedia.org/wiki/Bottomonium> (dostęp 02.03.2022)

<sup>218</sup> [https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy\\_archiwum/z\\_omegi/index-pl.html](https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/index-pl.html)

<sup>219</sup> [https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics\\_is\\_fun/](https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/) (dostęp 02.06.2024)