

Dydaktyka

fizyki współczesnej

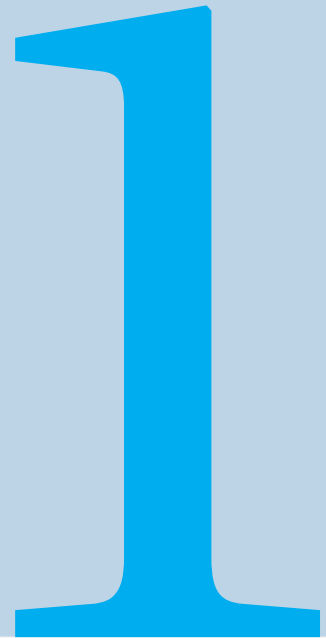
Grzegorz Karwasz
Andrzej Karbowski
Kamil Fedus



Spis treści

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

8. Zagadkowe promieniowanie	77
8.1. Promienie Röntgena	77
8.2. Rentgenowska tomografia komputerowa (CT)	81
9. Spektroskopia, czyli nauka o duchach	83
9.1. Spektroskopia optyczna	84
9.2. Spektroskopia fotoakustyczna	85
9.3. Spektroskopia transferu protonu	86
10. Od ogniwa Volty do reaktora termojądrowego	89
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
11. Rewolucja kwantów i atomów	101
11.1. Hipoteza kwantów światła	101
11.2. Efekt fotoelektryczny	105
11.3. Spektroskopia atomowa	107
11.4. Współczesny obraz atomu	108
12. Mechanika falowa	115
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
13. Podzielić niepodzielny	127
13.1. Promieniowanie α , β i γ – zarys historyczny	127
13.2. Budowa i właściwości jądra atomowego	130
13.3. Rozpady promieniotwórcze	133
13.4. Rozszczepienie jądra atomowego	136
14. Kwarki i skwarki	139
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 czwartek¹, 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.

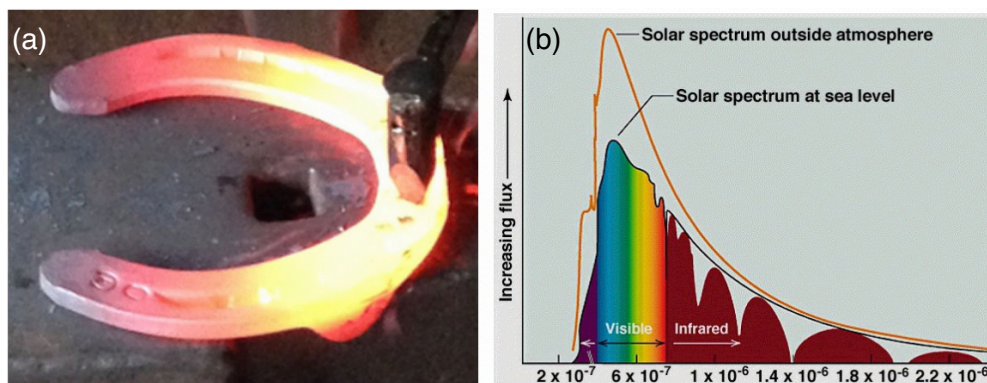
1.1. Fizyka kwantowa

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*², w zależności od temperatury, to musi być ku temu jakaś przyczyna.

¹ 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.

² 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 podkova zmienia swój kolor w miarę wzrostu temperatury? I podkova, 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 ³)

Było już wiadomo, że materia ma strukturę atomową, a w 1897 roku J. J. Thomson „odkrył”⁴ 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 wnęce 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 λ – 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 ν jest częstotliwością fali związaną z jej długością λ 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 elektronowolt⁵), a światła czerwonego ($\lambda = 760$ nm) niesie energię 1,6 eV.

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

⁴ 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.

⁵ 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 fotonami⁶, 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 „pałętających” 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 Ruhmkorffa⁷), 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, uczony 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 związania elektronów w określonym metalu jako W , można zapisać następującą zależność:

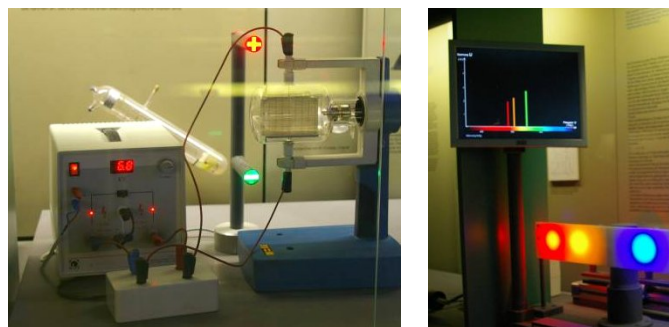
$$h\nu = W + eU, \quad (1.2)$$

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 wyrzuca elektron z atomu wodoru (czyli dokonuje jonizacji atomu wodoru): jest to już dość duża energia.

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

⁷ 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.

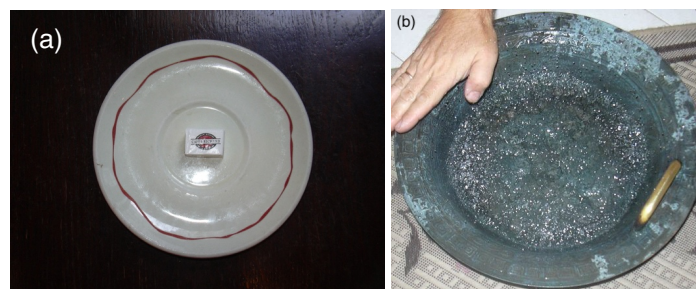
Hipoteza była tym bardziej uzasadniona, że znany był bardzo prosty wzór matematyczny określający położenie (tzn. długość fali) linii widmowych w atomie wodoru: podał go nauczyciel matematyki z Bazylei, Johann Balmer. Wzór tak prosty, aż nie do wiary, że czekał kilkanaście lat na odkrycie. Zapiszemy ten 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 roku⁸.

⁸ 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) ⁹

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
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
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
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
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
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: Wikipedia¹⁰)

⁹ http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/html/bohr-en.html, dostęp 02.03.2022)

¹⁰ [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.

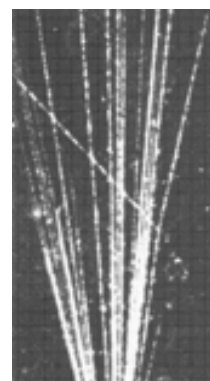
Potrzebne było więc równanie, podobne nieco do równania fali elektromagnetycznej, opisujące ruch elektronu i innych obiektów mikroświata. Przeczytacie o tym więcej w paragrafie 12.2. Umownie, autorzy tego podręcznika nazywają ten dział fizyki „teorią falową”, w odróżnieniu od wcześniejszej „teorii kwantowej”, 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.

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° świadczy o zderzeniu cząstki cięższej z cząstką lżejszą (jąder ^4He z jądrem ^1H). 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 Wolf¹¹)

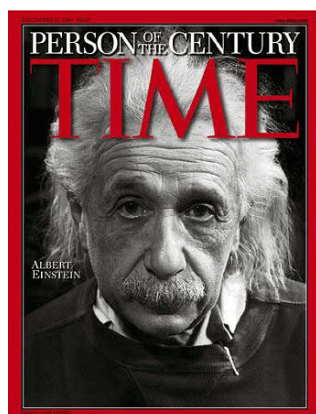


Z samego już równania Schrödingera wynika paradoks. Matematycznie, o ile rozwiązaniem równania mogą być określone funkcje Ψ_1 i Ψ_2 , to również kombinacja liniowa (czyli suma tych dwóch funkcji z odpowiednimi współczynnikami liczbowymi) też może być rozwiązaniem. Rozpad jąder promieniotwórczych jest 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)¹². 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 wymyślnej metody postanowił sprawdzić, czy przez pomiar zmiany prędkości

¹¹ H.Haken i H.C Wolf, *Atomy i kwanty*, PWN 2002

¹² 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 obserwatora¹³. 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 kierunku 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.

¹³ 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 szybciej¹⁴.

Podobnie rewolucyjne, trudne do akceptacji są konsekwencje teorii kwantowych. Opisują one jedynie prawdopodobieństwa, a nie pewność. Obie rewolucje XX wieku „zdetronizowały” 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: Wikipedia¹⁵)

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. Transystor powstał w Wigilię Bożego Narodzenia 1947 roku, a dziś w układach scalonych jest ich niezliczone mnóstwo.

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

¹⁵ 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.

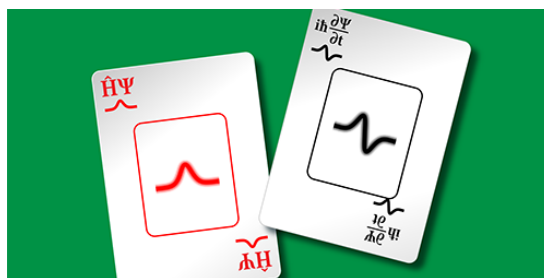
Rysunek 1.8. Zastosowania medyczne fizyki przeżywają ostatnio największy rozwój. Na zdjęciu aparatura do rezonansu magnetycznego. Przesuwając pacjenta (i zmieniając pole magnetyczne) jest możliwe obrazowanie „plasterek po plasterku” mózgu, bez zaglądania do niego. Większe pole magnetyczne (5 T) pozwala 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*

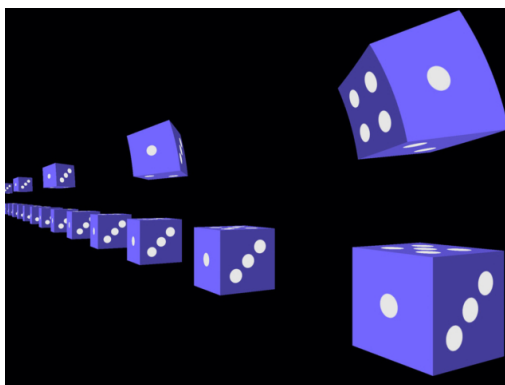
Nikt dziś nie poprawia ani nie kwestionuje rozwiązań równań Maxwella w próżni, a jedynie z nich korzysta dla znalezienia szczególnych konfiguracji pola elektromagnetycznego w określonych urządzeniach. Równanie Schrödingera ciągle jest natomiast rozwiązywane, dla coraz to bardziej skomplikowanych atomów 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 Ψ , 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.org¹⁶)



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 wyrażeń 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.

¹⁶ <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 $0,9c$ (górna kostka), 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.com¹⁸)

Natomiast szczególna teoria względności została doświadczalnie więcej niż zweryfikowana - wręcz stanowi część naszego codziennego świata: energia jądrowa, ewolucja gwiazd, anihilacja antymaterii to wszystko 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 kosmicznego¹⁷.

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-

¹⁷ B. Rossi, D. B. Hall, *Physical Review* 59, 223 (1941).

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

nych podręcznikach, ale „pieski”¹⁹, 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. 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.

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.

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.



¹⁹ 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.



Fizyka i astronomia: harmonia sfer

W poszukiwaniu interdyscyplinarności dla fizyki – astronomia i matematyka są pierwszymi dziedzinami wiedzy, ku którym się kierujemy. Astronomia jest, bez wątpienia, jedną z najstarszych fascynacji poznawczych człowieka. Obracające się nad głową niebo, przesuwający się co noc Księżyc i pięć błędzących gwiazd (planet) musiały budzić zdumienie swym precyzyjnym porządkiem.

Astronomia może być dla młodzieży naturalną drogą zainteresowania się światem zewnętrznym, a przez to i fizyką. Dobry nauczyciel winien wychodzić naprzeciw najróżniejszym zainteresowaniom uczniów tak, aby znaleźć z nimi „wspólny mianownik”. A przy okazji, ucząc astronomii, dostarczamy dorosłemu społeczeństwu minimum kompetencji przyrodniczych: „ten jasny obiekt na zachodzie to nie gwiazda, ale planeta Wenus, nam najbliższa”.

2.1. Już starożytni Maltańczycy...

2.1.1. Starożytne obserwatoria astronomiczne

Większość historii zaczyna się od „już starożytni Grecy...”. Nie uświadamiamy sobie, że Ateńczycy korzystali z wiedzy gromadzonej przez inne ludy nie przez stulecia, ale przez całe tysiąclecia. Miasta Ur i Uruk w Mezopotamii rozkwiwały już 4 tysiące lat p.n.e., a w Jerychu w Palestynie znaleziono ślady stałego osadnictwa sprzed 10 tys. lat p.n.e.²⁰ Wraz z wynalezieniem pisma wiedza mogła być przekazywana kolejnym pokoleniom i innym, odległym ludom (więcej o Mezopotamii w rozdziale 3.1).

²⁰ <https://en.Wikipedia.org/wiki/Jericho> (dostęp 02.03.2022).

Znajomość astronomii była niezbędna od początku inteligencji gatunku *Homo sapiens* (100 tys. lat temu?²¹). Nawet ludy żyjące z łowiectwa musiały planować okresy polowań, zobacz ilustrację z książki GK *Mały astronom* (wyd. Publicat, 2017) – rys. 2.1.

Rysunek 2.1. Ilustracja do rozdziału „Do czego służy kalendarz?”, we wstępie do książki Grzegorza Karwasza *Mały astronom* (wyd. Publicat, 2017, ilustracje Adam i Olga Błaszczak). Kalendarz potrzebny jest i rolnikom, i myśliwym. W starożytnej Grecji oficjalny kalendarz nie istniał. Stąd łacińskie powiedzenie *ad calendas graecas*, czyli nigdy.

Do czego służy kalendarz

Dziś każdy wie, co to jest kalendarz. Ale przed wiekami ludzie go nie znali. Pradawni człowiek, który żył w jaskiniach, musiał przewidzieć porę budzenia się niedźwiedzi z zimowego snu i wpływania do rzek wielkich łososi. Nie było to łatwe, jednak wiedział, którego dnia wyruszyć na łowy, a kiedy lepiej schronić się przed zamiecią śnieżną.

Od Stonehenge do Mezopotamii i Egiptu

Wszyscy potrafimy zaobserwować, że zimą dzień jest krótszy, tylko jak stwierdzić bez kalendarza, kiedy nadchodzi ta pora roku? Wiosną dzień wyraźnie się wydłuża, ale znów nie dałoby się ustalić, od którego momentu, gdyby nie było kalendarza. Aby pamiętać, kiedy zaczyna się lato, 5 tysięcy lat temu ustawiono w kole ogromne głazy. Stoją one



czyli kamienny krąg. Jest tam pięć wielkich, podwójnych głazów, które określały dni tygodnia, oraz 16 mniejszych oznaczających miesiące.

Kiedy w Anglii zbudowano ten kamienny krąg, w innej części świata, pustynnej Mezopotamii (dziś jest to Irak), wznoszono już całe miasta i potężne, wysokie wieże

Najstarsze zachowane budowle, menhiry ze Stonehenge²² i megalityczne świątynie na Malcie (3500 lat p.n.e.)²³ miały, bez wątpienia, znaczenie kalendarza. Ustawienie głazów lub otworów w ścianach było takie, aby zauważyć przesilenie letnie – cień (w południe) był najkrótszy, ale też miejsce wschodu Słońca było wysunięte najbardziej na północ (przemyśl to). Ale rękodzieła człowieka, sugerujące obserwacje astronomiczne są znacznie starsze niż budowle z Malty. Z terenów dzisiejszego Kongo²⁴ pochodzi kawałek kości, sprzed 20 tysięcy lat, z kilkoma seriami pionowych kresek: przypuszczalnie liczono dni, być może w cyklu Księżyca. Z Francji południowo-zachodniej pochodzi kawałek kości, na którym odkrywcy doszukują się wręcz zaznaczonych faz Księżyca.

²¹ Najstarsze ślady inteligencji twórczej – porysowany w kratkę kawałek ochry pochodzi z Bloombos Cave - groty na południowym krańcu Afryki, i jest datowany na 80 tys. lat temu.

²² <https://www.newscientist.com/article/2310095-stonehenge-may-have-been-a-giant-calendar-and-now-we-know-how-it-works/> (dostęp 02.03.2022).

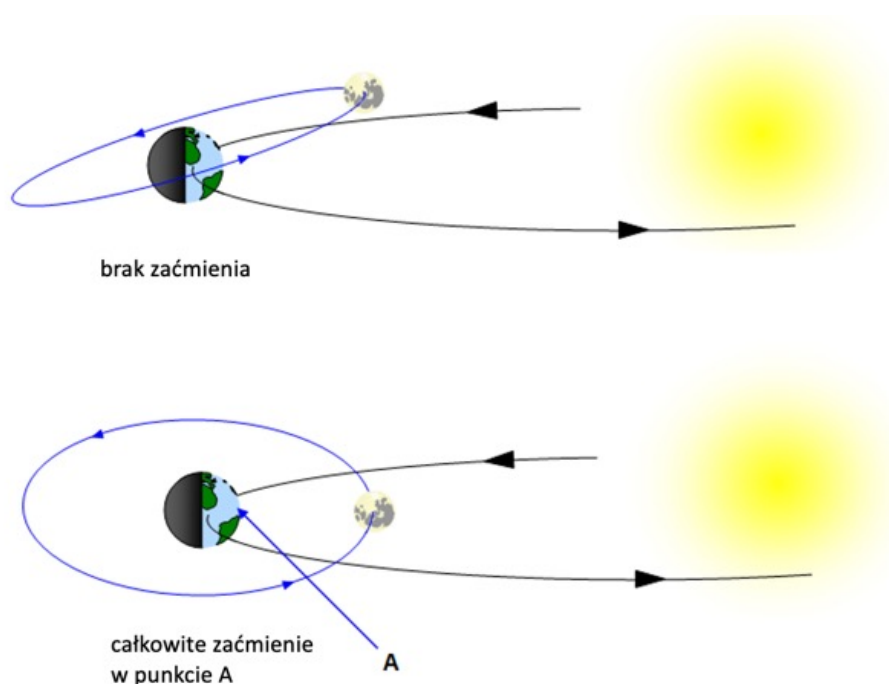
²³ C. R. Sant, „Calendars of Megalithic Malta: Resolving their Functions and Anomalies” (Createspace Independent Publishing Platform, 2015).

²⁴ <https://afrolegends.com/2013/08/29/the-ishango-bone-cradle-of-mathematics/> (dostęp 02.03.2022).

²⁵ <https://pl.wikipedia.org/wiki/MUL.APIN> (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 2.2. Fragment świątyni (a) w Hagar Qim na Malcie, z 3500 lat p.n.e., przypuszczalnie obserwatorium astronomiczne (zdjęcie Maria Karwasz) (b) Gliniana tabliczka MUL.APIN z Babilonii, z VII w. p.n.e., kompendium wiedzy astronomicznej (źródło: Wikipedia ²⁵)



Rysunek 2.3. Ilustracja z podręcznika internetowego fizyki (wiek 11–14 lat) ilustrujący powtarzalność cyklu saros, czyli zaćmień Słońca i Księżyca (źródło: Keith Gibbs, Schoolphysics²⁷)

Z VII wieku p.n.e. pochodzi, zachowany na glinianej tabliczce Mul.Apin, pierwszy podręcznik astronomii (rys. 2.2). W nim znajdujemy po raz pierwszy podział roku na 12 miesięcy po 30 dni. Dopiero Juliusz Cezar, w 46 r. p.n.e. zmodyfikował ten kalendarz, skracając luty (ostatni miesiąc w rzymskim roku): za to *Juliusz* i *August* mają po 31 dni. Ale po mezopotamskich matematykach pozostał nam podział doby na 24 godziny i godziny na 60 części mniejszych (czyli minut).

Już Chaldejczycy (albo nawet wcześniej Sumerowie) zauważyli regularne powtarzanie się zaćmień i Księżyca, praktycznie dwa razy w roku, i Słońca (całkowite w którymś miejscu na globie co 18 miesięcy, ale całkowite w danym miejscu raz na około 400 lat). Od nich pochodzi określenie „cykl saros”²⁶, czyli 223 miesiące księżycowe (nieco ponad 18 lat), kiedy płaszczyzny orbit Księżyca (dookoła Ziemi) i Ziemi (dookoła Słońca) przecinają się w ten sam sposób.

Oczywiście, zaćmienia Słońca łatwiej zrozumieć w modelu heliocentrycznym niż geocentrycznym (rys. 2.3), ale nie oznacza to, że nie warto spojrzeć w niebo jak starożytni, i po prostu się nim zachwycić.

2.1.2. Astronomia fenomenologiczna czy dedukcyjna?

Wydawca książki z astronomii dla dzieci oczekiwał, że zacznie się ona od wymieniania obiektów na niebie i stwierdzeniu, że nieprawdą jest jakoby Słońce „wędrowało” po niebie, bo to Ziemia się kręci, jak to stwierdził nasz wielki rodak, Kopernik. Kilka błędów dydaktyczno-kulturowych w jednym stwierdzeniu.

²⁶ [https://en.Wikipedia.org/wiki/Saros_\(astronomy\)](https://en.Wikipedia.org/wiki/Saros_(astronomy)) (dostęp 02.03.2022).

²⁷ <http://www.schoolphysics.co.uk/age11-14/Astronomy/text/Eclipses/index.html> (02.03.2022)

Po pierwsze, Kopernik urodził się siedem lat po zawarciu II pokoju toruńskiego, kiedy to miasto przeszło do „korony polskiej”, a było ono wielokulturowe. Nie ma pism Kopernika po polsku, ale musiał po polsku mówić, skoro (jako zarządca dóbr biskupa warmińskiego) rozsądzał spory między chłopami. Ale co ważniejsze, odrzucenie fenomenologicznego spojrzenia na niebo zabija radość z odkrywania: astronomia staje się nauką do zapamiętania jak fizyka czy historia albo zlepkiem kolorowych obrazów, ale z Internetu. Warto, w dydaktyce astronomii wrócić do fascynacji niebem, jaka bez wątpienia towarzyszyła człowiekowi u zarania pojawienia się usystematyzowanej wiedzy.

A przede wszystkim znany wierszyk „Wstrzymał Słońce, ruszył Ziemię” zaciera sens odkrycia Kopernika. Na jego pomniku w Toruniu niemiecki rzeźbiarz wyrzeźbił: „Terrae motor, Solis Caelique stator”, czyli wstrzymał Słońce i niebo. Bo o niebie pisał Kopernik, odpierając argumenty, jakoby Ziemia miała rozpaść się na kawałki pod wpływem siły odśrodkowej obrotu: „Ziemia, jakkolwiek nie byłaby wielką kulą, niczym jest w porównaniu z wielkością nieba, którego rozmiarów nie znamy, ani, być może, nawet *znać nie możemy*”. Tak, wiemy od czasów Einsteina, że rozmiarów Wszechświata znać nie możemy. Powszechne spłycenie odkrycia Kopernika świadczy o nieprzenikaniu się kultury naukowej i wiedzy potocznej.

Przypisywanie umiejętności intelektualnych tylko współczesnym nam pokoleniom jest jeszcze poważniejszym grzechem: człowiek żyjący kilka tysięcy lat temu dysponował tymi samymi przymiotami umysłowymi co my, ale w odróżnieniu od nas, nie był obciążony bagażem wiadomości – szkolnych, gazetowych, telewizyjnych. Jego umiejętność obserwacji świata zewnętrznego była więc, z pewnością, większa niż przeciętnego obywatela dziś. Patrząc z suchych płaskowyżów Mezopotamii na czarne jak atrament niebo²⁸ człowiek stawiał pytanie o regularność ruchów planet, Księżyca i Słońca²⁹.

W szkole uczy się, że wszystkie planety, Księżyc i Słońce poruszają się w pasie gwiazdozbiorów należących do znaków zodiaku. Rzeczywiście, Układ Słoneczny powstał z rozkręconej mgławicy proto-planetarnej, swego rodzaju wirującego „placka pizzy”. W odróżnieniu więc od atomu, planety krążą dookoła Słońca po orbitach leżących w jednej płaszczyźnie – tzw. ekliptyki. Prawie w jednej płaszczyźnie, bo planety są obiektami fizycznymi, a nie matematycznymi.

Zaletą modelu Kopernika (a raczej: odkrycia Kopernika, bo słowo „model” nie ma właściwej rangi) jest niebywałe uproszczenie analizy mechaniki nieba. To już nie jakieś ruchy do przodu i do tyłu jak w skomplikowanych zębatkach („epicyklach” Ptolemeusza), ale uporządkowane kręcenie się wszystkich planet³⁰. Własnoręcznie wykonany przez Kopernika schemat planet krążących po okręgach dookoła Słońca, z wyliczeniem okresów obiegu dookoła Słońca „*Martis – bima revolutio, Jovis xij anoru revolutio*” itd. powinien być na okładkach książek do fizyki. Kopernik przejawiał tę samą ciekawość w poszukiwaniu matematycznych zależności ruchu planet jak sto lat później Kepler.

²⁸ Pisał o nim też Immanuel Kant: „niebo gwieździste nade mną”.

²⁹ Nie jest ważne, czy ruchy planet i Księżyca są realne, jak myśłano jeszcze w czasach Ptolemeusza, czy pozorne, jak to wiemy od Kopernika. Teorię względności Einsteina przywołuje się czasem, nieco bezpodstawnie, na „uprawomocnienie” geocentrycznego punktu odniesienia.

³⁰ Jedynie Wenus kręci się dookoła osi w „odwrotnym” kierunku, i to bardzo wolno – raz na swój rok.



Rysunek 2.4. Animacja Google'a z okazji 540-tej rocznicy urodzin Kopernika: jest ona wzorowana na popularnej rycinie z XVII wieku, ale w niezwykle dydaktyczny sposób pokazuje, że cały Układ Słoneczny wiruje w jednym kierunku, przeciwnie do ruchu wskazówek zegara – o ile patrzymy znad bieguna północnego Ziemi (źródło: google.com ³¹)

W jakim kierunku kręci się kula ziemiska? Pokazują to czołówki dzienników telewizyjnych w wielu krajach (niektóre w błędny sposób). Na lekcjach geografii mówi się, że Ziemia kręci się z zachodu na wschód. Niewiele mówi to uczniowi, który nie wie gdzie jest na kuli ziemskiej zachód. Otóż kula ziemiska kręci się w kierunku odwrotnym do kierunku ruchu wskazówek zegara, o ile patrzymy z „góry”, czyli znad bieguna północnego. Jest to oczywiste, bo kierunek obrotu wskazówek zegara jest taki jak kierunek przesuwania się cienia patyka wbitego w piasek w Mezopotamii. Wspaniale oddaje to animacja Google'a z lutego 2013 roku zrobiona z okazji 540. rocznicy urodzin Astronoma (rys. 2.4).

2.2. Kepler: w poszukiwaniu matematycznego piękna

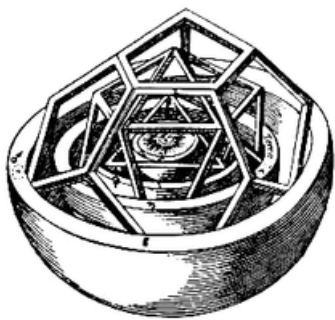
2.2.1. Magiczne bryły Platona

Jan Kepler, urodzony w Grazu, późniejszy współpracownik Tycha Brahe, podobnie jak ten drugi, miał możliwość obserwacji rozbłysku supernowej: gwiazdy kończącej swój żywot efektownym wybuchem, a z Ziemi widocznej w jasny dzień (w 1572 i 1604 roku ³²). Ale astronomią Kepler zajął się jeszcze przed 1604 rokiem, poszukując „magicznych” zależności między rozmiarami orbit poszczególnych planet.

Jak opisujemy w rozdziale „Fizyka i matematyka”, Pitagoras uważał liczby za stwory magiczne. Wzięło się to najpierw z muzyki, a później z odkrycia liczb niewymiernych. Platon, największy obok Arystotelesa filozof grecki, określany jako przedstawiciel idealizmu (w odróżnieniu od tego drugiego, który bywa katalogowany jako materialista), uważał za magiczne wielościany foremne, od czworościanu, przez sześcian, po foremny dwudziestościan. Pięć znanych w czasach Keplera planet i pięć brył, zachęciły młodego matematyka do poszukiwania magicznych zależności – orbit wpisanych w bryły foremne (zob. rys. 2.5).

³¹ <https://www.google.com/doodles/nicolaus-copernicus-540th-birthday>

³² Poprzednia supernowa została odnotowana w kronikach chińskich (i na malowidłach naskalnych w Nowym Meksyku) w roku 1054. Statystycznie, w naszej Galaktyce supernowa powinna wybuchać raz na 500 lat. Jednak po dwóch odnotowanych wybuchach, od 1604 roku nie zauważono kolejnej supernowej.



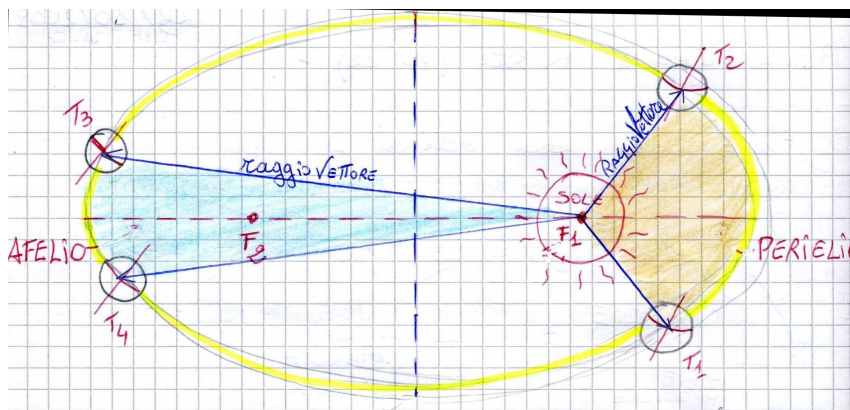
Rysunek 2.5. Model Układu Słonecznego w *Mysterium Cosmographicum* Jana Keplera (1596)

Pomysł interesujący, ale „niecelny”. Historia fizyki jest pełna podobnych niecelnych pomysłów, np. Pierre i Maria Curie stwierdzili, że w materiałach promieniotwórczych nie jest spełnione prawo zachowania energii, albo że materiały te wyłapują jakąś energię kosmiczną – nie wiadomo było, dlaczego próbki silnie radioaktywne nagrzewały się. Alessandro Volta próbował uszeregować materiały elektryzujące się pod wpływem tarcia: nie ma rzetelnego szeregu elektrostatycznego do dziś, natomiast szereg elektrochemiczny Volty jest wykorzystywany w każdej „baterii” komputera, telefonu komórkowego, latarki. Istotą odkrycia naukowego jest umiejętność prawidłowego postawienia nowego pytania, nawet jeśli problem miał już inne rozwiązania. Takimi odkrywcami byli Kopernik, Kepler, a później Newton i Einstein.

2.2.2. Najpiękniejsze zależności w astronomii

To, że ruchem planet rządzą matematyczne prawa podejrzewali już Babilończycy; na rysunku Kopernika orbity planet wewnętrznych były w mniejszych wzajemnych odległościach niż Jowisza i Saturna, ale dopiero Kepler znalazł *zależność* okresów obiegów od odległości.

Rysunek 2.6. II Prawo Keplera na rysunku uczennicy I klasy szkoły hotelarskiej we Włoszech: prawdziwe arcydzieło graficzne



Trzecie prawo Keplera (jak się później okazało wynikające z prawa grawitacji Newtona) stwierdza, że sześciiany odległości planet od Słońca mają się do siebie jak kwadraty ich okresów obiegu. „Magiczność” takiego sformułowania polega na tym, że kwadraty i sześciiany potrafimy wyobrazić sobie jako figury geometryczne. Drugie prawo jest nie mniej magiczne: zakreślane w stałym czasie pola są stałe (zob. rysunek gimnazjalistki z Włoch, rys. 2.6). Największe trudności sprawia uczniom pierwsze prawo Keplera: są oni przekonani, że Słońce jest w środku elipsy, a nie w jej ognisku³³.

Dokładne wyprowadzenie orbit eliptycznych z zasady zachowania momentu pędu w polu newtonowskim nie jest proste (wymaga umiejętności korzystania z tzw. biegu-

³³ Są dwa szybkie sposoby obrazowego pokazania elipsy i jej ognisk: wykreślenie na tablicy z wykorzystaniem kawałka sznurka (lub paska) oraz kapanie wody do płaskiego talerzyka – mimo że kolisty, fale wywołane przez krople ogniskują się symetrycznie, w innym punkcie.

nowego układu współrzędnych): pokazujemy je przy okazji „Fizyki zabawek” i lejka grawitacyjnego³⁴.

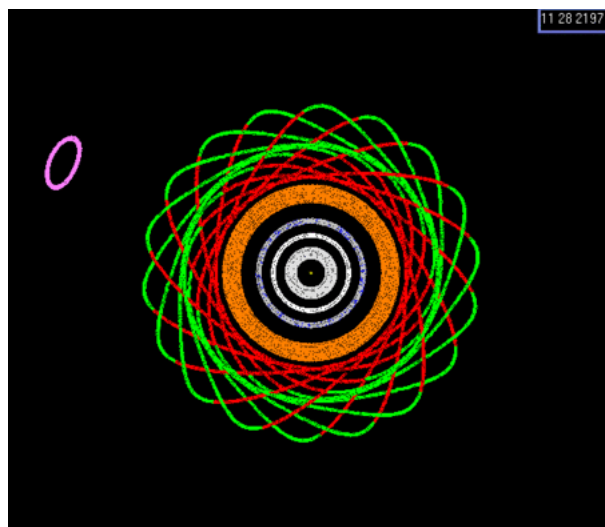
Kepler nie znalazł magicznych zależności dla odległości planet od Słońca. Ba! do dziś nie wiemy, dlaczego są takie, a nie inne. Ale Kepler odkrył prawa, które stały się jednymi z najpiękniejszych zależności, jakimi można zafascynować młodego człowieka³⁵.

2.2.3. Harmonia planet

Poszukiwanie symetrii, harmonii proporcji i prostoty nie jest jakąś filozoficzną skłonnością człowieka. Dziś, w dobie kognitywistyki możemy stwierdzić, że symetrie, prostopadłości, proste zależności i proporcje umożliwiają oszczędzanie pojemności percepcyjnej umysłu: mniej komórek pamięci jest potrzebne do zapamiętania kwadratu niż trapezu. Proste zależności rządzą orbitami w atomie wodoru, ale już w bardziej złożonych atomach trzeba wprowadzać „defekty kwantowe”. Zupełnie żadnej zależności nie widać w masach kwarków, podobnie zresztą jak w masach elektronu, protonu, mionu.

Muzyka jest przykładem harmonii, ale astronomia również: widzimy to „gołym okiem” co noc. Fakt, że Księżyc jest „zwrócony do nas zawsze tą samą stroną”, oznacza, że okres obiegu dookoła Ziemi i obrotu własnego są identyczne: tak zwany rezonans 1 : 1. Identyfikacyjny (a nawet silniejszy) rezonans wykazuje Pluton i jego największy satelita, Charon. Okres obrotu Charona dookoła własnej osi, okres obrotu Plutona i okres wzajemnego obiegu są identyczne. Merkury okrąża Słońce raz na 89 dni, a kręci się dookoła własnej osi raz na 2/3 tego okresu³⁶.

W pewnego rodzaju rezonansie pozostają okresy Jowisza i Saturna: planety silnie między sobą oddziałują i przypuszcza się, że w dalekiej przyszłości (za parę miliardów lat?) okresy obiegu będą się miały do siebie jak 1 : 2. „Zegarowe” wręcz synchronizacje wykazują trzy najbliższe Jowiszowi satelity, Io, Europa i Ganimedes, z okresami obiegu swej planety mającymi się do siebie jak 1 : 2 : 4.



Rysunek 2.7. Artystycznie ciekawy rysunek rezonansu między orbitami Jowisza i planetoidy Pallas (źródło: Wikipedia ³⁷)

³⁴ Monika Jurek, „Lejek grawitacyjny”, w: *Fizyka zabawek*, PAP Słupsk, 2004, dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/mech/kepler.htm (dostęp 02.03.2022).

³⁵ Zobacz artykuł Grzegorza Karwasza „Dlaczego warto uczyć astronomii?”, *Urania*, nr 4/2019, https://www.uraniam.edu.pl/sites/default/files/archiwum/uraniam_2019_04.pdf (dostęp 02.03.2022).

³⁶ W muzyce akord o stosunku częstotliwości 3 : 2, np. między G a C, nazywamy kwintą.

Skąd się biorą rezonanse? Licząc wiek Układu Słonecznego na 4,567 mld lat, od tego czasu minęła nieskończona prawie liczba „*revolutio*”, jak je określał Kopernik. Każdy obrót to oddziaływanie grawitacyjne między wieloma ciałami: tak jak brzeg kieliszka delikatnie pocierany po pewnej chwili zacznie drgać rezonansowo, tak i ciała w kosmosie „uzgadniają” swe okresy obrotu. Ale wiąże się to ze zmianami energii (potencjalnej i kinetycznej) tych ciał³⁸: niezbędna jest dyssypacja energii. Siły pływowe (włączając zjawiska lepkości), jak między półpłynną nadal Ziemią a Księżycem (płynnym, w momencie oderwania się od Ziemi) są dobrym przykładem takich sił dyssypacyjnych. Z powodu tych sił Ziemia spowalnia swój obrót: od czasów zegarów atomowych wiemy, że jest to 2 ms na stulecie. Z tych samych powodów oddala się od nas Księżyc: 3 cm na rok.

Keplerowi nie udało się znaleźć zależności matematycznych dla odległości planet od Słońca; nie udaje się to również to współczesnym astronomom – być może, nie ma żadnej zależności. Cały Układ Słoneczny powstał z rozkręconej mgławicy po wybuchu poprzedniczki Słońca, a mechanika takiej plazmowej chmury jest nieprzewidywalna. W XVIII wieku pojawiła się dość skomplikowana zależność matematyczna, zwana prawem Tytusa-Bodego – ale pozostaje ona jedynie przybliżeniem.

Mnemotechnicznie i nieco zabawowo opowiadamy, że Merkury jest od Słońca o $3/8$ jednostki astronomicznej (czyli odległości Ziemia–Słońce), Wenus o $3/4$ j.a., Ziemia, oczywiście, o $3/3$, Mars – $3/2$. Kolejna planeta powinna być o 3 jednostki, a kolejna o 6, ale ich tam nie ma: to wielki Jowisz, poprzez siły pływowe grawitacji uniemożliwił powstanie planety za Marsem – pozostał tam pas asteroidów, a sam Jowisz jest nieco bliżej – o 5 jednostek od Słońca, Saturn o 10, Uran – 20, a Neptun – 30. Oczywiście, dokładne dane można znaleźć w Wikipedii, ale uproszczenie przekazu dydaktycznego ma na celu „zaczepienie pamięci” na prostych liczbach. Możliwych zależności liczbowych jest wiele, zob. np. rezonans orbity Jowisza i planetoidy Pallas (rys. 2.7).

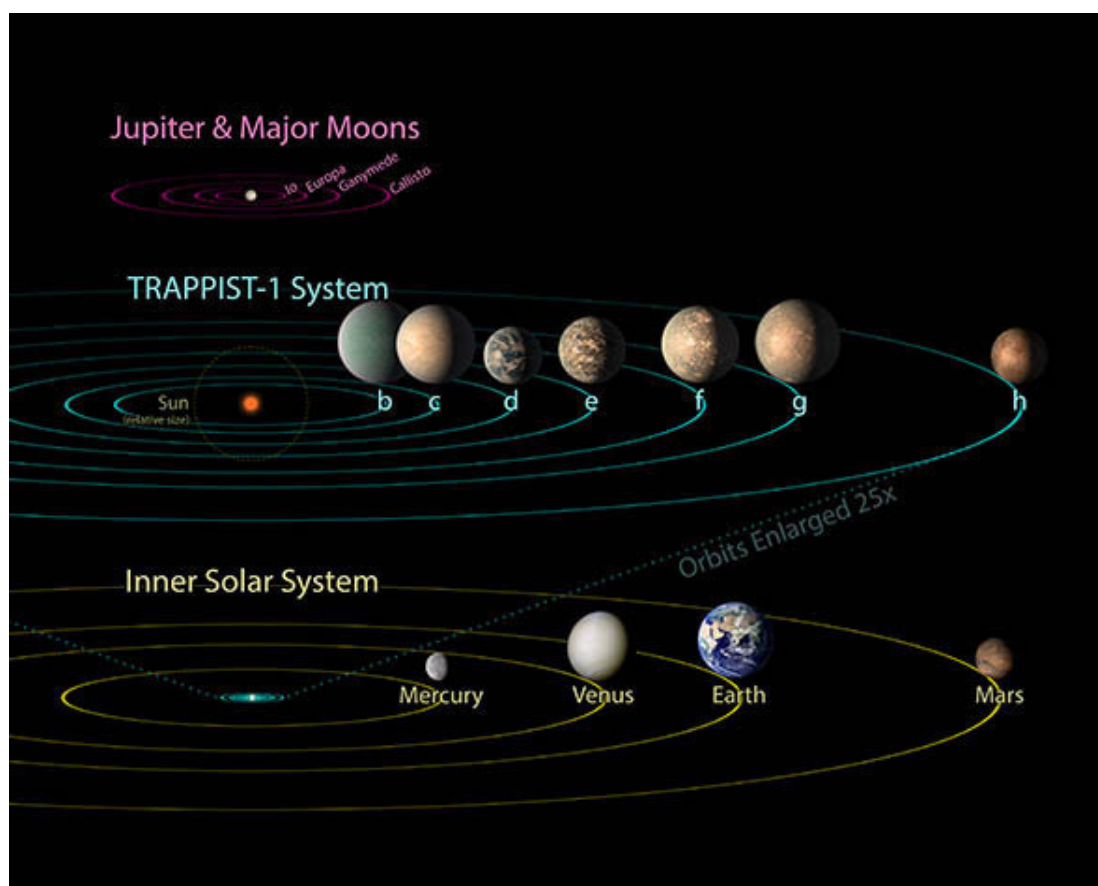
2.2.4. „Kepler” na tropie

Imieniem Keplera nazwano teleskop umieszczony na orbicie dookoła Ziemi, poszukujący planet wokół innych niż Słońce gwiazd (tzw. planet pozasłonecznych). Zagadnienie poszukiwania planet o tyle jest ciekawe, że wiąże się z pytaniem: „czy istnieje życie, możliwe inteligentne, poza Ziemią?” Astronom watykański, profesor z Teksasu, ksiądz George Coyne odpowiada: „Biblia nic w tej kwestii nie mówi”. A astronomia obserwacyjna?

Pierwszy pozasłoneczny układ planetarny został odkryty za pomocą radioteleskopu przez naukowca toruńskiego Aleksandra Wolszczana (09.02.1990). W kontekście międzynarodowym znaczenie tego odkrycia próbuje się pomniejszyć, wymieniając jako pierwszy układ planetarny dookoła gwiazdy Pegasi-51. Dziś (05.2024) Wikipedia wymienia ponad 5 tys. odkrytych planet dookoła gwiazd w naszej Galaktyce. Większość z nich to gazowe olbrzymy, podobne do Jowisza i Saturna. Ale niektóre z układów przypominają Słoneczny, z planetami przypuszczalnie skalistymi, i w niewielkich odległościach

³⁷ https://en.Wikipedia.org/wiki/Orbital_resonance, (dostęp 02.03.2022)

³⁸ Natomiast całkowity moment pędu jest zachowany.



Rysunek 2.8. Jeden z „obiecujących” pozasłonecznych systemów planetarnych: odkryty przez satelitę „Kepler” układ Trappist-1, czyli siedem przypuszczalnie skalistych planet, krążących na bardzo ciasnych orbitach dookoła czerwonego karła. System bardziej przypomina Jowisza i jego księżycy niż Układ Słoneczny (źródło: [jpl.nasa.gov](https://www.jpl.nasa.gov) ⁴⁰)

od swoich gwiazd, rys. 2.8. We wrześniu 2019 roku doniesiono o odkryciu wody w atmosferze jednej z pozasłonecznych planet³⁹. Ale z pewnością nie jest to planeta przypominająca Ziemię.

2.2.5. Harmonia Wszechświata

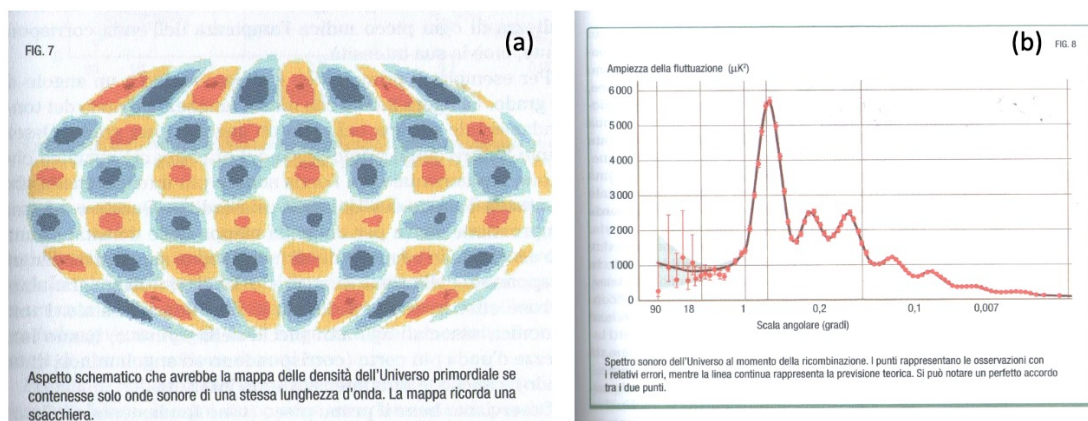
W poszukiwaniu interdyscyplinarnych skojarzeń, pomocnych w zainteresowaniu młodzieży fizyką i astronomią, sięgniemy do „harmonii” z kosmologii. Ta dziedzina astrofizyki nastrocza nam ostatnio sporo trudności: niespodziewanie dla fizyków, od kilkunastu lat stało się jasne, że niewidzialna grawitacja spaja ze sobą gwiazdy w galaktyki (obserwowana materia nie jest wystarczająca, aby równoważyć siły odśrodkowe) i że niewidzialna energia „rozpycha” Wszechświat, zapobiegając jego grawitacyjnemu zapadnięciu się. Widzialnej materii jest, w porównaniu z ciemną masą i ciemną energią, jedynie 4%. Czym są te „ciemne” formy materii? Nie mamy pojęcia.

Ale zagadek jest więcej, jak choćby obserwowany rozkład galaktyk i większych struktur, w które te galaktyki się grupują. W angielskiej Wikipedii pojawiło się nawet hasło

³⁹ A. Tsiaras et al. *Nature Astronomy* 3, 1086–1091 (2019);

<https://physicsworld.com/a/water-vapour-is-spotted-on-a-distant-rocky-planet/> (dostęp 02.03.2022).

⁴⁰ <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA21428>, (dostęp 02.03.2022)

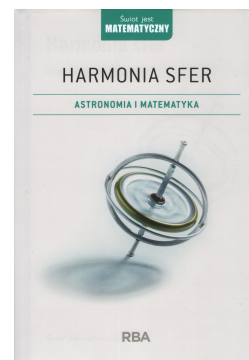


Rysunek 2.9. Dwie strony z książki, A. Casas Gonzales, *La materia oscura* (Ciemna materia), RBA Milano 2018: sposób na uzyskanie transformaty Fouriera rozkładu temperatury w promieniowaniu mikrofalowym tła (a) i wynik tej analizy (b). Rozkład Fouriera temperatury z Wielkiego Wybuchu przypominający rozkład harmoniczny dźwięków klarnetu.

„Palec Boży” (*Finger of God*). Z pomiarów promieniowania mikrofalowego tła wnioskuję się, że „granulacja” rozkładu materii w obecnym wszechświecie jest odzwierciedleniem rozkładu masy w „pierwotnej” zupie kwantowej. A jeśli w tej „zupie” ktoś zamieszał?

Przeprowadzono analizę 3D Fouriera (podobną do analizy składowych harmonicznym dźwięków) rozkładu temperatury mikrofalowego promieniowania tła (zob. rys. 2.9). Rozkład temperatury przypomina rozkład harmonicznym w dźwiękach klarnetu. Analogia daleka, ale pozwala na posłuchanie na lekcji fizyki koncertów na klarnet, na obój i na flet, Wolfganga Amadeusza Mozarta. Czyżby harmonia sfer? (zob. rys. 2.10).

Rysunek 2.10. *Harmonia sfer* – tytuł zaczerpnięty z poszukiwania przez Keplera muzyki wytwarzanej przez obracające się planety. Można tę muzykę zagrać, zob. np. wariacje na saksofon Johna Coltrane’a⁴¹. „Harmonia” jest częścią znakomitej, przetłumaczonej również na język polski, serii hiszpańskich książek (RBA) popularyzujących matematykę.



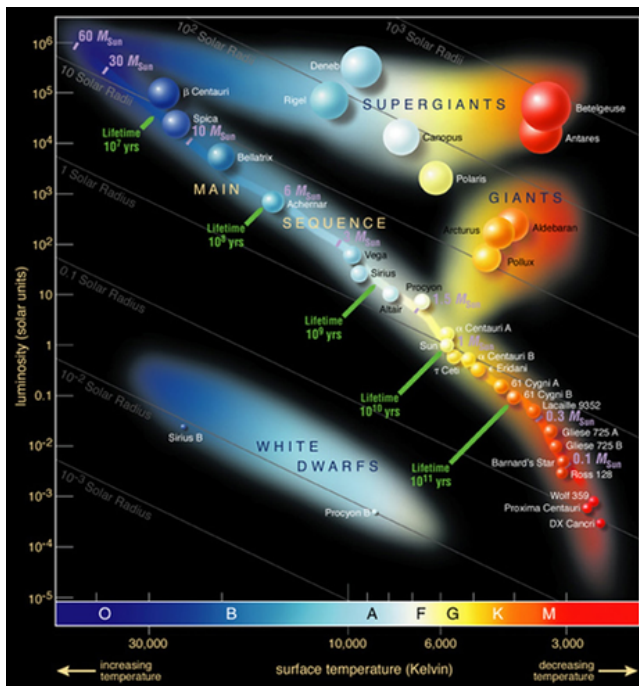
2.3. Kosmologia

2.3.1. Arystoteles: gwiazdy cieszą się własnym życiem

Arystoteles w traktacie astronomicznym *O niebie* pisał tak: „My bowiem pojmujemy gwiazdy jako ciała proste i jednostki rozłożone wprawdzie w pewnym porządku, lecz zupełnie nieżyjące, podczas gdy trzeba wiedzieć, że one rozwijają działalność i cieszą się życiem”⁴². Nikt, oczywiście, nie traktował starego filozofa serio. A on miał rację!

⁴¹ <http://uebergreifen.blogspot.com/2012/10/coltrane-and-kepler.html> (dostęp 02.03.2022)

⁴² Arystoteles, *O niebie*. Księga II, XII, *Gwiazdy i ich ruchy*, PWN, Warszawa 1980, s. 83.



Rysunek 2.11. Teleskop z Harvardu (zdjęcie po lewej), na którym na początku XX wieku grupa astronomek skatalogowała około milion gwiazd, co pozwoliło na stworzenie diagramu Herzsprunga-Russella (rycina po prawej). Opowiada prof. Andrzej Strobel (fot. Maria Karwasz)

W końcu XIX wieku, tuż przed powstaniem teorii kwantowych i teorii względności, fizycy byli przeświadczeni o własnej wszechwiedzy – uważano, że głównym zajęciem w przyszłości będzie jedynie poprawianie dokładności sformułowanych już praw. Fizycy (np. William Thomson, czyli Lord Kelvin) mylili się również w kwestii wieku Ziemi. Z obserwacji geologicznych skał osadowych można było łatwo wyliczyć, warstwa po warstwie, że akumulacja mięszności skał rzędu kilku kilometrów (jak np. wapienie w Dover czy w Dolomitach) wymagała 1–2 miliarda lat.

Oceny fizyków brały się z bilansu energetycznego Słońca. Otóż, znając rozmiary Słońca (do tego służyły np. pomiary tranzytu Wenus po tarczy słonecznej, zdarzające się raz–dwa na 100–200 lat) i jego temperaturę (z pomiarów, które posłużyły Planckowi do jego teorii, zob. rozdział I) można było się pokusić o określenie wieku Słońca. Lord Kelvin był przekonany, że źródłem energii Słońca jest jego grawitacyjne zapadanie się (a masę Słońca znamy z praw Keplera). W ten sposób stwierdzono, że Słońce (czyli również Ziemia) ma jakieś 50 mln lat. Niezgodność z danymi geologicznymi, widocznymi „gołym okiem” – nie do przyjęcia. Lord Kelvin nie przypuszczał oczywiście, że energia może „powstać” z masy w reakcjach termojądrowych.

Ale mimo teorii Einsteina, astronomowie nie byli gotowi do przyjęcia hipotezy o ewolucji gwiazd. „Gołym okiem” widać, że gwiazdy różnią się nie tylko jasnością, ale też kolorami. Rozwój technik spektroskopowych (np. analiza widma wodoru, zob. rozdział I) pozwoliły to „gołym okiem” zamienić na szczegółowe widma. Stało się jasne, że niektóre gwiazdy (w tym Słońce) oprócz wodoru i helu zawierają pierwiastki jak tlen, sód, wapń, żelazo. Ba, nie ma dwóch gwiazd identycznych. Ale zanim astronomowie zrozumieli, że różne zawartości pierwiastków świadczą o różnych etapach ewo-

lucji gwiazd, nazwali typy gwiazd literami, od czerwonych do niebieskich, A, B, C itd. (rys. 2.11). „Po drodze” okazało się, że są i inne typy, pośrednie, stąd wierszyk w wersji angielskiej „Oh! Be a Fine Girl...”.

Skatalogowanie coś około miliona gwiazd (z pomocą teleskopu z Harvardu, obecnie w obserwatorium UMK w Piwnicach, zob. rys. 2.11) pozwoliło na stworzenie swego rodzaju „drzewa życia” gwiazd, zwanego diagramem Herzsprunga-Russella⁴³.

Diagram Herzsprunga-Russella kategoryzuje gwiazdy według ich jasności (absolutnej, czyli obserwowanej z tej samej odległości) i ich temperatury. Nie jest to diagram „dróg ewolucji” gwiazd, ale jedynie ich podobieństwa: ewolucja zależy przede wszystkim od masy początkowej – im gwiazda masywniejsza, tym ewolucja przebiega szybciej i temperatura na powierzchni wyższa (czyli kolor gwiazdy – niebieski). Ale sporo na niebie jest też gigantów czerwonych, jak np. Betelgeza w Orionie (jedna z trzech gwiazd w jego „pasie”, poszukaj obrazu w Internecie), które ewoluują powoli i zbliżają się do kończącego „życie” wybuchu, w formie super-nowej.

A mówiąc o Słońcu, zasadniczą kwestią jest jego charakter „z odzysku”, czyli z materii, która już podlegała reakcjom termojądrowym w poprzednim wcieleniu naszej gwiazdy. Dowód? Istnienie życia na Ziemi, które nie byłoby możliwe bez ciężkich pierwiastków, jak selen, miedź, a także uran: wszystkie pierwiastki cięższe niż żelazo nie mogą powstać w procesach syntezy termojądrowej, a muszą w procesach „stopienia się” lżejszych jąder w gwieździe neutronowej, która następnie wybuchu.

Jak przebiega ewolucja gwiazd? Używając zwrotu, który w tej książce pojawi się wiele razy: „tego, na razie, dokładnie nie wiemy”. Nawet w przypadku Słońca, dopiero w 2018 roku, po latach obserwacji neutrin słonecznych (to one wydostają się z jądra Słońca praktycznie bez przeszkód) udało się⁴⁴ określić stałe fizyczne reakcji termojądrowych w naszej gwieździe.

2.3.2. Poszukiwanie motywacji dydaktycznych

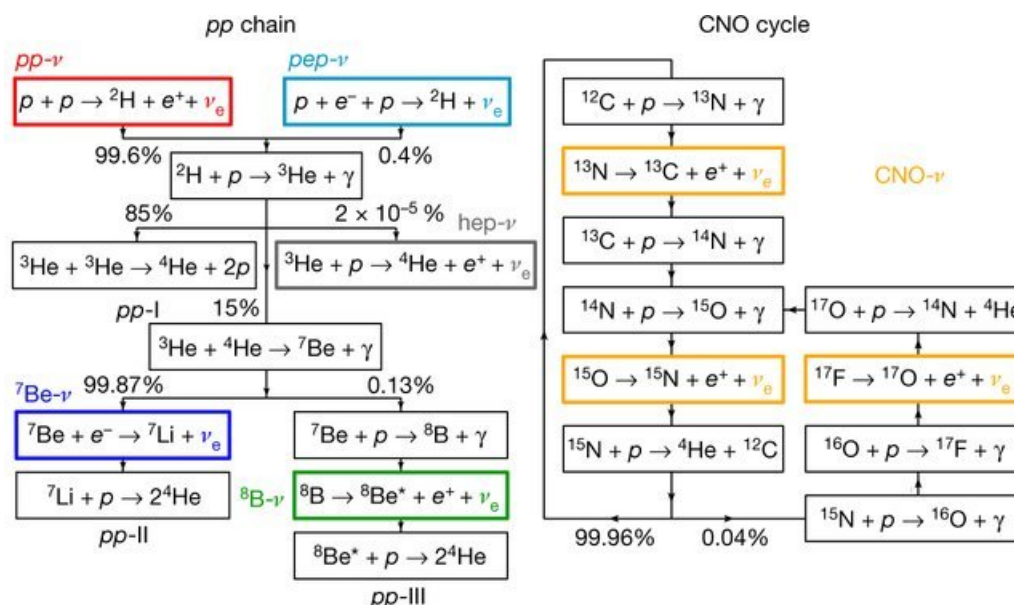
Astronomia okazuje się całkiem wdzięcznym partnerem w nauczaniu fizyki. Loty kosmiczne w zimną i pustą dal są pretekstem do pokazania zagadnień próżni, napędu odrzutowego, własności atmosfery, doświadczeń z ciekłym azotem itd. (zob. relacje z pokazów na stronach dydaktyka.fizyka.umk.pl). Jeziora ciekłego metanu istnieją, przypuszczalnie, na Tytanie, księżycu Saturna, ocean ciekłego azotu – na Plutonie, a gejzery siarki na Io – księżycu Jowisza. Zdjęcia tych ostatnich, wykonane przez sondy kosmiczne poruszają wyobraźnię, jak mogły wyglądać początki istnienia naszego globu, gdy tlenu w atmosferze jeszcze nie było.

Technologiczne „produkty uboczne” lotów kosmicznych – mikrokomputery, wodorowe ogniwa paliwowe i panele słoneczne, termiczne folie izolacyjne, teflon itd. są znakomitym argumentem motywującym do zainteresowania i astronomią i technologiami materiałowymi.

Fizyka współczesna, poprzez coraz bardziej precyzyjne metody spektroskopii i co-

⁴³ https://en.Wikipedia.org/wiki/Hertzsprung%E2%80%93Russell_diagram (dostęp 02.03.2022).

⁴⁴ The Borexino Collaboration, *Nature*, 562, 505–510 (2018).



Rysunek 2.12. „Mapa drogowa”, czyli kierunki i prawdopodobieństwa zachodzenia reakcji termojądrowych w Słońcu. Reakcje podzielone są na cykl protonowy (syntezy helu) i na na cykl syntezy węgla, azotu i tlenu. Oba cykle są połączone wąskim „pomostem” syntezy jądra węgla poprzez stan rezonansowy jądra berylu. Mapa ta ilustruje, że określenie „we wnętrzu Słońca zachodzi synteza cięższych pierwiastków z lżejszych” jest bardzo uproszczone (źródło: www.researchgate.net ⁴⁷)

raz czulsze detektory dostarcza zarówno osiągnięć spektakularnych, jak np. pierwsza fotografia czarnej dziury spoza naszej Galaktyki⁴⁵ z 2019 roku (uzyskana w światowej sieci radioteleskopów i analizowana metodami interferencji), jak i mniej spektakularnych, ale bardzo ważnych, jak niemierzalny prawie sygnał w mikrofalowym promieniowaniu tła kosmicznego, świadczący o „zapaleniu się” pierwszych gwiazd⁴⁶, jakieś 180 mln lat po Wielkim Wybuchu. W trakcie pisania tej książki (XI 2018) fizycy określili również, na podstawie wieloletnich pomiarów strumieni neutrin, szczegółową dynamikę reakcji termojądrowych we wnętrzu Słońca (zob. rys. 2.12).

Zadaniem dydaktyki fizyki współczesnej jest włączenie tych osiągnięć do programów nauczania nie jako prasowych ciekawostek, ale jako zapełnienie „luk” w wiedzy, na które to zapełnienie długo czekaliśmy. Wówczas wiedza staje się nie zlepkiem wiadomości, ale monolitem, który niekoniecznie musi zostać potwierdzony za kilka stuleci, ale który czyni z interdyscyplinarnych tematów platformę wyjściową do dalszej przygody poznawczej ucznia czy dorosłego.

⁴⁵ <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7372> (dostęp 02.03.2022).

⁴⁶ <https://www.theguardian.com/science/2018/feb/28/cosmic-dawn-astronomers-detect-signals-from-first-stars-in-the-universe> (dostęp 02.03.2022).

⁴⁷ https://www.researchgate.net/publication/328611556_Comprehensive_measurement_of_pp-chain_solar_neutrinos/figures?lo=1, (dostęp 02.03.2022)



Fizyka i matematyka: kwadratura koła

3.1. Skąd się wzięła matematyka?

3.1.1. Od Mezopotamii do Einsteina

Pierwsze twierdzenia matematyczne (jak twierdzenie „Pitagorasa” czy rozwinięcie liczby π na ułamki o mianowniku 12 i 60) znajdujemy na glinianych tabliczkach z Mezopotamii⁴⁸. Skąd się wzięła matematyka? Dyskutują nad tym nie tylko matematycy. I nad drugim pytaniem, jeszcze ważniejszym: dlaczego matematyka, nauka zupełnie abstrakcyjna⁴⁹, tak znakomicie wyjaśnia rzeczywistość. Więcej niż wyjaśnia: przewiduje.

Wyznacznikiem każdej teorii (matematycznej, a jeszcze bardziej fizycznej) jest przewidywanie nowych własności zjawisk innych niż te, z których ta teoria wynika. Teoria grawitacji wzięła się z pytania, czy przyspieszenie, z jakim odrywa się jabłko z drzewa, jest takie samo, jak przyspieszenie, z którym Księżyc, w ruchu po okręgu, spada ustawicznie na Ziemię. Równania Maxwella opisują zjawiska elektrostatyczne, magnetostaticzne, generację pola magnetycznego przez przepływ ładunku elektrycznego oraz indukcję elektromagnetyczną – odkrycia znane prawie od początku XIX wieku. Ale z rozwiązania równań Maxwella „pojawiały się” fale elektromagnetyczne (światło, radio, TV, promieniowanie Röntgena), bez których nie wyobrażamy sobie dziś cywilizacji. Równanie Einsteina opisuje krzywiznę czasoprzestrzeni w zależności od tensora energii-masy. Ale z jego rozwiązania pojawił się rozszerzający się Wszechświat.

Matematycy czasem żartują, że Bóg jest matematykiem, więc się z nim dobrze ro-

⁴⁸ D. F. Mansfield, *Foundations of Science* 26, 977–1005 (2021).

⁴⁹ Twory matematyczne nie muszą mieć odpowiedników w rzeczywistości, aby móc się o nich wypowiedzieć – przykładem jest choćby pojęcie punktu i prostej.

rozumieją. Hipoteza dobra, ale nieweryfikowalna. Ludwig Boltzmann, twórca termodynamiki, wkrótce po teorii Darwina wysunął hipotezę, że tylko te małpy mogły przeżyć, które potrafiły przewidzieć tor skoku z drzewa na drzewo (to znaczy parabolę rzutu ukośnego), czyli te, które prawidłowo stosowały matematykę zewnętrznego, fizycznego świata. I znów hipoteza ciekawa, ale nie wnosząca nic nowego. Podsumował to najlepiej Einstein: „Najbardziej niezrozumiałe w świecie fizycznym jest to, że może on zostać przez nas zrozumiany”.

3.1.2. Konieczność matematyki

Jako fizycy doświadczalni uważamy, że matematyka pojawiła się w historii ludzkości podobnie jak astronomia: z praktycznej konieczności. Rozwój cywilizacji starożytnych w dorzeczach wielkich rzek wymagał sprawnej organizacji: umiejętności projektowania, obliczania kosztów i przychodów. Jako pierwsza konieczność pojawiała się więc geometria i arytmetyka. Papirus Rhinda z roku 1550 p.n.e. zawiera rysunek trójkąta, trapezu i opisy hieroglifami. Jeszcze starszy papirus „moskiewski” z roku 1850 p.n.e. zawiera wzór na objętość piramidy ściętej (piramidy stawiano w Egipcie już tysiąc lat wcześniej) oraz przepis (proporcje) na warzenie piwa.

Egipcjanie nie znali ułamków dziesiętnych (ani systemu pozycyjnego – to wszystko przywędrowało do Europy z Indii), ale znakomicie radzili sobie z ułamkami zwykłymi: stosowali ułamki o liczniku 1. Jeden z problemów rozwiązanych w papirusie Rhinda to rozkład ułamków o liczniku 2 i mianowniku nieparzystym na ułamki o liczniku 1 i mianowniku parzystym, np. $2/77 = 1/44 + 1/308$. Nawet dziś przekaz dydaktyczny bardzo pożyteczny: „Nawet Egipcjanie, 4 tysiące lat temu potrafili sprowadzać ułamki do wspólnego mianownika”.

Ogólnie, jak w fizyce tak w matematyce motywacja do przyswojenia odpowiednich umiejętności musi wynikać z ich zastosowań. Tabelki do znajdowania najmniejszego wspólnego mianownika i największego dzielnika staną się bardziej zrozumiałe, gdy je potraktujemy jako sumy i iloczyn w algebrze zbiorów Boole’a. A z kolei te mają wszechstronne zastosowania⁵⁰ (jak „znajdź 10 szczegółów, którymi różnią się dwa rysunki”).

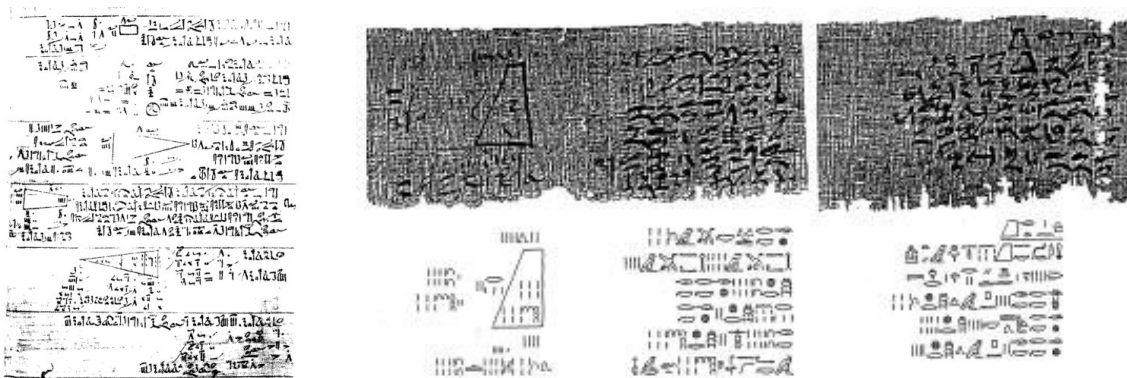
3.1.3. Archimedes i kwadratura koła

Matematyka bardzo szybko stała się nie tyle koniecznością praktyczną, ile przyjemnością poznawczą. Kwadratura koła, czyli konstrukcja kwadratu o powierzchni równej danemu kołu, lub innymi słowy znalezienie sposobu na „dokładne” wyznaczenie liczby π jest tego najlepszym przykładem.

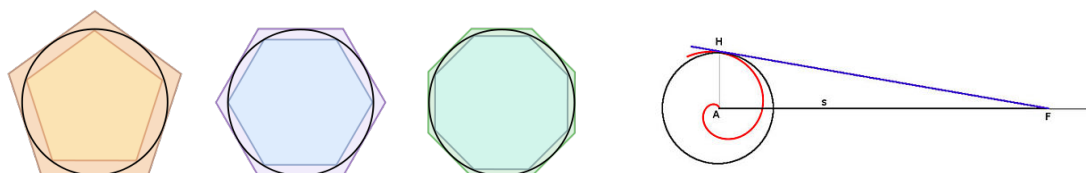
Egipski sposób wyznaczenia liczby π , opisany w papirusie Rhinda (rys. 3.1), mówił: „Odejmij $1/9$ od średnicy, i na tym, co zostanie, zbuduj kwadrat”. Dokładność wyznaczenia π tym sposobem jest lepsza niż 1%, mimo użycia tylko jednej cyfry znaczącej.

⁵⁰ Włoskie ministerstwo edukacji, reformując w 2011 roku system nauczania przygotowało programy (i podręczniki) „matematyki dla obywateli”, gdzie uczy się obliczania odsetek od kredytów, rozwiązywania sudoku, rysowania rzutów technicznych brył itd.

⁵¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Rhind_Mathematical_Papyrus (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 3.1. Papirus Rhinda (1550 r. p.n.e.), a w nim zadania z algebry i geometrii oraz papirus moskiewski (1850 r. p.n.e.) z zadaniami ze stereometrii i proporcjami składników do warzenia piwa (źródło: Wikipedia ⁵¹)



Rysunek 3.2. Dwa sposoby na wyznaczenie liczby π podane przez Archimedesesa: (a) metoda iteracyjna wpisywania i opisywania na okręgu wielokątów foremnych, (b) metoda stycznej do spirali – długość okręgu jest równa odcinkowi AF (źródło: Wikipedia ⁵³)

Archimedes (281–212 p.n.e.) rozwiązał zagadnienie w sposób iteracyjny, wpisując i opisując na okręgu wieloboki foremne, zob. rys. 3.2a. Podał on⁵² następujące przybliżenia górne i dolne dla liczby π : $3 + 10/71 < \pi < 3 + 10/70$. Wartość średnia z dwóch powyższych granic różni się od wartości „dokładnej” liczby π o 0,008%.

Archimedes podał też sposób geometryczny na wyznaczenie obwodu koła, korzystając ze „swojej” spirali: styczna do tej spirali (rys. 3.2b) odcina na prostej wychodzącej ze środka koła odcinek AF równy obwodowi koła. Sposób o tyle ciekawy, że łączy spiralę opisaną równaniem parametrycznym z wartością pochodnej i „przekłada” to na konstrukcję geometryczną. Języki programowania opracowane na potrzeby dydaktyki (np. GeoGebra) pozwalają na tworzenie apletów on-line ilustrujących to zagadnienie⁵⁴.

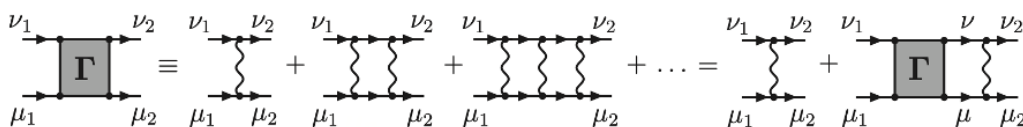
Liczba π stanowiła hobby-wyzwanie dla wszystkich pokoleń matematyków. Szeregi algebraiczne przybliżające π podali Leibniz (prosty wzór, ale wolno zbieżny⁵⁵), Euler, Viète i wielu innych. Z konstrukcji za pomocą cyrka i linijki podaje się sposób zaproponowany przez polskiego jezuitę Adama Kochańskiego (1631–1700) nadwornego matematyka Jana Sobieskiego. Błąd absolutny wyznaczenia π w konstrukcji Kochańskiego

⁵² Bill Cherovitzo, Squaring the Circle, University Denver Colorado, <http://www-math.ucdenver.edu/wcherowi/courses/history2/quad.pdf> (dostęp 02.03.2022).

⁵³ <https://pl.wikipedia.org/wiki/Pi> (dostęp 02.03.2022)

⁵⁴ G. Rubinstein, Archimede Spiral to Square the Circle, <https://www.geogebra.org/m/FJHrU53b> (dostęp 02.03.2022).

⁵⁵ $\pi = 4 - 4/3 + 4/5 - 4/7 + 4/9 \dots$



Rysunek 3.3. Diagramy pokazujące kolejne przybliżenia niezbędne do uwzględnienia w obliczeniach rozpraszania pozytonów na atomach (źródło: D. G. Green et al. ⁵⁹)

wynosi 0,00006. Konstrukcja z 1914 roku, autorstwa hinduskiego matematyka Ramanujana wyznacza liczbę π z dokładnością do 8 cyfr po przecinku. Multimedialna sekwencja tej konstrukcji jest dostępna w internecie⁵⁶. Prawdziwy wyścig dokładności zaczął się dopiero z powstaniem komputerów: trudno nawet określić, ile cyfr znaczących ma najlepsze dziś wyznaczenie liczby π .

3.1.4. Coraz dokładniej

Metody przybliżone rozwinięte nieco „dla zabawy” z liczbą π stały się podstawą wielu osiągnięć fizyki współczesnej. Widmo wodoru atomowego tylko w bardzo zgrubnym przybliżeniu jest opisane wzorem Balmera. W rzeczywistości, należy uwzględnić szeregi innych oddziaływań poza elektrostatycznym, wyjść poza mechanikę kwantową Schrödingera do relatywistycznego równania kwantowego Diraca, a i to jest dopiero początek drogi: elektron spędza nieco czasu w obszarze jądra, a więc i struktura jądra atomowego wpływa na poziomy energetyczny elektronów. Dziś dokładność wyznaczenia poziomów energetycznych elektronów w atomie wodoru sięga 10^{-14} : nie są to jeszcze poprawki grawitacyjne, ale niewiele brakuje⁵⁷. Coraz dokładniejsze pomiary widma wodoru pozwoliły na odkrycie nowych zjawisk, w szczególności doprowadziły do powstania tzw. elektrodynamiki kwantowej. Na stronach internetowych nazwaliśmy tę ścieżkę postępu „Hydrogen – never ending story”⁵⁸.

Na rys. 3.3 pokazujemy, jako ilustrację, kolejne przybliżenia, jakie trzeba uwzględnić w obliczeniach rozpraszania pozytonów (antyelektronów) na atomach: pozyton oddziałuje elektrostatycznie z atomem, ale to oddziaływanie zmienia rozkład chmury elektronowej atomu, a dodatkowo pozyton może związać się chwilowo (w locie) z którymś z elektronów atomu, co powoduje korelację ruchu z innymi elektronami etc.

Poprawki do mechaniki kwantowej wprowadzone przez elektrodynamikę kwantową są niewielkie i mają właśnie charakter „kolejnych przybliżeń”. Stosunek żyromagnetyczny elektronu (tzn. iloraz jego momentu magnetycznego do spinu) powinien wynosić 1 (w odpowiednich jednostkach), gdyby elektron był obiektem klasycznym. Mechanika kwantowa daje wartość 2 dla tego stosunku, a elektrodynamika kwantowa (zwana też relatywistyczną mechaniką kwantową⁶⁰) poprawia na 2,0023193043617(15).

⁵⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Squaring_the_circle (dostęp 02.03.2022).

⁵⁷ Zob. np. V. A. Yerokhin, K. Pachucki i V. Patkoš, *Annalen der Physik* 531, 1800324 (2019).

⁵⁸ http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/index-pl.html (dostęp 02.03.2022).

⁵⁹ D. G. Green et al. *Physical Review A* 90, 032712 (2014)

⁶⁰ https://en.Wikipedia.org/wiki/Quantum_electrodynamics (dostęp 02.03.2022).

Według najnowszych obliczeń elektrodynamiki kwantowej, iloczyn prędkości światła c i stałej Rydberga (czyli energii jonizacji atomu wodoru, R_∞) wynosi⁶¹

$$cR_\infty = 3289841960248,9(3,0) \text{ kHz}, \quad (3.1)$$

czyli względna niepewność tej stałej to 10^{-12} .

Niestety, autor (chwilowo) nie potrafi przeliczyć tego na inne jednostki energii, choćby na eV (stała Rydberga w eV to ok. 13,6) z właściwą precyzją – zmieniła się definicja jednostek SI i musimy zrozumieć, jakie dokładności wyznaczenia przypisać 1 sekundzie i 1 metrowi.

3.2. Poszukiwania „porządku”

3.2.1. Pitagoras i Fourier

Przypisuje się Einsteinowi, ale powiedział to chyba twórca algebry Kronecker, że dobry Pan Bóg wymyślił liczby naturalne, a całą resztę wymyślili matematycy. Tak! Z kombinacji liczb naturalnych (i odpowiednich operacji na nich) można stworzyć wszystkie inne rodzaje liczb, ale i liczby naturalne dostarczyły człowiekowi fascynacji poznawczych.

Pitagoras zauważył (a przed nim z pewnością pokolenia lutnistów na starożytnych dworach), że przyjemne dla ucha, harmoniczne są dźwięki na dwóch strunach różniących się długością o czynnik 2 (przy tym samym naciągu i materiale struny). Dziś mówimy, że ich częstotliwości różnią się o oktawę: na klawiaturze fortepianu są to pierwszy i ósmy kolejny klawisz. Podobnie „harmoniczne” wrażenie dają kwinta (3 : 2) i kwarta (4 : 3), poszukaj w Internecie szczegółów⁶².

Jeszcze sto lat temu do analizy częstotliwości niezbędne były skomplikowane urządzenia, w rodzaju mosiężnych kieliszków z wąskimi „dziubkami”, do których przykładano się ucho – tzw. rezonator Helmholtza. Dziś, taka analiza jest natychmiastowa i precyzyjna, tak za pomocą mikrokomputera jak telefonu komórkowego. Każdy uczeń widział pionowe paski podnoszące się i opadające w trakcie odtwarzania muzyki: to jest transformata Fouriera.

Matematyczna definicja transformaty Fouriera stanowi część kursu analizy i wymaga znajomości liczb zespolonych: z funkcji $f(t)$ określonej w dziedzinie czasu t otrzymuje się jej transformatę $F(\omega)$, określoną w dziedzinie częstotliwości ω .

„Muzyka kosmosu” przedstawiona w rozdziale II jest właśnie taką transformatą. Można też dokonać transformacji odwrotnej $F(\omega) \rightarrow f(t)$. Uproszczone wyjaśnienie transformaty Fouriera jest pokazane na rys. 3.4: przedstawiamy funkcję okresową i sprawdzamy z jakimi funkcjami $\sin(t)$, $\sin(2t)$ wykresy się nakładają. Tak działał rezonator Helmholtza: drgały te kieliszki, których częstotliwości rezonansowe znajdowały odpowiednią składową harmoniczną w analizowanym dźwięku.

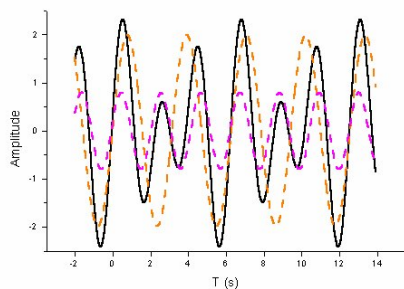
Bardzo pouczająca dydaktycznie jest analiza Fouriera dźwięku prostych instrumentów. Wbrew pozorom, trudno znaleźć instrument generujący dźwięki o jednej tylko

⁶¹ M. Horbatsch, E. A. Hessels, *Physical Review A* 93, 022513 (2016).

⁶² [https://en.Wikipedia.org/wiki/Interval_\(music\)](https://en.Wikipedia.org/wiki/Interval_(music)) (dostęp 02.03.2022).

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$



$$f(x) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$

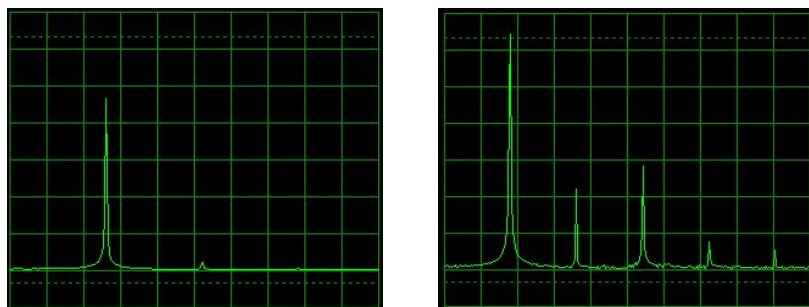
$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cos nx dx$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \sin nx dx$$

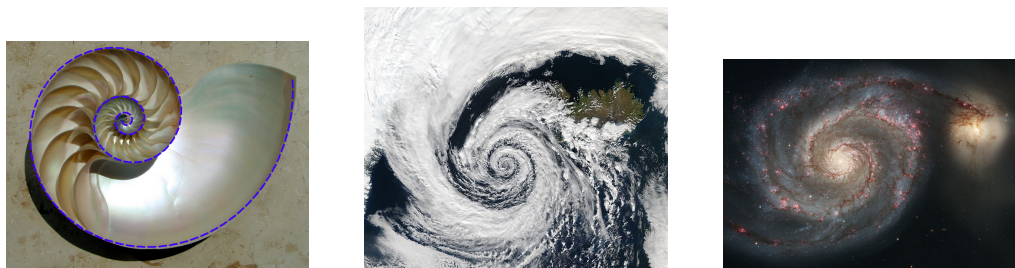
Rysunek 3.4. Ilustracja transformaty Fouriera: funkcja wykreślona linią ciągłą jest sumą dwóch funkcji $\sin t$ i $2\sin(2t)$, które przedstawione są za pomocą linii przerywanych. Sprawdzamy, że w badanej funkcji można zauważyć zmienność z odpowiednimi okresami. Obok wykresu wyrażania analityczne – współczynniki rozwinięcia transformaty Fouriera uzyskuje się z odpowiednich całek. (Źródło: *Tout tremble*, plakat dydaktyczny GK w serii "On the Track of Modern Physics", Projekt EU, 2005)

składowej harmonicznej - głos ludzki i skrzypce mają w widmie kilka składowych harmonicznych. O dziwo, kieliszek pocierany delikatnie po brzegu zwilżonym palcem wytwarza przejmujący pisk, ale o jednej tylko częstotliwości - dlatego właśnie dla naszego ucha jest on nieprzyjemny (rys. 3.5a). Ale nawet prosty, zabawkowy, plastikowy flet daje widmo o kilku częstotliwościach, pięknie rozłożonych jak kolejne liczby naturalne Pitagorasa (rys. 3.5b).

Analiza w domenie częstotliwości jest potężnym narzędziem badawczym fizyki współczesnej. W fizyce ciała stałego bada się „przezroczystość” kryształów krzemu. O ile tlenek krzemu (czyli szkło) jest przezroczysty dla światła widzialnego, jest on nieprzezroczysty dla podczerwieni (tak działają szklarnie). Krzem – odwrotnie – szary i nieprzezroczysty w świetle widzialnym jest przezroczysty w podczerwieni, a jakiegokolwiek



Rysunek 3.5. (a) Widmo Fouriera dźwięku kieliszka pocieranego na brzegu i (b) widmo zabawkowego fletu (Źródło: E. Rajch, G. Karwasz, *Czarodziejski flet*, Fizyka w Szkole, 1/2006).



Rysunek 3.6. Muszla nautilusa, niż nad Islandią i galaktyka Whirlpool mają ten sam kształt – opisany spiralą logarytmiczną (źródło: Internet; By Dicklyon – Own work, CC BY-SA 4.0 ⁶³)

zanieczyszczenia czy defekty są widoczne jako pasma absorpcyjne w zakresie określonych częstotliwości (zob. też. widmo absorpcji w podczerwieni H_2O i CO_2 w rozdziale o zmianach klimatycznych).

W klimatologii analizuje się okresowość zmian temperatury, opadów, wiatrów. Analiza danych meteorologicznych (zmian krótkookresowych) i zmian paleoklimatycznych pozwala wydzielić pogodę, makro-pogodę, klimat, makroklimat i megaklimat, z okresami zmienności około 7–10 dni, 50 lat, 80 tys. lat oraz 500 tys. lat. W krótkiej skali czasowej zmiany pogody są znaczne (różnice temperatur $5^{\circ}C$) i odpowiada za nie globalna cyrkulacja: „jeśli padało w weekend, to i w kolejny będzie padać”. Zmiany o okresie 50 lat są niewielkie ($0,5^{\circ}C$), a te o okresie 80–100 tys. lat to cykle zlodowaceń.

3.2.2. Potęga matematyki

Potęga matematyki polega na umiejętności dokonywania uogólnień – okazuje się, że zupełnie różne zjawiska fizyczne mogą być opisane za pomocą podobnych formalizmów. Podobne równania opisują drgania struny, rozchodzenie się światła i prawa mechaniki kwantowej. Ten sam kształt – spirali logarytmicznej ma układ chmur w niżu nad Islandią, muszla nautilusa, galaktyka czy układ ziaren w owocniku słonecznika (rys. 3.6). Wynika to oczywiście z zasad dynamiki galaktyk i chmur burzowych: im dalej tym szybsza rotacja. Nie potrafimy wyjaśnić, co utrzymuje wirujące galaktyki w całości – mówimy o ciemnej, ale grawitacyjnej masie. Dysponując obserwacjami astronomicznymi, potrafimy obliczyć brakującą masę i jej rozkład, ale mechanizmów nie znamy. Póki co, matematyka wykazuje „wyższość” nad fizyką. Przynajmniej w zakresie wirujących galaktyk.

3.2.3. „Model standardowy”

Matematyka pozostaje też, niechcący, paradygmatem dla innych nauk, najczęściej dla fizyki. Z trzech wielkich dzieł, które legły u podstaw nowoczesnej fizyki, *De Revolutionibus* (1543), *Dialog o dwóch największych systemach świata: Kopernikańskim i Ptolemeuszowym* (1632) i *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687) tylko praca Kopernika przypomina współczesne artykuły naukowe z fizyki: dane doświadczalne, teoria, porównania, tabele, rysunki. Dialog Galileusza, jak sama nazwa wskazuje, pozostaje

⁶³ <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35543222>,
http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=6204, <http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/ap050428.html>

dialogiem, jak to było u Platona – bez wzorów, rysunków, tabel. Natomiast praca Newtona przypomina podręcznik geometrii: rysunki cyrklem i linijką, założenia, twierdzenia i wnioski. Można by zaryzykować tezę, że Newton wziął za wzór *Elementy* Euklidesa.

Geometria Euklidesa to naukowy system, w którym ze ściśle określonej listy założeń (aksjomatów) wyprowadza się całe mnóstwo twierdzeń. Bardzo skomplikowaną *fenomenologię* cząstek elementarnych (odkryto ich doświadczalnie tysiące) uporządkowano poczynając od lat 60. XX wieku, korzystając z koncepcji kwarków – cząstek o ułamkowym ładunku elektrycznym ($+2/3$ i $-1/3$ ładunku elektronu), składających się na proton i neutron, ale nieseparowanych. Są trzy „pokolenia” kwarków, o masach coraz to większych, a czasach życia – mniejszych. Za pomocą kombinacji po dwa lub po trzy kwarki można „poskładać” dwie, bardzo liczne rodziny cząstek – mezonów i hadronów, odpowiednio (więcej w rozdziale 14). Ogromny sukces koncepcji trzech pokoleń kwarków jest określany mianem „Modelu Standardowego”, coś jakby do przyjęcia w sposób uniwersalny, *a priori*.

Tym, o czym twórcy modelu nie mówią, są dane doświadczalne, z których teoria korzysta, a wyjaśnić nie potrafi. W szczególności są to tzw. macierze Matsukawy-Cabbibo-Kobayashiego, czyli współczynniki prawdopodobieństw spontanicznej zmiany jednego kwarku w drugi. Kolejne założenie to tzw. asymetria ładunku (*Charge*), parzystości (tzn. obrotów, *Parity*) i czasu (*Time*). Jeszcze w latach 50. XX wieku okazało się, że rozpady promieniotwórcze *beta* (z emisją elektronu) wykazują orientację przestrzenną (w zależności od krętu, czyli spinu elektronu)⁶⁴. Innymi słowy, złamana jest symetria ładunku: upraszczając, ujemny elektron ma kręt „w prawo”, a dodatni antyelektron (pozyton) ma kręt w „lewo”. W 1964 roku w badaniach czasu życia cząstek elementarnych zawierających kwark dziwny (*strange*) okazało się, że również symetria *CP* jest złamana. Oznaczałoby to, wierząc nadal w zachowanie symetrii „całkowitej”, czyli *CPT*, że złamana jest symetria strzałki czasu *T*. Innymi słowy, dla kaonów (a potwierdza się to jeszcze bardziej dla cząstek zawierających jeszcze cięższe kwarki – *bottom*) czas płynie bardziej do przodu niż do tyłu⁶⁵.

Konkluzja dydaktyczna? Nauczeni „wpadką” Lorda Kelvina, chwając się sukcesami nauki, dobrze jest mówić również o niewiadomych.

3.3. Historia i współczesność matematyki

3.3.1. Newton i rachunek różniczkowy

Praca naukowa w każdej dziedzinie, a szczególnie w fizyce to jak żeglowanie bez mapy. Mając do dyspozycji możliwe na dzień dzisiejszy wyposażenie laboratoryjne (lub aparat matematyczny), staramy się „dopłynąć” do nieznanymi kontynentów⁶⁶. Ale to nie

⁶⁴ Doświadczenie, bardzo trudne, nad asymetrią rozpadu ^{60}Co w silnym polu magnetycznym przeprowadziła Wu, ale Nagrodę Nobla (1961) otrzymali teoretycy, którzy to zjawisko przewidzieli.

⁶⁵ Więcej na tematy symetrii *CPT* na plakacie dydaktycznym G. Karwasza *Czy świat się kręci w prawo*, w serii „Na ścieżkach fizyki współczesnej”, EU 2005, <https://dydaktyka.fizyka.umk.pl>

⁶⁶ Kolumb, oczywiście nie płynął zupełnie w nieznanne, choć sporo ryzykował. Znane były rozmiary kuli ziemskiej, i od czasów wyprawy Marco Polo, rodaka Kolumba do Chin – znana odległość Indii od

wystarczy: aby dokonać prawdziwego, przełomowego odkrycia uczony musi stworzyć sobie sam „warsztat pracy”. Doświadczenia z interferencją światła były trudne w czasach Witelona⁶⁷, Younga i Michelsona – wymagały świeczek, pryzmatów lub lusterek do prowadzenia promienia światła. Dziś wystarczy siatka dyfrakcyjna i wskaźnik laserowy za 5 zł. Podobnie z teorią – czasem trzeba stworzyć nową matematykę.

Ogólnie wiadomo, że Newton wprowadził rachunek małych wielkości (dyferencjalny w większości języków, różniczkowy po polsku) dla wyjaśnienia prędkości chwilowej $v = dx/dt$, gdzie dx są przyrostami drogi, a dt przyrostami czasu. Ale jest jeszcze inny, trudniejszy do zrozumienia powód powstania rachunku różniczkowego. Newton wyjaśnił prawa Keplera, wprowadzając wzór na siłę grawitacji F_G

$$F_G = \frac{GMm}{r^2}, \quad (3.2)$$

gdzie G jest stałą grawitacji (jej wartość zależy od wyboru jednostek), M i m masami przyciągających się ciał, a r – odległością między nimi.

Skąd Newton wydedukował wzór na siłę grawitacji? Z porównania z siłą odśrodkową, jaka działa na Ziemię w ruchu dookoła Słońca i na Księżyc w jego ruchu dookoła Ziemi.

$$F_C = \frac{mv^2}{r}, \quad (3.3)$$

gdzie v jest prędkością (liniową) ruchu po okręgu, a r – promieniem okręgu⁶⁸.

Ale i wzór na siłę odśrodkową Newton też musiał wyprowadzić. Z jego własnych praw dynamiki⁶⁹ potrafił wyliczyć przekaz pędu kulki odbijającej się ukośnie od płaskiej ściany. Przybliżył więc okrąg najpierw za pomocą kwadratu, później ośmiokąta i jak się to mówi naukowo „przeszedł w granicę” do nieskończone małych boków wielokąta, czyli do okręgu. Procedura ta sama, którą przyjął Archimedes.

Po co te dywagacje o historii fizyki? Dla przewidywania przyszłości. Nazywa się to ekstrapolacją (zob. np. rozdział o zmianach klimatycznych) – przewidywanie wartości nieznanych. Ale aby dokonać ekstrapolacji, najpierw musimy wykreślić krzywą. Im więcej punktów w przeszłości, tym lepsze, potencjalnie, będzie przewidywanie przyszłości. Dlatego warto dokładnie studiować przeszłość.

„słupów Herkulesa”. Kolumb dysponował i kompasem i zapewne wiadomościami o Wikingach, którzy odkryli Grenlandię. A przede wszystkim wiedział, że w kierunku zachodnim jesienią wieją silne i stałe wiatry znane pasatami. A za pół roku, na wiosnę, kierunek wiatrów przesuwa się. Dziś, po Koperniku, wiemy, że powodem jest zmiana względnego ustawienia kuli ziemskiej (i globalna konwekcja powietrza w tzw. komórkach Hadleya, plus siła Coriolisa, która globalną cyrkulację wiatrów „zakręca” wirowo).

⁶⁷ Witelon (1237–1300?) w traktacie o optyce *De perspectiva* opisał m.in. zwierciadła, peryskop, anomię oka, percepcję wizyjną. Witelon definiował się jak „syn Turynгии i Polski”. Jego dzieło z łaciny na język polski przetłumaczyli prof. prof. Andrzej Bielski i Andrzej Wróblewski z UMK.

⁶⁸ Przytaczamy te wzory, traktując je jako niezbędne minimum programowe: każdy dorosły musi rozumieć, od czego zależy siła odśrodkowa w ruchu po okręgu, np. samochodu na zakręcie.

⁶⁹ Kartezjusz sformułował trzy prawa mechaniki przed Newtonem: poprawnie rozumiał przekaz pędu w zderzeniach między ciałami, ale nie potrafił opisać matematycznie wielkości kinematycznych, takich jak pęd i przyspieszenie, ani wielkości dynamicznych, takich jak siła i pęd.

3.3.2. Rachunek całkowy: ile przejedzie ferrari?

Znana jest w historii fizyki (i matematyki) polemika między zwolennikami tezy (angielskiej) o Newtonie jako autorze rachunku różniczkowego (i całkowego) i Leibnizu, jako autorze rachunku całkowego (i różniczkowego). Polemika podobnie bezużyteczna, jak o narodowości Kopernika. Newton był dyrektorem mennicy Anglii, a Leibniz (urodzony w rejonie Miśni i Łużyc, czyli przypuszczalnie władający również językiem słowiańskim) – kanclerzem na dworze księcia Hanoweru. Leibniz stworzył mnóstwo pism filozoficznych (o atomach świata, o etyce itd.), a Newton – fizycznych. To on obliczył wysokość dźwięku powstającego w strunie cytry (problem fascynował uczonych od Pitagorasa do Galileusza), wyjaśnił działanie soczewek, zdefiniował współczynnik lepkości i oporu aerodynamicznego. A jego listy filozoficzno-teologiczne nadal czekają na publikację.

Równanie łączące rachunek różniczkowy z całkowym jest często nieznane studentom. Zazwyczaj mówi się, że „całka to odwrócenie pochodnej”, ale nie jest to określenie dające jakkolwiek receptę. Trzeba przywołać tzw. równanie podstawowe rachunku całkowego, które łączy całkę oznaczoną, ale o „kroczącej” granicy górnej, z funkcją pierwotną, $f(x)$:

$$\frac{d}{dx} \int_a^x f(t) dt = f(x), \quad (3.4)$$

Tak jak pojęcie różniczkowania nie przekracza możliwości percepcji nawet małych dzieci („a co będzie, jeśli będziemy sprawdzać przebytą drogę w bardzo, bardzo małych odstępach czasu?”), tak też rachunek całkowy tych możliwości nie przekracza. W *Toruńskim poręczniku do fizyki*⁷⁰ przytaczamy przykład pytania, ile metrów przejedzie ferrari, jeśli przyspiesza „do stowy” (czyli dla łatwiejszego rachunku 108 km/h = 30 m/s) w trzy sekundy. Interaktywne rozumowanie nauczyciela z całą grupą daje wynik właściwy, 45 m. Przejście formalne od $a = \text{const}$ do $s(t) = \frac{1}{2}at^2$ wymaga dwukrotnego całkowania, ale z zadaniem praktycznym (i to o ferrari albo bmw) uczniowie sobie radzą całkiem nieźle.

W *Poręczniku* podajemy jedynie w przypisie, że procedura liczenia przyrostów drogi ze średniej prędkości w kolejnych sekundach jest całkowaniem numerycznym metodą trapezów. I tylko w przypadku stałego przyspieszenia całkowanie metodą trapezów daje wynik identyczny jak całkowanie analityczne.

3.3.3. Work in Progress

Jest wiele nierozwiązanych zagadnień w fizyce. Nie potrafimy wyjaśnić zjawiska nadprzewodnictwa w wysokich temperaturach mimo upływu 40 lat od jego odkrycia. Ceramiki o skomplikowanych wzorach chemicznych, zawierające np. tlenki miedzi, baru, itru, w temperaturze pokojowej są znakomitymi izolatorami, a w temperaturach ciekłego azotu (77 K), a nawet wyższych, stają się nadprzewodnikami. „Żonglerka” elektro-

⁷⁰ G. Karwasz, M. Sadowska, K. Rochowicz, *Toruński poręcznik do fizyki. Mechanika. Gimnazjum klasa 1*. Wyd. Nauk. UMK. 2009.

nami między atomami tlenu i miedzi, czy szczególna, jakby fraktalna struktura krystaliczna tych tlenków?

Rozwiązania wymaga równanie ogólnej teorii względności – nie mamy jasności nawet w kwestii precesji orbity Merkurego, przykładzie przytoczonym w oryginalnej pracy Einsteina. Kosmolodzy zastanawiają się, ile wymiarów ma czasoprzestrzeń, a sam Einstein spekulował o „tunelach” w tej czasoprzestrzeni. A i coraz dokładniejsza (i złożona) mechanika kwantowa wymaga nowych metod matematycznych (i numerycznych). Innymi słowy: prace w toku, a adepci mile widziani...

4

Klimat, środowisko, energia – czyli o efekcie cieplarnianym

4.1. Równowaga termodynamiczna

Źródłem ciepła na Ziemi jest Słońce. Co prawda, z rozpadów promieniotwórczych (izotopu potasu ^{41}K , z szeregu ^{238}U i ^{232}Th) powstaje jakieś 20 TW ciepła, a ze stygnięcia globu dociera do powierzchni dodatkowo prawie 30 TW (tera = 10^{12}), to i tak jest to bardzo niewiele w porównaniu z $1366 \text{ W/m}^2 \pi (6370 \times 10^3 \text{ m})^2 = 174 \times 10^3 \text{ TW}$ docierających do powierzchni Ziemi bezustannie ze Słońca⁷¹. Stała słoneczna **1361 W/m²** to energia, jaka w jednostce czasu trafia na 1 m² powierzchni (powyżej atmosfery) ustawionej prostopadle do promieniowania słonecznego, docierająca w okolice Ziemi.

Jaka powinna być temperatura globu w stanie równowagi termodynamicznej dla promieniowania padającego i wysyłanego w modelu Ziemi bez atmosfery możemy oszacować, korzystając z pojęcia ciała doskonale czarnego. Jeżeli założymy, że obiektem promieniującym w kosmos jest kula (o powierzchni $4\pi R^2$), to gęstość powierzchniowa I strumienia energii wypromieniowanej w jednostce czasu wynosi:

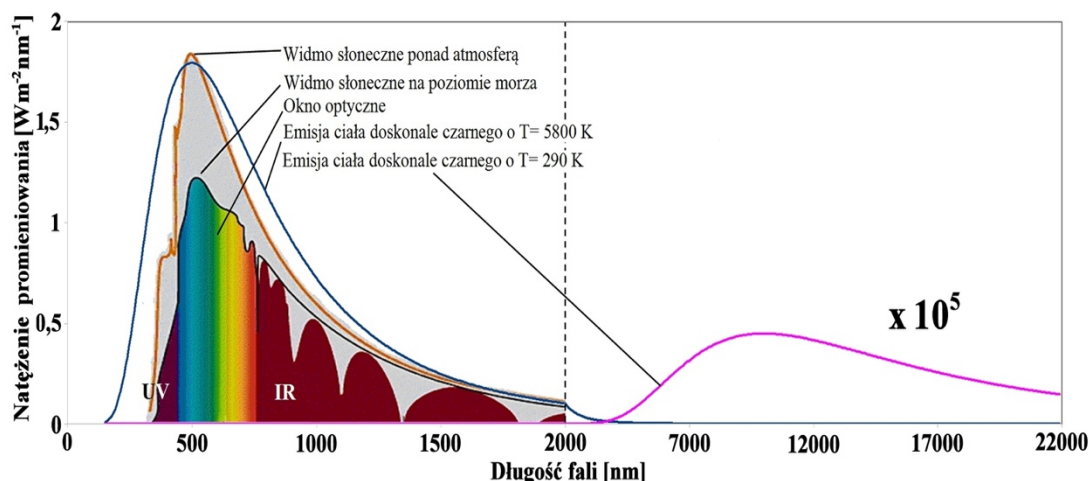
$$I = \frac{1}{4} 1361 \text{ W/m}^2 = 340,2 \text{ W/m}^2. \quad (4.1)$$

Czynnik 1/4 bierze się z porównania powierzchni koła πR^2 do powierzchni kuli. Z prawa Stefana-Boltzmann'a

$$I = \sigma T^4, \quad (4.2)$$

gdzie stała $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, otrzymujemy $T = 278 \text{ K}$ (czyli $+5^\circ\text{C}$), zob. rys. 4.1.

⁷¹ Jako promień Ziemi przyjęliśmy $R = 6370 \text{ km}$, mimo że Ziemia nie jest idealną kulą.



Rysunek 4.1. Zależność natężenia promieniowania słonecznego od długości fali (λ w nm) na jednostkę powierzchni, docierającego do powierzchni Ziemi. Maksimum emisji ciała doskonale czarnego o $T = 5800$ K odpowiada długości fali $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$. Maksimum emisji dla $T = 290$ K odpowiada $\lambda = 10 \mu\text{m}$. Natężenie promieniowania poza atmosferą ma w maksimum wartość około $2 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$. Natężenie promieniowania dla $T = 290$ K zostało przemnożone przez czynnik 10^5 . Uwaga na dwa rodzaje skali OX (powyżej 2000 nm jest ona przemnożona przez czynnik 1/10). Moc promieniowania Słońca w innych zakresach fal jest pomijalnie mała (źródło: G. Karwasz i K. Służewski ⁷³)

Podana stała słoneczna I jest wynikiem pomiarowym uzyskanym z użyciem satelitów. Podobny wynik na ekwiwalentną temperaturę Ziemi doskonale czarnej można uzyskać również z geometrycznych danych astronomicznych⁷². W rzeczywistości, jak widać na rys.4.1, atmosfera pochłania nieco promieniowania dochodzącego ze Słońca, tak więc temperatura równowagi termodynamicznej byłaby jeszcze niższa, niż wyliczone przez nas $+5^\circ\text{C}$. Należy rozważyć te kwestie dokładniej.

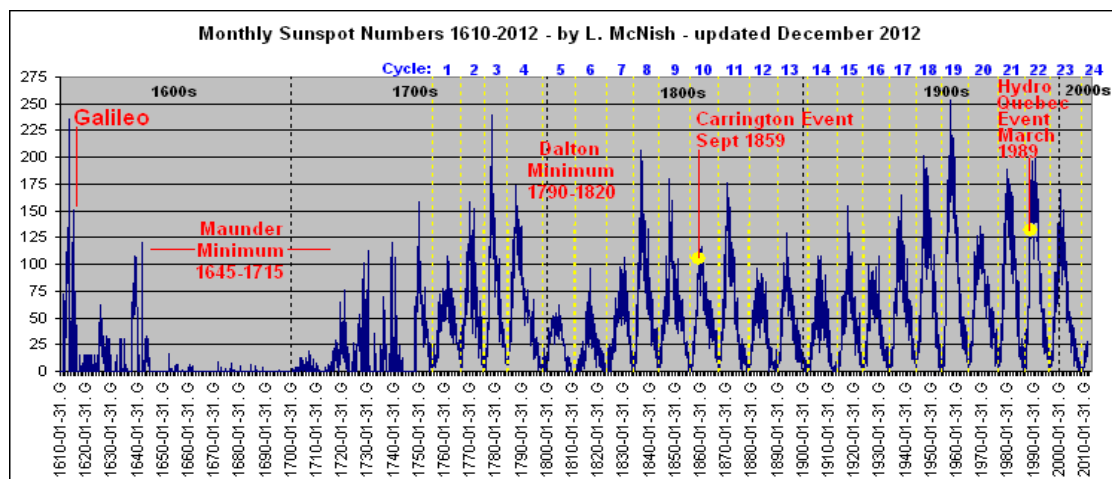
Słońce nie oświetla Ziemi przez cały czas z tą samą intensywnością. Aktywność Słońca rośnie raz na 11 lat, kiedy przybywa plam słonecznych⁷⁴, ale zmiany w ilości energii docierającej do Ziemi nie przekraczają $\pm 0,1\%$. Mimo to, brak plam słonecznych przez dłuższy czas, jak np. obserwowany przez Jana Heweliusza w połowie XVII wieku, wyraźnie prowadzi do ochłodzenia klimatu. Ochłodzenie to, mniej więcej od czasu Potopu szwedzkiego do Sejmu Niemego, nosi miano minimum Maundera lub małej epoki lodowcowej (zob. rys. 4.2).

⁷² Jeżeli znamy temperaturę powierzchni Słońca (5780 K), to temperaturę Ziemi można obliczyć bez stałej Stefana-Boltzmann, korzystając jedynie z danych astronomicznych (promień Ziemi, średnica Słońca 1,4 mln km i odległość Ziemia–Słońce 150 mln km), zob. *Zadania czeskie*, Zakład Dydaktyki Fizyki UMK, „Temperatura Ziemi”, physicstasks.eu (dostęp 02.03.2022).

⁷³ G. Karwasz, K. Służewski, Ziemia pod pierzynką, czyli o naturalnym efekcie cieplarnianym, Foton 121 (2013)

⁷⁴ Plamy słoneczne to w uproszczeniu gigantyczne wiry pola magnetycznego docierające na powierzchnię Słońca. Wzrostowi plam odpowiada wzrost „zerwanych” wirów, czyli słonecznych erupcji, wyrzucających w kosmos zwiększone ilości ultragorącej plazmy. Nie ma dotychczas przekonującego modelu magneto-hydro-termo-dynamiki Słońca wyjaśniającej cykle 11-letnie.

⁷⁵ <https://calgary.rasc.ca/sunspots.htm> (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 4.2. Okresowe zmiany liczby plam słonecznych. Minimum Maundera na tle obserwowanej liczby plam słonecznych w latach 1610–2010 (źródło: RASC Calgary Centre ⁷⁵)

Na podstawie analizy zawartości węgla ^{14}C w słojach drzew możemy ocenić aktywność Słońca również w okresach dawniejszych⁷⁶. Wydaje się, że aktywność słoneczna była niższa niż zwykle również pod koniec średniowiecza (minimum Wolfa, około roku 1300 n.e.). Nie do końca jednak minima temperatury (uśrednione po okresach kilkuletnich) odpowiadają minimom aktywności słonecznej.

4.2. Cykle Milankovicia

Nie tylko zmiany aktywności Słońca mają wpływ na klimat. Wiemy, choćby z obserwacji morenowego krajobrazu północnej Polski, że co mniej więcej sto tysięcy lat zdarzają się wielkie zlodowacenia. Podobnie długiego okresu są tzw. cykle Milankoviča. Wydaje się, że za cykle rzędu dziesiątków i setek tysięcy lat jest odpowiedzialna „maszyna” Układu Słonecznego.

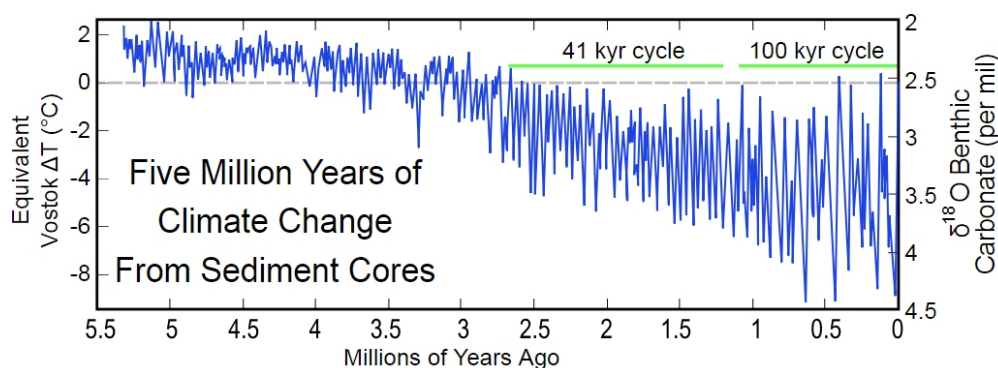
Wiadomo od czasów Keplera, że planety krążą dookoła Słońca po elipsach Słońce znajduje się w ognisku elipsy, a raczej wspólnym ognisku elips dla różnych planet. Elipsy te mogą być spłaszczone mniej (jak w przypadku Ziemi, z mimośrodem $e = 0,0167$) lub bardziej (jak w przypadku Marsa, $e = 0,0935$). Geometria orbity określonej planety, np. Ziemi ulega okresowym zmianom – spłaszczenie i nachylenie płaszczyzny orbity (czyli ziemskiej ekliptyki) do średniej płaszczyzny orbit innych planet. Pod wpływem Jowisza i Saturna oś orbity Ziemi ulega też powolnej rotacji.

Sama oś Ziemi, wirującego w przestrzeni dużego bąka, podlega precesji, z okresem około 25 tys. lat. Warto podkreślić, że ten ruch znał już Mikołaj Kopernik. Co więcej, waha się też pochylenie tej osi w stosunku do ekliptyki (od $22,1^\circ$ do $24,5^\circ$). Zsumowanie tych ruchów jest trudne, jak to omawia angielska wersja Wikipedii⁷⁷. Efektem są nie-

⁷⁶ Niestabilny izotop ^{14}C powstaje w atmosferze w reakcji pochłonięcia neutronu przez izotop ^{14}N produkowany jest proton, według schematu $^1_0n + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + ^1_1\text{p}$. Neutrony w atmosferze pochodzą z tzw. promieniowania kosmicznego, a to głównie z wiatru słonecznego.

⁷⁶ Podejrzenia o orbity niekołowe planet znajdujemy też w dziele Kopernika.

⁷⁷ Wikipedia, *Milankovitch Cycles*, en.Wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles (dostęp 02.03.2022).



Rysunek 4.3. Zmiany klimatu i temperatury na Ziemi w ciągu minionych 5,5 mln lat (źródło: Wikipedia ⁷⁸)

wielkie zmiany nasłonecznienia, ale powodujące zmiany temperatury od $+2^{\circ}\text{C}$ do -8°C (zob. rys. 4.3).

4.3. Sprzężenia zwrotne

Dokonane wcześniej obliczenie temperatury zakładało, że Ziemia jest doskonale czarna, tzn. pochłania całe padające promieniowanie. Gdyby tak było, np. dla Księżyca, to byłby on niewidoczny: tak nie jest! Pewna część promieniowania jest odbijana w kosmos – mówimy o współczynniku *albedo*, czyli zdolności odbijania promieniowania. Wynosi on 0,9 dla śniegu, 0,4 dla piasku pustyni, 0,15 dla świerkowego lasu, 0,1 dla oceanu, a średnio dla Ziemi 0,3. Uwzględnienie tego albedo we wcześniejszym obliczeniu daje temperaturę 254 K, czyli -18°C . Tyle wynosiłaby temperatura na Ziemi, gdyby nie miała ona pierzynki z atmosfery.

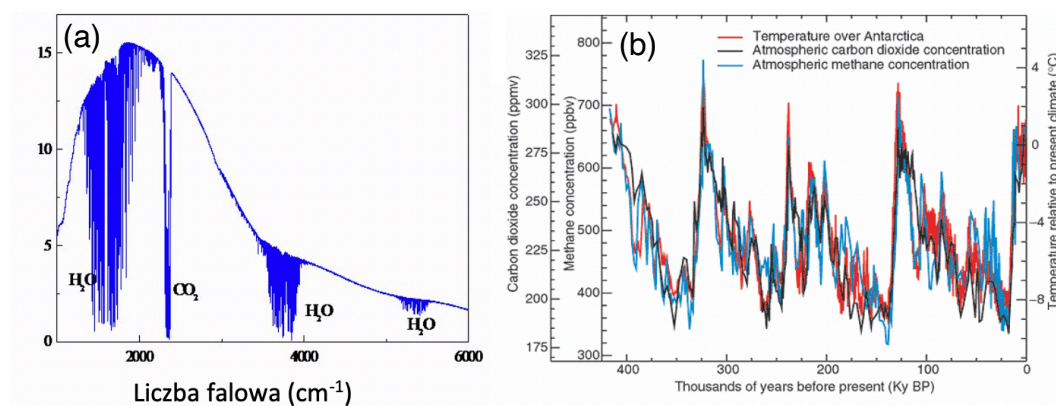
Po prześledzeniu skomplikowanego bilansu ciepła na Ziemi okazuje się, że nasza planeta ma nadwyżki energii: jej temperatura uśredniona po całym globie, porach roku, dniu i nocy jest zdecydowanie wyższa niż wynikałoby to z prawa Stefana-Boltzmanna. Konstruowane są coraz bardziej skomplikowane komputerowe modele „Global Climate Circulation”. Obrazowo można natomiast powiedzieć, że atmosfera działa jak pierzynka – nie grzeje tak, jak grzałka, ale zapobiega ucieczce ciepła z Ziemi w kosmos.

W całościowym bilansie atmosfera podnosi efektywną (średnią) temperaturę na naszej planecie, z -18°C dla piaskowej kuli bez atmosfery (jak na Marsie) do $+15^{\circ}\text{C}$. Te dodatkowe $+33^{\circ}\text{C}$ to *naturalny efekt cieplarniany*. Jest to „zbieg okoliczności” szczęśliwy dla życia na Ziemi – zamiast średnio syberyjskiej zimy mamy majowe popołudnie!

4.4. Gazy cieplarniane

Główne składniki atmosfery, azot N_2 , tlen O_2 , argon Ar (1%) są dla światła słonecznego prawie w całym zakresie widma przezroczyste. Inaczej jest z gazami w postaci cząsteczek wieloatomowych, jak para wodna (H_2O), dwutlenek węgla CO_2 , a także spotykane w śladowych ilościach w atmosferze ziemskiej podtlenek azotu N_2O , metan CH_4 .

⁷⁸ https://pl.m.wikipedia.org/wiki/Plik:Five_Myr_Climate_Change.png (dostęp 02.03.2024)



Rysunek 4.4. Mechanizmy efektu cieplarnianego. (a) Widmo absorpcji promieniowania podczerwonego: źródło promieniowania - spektrograf do badania czystości krzemu, o temperaturze lampy około 1000K, w powietrzu "pokojowym". W pokazanym zakresie promieniowania główne składniki atmosfery, N₂ i O₂ nie pochłaniają energii, więc atmosfera jest „przezroczysta”; energia jest jednak dobrze pochłaniana przez H₂O i CO₂ – ich zakresy absorpcji się uzupełniają; CO₂ skutecznie zamyka możliwe okno ucieczki ciepła z Ziemi (pomiar GK, Uniwersytet w Trento, 2002); (b) w ciągu ostatnich 400 tys. lat temperatura na Antarktydzie (linia czerwona) i zawartość CO₂ w atmosferze (linia czarna) były ściśle skorelowane (źródło: IPCC⁸⁰)

Wielatomowa struktura pozwala tym gazom efektywnie pochłaniać promieniowanie podczerwone. Promieniowanie słoneczne (40% energii w zakresie widzialnym) dociera w większości do powierzchni Ziemi, ale promieniowanie wychodzące z Ziemi (70% energii w zakresie podczerwieni, o dużych długościach fali) jest pochłaniane przez gazy wielatomowe (zob. rys. 4.4)⁷⁹. Dlatego średnia temperatura na Ziemi, jak to już powiedzieliśmy, jest wyższa, niż to wynikałoby z danych „astronomicznych”, aż o 33°C i wynosi +18°C. Dla życia opartego na wodzie jest to zasadnicza różnica!

Mechanizmy efektu cieplarnianego nie są proste, stąd i jego skutki nie są bezpośrednie. W szczególności, o ile zawartość dwutlenku węgla w atmosferze nie zależy od temperatury⁸¹, o tyle ilość pary wodnej zależy niezwykle silnie: od zawartości prawie 0% w temperaturze 0°C do zawartości 100% w temperaturze 100°C⁸². Mały wzrost temperatury na Ziemi powoduje znaczny wzrost ilości H₂O w atmosferze, co potęguje efekt cieplarniany. Jest to rodzaj dodatniego sprzężenia zwrotnego, jak piszczące głośniki, kiedy w pobliżu jest mikrofon! Korelacja między zawartością CO₂ w atmosferze, a średnią tem-

⁷⁹ Ta dziwna pozornie zależność jest konsekwencją prawa Plancka. Docierające do Ziemi promieniowanie ma „temperaturę” około 5700 K, a wysyłane przez Ziemię w kosmos około 300 K. W konsekwencji, większość energii cieplnej powracającej z Ziemi w kosmos jest unoszona przez promieniowanie podczerwone o dużych długościach fali. Gazy cieplarniane przeszkadzają w tej ucieczce, co w konsekwencji podnosi średnią temperaturę na Ziemi.

⁸⁰ <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/072.htm> (dostęp 02.03.2022)

⁸¹ Jak to pokazuje przykład Wenus z zawartością CO₂ w atmosferze 97% (i ogromną temperaturą, do 500°C), ilość CO₂ w atmosferze nie zależy od temperatury tylko w „rozsądnym” zakresie.

⁸² W saunie jest duszno z powodu małej zawartości tlenu – ciśnienie pary wodnej wypycha z sauny powietrze.

peraturą na Ziemi (rys. 4.4b) jest oczywista.

Dokładna temperatura zależy od wielu czynników. W przypadku Europy jest to np. ciepły prąd morski z rejonu Morza Sargassowego. To przyjemne $+15^{\circ}\text{C}$ musiało istnieć na Ziemi nie przez ostatnie 2 tysiące lat, ale co najmniej przez 3–3,5 mld lat, tak aby życie powstało, utrwaliło się, wyszło na ląd i wyewoluowało.

4.5. Antropogeniczny efekt cieplarniany

Czy człowiek wywołuje dodatkowy efekt cieplarniany, emitując do atmosfery gazy cieplarniane i parę wodną? Dwutlenku węgla jest, a raczej było 150 lat temu, zaledwie 280 ppm (części na milion). A ile jest pary wodnej? Zależy od wilgotności. Tzw. 100% wilgotności w Singapurze to zaledwie (przy temperaturze 29°C) 4% objętościowo pary wodnej w atmosferze. Ilość pary wodnej, jaka może „zmieścić” się w powietrzu (w sensie ciśnień parcjalnych w prawie Daltona), to od nieco powyżej 0% do 100% objętościowo w 100°C (i przy ciśnieniu 105 Pa). Zależność jest silniejsza niż jak T^2 , gdzie T jest temperaturą w stopniach Celsjusza⁸³.

Czyli znów dodatnie sprzężenie zwrotne! Wyższa temperatura to więcej pary wodnej w atmosferze i ściślejsze domykanie okna. Takich dodatnich sprzężeń jest więcej, jak np. malejąca rozpuszczalność CO_2 w oceanach w miarę wzrostu temperatury albo uwalnianie metanu z rozmarzającej syberyjskiej tundry⁸⁴. Czyli klimat powinien być z natury rzeczy niestabilny? Niewykluczone, że niestabilności klimatu, typu *on-off* są cechą permanentną. Wykresy zmian temperatury wydedukowanych z analiz izotopowych lodowych warstw na Antarktydzie⁸⁵ sugerują, że temperatura rośnie nagle, w ciągu kilku tysięcy lat, po czym powoli spada w cyklach co około 100 tysięcy lat. Zmiany koncentracji CO_2 na tym wykresie wydają się skutkiem, a nie przyczyną zmian temperatury.

Zmian klimatycznych nie można utożsamiać z globalnym ociepleniem. „Ocieplenie” to dla fizyka większa ilość energii „wpompowana” w układ termodynamiczny w równowadze. W każdym momencie ilość energii otrzymanej i traconej jest identyczna, ale równowaga ta ustala się na coraz wyższym poziomie.

Globalne ocieplenie może też przynieść, paradoksalnie, dramatyczne ochłodzenie w Europie. Europa ma znacznie cieplejszy klimat niż np. wschodnie wybrzeża USA, leżące na tej samej szerokości geograficznej. Korea Południowa, bardziej na południe niż Kalabria na końcu włoskiego „buta”, rejestruje zimowe temperatury nawet do -20°C . Powodem tej łagodności klimatu w Europie jest Prąd Zatokowy (tzw. Golfstrom). Prąd ten, jak każdy silnik termodynamiczny, jest napędzany różnicą temperatur między Morzem Sargassowym a oceanem w rejonie Islandii, gdzie ciepłe wody wychładzają się, zapadają w głąb oceanu i wracają do Morza Sargassowego jako lodowaty prąd głębinowy. Ocieplenie w rejonie Islandii może osłabić Prąd Zatokowy, w wyniku czego Polsce

⁸³ http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/termo/psychometr_big-pl.html;
http://en.Wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water (dostęp 02.03.2022).

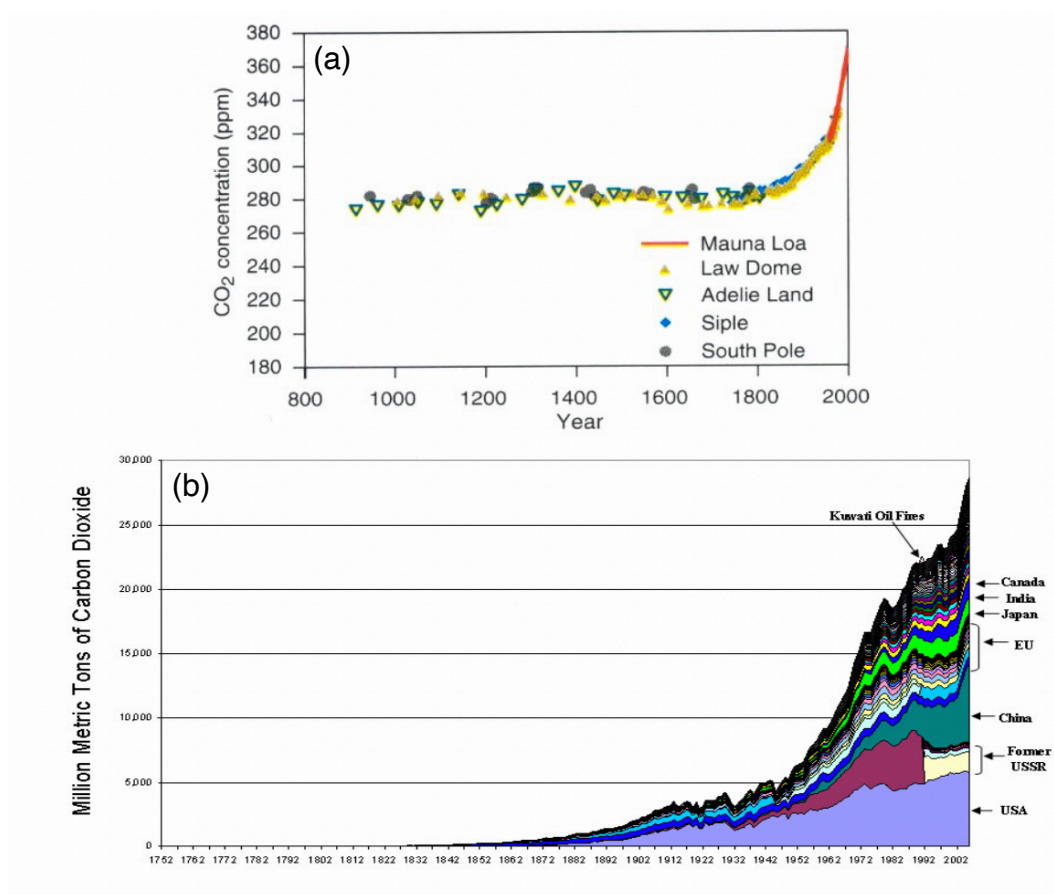
⁸⁴ Wydaje się, że sporo metanu jest też „zagrzebane” na dnie oceanów w postaci wysokociśnieniowych hydratów. Wzrost temperatury oceanów może powodować ich gwałtowne uwolnienie.

⁸⁵ http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vostok_Petit_data.svg (dostęp 02.03.2022) pomiary z radzieckiej stacji Vostok, opracowane we współpracy z badaczami z Francji i USA.

przypadną syberyjskie zimy.

Możliwe scenariusze są przedmiotem licznych naukowych, politycznych i ekonomicznych dyskusji. Metody matematyczne stosowane do prognoz klimatycznych zależą od jakości danych doświadczalnych i naszej znajomości procesów fizycznych, biologicznych, a także zmian cywilizacyjnych i technologicznych. Najistotniejszym czynnikiem sprzężeń zwrotnych wydaje się zawartość CO_2 w atmosferze. Pozostawała ona stała przez ostatnie parę tysięcy lat, na poziomie paleontologicznie dość wysokim, 280 ppm, ale od początku ery przemysłowej zdecydowanie rośnie. Dziś (20/05/2024) koncentracja ta wynosi 421 ppm: o 50% więcej niż 150 lat temu. Człowiek w istotny sposób zmienił skład atmosfery Ziemi.

Dane z rys. 4.5 są wynikami różnych analiz, m.in. izotopowych lodu Antarktydy, przyrostów drzew i składu atmosfery mierzonego spektroskopowo w obserwatorium astronomicznym na Hawajach („Mauna Loa”).



Rysunek 4.5. (a) Koncentracja CO_2 (ppm) od roku 800 do 2000 (dane z różnych źródeł, opracowanie GK) (b) Wzrost CO_2 w atmosferze ziemskiej z wyszczególnieniem emisji antropogenicznej CO_2 w latach 1752-2002) z różnych części świata (źródło: EIA 2010 ⁸⁶)

Czy wzrost koncentracji CO_2 doprowadzi do globalnego wzrostu temperatury na Ziemi? A jeśli tak, to o ile? Wydaje się, że od początku XX wieku temperatura średnia na Ziemi wzrosła o jakieś $+0,4$ do $+0,6^\circ\text{C}$. Jest to nieco mniej niż $-0,7^\circ\text{C}$ w okresie wojny

⁸⁶ U.S. Energy Information Administration 2010

trzydziestoletniej i dużo mniej niż $+3^{\circ}\text{C}$ w czasach, kiedy żyły dinozaury na naszych szerokościach geograficznych. Niestety - dla nas, nie potrafimy do końca przewidzieć zmian temperatury na Ziemi. Po drugie, fluktuacje klimatyczne stają się uciążliwe we współczesnym świecie, w którym musimy podróżować, w którym wydajność produkcji rolnej jest coraz bliższa możliwych granic, w którym ludzkość zagospodarowuje tereny coraz bardziej narażone na powodzie, podtopienia, susze, tajfuny itd.

Konkludując, na ziemski klimat wpływ ma bardzo wiele czynników. Niektóre z nich znamy, inne być może nie. Z biegiem czasu niektóre mechanizmy stały się jednak już jasne. Co możemy powiedzieć na pewno?

- a) Własności absorpcyjne w podczerwieni cząsteczki CO_2 są istotną przyczyną naturalnego efektu cieplarnianego, dzięki któremu jest możliwe białkowe życie na Ziemi.
- b) Działalność przemysłowa człowieka przyczyniła się do istotnego (o prawie 50%) wzrostu zawartości CO_2 w atmosferze.
- c) Czy ten wzrost spowoduje wzrost średniej temperatury na Ziemi i/lub obniżenie temperatury w Europie, i/lub globalne zlodowacenie i/lub gwałtowne huragany i/lub susze? Na razie nie ma bezdyskusyjnych dowodów. Gromadzenie danych trwa jednak nadal. Kto wie, do jakich wniosków doprowadzi za kilka/kilkanaście lat?



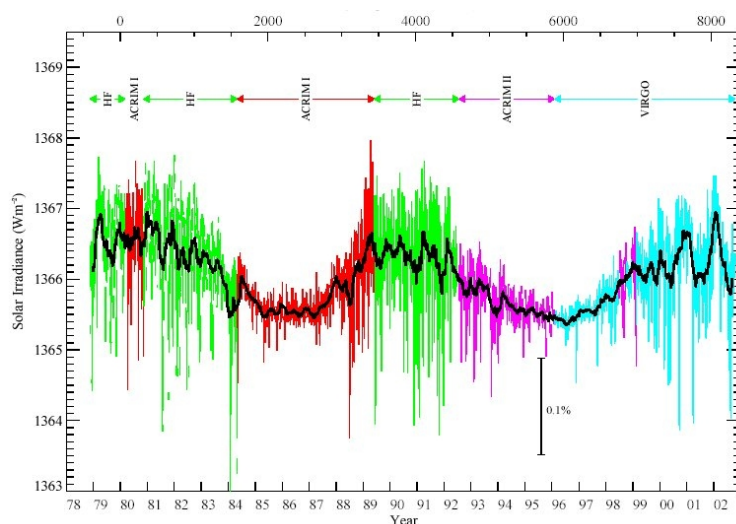
Klimat i środowisko – alternatywne źródła energii

5.1. „Produkcja” energii

Energii nie możemy wytwarzać, energii nie możemy produkować, energię możemy tylko przetwarzać, jedną formę energii w drugą. Zgodnie ze słynnym równaniem Einsteina $E = mc^2$ całkowita ilość energii we Wszechświecie od jego początku do dzisiaj powinna być taka sama. Sumaryczna masa i energia Wszechświata jest stała. Jest to podstawowe prawo fizyki, czyli globalne prawo zachowania energii.

Źródłem energii docierającej do Ziemi jest Słońce. Jest to ilość mniej więcej stała i różni się niewiele o 0,1% (ok. 1 W/m^2) w 11-letnich cyklach słonecznych, w zależności od aktywności Słońca i liczby plam na Słońcu. Stała słoneczna to całkowita energia, jaką promieniowanie słoneczne przenosi w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię ustawioną prostopadle do promieniowania w średniej odległości Ziemi od Słońca (150 milionów km) przed wejściem promieniowania do atmosfery.

Obecnie wielkość tę mierzy się za pomocą pomiarów satelitarnych, dzięki czemu pomija się wpływ atmosfery ziemskiej na otrzymane wyniki. Średnia wartość stałej słonecznej zmierzona przez eksperyment SORCE wynosi 1366 W/m^2 (zob. rys. 5.1). Zmiany klimatyczne zachodzące na Ziemi nie wynikają więc ze zmiany ilości energii docierającej ze Słońca, ponieważ ta jest stała. Jak już wspomniano energia słoneczna dostarczana jest do Ziemi w postaci światła widzialnego (ok. 40%), podczerwonego (50%) i nadfioletu (10%). Atmosfera jest zasadniczo przezroczysta w zakresie widzialnym, ale z powodu zawartości gazów jak H_2O i CO_2 jest nieprzezroczysta dla promieniowania podczerwonego, szczególnie o długości fal kilku mikrometrów. Ta właściwość fizyczna jest powodem naturalnego i antropogennego efektu cieplarnianego.



Rysunek 5.1. Zmiany stałej słonecznej w cyklu 11-letnim, dane satelitarne z lat 1978–2003. Pomiary z różnych satelitów zostały przedstawione w odmiennych kolorach (źródło: ASS⁸⁷)

5.2. Źródła energii wolne od węgla

W grudniu 2018 roku opublikowano raport, który sumuje przewidywania do końca tego stulecia i stwierdza, że do 2040 roku możemy się spodziewać wzrostu średniej temperatury na Ziemi nawet o 1,5°C (zob. rys. 5.2)⁸⁸.

Jeśli przejdziemy na alternatywne źródła energii, to wzrost globalnej temperatury zostanie zahamowany w ciągu najbliższych dwudziestu lat. Jeśli tego nie zrobimy, to w 2060 roku grozi nam krytyczny wzrost temperatury powyżej 2°C. W wyniku tego niektóre archipelagi mogą zostać zalane wodą, ponieważ stopnieją lodowce i poziom mórz się podniesie. Wynika stąd wniosek, że aby zmniejszyć efekt cieplarniany należy zlikwidować emisję CO₂ do atmosfery, czyli wyeliminować węgiel z możliwych źródeł energii.

Spalanie benzyny (C₆H₁₄, heksanu) dostarcza mniej (zaledwie 50%) CO₂ w porównaniu z tą samą energią uzyskaną ze spalania czystego węgla. Podczas spalania metanu (CH₄), czyli gazu ziemnego, do atmosfery trafia jeszcze mniej CO₂, bo zaledwie 20%. Gdybyśmy spalali jedynie wodór (H₂), wówczas 0% CO₂ trafiłoby do atmosfery ziemskiej.

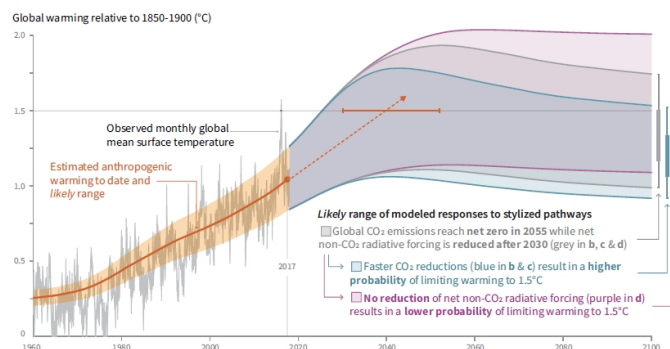
Wodór jako nośnik energii może być wytwarzany z elektrolizy wody. Szczególnie obiecujące technologicznie jest zastosowanie tzw. "ogniw paliwowych", w których gazowy wodór łączy się z gazowym tlenem (z powietrza), wytwarzając bezpośrednio energię elektryczną. Produktem ubocznym procesów zachodzących w ogniwach jest woda. Innymi słowy, wodę utraconą do wytworzenia wodoru możemy odzyskać dzięki ogniwom paliwowym, przy okazji wytwarzając pożądaną energię. Zalety ogniw paliwowych zostały bardzo szybko rozpoznane przez amerykańską Narodową Agencję Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA), która od połowy lat 60. XX wieku korzystała z nich, począwszy od misji Apollo i budowy pierwszych promów kosmicznych. Podczas podróży

⁸⁷ N. Scafetta and R. C. Willson, *Astrophysics and Space Science* 350 (2), 421–442, (2014)

⁸⁸ https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf (dostęp 02.03.2022).

Cumulative emissions of CO₂ and future non-CO₂ radiative forcing determine the probability of limiting warming to 1.5°C

a) Observed global temperature change and modeled responses to stylized anthropogenic emission and forcing pathways



Rysunek 5.2. Przewidywane zmiany globalnej temperatury do roku 2100, w różnych scenariuszach emisji gazów cieplarnianych (źródło: IPCC ⁸⁹)

na księżyc ogniwa paliwowe, znajdujące się w module serwisowym statku kosmicznego, zapewniały astronomom zarówno energię elektryczną, jak i wodę pitną. W sumie w 18 misjach Apollo, ogniwa paliwowe przepracowały ponad 18 000 godzin, bez choćby pojedynczej awarii podczas lotów. Obecnie ogniwa paliwowe postrzegane są przede wszystkim jako alternatywa dla silników spalinowych do napędzania pojazdów mechanicznych. Samochody na silniki elektryczne wykorzystujące wodór jako paliwo stają się coraz bardziej powszechne na rynku motoryzacyjnym. Niestety w Polsce wciąż brak jest dystrybutorów wodoru na stacjach paliw.

Sensownym celem polityki klimatycznej i energetycznej powinno być wyeliminowanie jako źródeł energii paliw kopalnych: węgla, ropy i metanu, oraz zastąpienie ich energiami **odnawialnymi** (alternatywnymi). Najlepszymi źródłami energii odnawialnej w przyszłości będzie energia słoneczna uzyskiwana z ogniw fotowoltaicznych, energia z turbin wiatrowych i wodnych, energia z elektrowni atomowych (rys. 5.3) i energia z nowocześnie (lecz nadal w fazie prototypów) elektrowni wykorzystujących fuzję jądrową (czyli syntezę jąder helu z jąder wodoru). Sumaryczna ilość energii, której ludzie potrzebują, niestety ciągle rośnie.

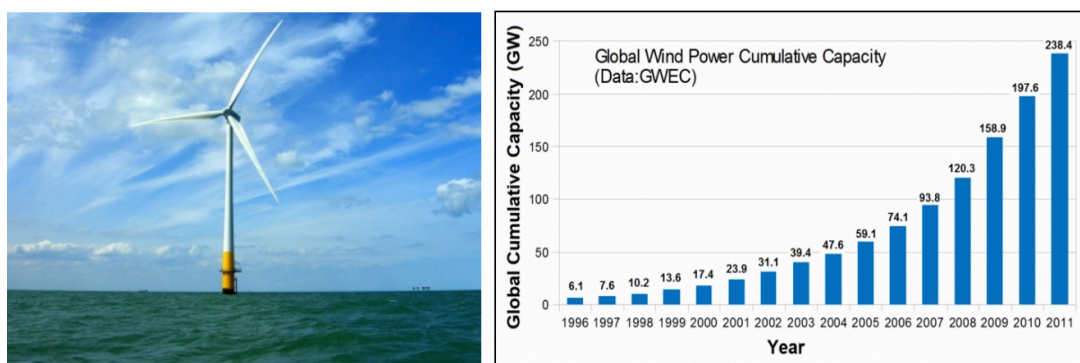
Jeden reaktor w elektrowni atomowej dostarcza ok. 500 MW energii i zaspokaja to potrzeby 200 000 gospodarstw domowych. Główną zaletą reakcji jądrowych jest fakt, że z małej ilości (rzędu kilku kilogramów) paliwa jądrowego (najczęściej uranu) uzyskuje się duże ilości energii. Dla porównania tradycyjna elektrownia węglowa zużywa na dobę kilka pociągów z wieloma wagonami wypełnionymi węglem. W cyklu pracy reaktora jądrowego zachodzi reakcja łańcuchowa, ale tak kontrolowana, aby nie nastąpił niebezpieczny wybuch.

Ponad 40% energii elektrycznej produkowanej w Dani wytwarzane jest przez wiatraki. Cały czas rośnie dynamicznie globalny udział energii wiatrowej. Co trzy lata podwaja się ilość produkowanej w ten sposób energii. Jeden wiatrak o średnicy 90 m produkuje średnio 3 MW energii elektrycznej i zaspokaja to potrzeby 1000 gospodarstw do-

⁸⁹ <https://www.ipcc.ch>



Rysunek 5.3. Kolumny w elektrowni jądrowej, w których jest chłodzony czynnik roboczy napędzający reaktor. Dym wydostający się z kominów to para wodna, czyli emisyjność CO₂ wynosi 0% (źródło: Wikipedia, Électricité de France)



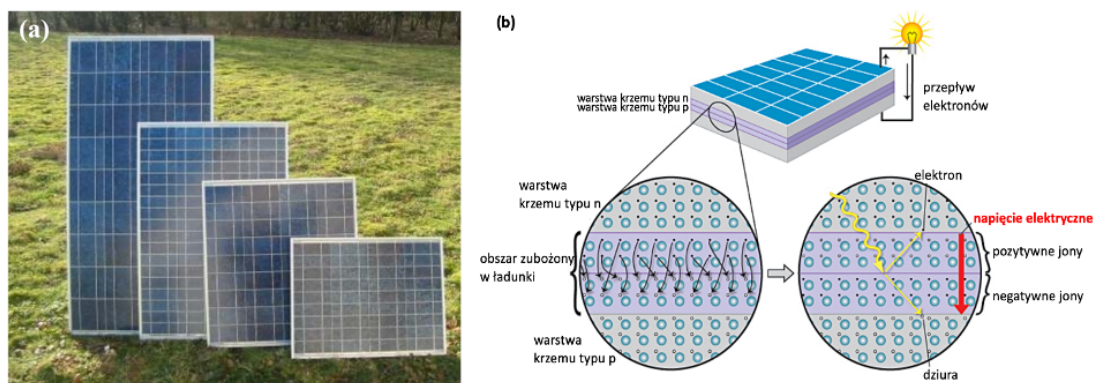
Rysunek 5.4. Coraz bardziej popularne są wiatraki i farmy wiatrowe budowane na morzu (źródło: Global Wind Statistics 2010, Global Wind Energy Council)

mowych. W Polsce również obserwujemy coraz więcej wybudowanych wiatraków i planuje się budowę farm wiatrowych na Bałtyku. Mniej więcej 5% całkowitej produkcji energii na świecie wytwarzanej jest przez wiatraki. Najwięcej energii tego typu wytwarza się w Chinach, USA, Niemczech, Hiszpanii i Danii.

Obecnie w wielu laboratoriach naukowych na całym świecie pracuje się nad udoskonaleniem, poprawieniem żywotności i efektywności ogniw fotowoltaicznych oraz obniżeniem ich ceny. W półprzewodnikach oświetlonych światłem, czyli np. w dwóch kawałkach krzemu typu n i p , ładunki ulegną rozdzielaniu i popłyną prąd elektryczny. Ogniwa łączymy w panele fotowoltaiczne, aby uzyskać z nich większe napięcie elektryczne (rys. 5.5). Efektywność obecnie stosowanych ogniw fotowoltaicznych, opartych o krzem, wynosi kilkanaście procent. I jest to, niestety, granica nie technologiczna, ale fizyczna. Kwanty światła podczerwonego nie niosą dostatecznej energii aby wywołać efekt fotoelektryczny, a kwanty światła nadfioletowego - zbyt dużą, że nadmiar tej energii zamienia się ciepło. Rozwiązaniem byłyby panele wielowarstwowe, z różnych półprzewodników, albo użycie bardziej "egzotycznych" niż krzem materiałów, np. arsenku galu GaAs. Jest to "sztuczny" krzem, wykorzystywany np. w telefonach komórkowych. Niestety, wraz z wydajnością ogniw fotowoltaicznych rosną znacznie koszty ich

produkcji i eksploatacji: panele tego typu są więc wykorzystywane np. w stacjach kosmicznych, gdzie wartość samych materiałów stanowi znikomą część kosztów ich wysłania na orbitę.

Problemem, z którym będziemy musieli się zmierzyć jest również "magazynowanie" energii. "Produkcja" energii elektrycznej w farmach wiatrowych oraz w panelach słonecznych uzależniona jest od pogody. Tradycyjna energetyka jądrowa, oparta o uran, natrafi wkrótce na barierę dostępności bogatych w ten pierwiastek rud. Dysponują nimi Australia, Rosja, Kazachstan, Kanada. Wiele krajów, jak Norwegia, alpejska część Włoch, syberyjska część Rosji korzysta z elektrowni wodnych. Niestety i tu natrafiamy na barierę dostępności wody i możliwości budowy zbiorników. Intensywnie trzeba więc szukać nowych technologii.

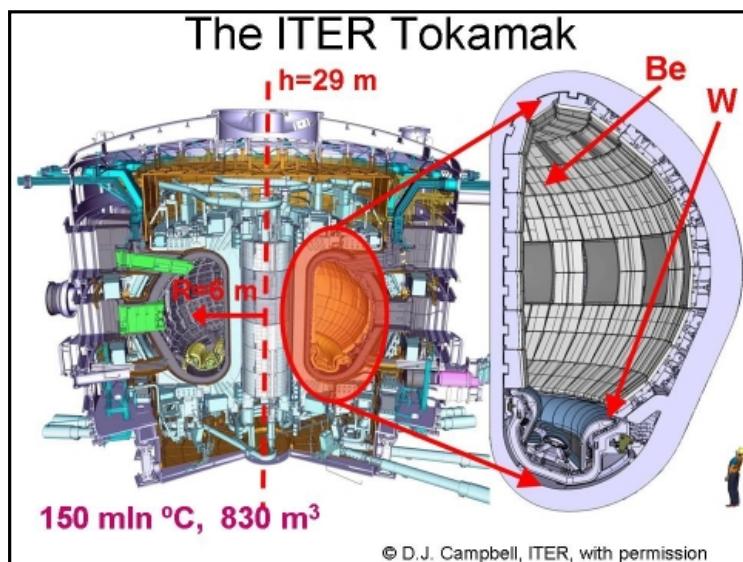


Rysunek 5.5. (a) Bardzo obiecujące są coraz bardziej udoskonalane panele fotowoltaiczne. (b) Schemat złącza p-n demonstrujący rozdział ładunków (elektron - dziura) pod wpływem światła i pola elektrycznego, które samoistnie powstaje w obszarze warstwy zubożonej (źródło: American Chemical Society⁹⁰)

Źródłem energii Słońca, bardzo ustabilizowanym i niezmiennym od 4,5 miliarda lat, są reakcje syntezy termojądrowej, głównie jąder helu z jąder wodoru. Przeprowadzenie takiej reakcji na Ziemi umożliwiłoby stworzenie bardzo efektywnego źródła energii. W oparciu o tę reakcję, już w latach 50-tych XX wieku zbudowano bombę termojądrową. Niestety, pokojowe wykorzystanie reakcji syntezy (fuzji) jądrowej napotyka na poważne kłopoty technologiczne. O ile we wnętrzu Słońca temperatura wynosi 15 mln °C, to wewnątrz reaktora termojądrowego musi wynosić 150 mln °C. Plazma we wnętrzu Słońca jest ściśnięta przez ogromne siły grawitacji. "Ściśnięcie" plazmy w reaktorze odbywa się za pomocą gigantycznych pól magnetycznych, wytwarzanych przez skomplikowane systemy cewek nadprzewodzących, ale reagujący gaz nie osiąga nawet ciśnienia atmosferycznego: stąd konieczność tak wysokich temperatur.

Obecnie (2024 r.) najbardziej zaawansowanym naukowo i technologicznie projektem (o nazwie ITER) są wspólne działania praktycznie całego świata (Europy, USA, Kanady, Chin, Indii, Rosji) nad skonstruowaniem reaktora dającego netto uzysk energii (po odliczeniu energii elektrycznej zewnętrznej niezbędnej do zasilania cewek, utrzymania

⁹⁰ <https://www.acs.org/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2013-2014/how-a-solar-cell-works.html> (dostęp 27.05.2024)



Rysunek 5.6. Schemat budowy reaktora termojądrowego ITER Tokamak w Cadarache w pobliżu Marsylii we Francji z zachowaniem skali. W powiększeniu komora próżniowa reakcji termojądrowej, o objętości prawie 900 m^3 . Po prawej stronie na dole stoi dorosły człowiek (źródło: D. J. Campbell ⁹²)

próżni, wytwarzania ultra-niskich temperatur nadprzewodnikowych uzwojeń itd.). Ale i ten reaktor pozostanie prototypem: do wyłożenia ścian wykorzystuje się wolfram, którego zasoby są ograniczone, do budowy cewek tantal i niob (lub cynę), a samym paliwem jest najcięższy izotop wodoru, tryt, który jest "odpadem" w zwykłych reaktorach uranowych, a którego całkowite zapasy wynoszą obecnie jakieś 27 kg. Według projektu ITER ma każdorazowo podtrzymywać reakcję fuzji przez około 1000 sekund, osiągając moc 500–1100 MW.

Schemat reaktora ITER, budowanego w Cadarache na południu Francji, jest pokazany na rysunku 5.6. Jest to obecnie najbardziej złożony (i kosztowny⁹¹) projekt całej ludzkości, poza lotem człowieka na Marsa. Jednocześnie, jest to największe laboratorium fizyki jądrowej, atomowej, nadprzewodników, plazmy - szansa na kolejny skok technologiczny ludzkości. Ale, jeśli opanujemy na przemysłową skalę syntezę helu z deuteru, energii termojądrowej wystarczy nam na kilka tysięcy lat.

⁹¹ Założony koszt 13 mld euro z pewnością zostanie przekroczony. Dla śledzenia postępów nad budową reaktora ITER odsyłamy Czytelnika do właściwych stron internetowych tak projektu jak Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (IAEA).

⁹² D. J. Campbell, *Progress towards Fusion Energy at ITER*, IAEA Technical Meeting, Deajeon, Republic of Korea, 15–19.12.2014)

6

Fala grawitacyjna

6.1. Dlaczego fala?

Fala grawitacyjna zarejestrowana 14 września 2015 roku jest jednym z najbardziej spektakularnych odkryć fizyki, nie tylko XXI wieku. Jest „namacalnym” wynikiem ogólnej teorii względności (OTW) Einsteina. Na potwierdzenie istnienia takiej fali czekano dokładnie sto lat. Fala jest też przykładem znakomicie zaplanowanego, i realizowanego przez 50 lat, przy współpracy teoretyków i doświadczalników, eksperymentu fizycznego.

6.1.1. Nielubiana teoria

Albert Einstein otrzymał Nagrodę Nobla w 1921 roku, zaraz po tym, jak jego OTW z 1917 roku została potwierdzona przez obserwacje zaćmienia Słońca w 1919 roku. Jednak nie dostał nagrody za teorię względności, ale za wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego (zob. rozdział 1). Podobno jeden z profesorów w Komitecie nie wierzył w tę teorię. Jednym z efektów przewidzianych przez ogólną teorię względności było grawitacyjne odchylenie się promieni światła, możliwe do zmierzenia w trakcie okultacji Słońca. Wkrótce po dewastującej Europę wojnie zostały zorganizowane przez Królewskie Towarzystwo Naukowe (w Anglii) dwie wyprawy, do Zachodniej Afryki i Brazylii. Miały one na celu sprawdzenie, czy w trakcie zaćmienia światło gwiazd jest odchylane przez Słońce od linii prostej zgodnie z teorią Newtona czy Einsteina. Oczywiście fotony nie mają masy (spoczynkowej), więc przypisanie im masy grawitacyjnej jest koncepcyjnie nieco ryzykowne, ale łącząc teorię Plancka, że energia fotonu wynosi $E = h\nu$ i wzór $E = mc^2$ możemy założyć, że „ m ” w ten sposób wyliczone jest masą oddziaływania grawitacyjnego między fotonem a Słońcem. Teoria Newtona, w ten sposób „ulepszona”, pozwala więc wyzna-

czyć odchylenie promienia odległej gwiazdy przy jego przejściu w pobliżu Słońca. Otóż odchylenie wynikające z ogólnej teorii względności jest dwukrotnie większe niż „newtonowskie”.

Obserwacje odchylenia promienia jakiejś gwiazdy, w trakcie trwającego parę minut zaćmienia, w warunkach niepewnej pogody nie było łatwe – z szesnastu płyt fotograficznych tylko jedna nadawała się do analizy. Relacjonując swe pomiary przed Królewskim Towarzystwem, Arthur Eddington miał świadomość, że patrzy na nich z portretu sam Newton, a Einstein pochodził z nieprzyjaznego, jeszcze rok wcześniej, kraju. Ale wyniki Eddingtona potwierdziły, w granicach błędu, że rację miał Einstein. Ten ostatni całą polemiką się nie przejmował. Gdy otrzymał wiadomość, że obserwacje przyznały mu rację powiedział: „Nie miałem żadnych wątpliwości, że moja teoria jest słuszna”⁹³.

6.1.2. Case study

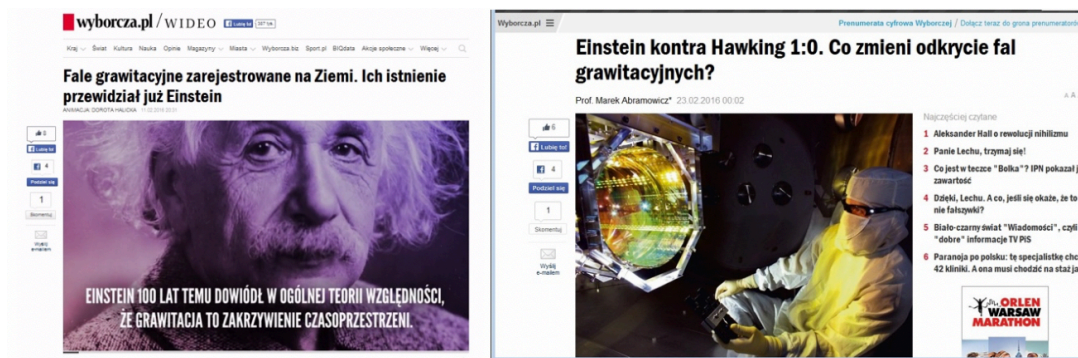
Fale grawitacyjne są jednym z efektów przewidzianych przez OTW. Doświadczalne odkrycie fal elektromagnetycznych przez Hertza, mniej więcej dwadzieścia lat po sformułowaniu praw przez Maxwella, miało zasadnicze znaczenie dla całego dalszego rozwoju techniki, w szczególności telekomunikacji. Od sformułowania OTW do pierwszej detekcji fali grawitacyjnej minęło natomiast 100 lat. Było to więc odkrycie niezwykle długo oczekiwane. Ale znaczenie, jakie przypisujemy (GK) temu odkryciu nie polega ani na potwierdzeniu OTW, ani na efekcie prasowym, jaki wywołało. Detekcja fali grawitacyjnej to przykład niezwykle dobrze zaplanowanego i konsekwentnie realizowanego przez lata doświadczenia fizycznego. Jest to obecnie absolutnie najdokładniejsze doświadczenie wykonane przez naukowców (nie tylko fizyków). Dokładność względna 10^{-21} oznacza zmierzenie skrócenia odcinka 10 km z precyzją lepszą niż 1/1000 promienia protonu (a ten wynosi $0,84 \times 10^{-15}$ m).

Detekcja fali była więc możliwa dzięki zastosowaniu najlepszych dostępnych technologii, w dziedzinie mechaniki, optyki, automatyki, informatyki. I wszystkie elementy zostały dopasowane we właściwym harmonogramie. Detekcja fali grawitacyjnej jest więc przykładem jak zaplanować i przeprowadzić arcy-trudny eksperyment. Przewidziano również, jaki kataklizm kosmiczny i w jakiej maksymalnej odległości musi się zdarzyć, aby powstała fala możliwa do zarejestrowania na Ziemi (rys. 6.2a). Potrzebny jest też łut szczęścia, aby kataklizm taki zdarzył się w momencie, kiedy aparatura jest gotowa do pracy. Ale jak mówi przysłowie, odważnym szczęście sprzyja, gdyż fala nadeszła, akurat kiedy zakończyły się testy próbne⁹⁴.

Nic więc dziwnego, że ogłoszone w lutym 2016 roku odkrycie znalazło się na pierwszych stronach dzienników, a Nagroda Nobla została przyznana natychmiast, w 2017 roku.

⁹³ Polecamy znakomitą biografię Einsteina autorstwa Abrahama Paisa, wydaną również po polsku.

⁹⁴ Nadejście fali było do tego stopnia niewiarygodne, że młody naukowiec w Hamburgu (tam był dzień, gdy pojawił się sygnał) uważał, że to dowcip amerykańskich kolegów (informacja prywatna).



Rysunek 6.1. Właściwe wykorzystanie środków masowego przekazu do pokazania atrakcyjności fizyki współczesnej – pierwsze strony gazet (drukowanych i internetowych) po oficjalnym ogłoszeniu detekcji fali grawitacyjnej

6.1.3. Fałszywy alarm

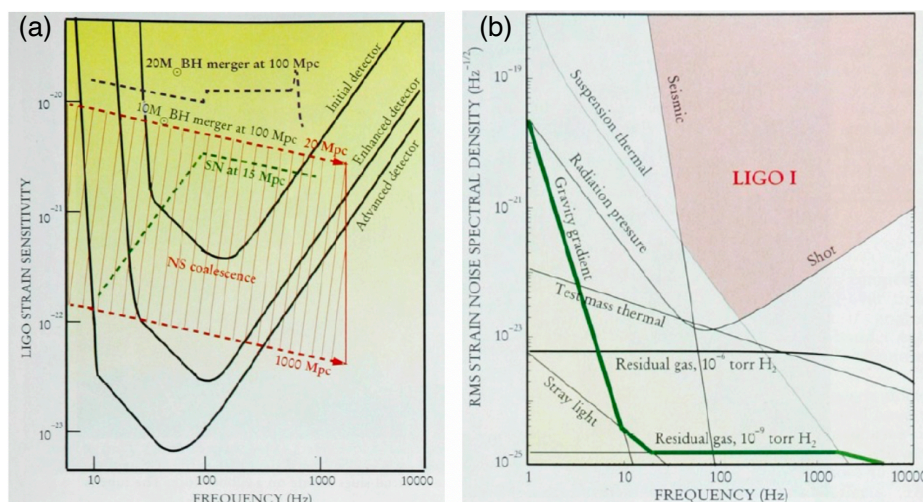
Fale grawitacyjne, rozumując naiwnie, mogłyby istnieć również w teorii grawitacji Newtona, ponieważ poruszająca się masa przypomina poruszający się ładunek elektryczny. Ale tak nie jest. Źródłem fal elektromagnetycznych jest dipol elektryczny, czyli układ dwóch ładunków poruszających się po odcinku prostej, natomiast źródłem fal grawitacyjnych musi być *kwadrupol*⁹⁵, czyli np. *wirujący* w przestrzeni układ dwóch mas. Nobliści Barry Barish i Reiner Weiss przewidzieli na etapie planowania eksperymentu, już w 1999 roku, jakiej amplitudy fala (i o jakiej częstotliwości) może do nas dotrzeć z różnych kataklizmów kosmicznych (rys. 6.2a). Przeliczyli też różne źródła zakłóceń. Z analizy wynikało, że najwyższą czułość antena LIGO⁹⁶ powinna mieć dla fal o częstotliwości około 100 Hz.

Presja odkrycia była jednak ogromna. W latach 60. XX wieku Amerykanin Joseph Weber (1919–2000) zbudował „detektor” fal grawitacyjnych, w postaci aluminiowego cylindra o długości 2 m i średnicy 1 m, umieszczonego w próżni w temperaturze ciekłego helu (4K). Joe Weber twierdził, że jego cylinder rejestruje fale grawitacyjne. Eksperyment był powtarzany (i udoskonalany) w wielu laboratoriach na świecie, oczywiście bez efektu. Lekcja z tego doświadczenia jest podwójna: był to *pierwszy* detektor, a przez to wzbudził zainteresowanie świata naukowego, ale jego budowa i poszukiwania fal o częstotliwości 1666 Hz były naiwne. Mimo to, cylinder Webera trafił z misją Apollo na Księżyc. Dopiero w końcu lat 60. teoretyk z Caltechu Kip Thorne i „doświadczalnik” Reiner Weiss z MIT dokonali analizy możliwości detekcji fal za pomocą *interferometrii laserowej*, tzn. w układzie doświadczalnym koncepcyjnie identycznym jak pomiar „wiatru eteru” wykonany w 1887 roku przez Abrahama Michelsona. Na początku 2016 roku antena LIGO zarejestrowała pierwszy sygnał, którego źródłem była fala grawitacyjna. Wiadomość ta niemal natychmiast trafiła na pierwsze strony światowych gazet i czasopism (zob. rys. 6.1).

⁹⁵ Kwadrupol, czyli w elektrostatyce układ czterech ładunków, dwóch o znaku dodatnim i dwóch o znaku ujemnym.

⁹⁶ Light Interference Gravitational wave Observatory.

⁹⁷ B.C. Barish and R. Weiss, *Physics Today* 52 (10), 44, (1999)



Rysunek 6.2. (a) Przewidywany sygnał fali grawitacyjnej (względne wydłużenie się anteny LIGO i częstotliwość drgań) dla różnych kataklizmów kosmicznych: czerwony zakreślony obszar to zlanie się dwóch czarnych dziur o masach 10 mas Słońca w odległości od 300 mln lat świetlnych do 3 mld lat świetlnych; przerywana czarna linia – wybuch supernowej w odległości 45 mln lat świetlnych (sporo galaktyk znajduje się bliżej niż ta granica). Amplituda sygnału maleje w miarę wzrostu częstotliwości (skala Y logarymiczna!). Maksymalną czułość antena wykazuje dla częstotliwości około 100 Hz (i taki mniej więcej sygnał został zarejestrowany 14.09.2015). (b) Przewidywane źródła zakłóceń w antenie LIGO; przykładowo drgania termiczne zawieszonych lusterek, drgania sejsmiczne, ciśnienie światła na lustro, drgania lusterek wywołane obecnością gazu w warunkach bardzo wysokiej próżni itd. (źródło: B.C. Barish and R. Weiss⁹⁷)

6.1.4. Dwie gwiazdy

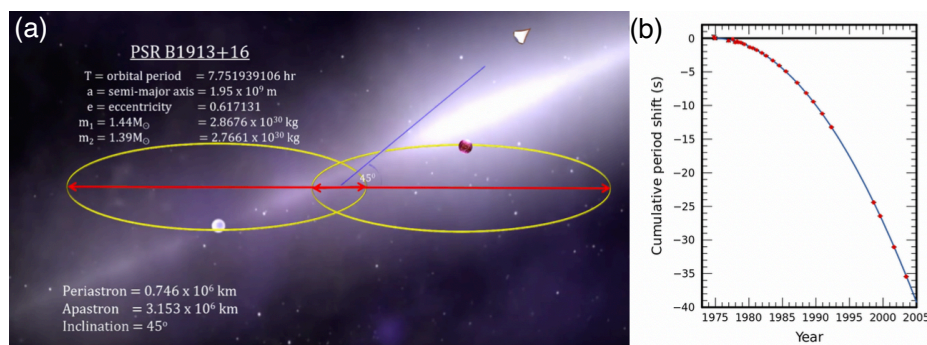
Nagroda Nobla z 2017 roku nie była jednak pierwszą przyznaną za fale grawitacyjne. Dwóch astronomów amerykańskich, Russel A. Hulse i Joseph H. Taylor, Jr. otrzymało ją w 1993 roku za 20 lat obserwacji fal radiowych wysyłanych przez *pulsar*⁹⁸ odległy o 21 lat świetlnych od Ziemi. Impulsy od tego pulsara trwają 59 ms, ale sygnał przesuwa się cyklicznie o 3 sekundy co 7 dni, co jest dowodem, że pochodzi od dwóch gwiazd neutronowych⁹⁹ wirujących bardzo szybko, w odległości 1 mln km od siebie (rys. 6.3a)¹⁰⁰.

Hulse i Taylor badali niewielkie zmniejszanie się okresu obiegu tych dwóch gwiazd. Zgodnie z prawami Keplera, okres powinien pozostawać stały, chyba że układ traci energię (czyli dwie gwiazdy spowalniają i ich orbity robią się coraz ciaśniejsze). Obserwowalna zmiana okresu wskazywała, że ta szybkość utraty energii jest znaczna, 2% mocy

⁹⁸ Pulsarami zostały nazwane odkryte w 1967 roku obiekty wysyłające bardzo szybkie impulsy fal radiowych. Dziś wiemy, że są to szybko wirujące gwiazdy neutronowe, a impulsy są rejestrowane, kiedy oś rotacji „celuje” w Ziemię.

⁹⁹ W gwiazdy neutronowe zamieniają się gwiazdy nieco masywniejsze od Słońca po zakończeniu swej ewolucji. Masy gwiazd neutronowych układu binarnego badanego przez Hulse’a i Taylora wynoszą 1,39 i 1,44 masy Słońca.

¹⁰⁰ https://en.Wikipedia.org/wiki/Hulse%E2%80%93Taylor_binary (dostęp 02.03.2022), <http://edu-observatory.org/olli/GR/Week4.html> (dostęp 02.03.2022), <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1993/summary/> (dostęp 02.03.2022).



Rysunek 6.3. R. Hulse i J. Taylor badali impulsy radiowe pulsara PSR B1913+16 i zauważyli przesuwanie się tych impulsów w czasie, co świadczyło o zmieniającej się odległości pulsara od Ziemi, z czego naukowcy wywnioskowali o obecności drugiej gwiazdy neutronowej (a). Zauważyli też, że okres wzajemnego obiegu zmniejsza się o $76 \mu\text{s}/\text{rok}$. Układ traci energię i za 300 mln lat dwie gwiazdy zleją się w jedną. Utrata energii następuje poprzez fale grawitacyjne, zgodnie z OTW Einsteina. (b) Wykres przedstawia, rok po roku, skumulowane od 1975 roku przesunięcie okresu

emitowanej przez Słońce. Utrata energii może zachodzić jedynie przez emisję fal grawitacyjnych. Obliczenia wykazały, że szybkość utraty energii jest zgodna z przewidywaniami OTW.

6.2. Ogólna teoria względności

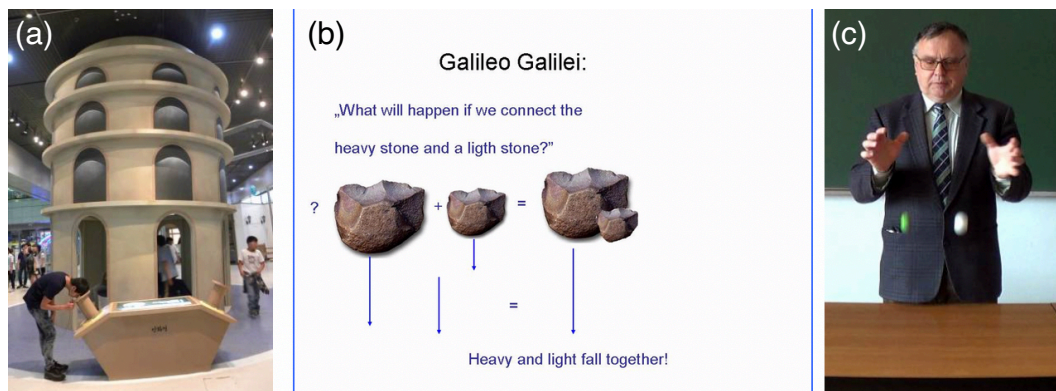
Od czasów Galileusza rozróżniamy dwa szczególne przypadki ruchu: prostoliniowy *jednostajny* (przymiotnik) i prostoliniowy *jednostajnie* (przysłówek) przyspieszony. Dydaktycznie jest to ruch kulki po poziomym stole i po stole pochylonym. Newton zauważył, że ruch jednostajny to ruch w układzie, w którym nie działają siły, a ruch przyspieszony to ruch pod wpływem stałej siły. Ale wynik Newtona wcale nie jest taki prosty.

6.2.1. Odkrycie Galileusza

Galileusz odkrył prawo ruchu jednostajnie przyspieszonego – przyrosty drogi przebytej w kolejnych odcinkach czasu mają się do siebie jak kolejne liczby nieparzyste. Dziś zapisujemy tę zależność jako $s = 1/2 at^2$, gdzie s jest drogą przebytą od początku ruchu, natomiast t czasem liczoną również od tego początku. Ale Galileusz, przypuszczalnie zrzucając kamienie z Wieży w Pizie (która już w jego czasach była krzywa, rys. 6.4a), odkrył bardzo ważne prawo, zwane prawem spadku swobodnego, które stwierdza, że wszystkie ciała, lekkie i ciężkie, spadają w tym samym czasie (innymi słowy z tym samym przyspieszeniem). Nawet dziś, kiedy znamy prawa Newtona, nie jest to wynik oczywisty. Otóż II prawo Newtona operuje masą ciała m_i , nazwijmy ją inercjalną, którą powinniśmy, teoretycznie, odróżnić o masę grawitacyjną m_G , która pojawia się we wzorze na siłę grawitacji. Jeśli te dwie masy są identyczne, ciała spadają z tym samym przyspieszeniem, niezależnym od masy:

$$F_a = m_i a \quad \text{i} \quad F_G = G \frac{M m_G}{r^2}, \quad (6.1)$$

gdzie F_a jest siłą, powodującą przyspieszenie a , G – stałą grawitacji, M – masą Ziemi, a r – odległością do środka Ziemi. Ponieważ G , M i r nie zależą od masy ciała spadającego, o ile więc m_i i m_G są identyczne, przyspieszenie w spadku swobodnym *nie zależy do masy ciała* (i wynosi $g = GM/r^2$).



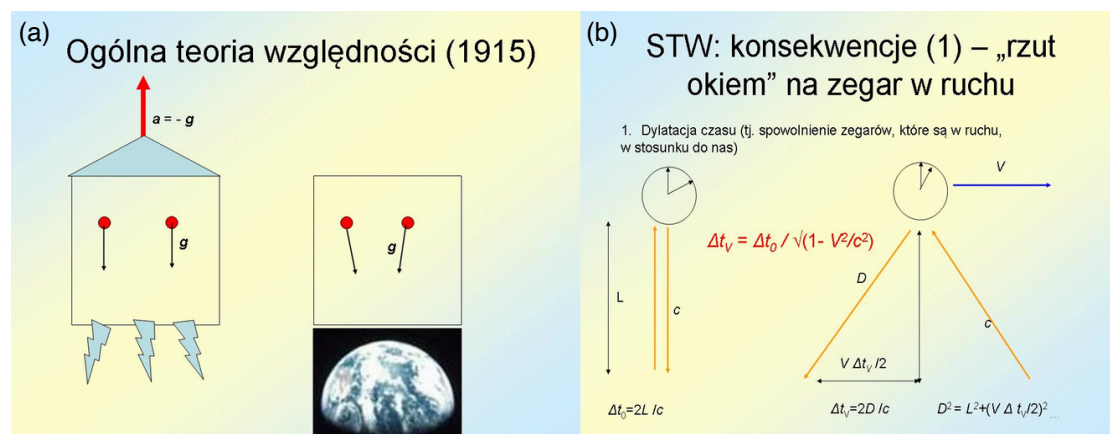
Rysunek 6.4. „Paradoks” Galileusza: dlaczego ciała lekkie i ciężkie spadają z tą samą „prędkością”? (a) Parafraza Krzywej Wieży w Pizie, w Muzeum Nauki w Daejon, Republika Korei; (b) fragment wykładu GK w Gunsan (2016) i (c) doświadczenie ze spadającymi piłeczkami, ciężką i lekką (fot. Maria Karwasz)

Galileusz nie znał tych wzorów, więc przeprowadził rozumowanie, które dziś nazywamy *Gedankenexperiment*. Jeśli, za Arystotelesem, kamień cięższy spada szybciej niż lekki, to jeśli je zwiążemy sznurkiem, to będą spadały z prędkością średnią: lekki spowalnia ciężki, a ciężki przyspiesza lekki. Ale jeśli je zwiążemy ciasno (rys. 6.4b), to będzie jak jeden kamień, ale jeszcze cięższy. Jedyne rozwiązanie, że ciężki i lekki spadają z tą samą prędkością.

6.2.2. Najpiękniejsze równanie fizyki

W dydaktyce możemy pozwolić sobie na wzbogacenie narracji merytorycznej jakimś zabawowym przerywnikiem. Opracowania multimedialne „Teoria di relatività” wybitnego fizyka jądrowego Ugo Amaldiego stawiają żartem pytanie, czy OTW przyszła do głowy młodemu urzędnikowi patentowemu w Bernie, kiedy zasnawszy spadł z krzesła. Innymi słowy, gdzie w trakcie spadku swobodnego „znika” siła grawitacji.

Heurystycznie, o ile szczególna teoria względności wzięła się z pytania, jak opisać prawa fizyki (elektrodynamiki w szczególności) w układach wzajemnie poruszających się ruchem jednostajnym, to ogólna teoria wzięła się z pytania o ruch jednostajnie przyspieszony i grawitację. W jaki sposób możemy odróżnić, czy znajdujemy się w polu grawitacyjnym na Ziemi, czy w przyspieszającej rakiecie kosmicznej. Odpowiedzią jest doświadczenie ze spadającymi piłeczkami jak na rys. 6.4c. Otóż, w przyspieszającej windzie piłeczki „spadną” pionowo w dół, natomiast na ziemi polecą w kierunku środka



Rysunek 6.5. Ilustracja ogólnej i szczególnej teorii względności: (a) dwie „spadające” piłki lecą po liniach równoległych, jeśli doświadczenie przeprowadzamy w przyspieszającej rakiecie, a lecą do środka Ziemi, gdy doświadczenie wykonujemy w polu grawitacyjnym. (b) W układach poruszających się (w stosunku do nas) czas ulega spowolnieniu: w „rzucie okiem na zegar” światło wędruje po przeciwprostokątnej, więc zajmuje mu to (w stosunku do rzutu okiem na „nasz” zegar) więcej czasu (rysunki: GK)

Ziemi. Oczywiście, w zasadzie nie do odróżnienia, spadające piłki lecą też równolegle, no prawie równolegle (rys. 6.5). Kluczem do pytania o grawitację są więc trajektorie piłek, albo, i tu jest geniusz Einsteina – krzywizna czasoprzestrzeni. Masa (grawitacyjna, a każda jest grawitacyjna) powoduje zakrzywienie czasoprzestrzeni.

Wcześniej ze szczególnej teorii względności okazało się, że masa jest równoważna energii. Po lewej stronie równania mamy więc geometrię czasoprzestrzeni (tensor krzywizny, $\mathbf{G}$), a po prawej – tensor energii-masy $\mathbf{E}$. I cztery stałe wszechświata: liczbę 8, liczbę π , stałą grawitacji G i prędkość światła c . Oto najpiękniejsze równanie Wszechświata:

$$\mathbf{G} = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{E}. \quad (6.2)$$

6.2.3. Dlaczego Wszechświat ocalał?

Równanie 6.2 jest tak proste, że Einstein długo się bronił przed złamaniem jego piękna. Na kolejnych kolokwiach berlińskich w grudniu 1917 roku cztery razy dodawał i usuwał „ręcznie” dodaną poprawkę. Otóż z równania powyższego wynika, że świat nie istnieje, i istnieć nie może – zanim na dobre powstał, już się grawitacyjnie zapadł. No chyba że doda się poprawkę „rekompensującą” działającą na nieskończone odległości siłą grawitacji, jakieś sztuczne ciśnienie „rozpychające” świat. Nazywamy dziś ten sztucznie dodany składnik *członem kosmologicznym*.

Einstein do końca życia uważał poprawkę kosmologiczną za największy błąd swojego życia, ale w rzeczywistości, jest to jego największe odkrycie. Tzw. ciemna energia „rozdyma” Wszechświat i zapobiega grawitacyjnej zapaści. Wszechświat miał początek

(13,78 mld lat temu) i od tego czasu „puchnie”, a ostatnio, jak stwierdzili to laureaci Nagrody Nobla z 2011 roku, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess i Saul Perlmuttera¹⁰¹, to puchnięcie jest coraz szybsze (w Internecie znajdziesz więcej informacji na temat „ciemnej energii”).

6.3. Zadrzała czasoprzestrzeń

Fale elektromagnetyczne (w próżni) oraz fale grawitacyjne są falami poprzecznymi, tzn. drgania zachodzą w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali. Ale o ile fala elektromagnetyczna polega na wzajemnie przemienianych drganiach wektora natężenia pola magnetycznego i prostopadłego do niego wektora pola elektrycznego, o tyle w fali grawitacyjnej nie ma dwóch pól, są natomiast dwa prostopadłe kierunki. Falę grawitacyjną pokazujemy za pomocą marynarki w kratkę. Gdy rozciągamy marynarkę w jednym kierunku, to kratka (czyli metryka czasoprzestrzeni) wydłuża się, a w drugim kierunku kurczy.

6.3.1. LIGO

„LIGO” to skrót idei doświadczenia „noblowskiego” – Obserwatorium Grawitacyjne wykorzystujące interferencję światła. Jeżeli fala grawitacyjna powoduje kurczenie się jednego wymiaru, a rozszerzanie drugiego, wystarczy je „zmierzyć” dokładnie w tym samym czasie. Można tego dokonać z dużą precyzją ($1/10$ długości fali i lepiej) w układzie, w którym promień światła najpierw zostaje podzielony na dwie prostopadłe wiązki (za pomocą tzw. zwierciadła półprzepuszczalnego, a takim jest do pewnego stopnia szklana płytką), a następnie te dwie wiązki ponownie spotykają się. Jeśli jedno z ramion zmieni długość w stosunku do drugiego, obraz powracających i nakładających się (interferujących) wiązek światła się zmieni. W ten sposób Abraham Michelson ze Strzelna (zob. rys. 6.6) sprawdził, czy Ziemia porusza się w stosunku do hipotetycznego eteru, jakiejś „melasy”, w której podróżuje światło. Mimo że Michelson w 1887 roku nie miał lasera, zmierzył prędkość eteru (a raczej jego brak) z dokładnością do $1/10$ prędkości Ziemi na orbicie (a ta wynosi 30 km/s).

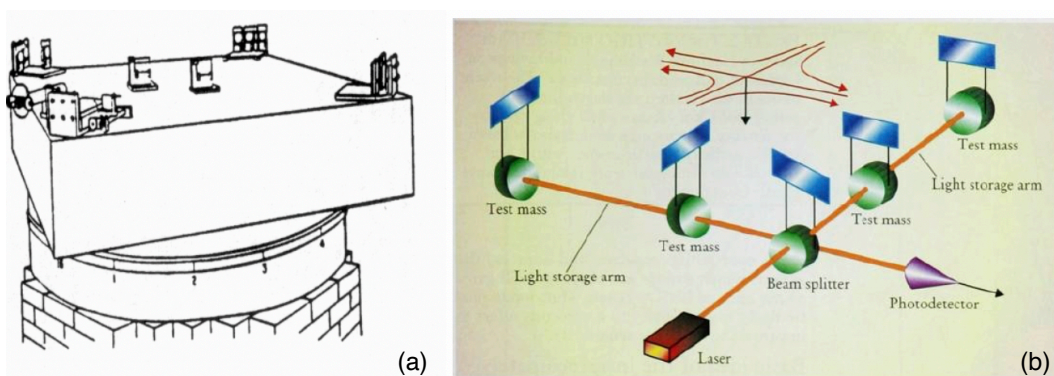
Długość ramion interferometru w doświadczeniu Michelsona wynosiła około dwóch metrów, w LIGO – 4 km (w rurach o bardzo wysokiej próżni). Dodatkowo, dla zwiększenia dokładności pomiaru, promień w LIGO wędrował 300 razy. Zastosowano superstabilne lasery i układy kształtowania wiązki światła (rys. 6.7a), bezstratne zwierciadła, trójstopniowe zawieszenia dla wyeliminowania drgań (rys. 6.7b), specjalną obróbkę sygnału dla usunięcia przewidywalnych zakłóceń¹⁰³. Wszystkie te przez lata opracowywane przez międzynarodowe zespoły badawcze rozwiązania techniczne, pozwoliły na osiągnięcie dokładności pomiaru względnego długości ramion rzędu 10^{-21} – absolutnie najwyższej w jakimkolwiek doświadczeniu naukowym¹⁰⁴.

¹⁰¹ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2011/perlmutter/lecture/> (dostęp 02.03.2022).

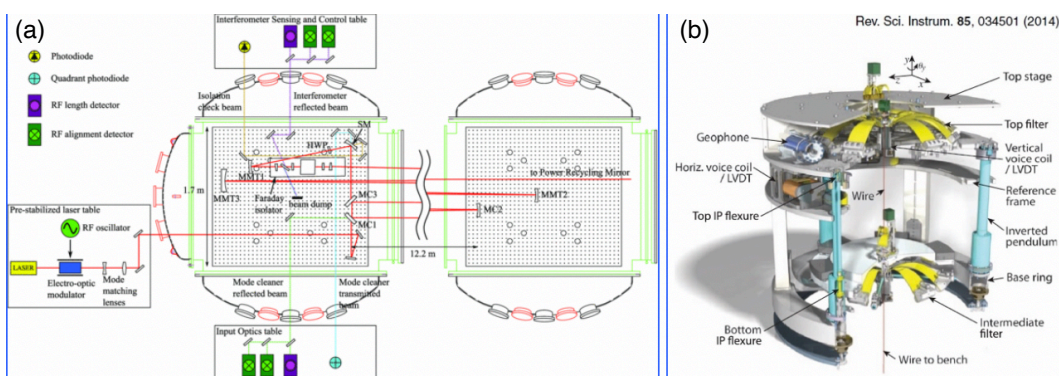
¹⁰² B. C. Barrish and R. Weiss, *Physics Today* 52, 44, (1999)

¹⁰³ K. L. Dooley, *Review of Scientific Instruments* 83, 033109 (2012).

¹⁰⁴ Więcej szczegółów technicznych na stronach http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=



Rysunek 6.6. Interferometr Michelsona: dwa promienie światła podróżujące w kierunkach prostopadłych. Jeśli jedno z ramion zmieni długość, obraz interferencyjny utworzony przez dwa powracające promienie zmieni się: (a) Michelson szukał, czy prędkość światła wzdłuż biegu Ziemi na orbicie i w poprzek się różnią; (b) w doświadczeniu LIGO badano, czy odległości między lustrami (zielone tarcze) zmieniają się, gdy przez układ przejdzie fala grawitacyjna (źródło: B. C. Barish and R. Weiss¹⁰²)



Rysunek 6.7. Niektóre ze specjalnych rozwiązań technicznych opracowanych na potrzeby LIGO: (a) układ stabilizacji termicznej wiązki światła, (b) układ zawieszenia zwierciadeł

Aby móc określić kierunek, z którego nadeszła fala, zbudowano dwa układy LIGO, na przeciwległych końcach USA (i trzeci w Pizie, ale ten był w trakcie poprawek, gdy nadeszła fala 14.09.2015).

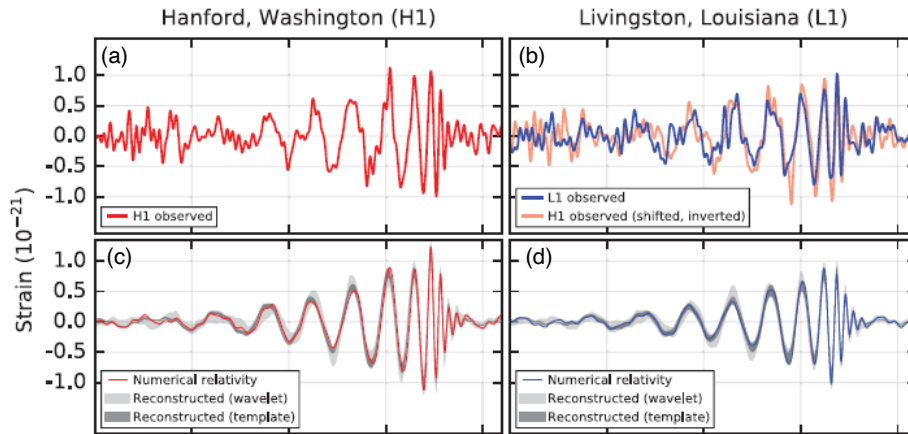
6.3.2. Zderzenie czarnych dziur

Fala zarejestrowana 14.09.2015 roku przypominała „ćwierknięcie” wróbla: był to ułamek sekundy drgań o rosnącej częstotliwości (zob. rys. 6.8). Użycie dwóch interferometrów, oddległych o 3 ms czasu propagacji światła pozwoliło na precyzyjne nałożenie dwóch sygnałów (zob. rys. 6.8 (a) i (b)).

Ale nie sam fakt zarejestrowania fali jest najbardziej fascynujący. Kilka miesięcy trwało „dopasowanie” zaobserwowanego sygnału do różnych modeli kosmicznych ka-

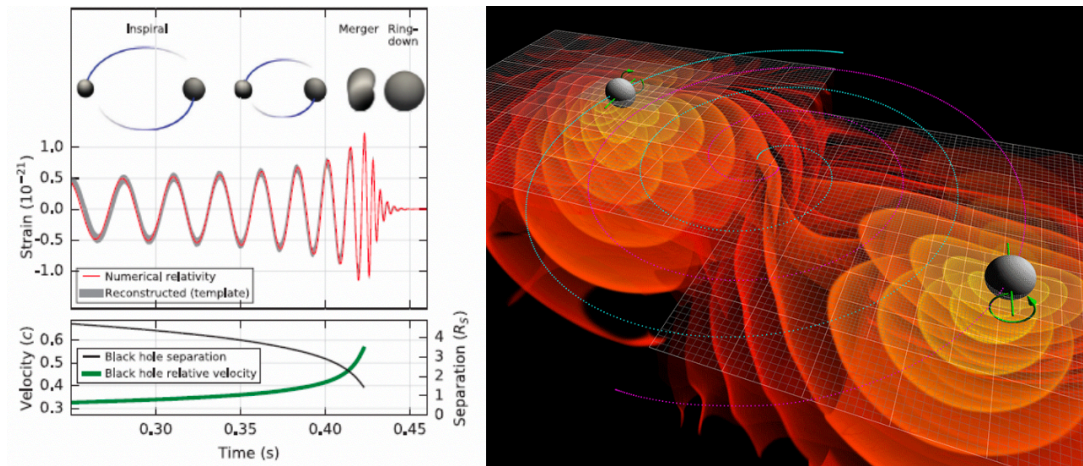
node/530, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/697 (dostęp 02.03.2022).

¹⁰⁵ B.P. Abbott et al. (LIGO) *Physical Review Letters* 116, 061102, 2016)



Rysunek 6.8. Oryginalny sygnał pierwszej rejestracji fali grawitacyjnej: trwał on 0,12 sekundy, początkowo jako drgania o częstotliwości 200 Hz, a później coraz silniejsze i szybsze, aż do ich nagłego zaniku (źródło: B.P. Abbott et al. (LIGO) ¹⁰⁵)

taklizmów – i to był prawdziwy test OTW Einsteina. Fizycy teoretycy wywnioskowali, że zderzyły się (połknęły nawzajem) dwie czarne dziury, o masach około ¹⁰⁶ 30 mas Słońca. Wyznaczono prędkość i odległość (300 km) początkową tych dziur przed zderzeniem, a nawet ich kierunek rotacji (rys. 6.9). Znalaziono przybliżony rejon zderzenia oraz zwerifikowano, że prędkość rozchodzenia się fal grawitacyjnych jest równa, w granicach niepewności pomiaru, prędkości światła ¹⁰⁷.



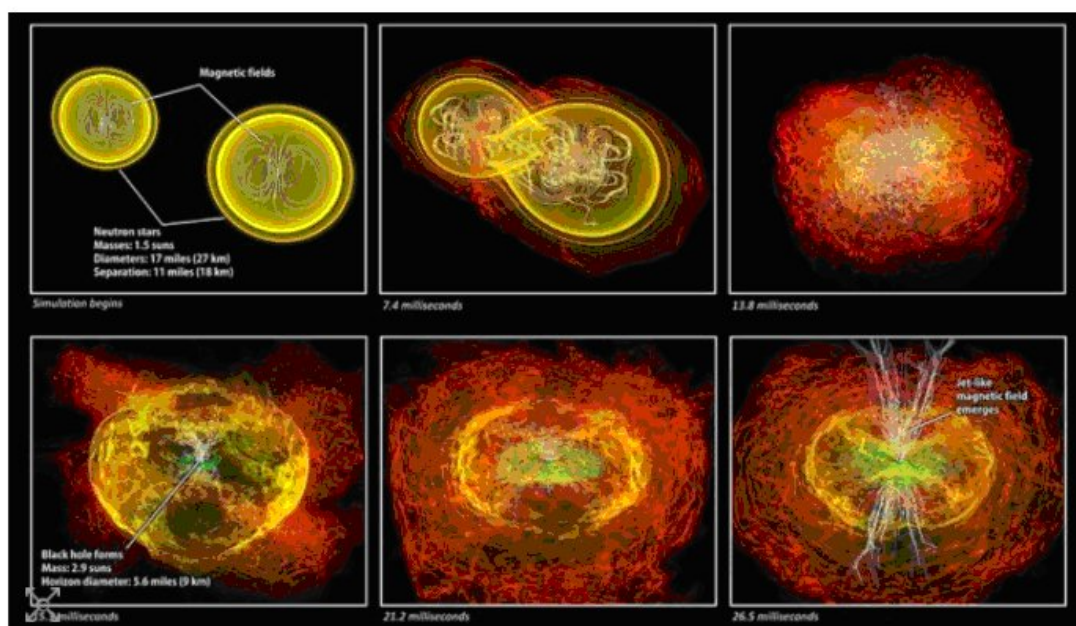
Rysunek 6.9. Porównanie sygnału teoretycznego dla zderzenia dwóch czarnych dziur (z wydedukowanymi parametrami) i sygnału zarejestrowanego (źródło jak na rys. 6.8) oraz grafika przedstawiające zderzenie i wysyłane fale (źródło: physics.aps.org ¹⁰⁸)

W trakcie ułamka sekundy poprzedzającego „sklejenie się” dwóch czarnych dziur (rys. 6.9), w kosmos uleciała energia równa trzem masom Słońca. Większość energii

¹⁰⁶ Dokładniej $36 \pm 4 M_{\odot}$ i $29 \pm 4 M_{\odot}$.

¹⁰⁷ Co pośrednio oznacza, że masa hipotetycznej cząstki pola grawitacyjnego, grawitonu, wynosi zero.

¹⁰⁸ <https://physics.aps.org/articles/v9/17> (dostęp 16.02.2016)



Rysunek 6.10. Wizja artystyczna zderzenia dwóch gwiazd neutronowych zarejestrowanego przez LIGO (źródło: aei.mpg.de¹¹⁰)

„uleciała” w formie fali grawitacyjnej. Prawdziwy kosmiczny kataklizm, na szczęście daleko od nas: 1,3 mld lat świetlnych odległości (1 rok świetlny to odległość, którą światło przebywa w ciągu roku). Nasza Galaktyka, o średnicy około 130 tys. lat świetlnych (trudno to przeliczyć na kilometry) na ułamek sekundy rozciągnęła się (i skurczyła) o jeden metr¹⁰⁹.

6.3.3. Zderzenie gwiazd neutronowych

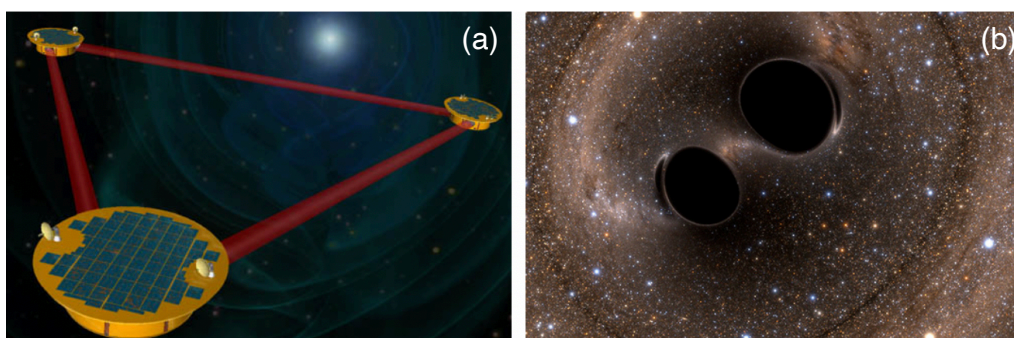
W 2017 roku LIGO zarejestrowało kolejną falę, tym razem z odległości „zaledwie” 130 mln lat świetlnych. Było to zderzenie dwóch gwiazd neutronowych, jednej o średnicy 18 km, a drugiej – 27 km. Gwiazdy zlały się w jedną (zob. rys. 6.10), ale nie powstała czarna dziura. Nowo powstała gwiazda błysnęła jako krótkożyciowa supernowa. W ciągu kilkunastu godzin rozbłysła najpierw promieniowaniem rentgenowskim, później w nadfiolecie, i w końcu promieniowaniem radiowym. Obserwowały ten wybuch liczne grupy astronomów na całym świecie. Wydaje się, że w widmie wyrzuconych atomów były pierwiastki tzw. ziem rzadkich, czyli lantanowce. Innymi słowy – zaobserwowano syntezę jądrową, jaka musiała zajść w momencie powstania Układu Słonecznego, 4,567 mld lat temu.

6.3.4. Nie tylko LIGO

Nie tylko trzy obserwatoria LIGO (i kolejne w budowie, np. w Indiach) poszukują fal grawitacyjnych. Alternatywnym projektem, chwilowo wstrzymanym, jest LISA (Laser In-

¹⁰⁹ Zob. też, G. Karwasz, Fala z grawitacyjnej otchłani, *Fizyka w Szkole* 2/2016 oraz G. Karwasz, I za-drżała czasoprzestrzeń, *Urania* 2/2016.

¹¹⁰ <https://www.aei.mpg.de/407206/bns-inspirals> (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 6.11. Projekt LISA – układ trzech satelitów oddległych o 5 mln km, wykorzystujący tę samą ideę interferencji laserowej, nie wyszedł do tej pory (sierpień 2022) poza fazę wstępnych prób. Koszty satelitów są znaczne, ale można by zarejestrować fale o niskich (poniżej 1 Hz) częstotliwościach (b) Wizja artystyczna drugiego zarejestrowanego zderzenia czarnych dziur, w 2016 roku. Czarne dziury deformują obraz leżących za nimi gwiazd (źródło: NASA, black-holes.org¹¹¹)

terferometr Space Antenna) – układ trzech satelitów oddległych od siebie o 5 mln km (rys. 6.11). Dzięki temu obserwatorium byłoby możliwe poszukiwanie fal o niskich częstotliwościach, ale dużych długościach fali – może odgłosów grawitacyjnych Wielkiego Wybuchu.

6.4. Inne efekty OTW

6.4.1. Równanie pozornie tylko proste

Ksiądz prof. Michał Heller, wybitny kosmolog, wyjaśnia, że niezwykle „zwarte” równanie Einsteina (a właściwie układ 10 sprzężonych równań różniczkowo-całkowych, zob. oryginalny zapis Einsteina na rys. 6.12a) zawiera w rzeczywistości 10 tysięcy składników, o ile dałoby się je przedstawić jeden po drugim. Z efektów przewidzianych przez OTW znamy kilka – przede wszystkim drugie prawo dynamiki Newtona oraz prawo grawitacji Newtona. Element po elemencie udaje się uzyskać kolejne „poprawki” (rys. 6.12b).

W oryginalnym artykule, w którym Einstein sformułował równanie OTW znalazły się dwa obliczenia – zakrzywienia promienia światła w pobliżu Słońca i Jowisza oraz precesji (przesuwania się) peryhelium orbity Merkurego. Pierwsze globalne rozwiązania dla wszechświata znalazł holenderski matematyk. Willem de Sitter – wszechświat był stacjonarny, niestety, o zerowej gęstości masy (czyli pusty). Kilka lat później (około 1921–1923) belgijski ksiądz Georges Lemaître i radziecki meteorolog Alexander Friedmann doszli do wniosku, że równanie Einsteina nie pozwala na istnienie wszechświata stacjonarnego – musi się albo rozszerzać, albo zapadać. Wniosek wkrótce po tym został potwierdzony przez obserwacje gwiazd zmiennych w oddległych galaktykach – uciekają one (tzn. galaktyki) od nas tym szybciej, im są dalej. Wszechświat puchnie we wszystkich kierunkach, jak ciasto drożdżowe.

¹¹¹ <https://lisa.nasa.gov/archive2011/>, <https://www.black-holes.org/lensing> (dostęp 02.03.2022)

(a)
$$\frac{\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}}{\partial x_{\alpha}} + \Gamma_{\mu\beta}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta} = -\kappa (T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T),$$

$$\sqrt{-g} = 1.$$

(b) **Equation of motion to post-Newtonian order**

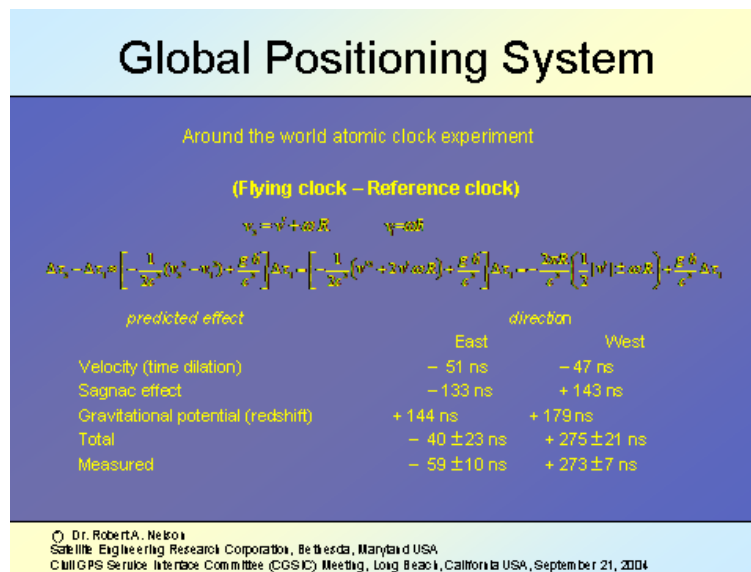
$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{r^3} \mathbf{r} - \frac{1}{c^2} \frac{GM}{r^3} \left[\left(4 \frac{GM}{r} - \dot{\mathbf{r}} \nabla^2 \dot{\mathbf{r}} \right) \mathbf{r} + 4 (\mathbf{r} \nabla^2 \dot{\mathbf{r}}) \dot{\mathbf{r}} \right]$$

Newtonian acceleration Precession of periapsis (like for Mercury)

$$+ 2 \frac{1}{c^2} \frac{GM}{r^3} \left[\frac{3}{r^2} (\mathbf{r} \nabla^2 \mathbf{J}) \mathbf{r} - \mathbf{J} \right] \times \dot{\mathbf{r}} + 3 \frac{1}{c^2} \frac{GM}{r^3} (\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}) \times \dot{\mathbf{r}}$$

Lens-Thirring precession (frame dragging) Geodetic (de Sitter) precession of the spin axis

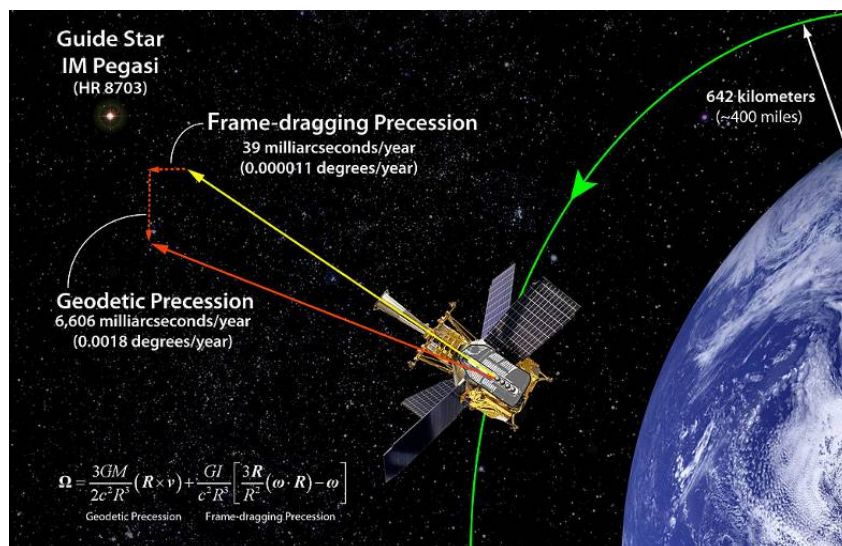
Rysunek 6.12. (a) Oryginalny zapis równania OTW (bez poprawki kosmologicznej) z artykułu Einsteina z 1915 roku. (b) Rozwinięcie *explicité* sił w OTW: przyspieszenie (czyli II prawo Newtona) po lewej stronie, po prawej stronie – siła grawitacji, poprawka powodujące precesję orbity (jak zaobserwowana Merkurego dookoła Słońca), „kisielowate” pociąganie czasoprzestrzeni wokół wirującej masy (zmierzone dla Ziemi), precesja żyroskopu orbitującego dookoła masy



Rysunek 6.13. Poprawki relatywistyczne do GPS

6.4.2. Global Positioning System

Bez poprawek ogólnej (i szczególnej) teorii względności nie byłoby możliwe działanie GPS. O ile światło podróżuje z tą samą prędkością, niezależnie, czy obserwator się porusza czy stoi (a tego nie można nigdy stwierdzić), to dwa impulsy światła lecące *dookoła* Ziemi na wschód i na zachód nie spotkają się w punkcie wyjścia (poprawka Sagnaca), zob. rys. 6.12. Zegary spóźniają się nie tylko w poruszających się układach odniesienia, ale też w polach grawitacyjnych (precyzyjny zegar atomowy wymaga poprawki, w zależności od wysokości usytuowania nad poziomem morza). Cały zestaw poprawek opracowany na potrzeby GPS pokazany jest na rys. 6.13.



Rysunek 6.14. Schemat doświadczenia „Gravity – probe B” (źródło: Wikipedia ¹¹²)

6.4.3. Kolejne weryfikacje

Rysunki raket kosmicznych na orbitach dookoła Ziemi pokazują nos rakiety zawsze w kierunku ruchu, na całej orbicie. Byłoby to sprzeczne z zasadą zachowania momentu pędu – nos rakiety jest skierowany zawsze w tym samym kierunku. No, prawie.

W doświadczeniu „Gravity probe B” (zob. rys. 6.14) umieszczono w rakiecie precyzyjny żyroskop: wirującą w parach ciekłego helu kulkę z nadprzewodzącego niobu. Po blisko stu tysiącach okrążeń dookoła Ziemi zmierzono efekt „pociągania” czasoprzestrzeni przez wirującą Ziemię (efekt Lensa-Thirringa). Spowodował on odchylenie żyroskopu od oryginalnego kierunku rotacji o 0,00001°/rok. O dwa rzędy wielkości większe okazało się odchylenie wskutek precesji linii geodezyjnych (efekt de Sittera). Koszt programu wyniósł 750 mln dolarów.

6.4.4. Jedyna „wpadka” Einsteina

Einstein został obrany człowiekiem XX wieku. Jego wpływ na fizykę będziemy odczuwać przez kolejne stulecia. Stawiał pytania, które otworzyły nowe możliwości i nauce i technice. Z pytania Einsteina o kwantowe korelacje wzięła się np. nowoczesna kryptografia. Jedyną poważną „wpadką” Einsteina wydają się „tunele czasoprzestrzeni”. Byłby to sposób na podróż z pominięciem ograniczeń nałożonych na czasoprzestrzeń przez szczególną teorię względności (żaden sygnał nie może zostać przesłany z prędkością większą niż światło). Niestety, późniejsze prace teoretyków wykazały, że o ile nawet takie tunele udałoby się stworzyć i do nich wejść, to nie ma sposobu na wyjście. Jak z czarnej dziury, o których wiemy, że istnieją na pewno, dopiero po pierwszym zarejestrowaniu fali grawitacyjnej.

¹¹² https://en.wikipedia.org/wiki/Gravity_Probe_B (dostęp 02.03.2022)



Laser – największy(?) wynalazek XX wieku

Laser to urządzenie emitujące promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu światła widzialnego, ultrafioletu lub podczerwieni. Nazwa tego urządzenia jest akronimem od słów z języka angielskiego *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, co można przetłumaczyć jako wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania. Promieniowanie lasera jest spójne, zazwyczaj spolaryzowane i ma postać wiązki o bardzo małej rozbieżności. W laserze łatwo jest otrzymać promieniowanie o bardzo małej szerokości linii emisyjnej, co jest równoważne bardzo dużej mocy w wybranym, wąskim obszarze widma. W laserach impulsowych można uzyskać bardzo dużą moc w impulsie i bardzo krótki czas trwania impulsu. W 1964 roku trzech uczeni, N. G. Basow i A. M. Prochorow (ZSRR) oraz C. H. Townes (USA) otrzymali Nagrodę Nobla z fizyki za prace będące podstawą działania laserów i maserów. W laserze atomy działają wspólnie, żeby wytworzyć światło o następujących charakterystycznych cechach:

- a) jest ono monochromatyczne,
- b) jest bardzo spójne,
- c) jest bardzo dobrze ukierunkowane – wiązka lasera rozszerza się w bardzo małym stopniu,
- d) można je dokładnie skupić. Ognisko światła laserowego może być tak małe, że łatwo osiągnąć w nim gęstość mocy równą 10^{17} W/cm².

7.1. Zasada działania lasera

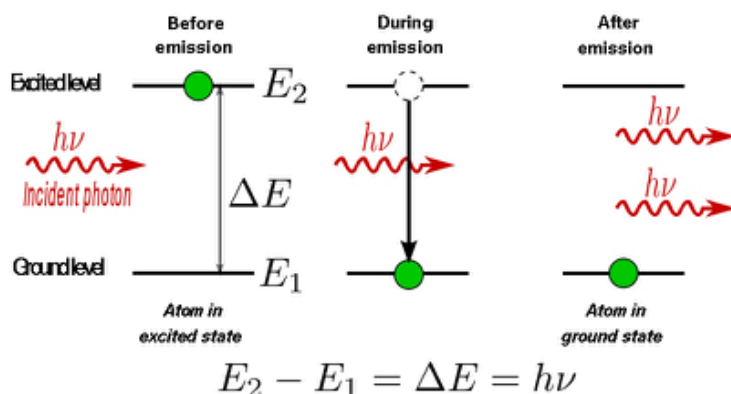
W laserze wykorzystuje się zjawisko emisji wymuszonej. Pojęcie to zaproponował w 1917 roku Albert Einstein. Aby zmusić pojedynczy atom do świecenia, powinien on

znajdować się w stanie wzbudzonym (o energii E_2 , zob. rys. 7.1) w obecności zewnętrznego promieniowania elektromagnetycznego (fotonów), którego częstotliwość ν spełnia następujący warunek:

$$h\nu = E_2 - E_1, \quad (7.1)$$

gdzie E_1 to energia stanu podstawowego atomu, natomiast h to stała Plancka.

Foton o energii $h\nu$ może wymusić w atomie jego przejście do stanu podstawowego. W czasie takiego procesu emitowany będzie dodatkowy foton, którego energia również będzie równa $h\nu$. Powyższy proces nazywamy emisją wymuszoną, ponieważ jest on wyzwalany przez foton pochodzący z zewnątrz. Foton emitowany jest identyczny z fotonem wymuszającym, a więc fale związane z tymi fotonami mają taką samą energię, fazę, polaryzację i kierunek rozchodzenia się. Efektywna emisja światła laserowego wymaga inwersji obsadzeń, tzn. w stanie o wyższej energii musi być więcej atomów niż w stanie o energii niższej. Innymi słowy, musi być więcej atomów emitujących światło niż atomów je pochłaniających (absorbujących). Bezpośrednim sposobem do doprowadzenia do takiej sytuacji jest „pompowanie” energii do ośrodka czynnego w laserze przed rozpoczęciem akcji laserowej. Proces ten ma na celu przeniesienie jak największej liczby elektronów w substancji czynnej do stanu wzbudzonego. Pompowanie lasera odbywa się poprzez błysk lampy błyskowej (flesza), błysk innego lasera, przepływ prądu (wyładowanie) w gazie, reakcję chemiczną, zderzenia atomów, wstrzelenie wiązki elektronów do substancji.

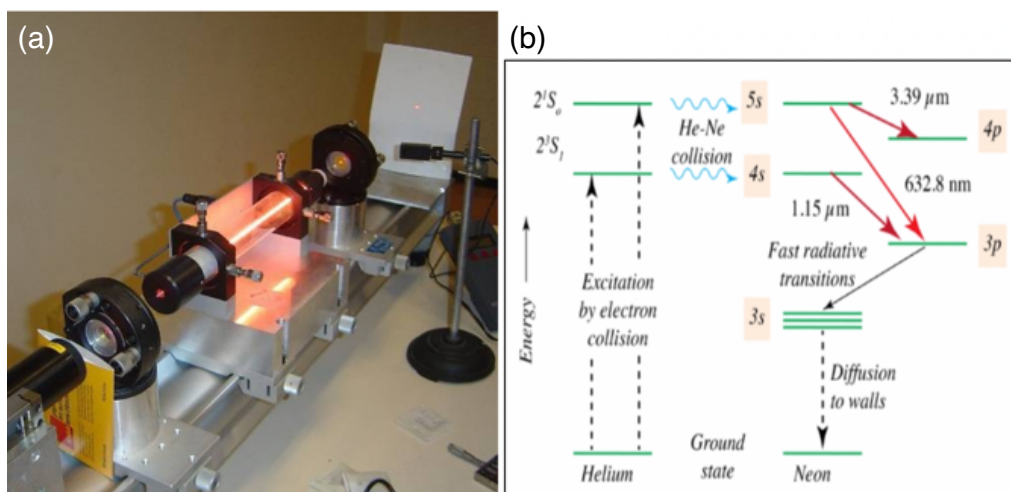


Rysunek 7.1. Schemat emisji wymuszonej dla pojedynczego atomu (źródło: Wikipedia ¹¹³)

7.2. Laser gazowy He-Ne

Laser helowo-neonowy (zob. rys. 7.2) to laser gazowy o działaniu ciągłym, w którym substancją roboczą wewnątrz rury próżniowej jest mieszanina helu pod ciśnieniem parcyjnym 1 mm Hg i neonu pod ciśnieniem parcyjnym 0,1 mm Hg (stosunek ciśnień gazów He : Ne wynosi 10 : 1). Emituje on wiązkę światła w zakresie widzialnym o długości fali $\lambda = 632,8$ nm (czerwień) i w podczerwieni o długości fali $1,15 \mu\text{m}$. Został on zbudowany po raz pierwszy w 1961 roku przez Ali Jadana i jego zespół.

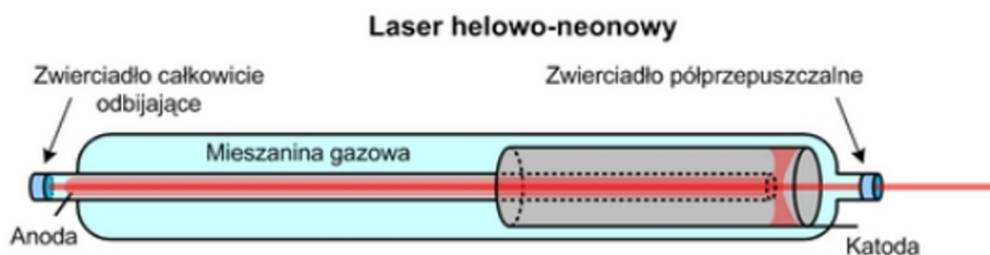
¹¹³ https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Stimulated_Emission.svg (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 7.2. a) Laser helowo-neonowy emitujący wiązkę światła w zakresie czerwieni i podczerwieni, b) układ poziomów energetycznych w atomach helu i neonu, kluczowe dla działania lasera He-Ne (źródło: Wikipedia ¹¹⁴)

W wyniku przepływu prądu elektrycznego przez mieszaninę gazów He i Ne, które znajdują się w szklanej rurze, elektrony obu gazów przechodzą na wyższe poziomy energetyczne. Część atomów helu przechodzi do stanu 2^1S_0 , który jest metatrwały (o czasie życia około 20 ms). W zderzeniu tego metatrwałego atomu helu z atomem neonu, wzbudzeniu do stanu $5s$ ulega atom neonu (zob. diagram poziomów energii He i Ne na rys. 7.2b). W taki sposób w atomach neonu stan $5s$ może stać się silniej obsadzony niż stan $3p$, czyli występuje inwersja obsadzeń. Akcja laserowa zachodzi pomiędzy poziomami neonu $5s$ i $3p$ i emitowane jest światło o długości fali $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ (czerwień) oraz pomiędzy poziomami $4s$ i $3p$ i emitowane jest wówczas światło o długości fali 1152 nm (podczerwień).

Atomy neonu emitują światło w całej długości rury wyladowczej. Światło to przechodzi przez przepuszczalne okienka i odbija się od zwierciadła całkowicie odbijającego światło i częściowo od zwierciadła półprzepuszczalnego, przechodząc tam i z powrotem, powodując wymuszenie emisji światła przez atomy neonu (rys. 7.3). Część światła wydostaje się przez zwierciadło półprzepuszczalne, tworząc użyteczną wiązkę laserową.

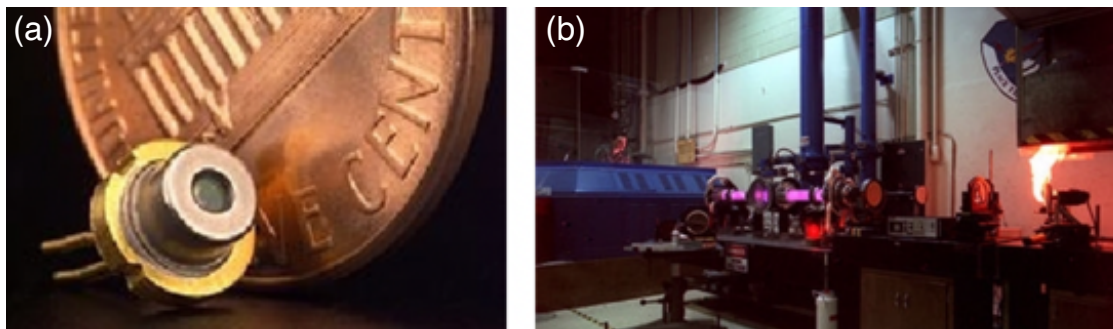


Rysunek 7.3. Schemat budowy lasera He-Ne (źródło: laboratoria.net ¹¹⁵)

¹¹⁴ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Laser_helowo-neonowy,
https://en.wikipedia.org/wiki/Helium-neon_laser (dostęp 02.03.2022)

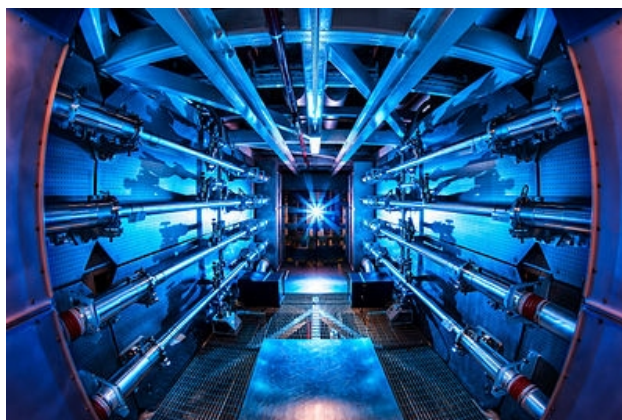
7.3. Zastosowania laserów

Lasery mogą być bardzo małe (wręcz miniaturowe) lub bardzo ogromne (zajmujące całą halę przemysłową). Na szeroką skalę stosowane są w medycynie, stomatologii i salonach piękności. Bardzo często możemy spotkać lasery półprzewodnikowe w czytnikach CD i DVD, np. w komputerach czy sprzęcie muzycznym (zob. rys. 7.4a).



Rysunek 7.4. a) Laser półprzewodnikowy o mocy 3 mW stosowany w czytnikach CD i DVD, b) laser gazowy na CO₂ o mocy 3 kW (źródło: Wikipedia ¹¹⁶)

W zakładach przemysłowych można spotkać lasery gazowe o mocy kilku tysięcy watów, służące do precyzyjnego cięcia grubych blach metalowych i kątowników oraz do spawania (zob. rys. 7.4b). Powyższe lasery emitują światło w zakresie widzialnym (czerwień) i podczerwieni, czyli w zakresie niewidzialnym dla ludzkiego oka.



Rysunek 7.5. Układ kilkuset laserów neodymowych o mocy 3 TW w USA (źródło: llnl.gov)

W amerykańskim laboratorium w Livermore, wielki układ kilkuset laserów zogniskowanych w jednym miejscu ma na celu uzyskanie syntezy termojądrowej, czyli wytworzenie plazmy o temperaturze ok. 100 mln°C (zob. rys. 7.5). W takich warunkach w plazmie jądra wodoru mogą się połączyć w jądra helu. Tego rodzaju laserowa reakcja syntezy termojądrowej została zaobserwowana po raz pierwszy w grudniu 2022 roku.

¹¹⁵ <http://laboratoria.net/artukul/item,20670,print,1.html> (dostęp 02.06.2024)

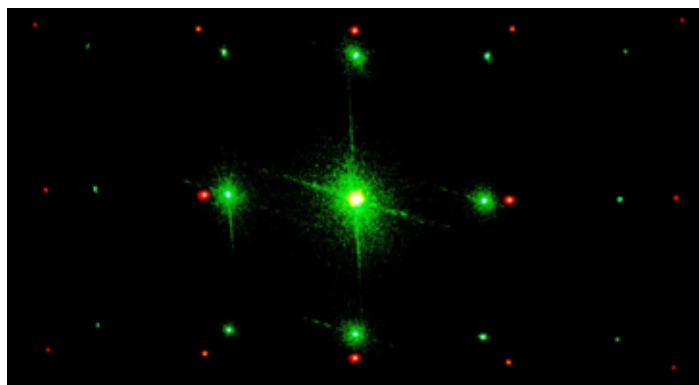
¹¹⁶ https://pl.wikipedia.org/wiki/Laser_półprzewodnikowy,

https://pl.wikipedia.org/wiki/Laser_molekularny (dostęp 02.03.2022)

¹¹⁶ <https://www.llnl.gov/news/lab-report?page=36> (dostęp 02.03.2022)

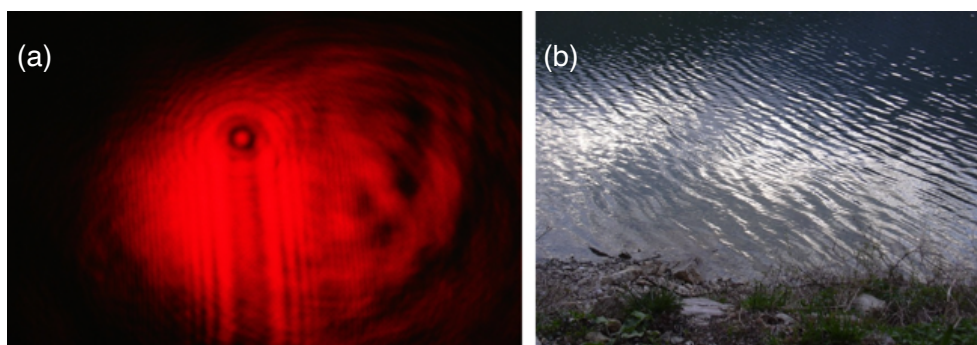
7.4. Podwójna natura światła

Podwójna natura światła – falowa i fotonowa (o tej drugiej mówimy też „ciałowa”, czyli korpuskularna) sprawiła poważny problem fizykom. Newton, który opisał, jak światło białe rozszczepia się w pryzmacie na poszczególne kolory, uważał światło za cząstki, czyli korpuskuły. O ile powstawanie kolorów w pryzmacie da się wyjaśnić za pomocą teorii Newtona, o tyle powstawanie kolorów w bańce mydlanej czy w okularach dyfrakcyjnych wymaga teorii falowej światła. Ogólnie okulary dyfrakcyjne, podobnie jak płyta CD, to szereg regularnych nacięć, położonych blisko siebie (kilkaset na milimetr). Światło na tych nacięciach ugina się, jak fala na jeziorze, gdy spotka przeszkodę.



Rysunek 7.6. Światło lasera czerwonego i zielonego po przejściu przez siatkę dyfrakcyjną ulega ugięciu pod ściśle określonymi kątami (tu tworzy krzyże, bo siatka miała nacięcia w formie krzyży). Kąt ugięcia światła na siatce zależy od długości fali – plamki zielonego lasera ($\lambda = 500 \text{ nm}$) położone są bliżej plamki centralnej (światła nieugiętego) niż światło lasera czerwonego ($\lambda = 700 \text{ nm}$) (fot. Krzysztof Służewski)

W zjawiskach ugięcia (dyfrakcji) na płycie CD lub w okularach dyfrakcyjnych światło uwidacznia swoją naturę falową (zob. rys. 7.6). Nie ma możliwości wyjaśnienia ugięcia światła za pomocą teorii korpuskularnej, no chyba że ją bardzo skomplikujemy (np. nie cząstki, ale jakieś wirujące hantle). Z kolei nie ma sposobu na wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego (i paru innych zjawisk z udziałem światła i atomów, jak np. tzw. zjawiska Comptona) bez założenia, że światło to kwanty energii.



Rysunek 7.7. Ugięcie wiązki światła z lasera na łepku szpilki (fot. Krzysztof Służewski, pokazy ZDF UMK) i ugięcie fal na wodzie (fot. Maria Karwasz, lago Terlago, 2012)

Światło, które ulega ugięciu np. na siatce dyfrakcyjnej, musi być falą. Widzimy to bardzo dobrze w dobie laserów. Przedmioty jednolitego koloru, np. biała ściana, oświetlone światłem lasera wydają się „pstroke”, tzn. pojawiają się na nich jaśniejsze i ciemniejsze miejsca. Dzieje się tak, gdyż natężenie fal pochodzących od dwóch lub więcej źródeł sumuje się lub odejmuje, w zależności czy do określonego punktu w określonym momencie docierają dwa maksima czy minimum i maksimum fali. Mówimy o zjawisku interferencji. Interferencja dwóch fal, padającej i odbitej, jest powodem powstawania kolorów w bańkach mydlanych.

Na przeszkodach, jak kołek w jeziorze, fala ugina się i zmienia kierunek rozchodzenia się. Mówimy o zjawisku dyfrakcji¹¹⁷. Zjawisko ugięcia światła na główce szpilki pokazujemy na rys. 7.7.

Lasery pozwalają nam bez trudu zaobserwować naturę falową światła. W laserowej rurze (lub ministrukturze w półprzewodniku) światło propagujące w lewo i w prawo również nakłada się, tworząc falę stojącą. Ale jednocześnie, lasery są wytworem mechaniki (a w zasadzie fotoniki) kwantowej: pojęcie inwersji obsadzeń, przejścia optyczne dozwolone i zakazane, stany metastabilne - to wszystko pojęcia fizyki atomowej, ale kwantowej.

¹¹⁷ Tak właśnie działa siatka dyfrakcyjna – każda z rys ugina falę, a określony kolor tworzy jasną plamkę tylko tam, gdzie poszczególne fale ugięte sumują się.

8

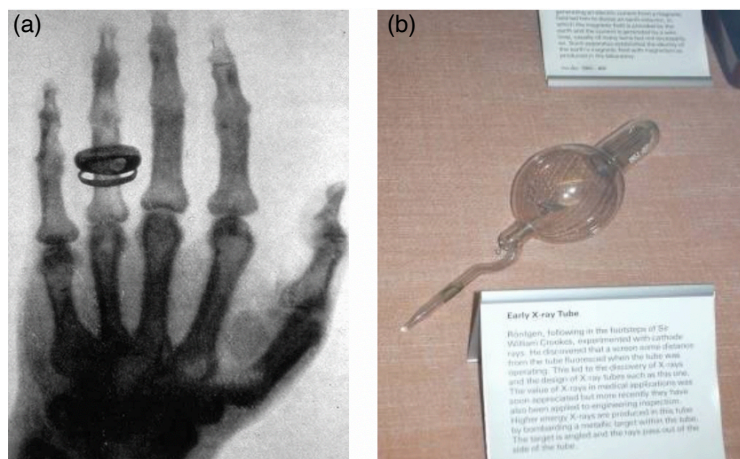
Zagadkowe promieniowanie

8.1. Promienie Röntgena

Koniec XIX wieku obfitował w odkrycia fizyczne. 8 listopada 1895 roku Wilhelm Röntgen odkrył „niewidzialne” promienie X, które w Polsce są znane jako promieniowanie Röntgena lub promieniowanie rentgenowskie. Symulację komputerową oryginalnego eksperymentu Röntgena można odnaleźć na stronach „www.vascak.cz”. W rzeczywistości promienie X są falami elektromagnetycznymi, tylko że o małej długości fali od 5 pm do 10 nm, czyli o energii fotonów rzędu keV. Wyróżniamy twarde promieniowanie rentgenowskie o długości fal od 5 pm do 100 pm i miękkie promieniowanie rentgenowskie o długości fal od 100 pm do 10 nm. Ze względu na częściowe pokrywanie się zakresów promieniowania rentgenowskiego i promieniowania gamma, obecnie jako kryterium klasyfikujące przyjmuje się źródło promieniowania. Promieniowanie rentgenowskie powstaje podczas hamowania swobodnych elektronów, a promieniowanie gamma w wyniku rozpadu promieniotwórczego jąder pierwiastków.

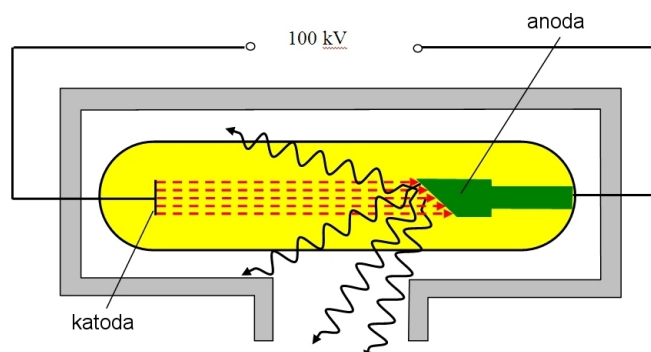
Promieniowanie rentgenowskie uzyskuje się w praktyce np. w lampie rentgenowskiej (rys. 8.1 i 8.2)¹¹⁸ poprzez wyhamowywanie rozpędzonych elektronów na materiale o dużej (powyżej 20) liczbie atomowej (promieniowanie hamowania). W wyniku tego powstaje promieniowanie o charakterystyce ciągłej, na której widoczne są również piki pochodzące od promieniowania charakterystycznego anody, ponieważ rozpędzone elektrony wybijają elektrony z atomów anody. Wolne miejsca po wybitych elektronach na dolnych powłokach elektronowych pozostają puste do momentu, aż zapełnią je elek-

¹¹⁸ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_rentgenowskie (dostęp 02.03.2022),
http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/index-pl.html (dostęp 02.03.2022).



Rysunek 8.1. a) Zdjęcie rentgenowskie dłoni Alberta von Köllikera wykonane przez Röntgena na Uniwersytecie w Würzburgu 23 stycznia 1896, b) Lampa rentgenowska, Science Museum, Londyn (fot. GK)

trony z wyższej powłoki. Elektron, przechodząc w atomie anody z wyższego stanu, emituje kwant promieniowania rentgenowskiego i następuje emisja charakterystycznego promieniowania X.

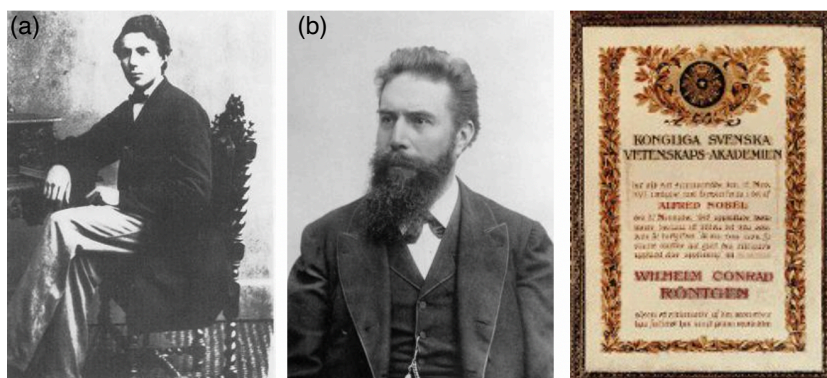


Rysunek 8.2. Schemat lampy rentgenowskiej (rys. Eryk Rajch)

Promieniowanie X może powstać także w inny sposób, a mianowicie w wyniku wychwytu elektronu w atomie, tj. gdy jądro atomowe przechwytuje elektron znajdujący się na powłoce K, w wyniku czego powstaje wolne miejsce, na które spadają elektrony z wyższych powłok i następuje emisja kwantu X. Przykładem źródła promieniowania X wykorzystującego wychwyt elektronu jest ^{55}Fe , emitujące 80% kwantów o energii ok. 5,9 keV (linia K_{α}) oraz 20% o energii 6,2 keV (linia K_{β}).

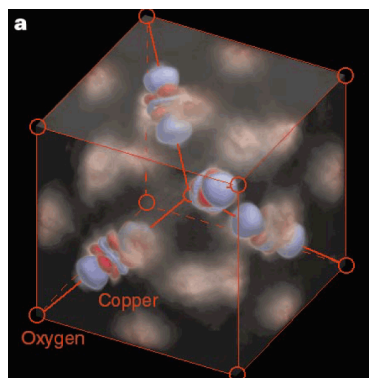
Zasługa Röntgena polega nie na „odkryciu” – ale na postawieniu roboczych hipotez, ich sprawdzeniu, błyskawicznym opublikowaniu wyników oraz ich ogłoszeniu publicznym. Röntgen spędził w laboratorium 8 tygodni, aż do Bożego Narodzenia 1895 roku, a w styczniu 1896 roku „jego” promienie już stosowano w amerykańskich szpitalach. Za to odkrycie Röntgen otrzymał pierwszą Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 1901 roku (zob. rys. 8.3).

Promienie Röntgena (promieniowanie X) mają wszechstronne zastosowania – od



Rysunek 8.3. Wilhelm Conrad Röntgen – fizyk, laureat pierwszej Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki (1901), przyznanej „w uznaniu zasług, które oddał przez odkrycie promieni nazwanych jego nazwiskiem”

medycyny i stomatologii, do badania materiałów, sprawdzania bagaży na lotniskach (używane są dwie wiązki promieniowania, a różnych energiach dla lepszego zobrazowania przedmiotów, a kolorowe obrazy są wynikiem obróbki komputerowej sygnału) i prześwietlania egipskich mumii (dla zbadania stanu zdrowia "pacjenta", bez konieczności rozwijania bandażu). Wysokiej jakości wiązka promienia Röntgena, uzyskana z tzw. akceleratora synchrotronowego pozwoliła na zobrazowanie pojedynczych atomów, a nawet orbitali elektronów w tych atomach (zob. rys. 8.4).



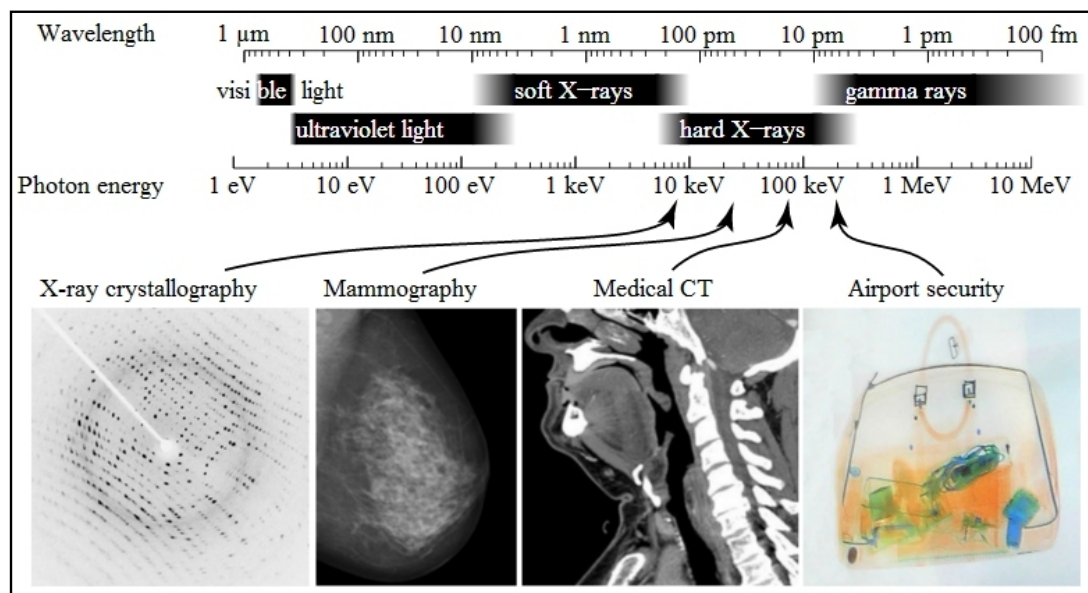
Rysunek 8.4. Zmierzony za pomocą promieni Röntgena rzeczywisty rozkład gęstości elektronów w kryształ tlenku miedziowym Cu_2O – orbitale d (źródło: Zuo et al.¹¹⁹)

Pierwszym zastosowaniem (parę miesięcy po odkryciu, w USA) promieni X były diagnostyka szpitalna złamań kości i chorób płuc. Dziś, aparaty rentgenowskie do wykonywania zdjęć dentystycznych są wielkości zabawkowego pistoletu, a rentgenowska tomografia komputerowa jest zarówno badaniem zasadniczym jak pomocniczym, np. w rezonansie magnetycznym¹²⁰. Wysokoenergetyczne promieniowanie rentgenowskie (rzędu MeV) stosowane jest zaś jako wygodna alternatywa napromieniowania za pomocą radioizotopów w radioterapii niektórych nowotworów, ponieważ występuje tu

¹¹⁹ Zuo et al. *Nature* 401 (6748):49-52 (1999)

¹²⁰ <https://en.Wikipedia.org/wiki/X-ray> (dostęp 02.03.2022).

dogodny dla pacjentów brak konieczności okresowej wymiany materiału promienio-
twórczego. Promieniowanie takie generowane jest zwykle w wyniku bombardowania
tarczy wolframowej (lub z dużym udziałem tego metalu) strumieniem elektronów po-
chodzących z akceleratorów liniowych. Do naświetleń powierzchniowych nowotworów
wykorzystuje się także niżej energetyczne promieniowanie rentgenowskie z zakresu
80–250 keV.



Rysunek 8.5. Zastosowania promieniowania rentgenowskiego w nauce (krystalografia – badanie struktury wewnętrznej materiałów), medycynie (mammografia, tomografia komputerowa itd.) i technice (prześwietlanie bagaży, badanie defektów w elementach metalowych – defektoskopia, zob. rys. 8.5) (źródło: Wikipedia ¹²¹)

Promieniowanie rentgenowskie wykorzystuje się także w badaniu dzieł sztuki (pozwala ustalić skład chemiczny pigmentów, a przez to wykazać fałszerstwa), badaniu struktury wewnętrznej ciał stałych (dyfrakcja rentgenowska - pozwala ustalić strukturę krystalograficzną, a przez to ustalić typ, np. minerału) oraz badaniu struktur biologicznych – dyfrakcja DNA, białek, wirusów itd. Znany wszystkim rysunek jako podwójnej spirali został wydedukowany przez Jamesa Watsona i Francis Cricka na podstawie zdjęć rentgenowskich kryształów DNA¹²²

Jeszcze sto lat temu podstawowym narzędziem diagnozy było osłuchiwanie pacjenta za pomocą stetoskopu. W XX wieku fizyka zrewolucjonizowała medycynę – począwszy od medycznych zastosowań promieni Röntgena w czasie I wojny światowej¹²³, poprzez terapie nowotworów za pomocą izotopów promieniotwórczych, do nowoczesnych komputerowych metod diagnostycznych.

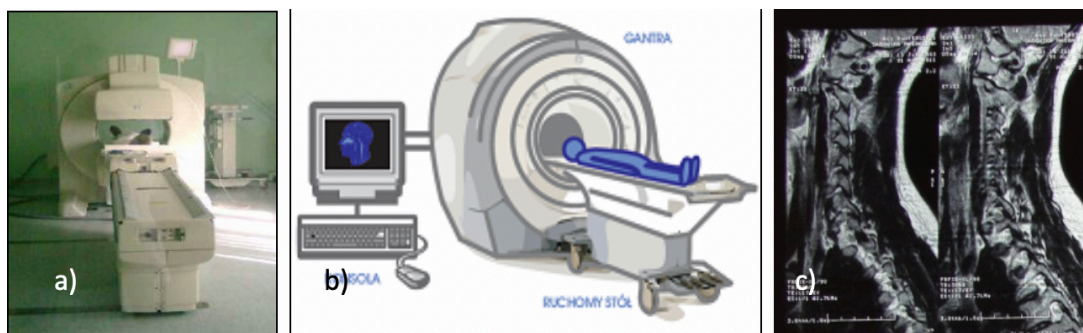
¹²¹ https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:X-ray_applications.svg (dostęp 02.03.2022)

¹²² W szczególności, decydujące znaczenie miały zdjęcia wykonane przez Rosalindę Franklin, która niedługo później zmarła na nowotwór, a dla której sam Watson sugerował nagrodę Nobla, niestety, pośmiertnie (zob. odpowiednie hasło w angielsko-języcznej wersji Wikipedii, dostęp 02.06.2024).

¹²³ Maria Curie jest bohaterką narodową Francji głównie z powodu uratowania setek tysięcy żołnierzy w czasie I wojny światowej; z grupą kobiet, w zarekwirowanych na te cele od prywatnych właścicieli minicieżarówek, przeprowadziła 1,5 mln badań rentgenowskich rannych na froncie żołnierzy.

8.2. Rentgenowska tomografia komputerowa (CT)¹²⁴

Promienie rentgenowskie są silniej absorbowane przez tkanki gęste jak kości. Rentgenowska tomografia komputerowa polega na wykonywaniu zdjęć rentgenowskich badanego narządu pacjenta w różnych płaszczyznach i pod różnym kątem. Komputerowa obróbka serii zdjęć pozwala uzyskać kilkuwarstwowy obraz, na którym można zaobserwować nawet niewielkie symptomy choroby (zob. rys. 8.6)¹²⁵.



Rysunek 8.6. Rentgenowska tomografia komputerowa: a) stanowisko diagnostyczne w Centrum Onkologii w Bydgoszczy; b) schemat urządzenia; c) zdjęcie boczne kręgosłupa za pomocą tomografii komputerowej (źródło: Anna Kozłowska)

Aparat rentgenowski składa się ze stołu, na którym leży pacjent, gantry, czyli obrotowej obręczy zawierającej lampę rentgenowską i detektory dokonujące pomiary co kilka stopni. Konsola pomiarowa i komputery znajdują się na zewnątrz sali. Dawka, jaką otrzymuje pacjent podczas badania, wynosi ok. 15 mSv (milisivertów), jest to więcej niż roczna dawka promieniowania naturalnego, w tym promieniowania kosmicznego wynoszącego 6 mSv. Narażenie na promieniowanie w tomografii komputerowej w największym stopniu zależy od parametrów technicznych badania i aparatu oraz od pacjenta. Dawki promieniowania w badaniu w tomografii komputerowej mogą być od 5 do 100 razy większe niż w konwencjonalnym badaniu radiologicznym tej samej okolicy ciała. Korzyści z badania są jednak znaczne.

¹²⁴ ang. *computer tomography*.

¹²⁵ G. Karwasz, *Toruński poręcznik do Fizyki. Fizyka współczesna i astrofizyka*. Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2020.

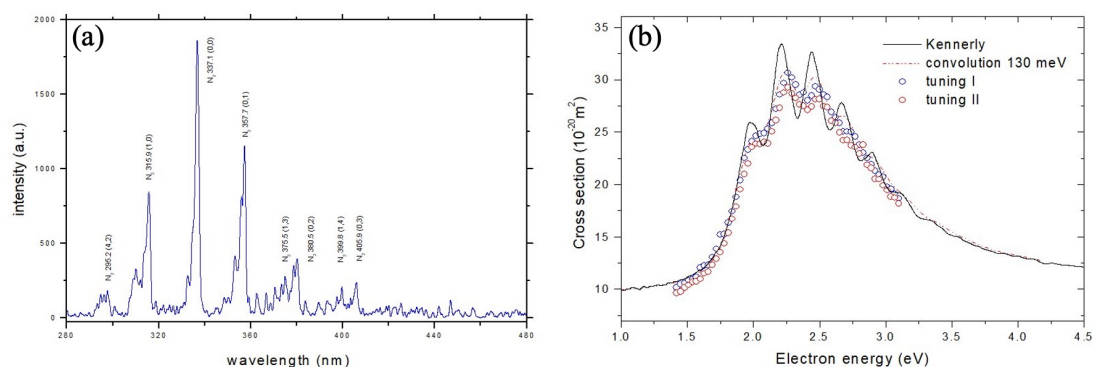


Spektroskopia, czyli nauka o duchach

Większość słów języka naukowego jest pochodzenia greckiego. Do takich słów należy „fizyka”, czyli natura, „psycho-logia”, czyli nauka o duszy, „filozofia”, czyli miłość do wiedzy. Słowa „spektrum” nie ma jednak w słowniku klasycznego języka greckiego. Zostało ono użyte po raz pierwszy przez Cyncerona. Słownik łaciny podaje znaczenia „obrazu”, „wyobrażenia”, „rzeźby”. Korzystamy z etymologii, aby pogłębić zrozumienie pojęć i metodologii fizyki. Spektro-skopia, czyli badanie „widm” jest słowem wytrychem w fizyce. Większość pomiarów w fizyce to „widma”, w języku potocznym – duchy. Tak! Fizyk bada obiekt, ale to, co otrzymuje, to *wyobrażenie* obiektu, a nie obiekt „sam w sobie”, jakby to powiedział Immanuel Kant.

Rozgraniczenie między obiektem a pomiarem nabiera pełnego sensu dopiero w mechanice kwantowej - wynik pomiaru to operacja matematyczna przeprowadzona na funkcji falowej. W fizyce doświadczalnej jest identycznie - widmo to wynik zaplanowanej procedury pomiarowej. I tak widmem można nazwać prążki absorpcyjne światła, które przeszło przez określoną substancję, albo prążki emisyjne gazowego źródła światła (zob. rys. 9.1). Widmem można też nazwać zależność przekroju czynnego na rozpraszanie elektronów w gazach: mówi ono, czy gaz jest przezroczysty dla elektronów o określonej energii, a używając języka mechaniki kwantowej (zob. dalsze rozdziały) – dla elektronów o określonej długości fali de Broglie’a.

Szerokie znaczenie słowa spektroskopia pozwala na jego użycie dla różnego rodzaju pomiarów - w zakresie badania własności optycznych (współczynnika absorpcji, emisji, odbicia), w zakresie pomiarów masy drobin (spektroskopia masowa), w zakresie pomiarów czasów życia pozytonów w materiałach (spektroskopia pozytonowa) itp.



Rysunek 9.1. Znaczenie słowa „spektroskopia” jako badanie obrazu danej substancji – tu dwa „widma” azotu cząsteczkowego. (a) Widmo emisji optycznej w wyładowaniu elektrycznym – widoczne linie emisyjne w zakresie nadfioletu (315–380 nm); linie emisyjne odpowiadają zazwyczaj liniom absorpcji, innymi słowy azot cząsteczkowy jest nieprzezroczysty w nadfiolecie, a przezroczysty w zakresie widzialnym. (b) W doświadczeniach z rozpraszaniem elektronów obserwujemy inny obraz – azot jest nieprzezroczysty dla elektronów o energiach 2–3 eV (co odpowiada energii kwantów światła w zakresie widzialnym), natomiast przezroczysty (przekrój czynny jest niski) w zakresie energii elektronów odpowiadającej kwantom światła podczerwonego i nadfioletu. Przedstawione tu „widmo absorpcji” ilustruje jeszcze jedną zasadę pomiaru fizycznego – wynik zależy od użytego instrumentarium. Pomiary z gorszą rozdzielczością energetyczną (kółka) dają inny wynik niż pomiary z dobrą rozdzielczością (źródło: GK)

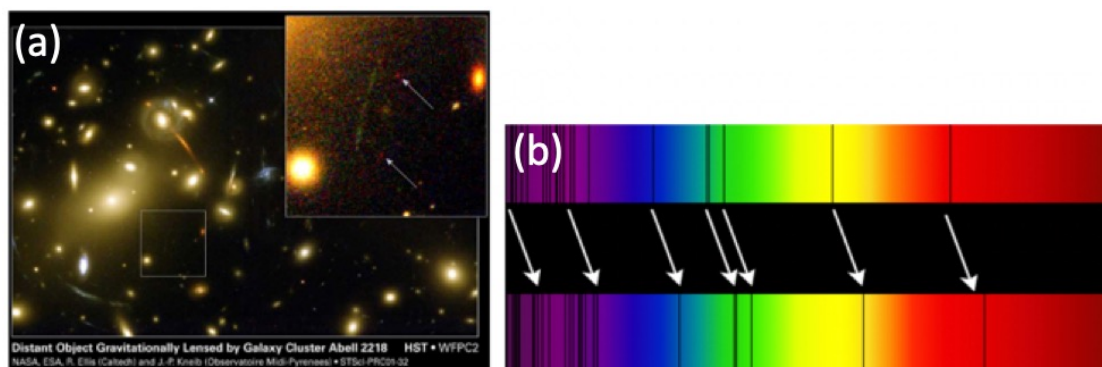
9.1. Spektroskopia optyczna

Spektroskopia optyczna jest najstarszą, a przy tym przypuszczalnie najbardziej wszechstronną metodą badania własności atomów i gazów. To za pomocą spektroskopii optycznej (obserwacji widma Słońca) został odkryty hel, a następnie w badaniach widm emisyjnych argonu (skraplającego się w wyższej temperaturze niż azot i tlen) – kolejne gazy szlachetne – krypton i ksenon.

Spektroskopia optyczna jest potężnym narzędziem badawczym również w astronomii. Ponieważ prawa fizyki pozostają identyczne w całym Wszechświecie, możemy wnioskować o własnościach odległych gwiazd i galaktyk na podstawie obserwacji widm emisyjnej optycznej. I tak, widząc (nawet gołym okiem, rys. 9.2), że odległe galaktyki są koloru czerwonego, możemy wnioskować, poprzez efekt Dopplera, że oddalają się one z tym większą prędkością, im dalej są od nas odległe. Oczywiście to „gołym okiem” znajduje potwierdzenie w dokładnej analizie przesunięcia linii widmowych (rys. 9.2b).

Ale do dokonania spektroskopii optycznej (czyli rozdzielenia widma optycznego na jego składowe) nie jest potrzebny specjalistyczny spektroskop. Kolory z białego, słonecznego światła pojawiają się w tęczy, albo na niebie w czasie zachodu słońca. Specyficzne właściwości atmosfery (różna zawartość pyłów, obecność kryształków lodu lub kropeł wody w chmurach) powodują, że każdy zachód słońca może być inny (zob. rys. 9.3).

¹²⁶ <https://hubblesite.org/contents/media/images/2001/32/1114-Image.html> (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 9.2. a) Odległe galaktyki wydają się czerwone: jest to efekt Dopplera wynikający z rozszerzania się Wszechświata (obraz z teleskopu Hubble’a), b) linie widmowe gwiazd tego samego typu w odległych galaktykach są przesunięte w kierunku czerwieni (źródło: hubblesite.org ¹²⁶)



Rysunek 9.3. Trzy zachody Słońca w San Paolo w Brazylii: kolory nieba i chmur pozostają komplementarne – światło przechodzące nie zawiera kolorów, które zostały rozproszone na chmurach (podziękowania dla Carmen Busco)

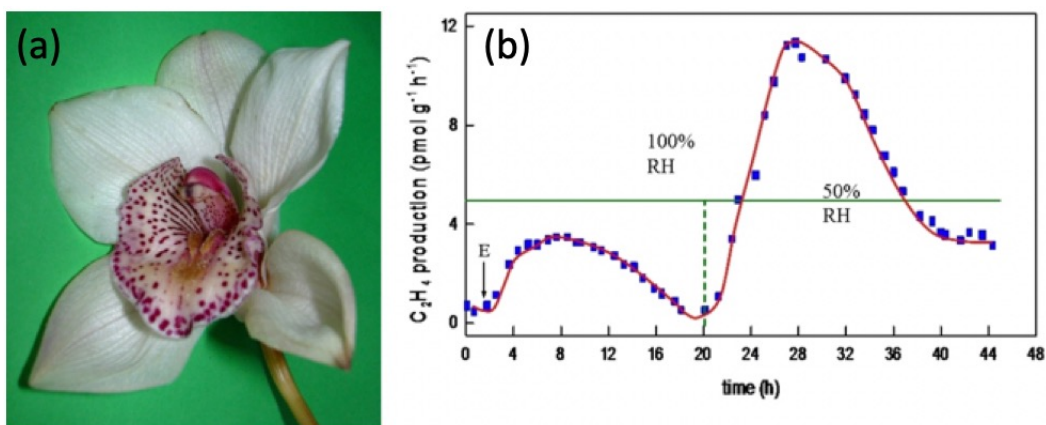
9.2. Spektroskopia fotoakustyczna

Spektroskopia fotoakustyczna jest nowoczesną metodą badania minimalnych stężeń niektórych substancji w fazie gazowej. W szczególności znalazła zastosowanie w pomiarach biofizycznych – emisji etylenu przez rośliny (hormon gazowy) w warunkach stresu lub innych stanów fizjologicznych (np. zerwanie liścia, brak wody, zapylenie itd.).

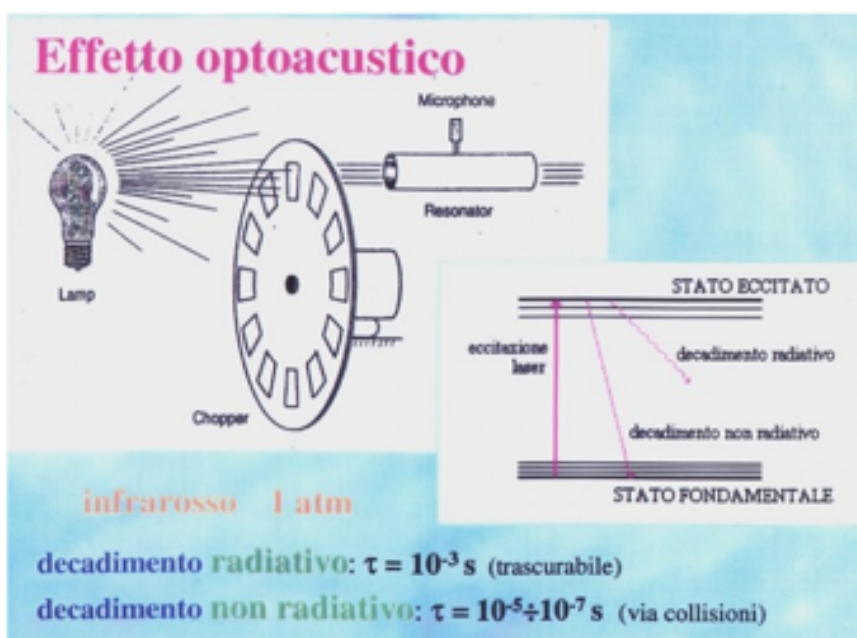
Zasada działania spektroskopii fotoakustycznej, metody czulej na poziom części na miliard (ppb) korzysta z własności emisji światła przez układy atomowe – im niższa częstota emitowanego światła, tym dłuższy czas układ pozostaje w stanie wzbudzonym. Zamiast więc badać emisję w zakresie widzialnym, bada się zakres podczerwieni. Kolejny warunek umożliwiający stosowanie tej techniki to odpowiednie, silne źródło światła wzbudzającego układ, np. laser CO₂ w podczerwieni. Jeśli niektóre z linii emisyjnych lasera odpowiadają jakimś liniom absorpcyjnym poszukiwanej drobin, mówimy o „odcisku palca” (fingerprint). Tak jest np. w przypadku etylenu.

Dla osiągnięcia bardzo wysokiej czułości pomiaru warunkiem niezbędnym jest tzw. lock-in, czyli „zalogowanie” sygnału na odpowiedniej częstotliwości. W praktyce spektroskopii fotoakustycznej światło lasera jest modulowane za pomocą przesłony w postaci koła zębatego (rys. 9.5).

Jeżeli w kuwecie badawczej znajdują się ślady poszukiwanego gazu, wówczas światło (podczerwone) lasera jest absorbowane i re-emitowane we wszystkich kierunkach



Rysunek 9.4. a) zdjęcie orchidei, b) kwiaty orchidei zaczynają emitować etylen (C_2H_4) zaraz po zapyleniu (źródło: dr A. Boschetti, informacja prywatna)



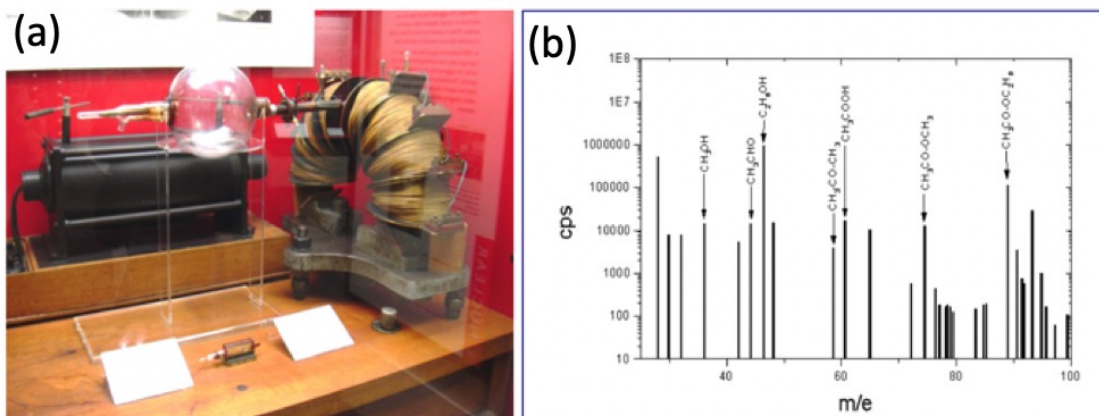
Rysunek 9.5. Schemat zestawu doświadczalnego – koło zębate służy jako przesłona dla światła lasera podczas pomiarów fotoakustycznych (autor: dr Andrea Boschetti, CNR i IRST, Trydent, Włochy)

z bramkowaniem odpowiadającym częstotliwości przesłony: mikrofony wychwytyują dźwięk o częstotliwości modulacji. Etylen jako hormon powoduje m.in. dojrzewanie bananów, jest wydzielany przez orchidee w trakcie kwitnienia (zob. rys. 9.4) lub np. przez winorośl, po urwaniu liścia.

9.3. Spektroskopia transferu protonu

Spektroskopia masowa, czyli pomiar masy atomów i cząsteczek w fazie gazowej datuje się od lat 20. zeszłego stulecia. Wówczas Aston zbudował pierwszy spektrometr używający pola magnetycznego do separacji jonów o różnych masach (zob. rys. 9.6). Spektrometria przekazu protonu pozwala na „miękką” jonizację, tzn. taką, w której jo-

nizowana cząsteczka nie zostaje rozbita na fragmenty, a jedynie przyłącza proton H^+ . Spektroskopia ta, szczególnie przydatna w fazie gazowej, pozwala np. na analizowanie oddechu człowieka w celu natychmiastowego określenia, czy nie jest on chory na cukrzycę. Badania przeprowadzone przez grupę szwajcarską (z Neuchâtel) pokazały, że liść ugryziony przez gąsienicę wydziela zapach zwabiający osy, które z kolei pożerają gąsienicę¹²⁷. Można również skontrolować za pomocą widma masowego zapachu, czy truskawki są świeże i czy kawa została prawidłowo sparzona.



Rysunek 9.6. a) Spektrometr masowy Astona, za pomocą którego stwierdził, m.in., że neon jest mieszaniną atomów o tej samej ilości elektronów, ale różnej masie (czyli izotopów). Było to bezpośrednią przesłanką do poszukiwania neutralnego elektrycznie składnika jądra atomowego – neutronu. Muzeum Nauki w Londynie (fot. GK, 2001). b) Na powyższym rysunku przedstawione jest widmo masowe powstałe w wyniku jonizacji zapachu świeżych truskawek

Analiza widma dla „zapachu” świeżych truskawek przeprowadzona została tylko dla związków chemicznych, takich jak metanol, etanol, acetaldehyd, aceton, kwas octowy, octan metylu oraz octan etylu. Alkohol metylowy oraz etylowy można tu potraktować jako „medium” przenoszące pozostałe związki zapachowe. Octany metylu oraz etylu charakteryzują się miłym zapachem, pozostałe związki zaznaczone na wykresie mają zapach nieprzyjemny.

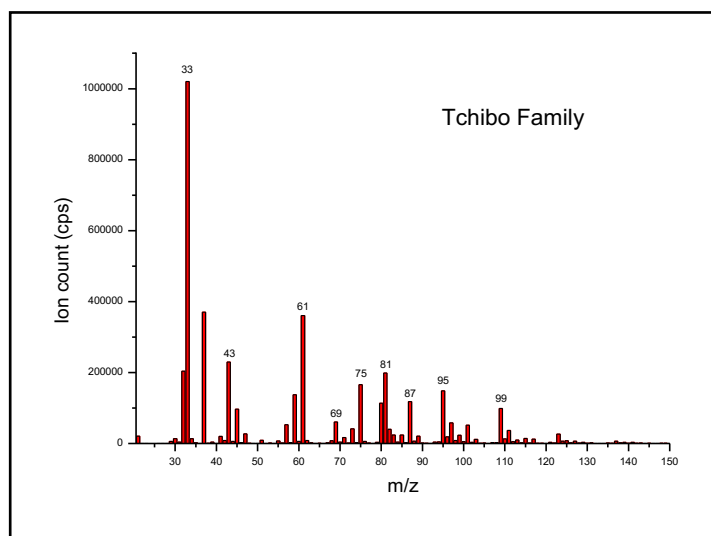
Trudnością spektrometrii masowej jest to, że drobiny (atomy) muszą zostać zjonizowane (neutralne atomy nie są odchylane przez pola elektryczne i magnetyczne). Proces jonizacji, zazwyczaj poprzez zderzenia z elektronami, prowadzi w przypadku drobin do ich fragmentacji. Jest więc bardzo trudne odnalezienie, jaka była masa cząsteczki wyjściowej.

Jednym z najważniejszych zagadnień związanych z badaniami składu chemicznego substancji za pomocą metod spektroskopii masowej jest sposób jej jonizacji. Procesowi jonizacji związków chemicznych, przeprowadzanemu np. za pomocą wyładowania elektrycznego, naświetlania światłem laserowym, wiązką elektronów lub innych cząstek naładowanych, towarzyszy zazwyczaj także proces fragmentacji badanych cząsteczek. W tym wypadku ustalenie pierwotnego składu chemicznego badanej próbki na podstawie widma masowego jest bardzo trudne.

¹²⁷ <http://www.ionicon.com/applications/showcases/biological-research> (dostęp 02.03.2022).

Spektroskopia masowa transferu protonu wykorzystuje proces przyłączenia protonu (H^+) do badanej cząsteczki, w wyniku czego w widmie masowym pojawia się pik przesunięty o jedną jednostkę masy atomowej. Większość cząsteczek organicznych ma dodatnią energię wiązania z protonem. Proton jest wychwytywany przez cząsteczkę w zderzeniach np. ze zjonizowanymi klasterami wody, jak $H^+(H_2O)$.

Dzięki tej metodzie dokonano ogromnego postępu w dziedzinie fizykochemicznych badań żywności – możliwe jest np. określenie jakości kawy na podstawie jej zapachu (rys. 9.7), lub stwierdzenie, że w koszu truskawek znajdują się dwie zakażone pleśnią. W zakresie badań medycznych jest możliwe diagnozowanie cukrzycy na podstawie zapachu z ust (obecność acetonu) itd.



Rysunek 9.7. Określenie jakości kawy na podstawie badania zapachu kawy za pomocą spektroskopii transferu protonu (źródło: dr Tomasz Wróblewski, Akademia Pomorska w Słupsku)

10

Od ogniwa Volty do reaktora termojądrowego

10.1. Pilna konieczność

Zachodzi pilna konieczność rozwoju nowych sposobów pozyskiwania i magazynowania energii¹²⁸. Dysponowanie źródłami energii (w zamierzonych czasach oznaczało to – pożywienie) było w dziejach ludzkości jednym z głównych powodów konfliktów zbrojnych. Dzieje się tak i dzisiaj – zasoby paliw kopalnych wyczerpują się: jedno z najbardziej miarodajnych czasopism naukowych, brytyjskie „Nature” w 2002 roku oceniło dostępne zasoby węgla (przy ówczesnym zużyciu) na 202 lata, gazu ziemnego na 55 lat, a ropy naftowej na 37 lat. Oczywiście, nowe odkrycia i nowe technologie, np. pozyskiwania ropy z łupków roponośnych wydłużają tę perspektywę. Niestety nie na długo – również zasoby bogatych rud uranu w wielu krajach (jak Polska czy Czechy) już się wyczerpały.

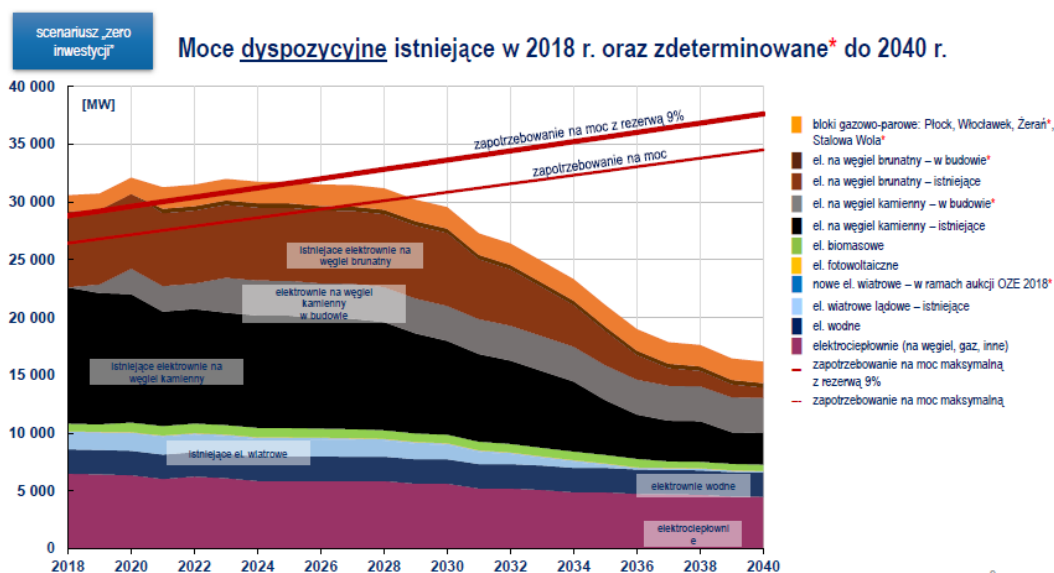
Tak więc, nie tylko problemy zmian klimatycznych są powodem poszukiwań nowych technologii energetycznych (a jest to pojęcie szersze niż „energje alternatywne” opisane w rozdziale 5) – najważniejszym problemem dla następujących po nas pokoleń będzie problem niewystarczających „zasobów energetycznych” – już nie tylko wytwarzania prądu elektrycznego, ale magazynowania „energji”, w czasie, kiedy ani ogniwa fotowoltaiczne, ani elektrownie wiatrowe jej nie dostarczają.

To samo czasopismo „Nature”, które w 2002 roku ostrzegało przed wyczerpaniem się kopalni, w 2019 roku opublikowało¹³⁰ szczegółową perspektywę energetyczną dla

¹²⁸ Zwracamy uwagę na skrót myślowy, jakim są sformułowania „pozyskiwanie” i „magazynowanie” energii: energia jest wielkością ściśle zachowaną w fizyce, a mówimy jedynie o jej *formach* albo nośnikach – prąd elektryczny, strumień spadającej wody, zbiornik wodoru itd.

¹²⁹ <https://www.gov.pl/web/energia/raport-mit-o-przyszlosci-energii-jadrowej> (dostęp 02.03.2022)

¹³⁰ D. Bogdanov et al., *Nature Communications* 10, 1077 (2019).



Rysunek 10.1. Raport Ministerstwa Energii (22.01.2019): prognoza zapotrzebowania i podaży mocy elektrycznej w Polsce do 2040 roku. Główne „źródła” energii – węgiel kamienny i brunatny (paski czarny i brązowy) są na wyczerpaniu (źródło: Ministerstwo Energii ¹²⁹)

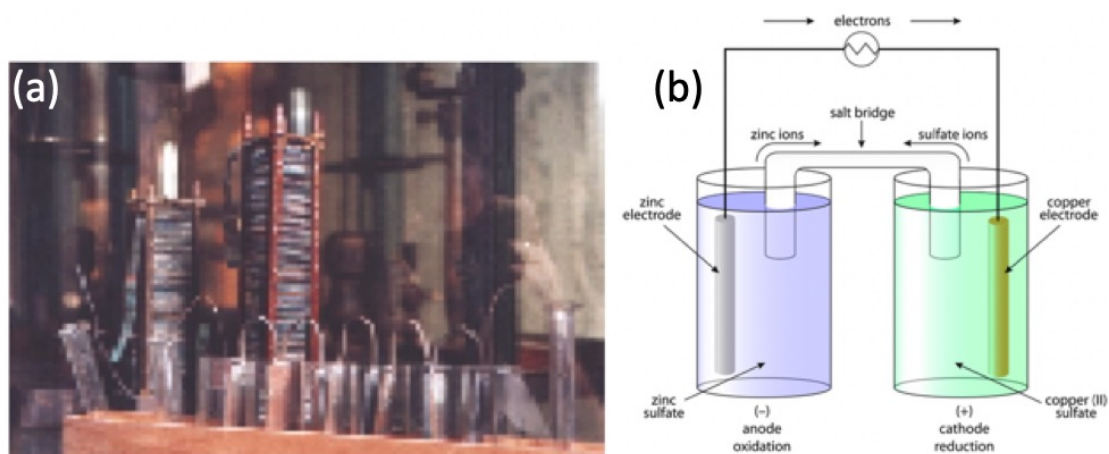
całej planety do roku 2050 z uwzględnieniem specyfiki poszczególnych krajów. Wynika z tej prognozy, że energetyka jądrowa i węglowa będą stopniowo zanikały, głównie na rzecz ogniw fotowoltaicznych. Wiele krajów, w tym Polska, mogą mieć spore deficyty produkcji energii (rys. 10.1). Nadal też nie ma jasności w sprawie „magazynowania” energii – gigantyczne baterie elektrochemiczne, sztuczne wytwarzanie metanu z dwutlenku węgla i wody, ogromne zbiorniki na wodór w podziemnych jaskiniach itd. Według wspomnianego opracowania, w 2050 roku „produkcja” energii elektrycznej w skali globu¹³¹ będzie rzędu 50 PWh (peta = 10^{15}), czyli wzrośnie o 50% od 2020 roku, a potrzeby „magazynowania” wyniosą 15 PWh, czyli wzrosną od 2020 roku dziesięciokrotnie. Bez wątpienia w XXI wieku potrzebne są innowacyjne, śmiałe rozwiązania naukowe i techniczne. Studenci i uczniowie winni mieć tego świadomość, a nowe kierunki studiów są również dla uczelni sposobem na podniesienie kompetencji dydaktycznych.

10.2. Ogniwo Volty

Albert Einstein na uroczystościach z okazji 100-lecia śmierci Aleksandra Volty stwierdził, że od ogniwa Volty zaczęła się fizyka współczesna. Rzeczywiście, stos monet cynowych i srebrnych ułożonych jedna na drugiej (i co druga moneta przedzielona bibułą nasączoną słoną wodą, rys. 10.2a) stał się pierwszym użytecznym źródłem *prądu* elektrycznego. Wcześniej, kule szklane czy siarkowe i inne „maszyny” elektrostatyczne wytwarzały jedynie iskry elektryczne i służyły zabawie w arystokratycznych salonach.

¹³¹ Obecnie moc zainstalowana we wszystkich elektrowniach świata wynosi 10 TW, a całkowity wypływ energii geotermicznej z wnętrza Ziemi (stygnięcie plus promieniotwórcze rozpady uranu, toru i potasu) – 40 TW.

Domenico Romagnosi, adwokat z Trydentu zauważył już w 1802 roku¹³², że prąd ze stosu Volty odchyła igłę magnetyczną – otworzyła się droga do pomiaru natężenia prądu elektrycznego¹³³. Co więcej, ogniwa Volty pozostają głównymi źródłami prądu w komputerach przenośnych, telefonach komórkowych, tabletach itd. – nic lepszego nie zostało do tej pory wynalezione. Ogniwa elektrochemiczne są trwałe, proste w obsłudze, i w stosunku do swej masy bardzo wydajne.



Rysunek 10.2. (a) Oryginalne ogniwa Volty z Muzeum w Como: dwa stosiki metalowych krążków (chyba miedź i cynk) i płytki miedziane i cynkowe połączone przewodami i zanurzone w rozcieńczonym kwasie siarkowym (fot. GK, 2002). (b) Ogniwo Daniella ma dwa oddzielne pojemniki z elektrolitem – w jednym są jony Zn^{2+} , w drugim Cu^{2+} : zapobiega to wydzielaniu się wodoru na elektrodzie miedzianej. Dla zamknięcia obwodu elektrycznego dwa naczynia są połączone „kluczem” jonowym – żelazem z KNO_3 . Dzięki ogniwu Daniella w połowie XIX wieku całe Stany Zjednoczone zostały połączone siecią telegraficzną (źródło: Wikipedia ¹³⁴)

Schemat dla ogniwa wodorowego w par. 10.3. wyjaśnia, że potencjał elektryczny pochodzi z reakcji chemicznej $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$. Podobnie jest w ogniwie Volty, z elektrodami metalowymi: energia chemiczna ulega „transformacji” w energię prądu elektrycznego. Z różnic chemicznych między metalami, np. srebra i cyny wynika, że jeden z nich (cyna) łatwiej traci elektrony, a inny trudniej. W fazie gazowej mówilibyśmy o energii jonizacji, zob. rozdział 9. Dla srebra wynosi ona 7,58 eV a dla cyny 7,34 eV. W fazie stałej wartości energii niezbędnej do wybicia elektronu (np. poprzez efekt fotoelektryczny) są niższe: 4,7 eV dla Ag i 4,3 eV dla Sn. (Wartości energii fotonów niezbędne do wybicia elektronów z metalu nazywamy, za Einsteinem, „pracą wyjścia”, par. 11.2).

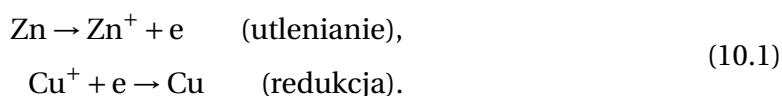
„Praca wyjścia” w ogniwie Volty – metalach zanurzonych w wodzie – jest inna. Volta uszeregował metale według potencjału, jaki uzyskuje się w ogniwie elektrochemicznym; dziś – w stosunku do elektrody platynowej, z katalizatorem w postaci nanostrukturalnej platyny, tzw. czerni platynowej i obmywanej strumieniem gazowego wodoru.

¹³² Doświadczenie powtórzone w 1820 roku przez Duńczyka Hansa Christiana Ørsteda.

¹³³ Tego rodzaju mierniki były wykorzystywane jeszcze 20 lat temu, nie tylko do pomiaru natężenia prądu, ale też np. jako prędkościomierze w samochodach.

¹³⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Daniell_cell (dostęp 02.03.2022)

Niestety, nie potrafimy jeszcze wyliczyć, mimo ogromnego rozwoju metod mechaniki kwantowej, jakie napięcie powstanie między srebrem, miedzią a cynkiem w elektrolizie. Procesy zachodzące w ogniwie Volty (a właściwie Daniella, rys. 10.2b) to oddawanie elektronu przez atom cynku (i przechodzenie powstałego jonu Zn^+ do roztworu), przepływ elektronów zewnętrznym przewodem do miedzi oraz na elektrodzie miedzianej – przyłączanie elektronu do jonu miedzi (osadza się metaliczna miedź, a w roztworze ubywa Cu^+):



Elektrodą ujemną w ogniwie Daniella jest cynk (anoda), a dodatnią (katodą) jest miedź. To nie tylko metal, ale granica faz woda–metal, decydują o tym napięciu. Intuicyjnie rozumiemy, dlaczego lit leży w szeregu Volty na dole (rys. 10.3)¹³⁵ – jest to pierwiastek alkaliczny, o jednym elektronie zewnętrznym (walencyjnym), słabo związanym z resztą atomu. Ale wartości potencjału przewidzieć nie potrafimy. Dopiero niedawno pojawiła się praca, próbująca wyliczyć pracę wyjścia elektronów z platyny zanurzonej w wodzie¹³⁶ (rys. 10.4). Nie jest to jeszcze wynik w pełni poprawny, ale zaczynamy rozumieć, że interface (warstwa graniczna) między wodą a metalem zasadniczo zmienia fizykę procesu.

Rysunek 10.3. Szereg elektrochemiczny (Volty): pokazana jest reakcja jonowa, która dostarcza określonego potencjału (w stosunku do elektrody „wodorowej”, zob. par. 10.3) Największy potencjał ujemny uzyskuje się z reakcji $\text{Li}^+ + e^- \rightarrow \text{Li}$. Lit jest przy tym pierwiastkiem bardzo lekkim, stąd jego zastosowanie w bateriach telefonów komórkowych. Niestety, nie jest zbyt rozpowszechniony w skorupie ziemskiej (jest go 10-krotnie mniej niż np. wanadu czy cyrkonu). Dodatkowo, w bateriach ładowalnych ma tendencję do osadzania się w formie dendrytów, co może powodować zapalenie się baterii. Dodajmy, jako postscriptum, że Nagroda Nobla za 2019 rok w dziedzinie chemii została przyznana za wynalezienie baterii litowych (źródło: Wikipedia¹³⁷)

	Half Reaction	Standard Potential (V)
↑ stronger oxidizing agent	$\text{F}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{F}^-$	+2.87
	$\text{Pb}^{4+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+}$	+1.67
	$\text{Cl}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	+1.36
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	+1.23
	$\text{Ag}^+ + 1e^- \rightleftharpoons \text{Ag}$	+0.80
	$\text{Fe}^{3+} + 1e^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	+0.77
	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0.34
	$2\text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0.00
	$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0.13
	$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0.44
	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0.76
	$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Al}$	-1.66
	$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2.36
↓ stronger reducing agent	$\text{Li}^+ + 1e^- \rightleftharpoons \text{Li}$	-3.05

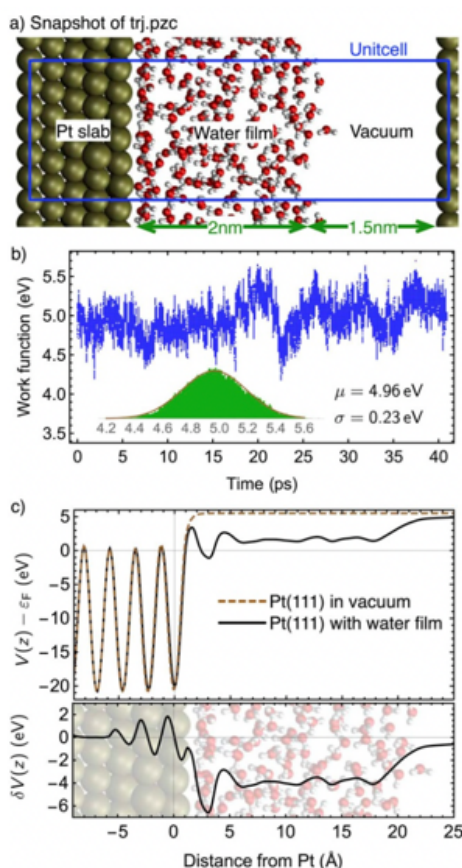
10.3. Ogniwu wodorowe

Zasada działania ogniwa Volty polega na zamianie „energii chemicznej” w prąd elektryczny. Pojęcie „energii chemicznej” jest tu umowne - w reakcjach chemicznych eg-

¹³⁵ phys.org/news/2018-10-whiskers-surface-growth-dendrites-lithium.html (dostęp 02.03.2022).

¹³⁶ Sung Sakong, Axel Croß, *Journal of Chemical Physics* 149, 084705 (2018).

¹³⁷ https://en.wikibooks.org/wiki/Introduction_to_Inorganic_Chemistry (dostęp 02.03.2022)



The description of electrode-electrolyte interfaces is based on the concept of the formation of an electric double layer. This concept was derived from continuum theories extended by introducing point charge distributions. Based on *ab initio* molecular dynamics simulations, we analyze the electric double layer in an approach beyond the point charge scheme by instead assessing charge polarizations at electrochemical metal-water interfaces from first principles. We show that the atomic structure of water layers at room temperature leads to an oscillatory behavior of the averaged electrostatic potential. We address the relation between the polarization distribution at the interface and the extent of the electric double layer and subsequently derive the electrode potential from the charge polarization.”

The electric double layer at metal-water interfaces revisited based on a charge polarization scheme

Cite as: J. Chem. Phys. 149, 084705 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5040056>
Submitted: 14 May 2018 . Accepted: 29 July 2018 . Published Online: 28 August 2018

Sung Sakong and Axel Groß

Rysunek 10.4. Jedna z pierwszych prac teoretycznych (sierpień 2018), w której pokazano, że „praca wyjścia” elektronów z platyny (panel c) w próżni i w obecności cienkiej warstwy wody na powierzchni platyny są różne. Pokazano, jak ta praca wyjścia zmienia się („waha”) na odległościach kilku atomów od powierzchni. Panel (a) pokazuje, jak drobiny wody „porządkują się” w obecności powierzchni metalu. Dla prostoty obliczeń założono, że powierzchnia metalu jest monokrystaliczna, z orientacją kryształów (111)

zotermicznych, np. spalania wodoru w tlenie wydziela się ciepło. Dokładny bilans uwzględnia energię wiązania atomów wodoru w cząsteczce H_2 (4,52 eV), tlenu w O_2 (1,50 eV) i wodoru z tlenem H-O w H_2O (3,79 eV). W reakcji $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ wydziela się więc energia netto 2,31 eV na jedną cząsteczkę wody¹³⁸. Zamiana tego ciepła na użyteczną energię mechaniczną musi korzystać z maszyny termodynamicznej, a ta, zgodnie z zasadą Carnota, ma wydajność η zależną od temperatury źródła ciepła T_1 i temperatury chłodnicy T_2 , w idealnym przypadku (bez strat) wynoszącą:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (10.2)$$

Nawet jeśli najnowsze rodzaje turbin gazowych¹³⁹ osiągają wydajności do 60%, wydajność typowych silników spalinowych nie przekracza 25–30%. Wodór jest atrakcyjnym paliwem, jako że w trakcie spalania nie jest emitowany dwutlenek węgla¹⁴⁰. Bez-

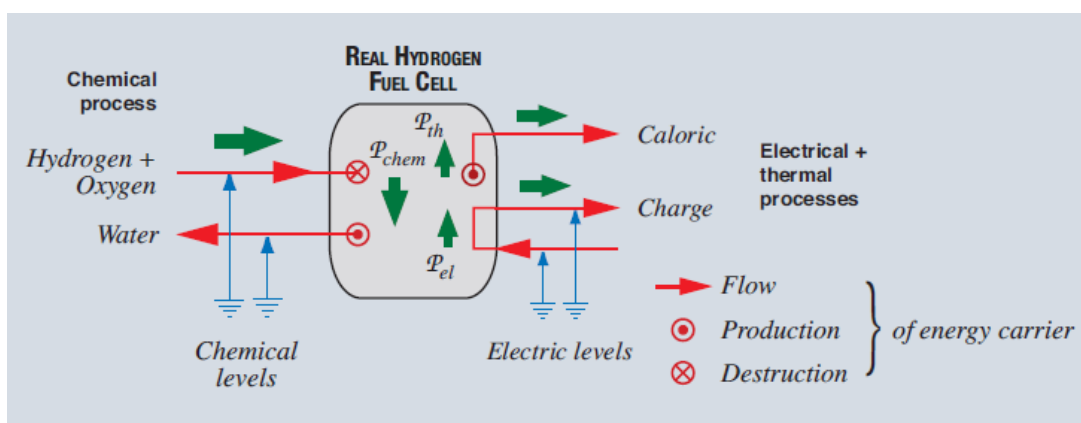
¹³⁸ $2,31\text{eV} = 1/2 (4 \times 3,79 - 10,54)$ eV. W chemii dla energii wiązania (a właściwie energii swobodnej Gibbasa) używane były jednostki kcal/mol. 1 eV = 23 kcal/mol.

¹³⁹ Np. 605 MW turbina General Electric 9HA, o temperaturze w komorze spalania 1540°C.

¹⁴⁰ W tym sensie, spalanie metanu (CH_4) wytwarza mniej CO_2 na jednostkę uzyskanego ciepła niż spa-

pośrednie spalanie wodoru dla uzyskania pracy mechanicznej napędzającej np. samochody byłoby więc termodynamicznie niekorzystne. To jest pierwszy powód prac nad tzw. ogniwami paliwowymi. Drugi powód to problemy z globalnym ociepleniem i zanieczyszczeniem powietrza. Spalanie kopalin wytwarza dwutlenek węgla, a tego przybyło w atmosferze od początku ery przemysłowej o 40% (zob. rozdział o zmianach klimatycznych). Dodatkowo, spalanie węgla wytwarza aromatyczne związki o własnościach rakotwórczych, np. benzopiren. W Polsce dopuszczalne wartości benzopirenu są przekraczane (i to jako wartości średnie) ponad 10-krotnie¹⁴¹. Uczulamy więc uczniów/ studentów, że problemy środowiska nie są opiniami subiektywnymi, ale mają potwierdzenie w statystykach i analizach naukowych.

Ogniwo wodorowe (zwane też „paliwowym”) zostało zaproponowane w 1838 roku przez Wiliama Grove’a. Zauważył on w trakcie elektrolizy wody, że po wyłączeniu zewnętrznego źródła prądu (a pozostawiając elektrody w wodzie) prąd popłynął w przeciwnym kierunku. Dopiero przy okazji lotów Apollo znalazło prawdziwą realizację: i tlen i wodór były w zbiornikach rakiety, ogniwo wodorowe wytwarzało prąd elektryczny, a powstała woda służyła do picia.



Rysunek 10.5. Schemat koncepcyjny ogniwa wodorowego (lub ogólnie – ogniwa elektrochemicznego): przemiana chemiczna (synteza katalityczna wody z wodoru i tlenu) polega na obniżeniu potencjału chemicznego (lewa strona diagramu). Prawa strona diagramu pokazuje, że ładunki elektryczne są przenoszone do wyższego potencjału (płyne prąd elektryczny przez obwód zewnętrzny) i generowane jest ciepło (źródło: H. Fuchs, materiały projektu FCHGo¹⁴²)

Ogniwo wodorowe jest niejako odwróceniem elektrolizy (rys. 10.5). Dla dysocjacji (podziału na atomy) wody w procesie elektrolizy niezbędna jest różnica potencjału 1,23 V. Można by się podziwiać, że ogniwo wodorowe „produkuje” takie samo napięcie,

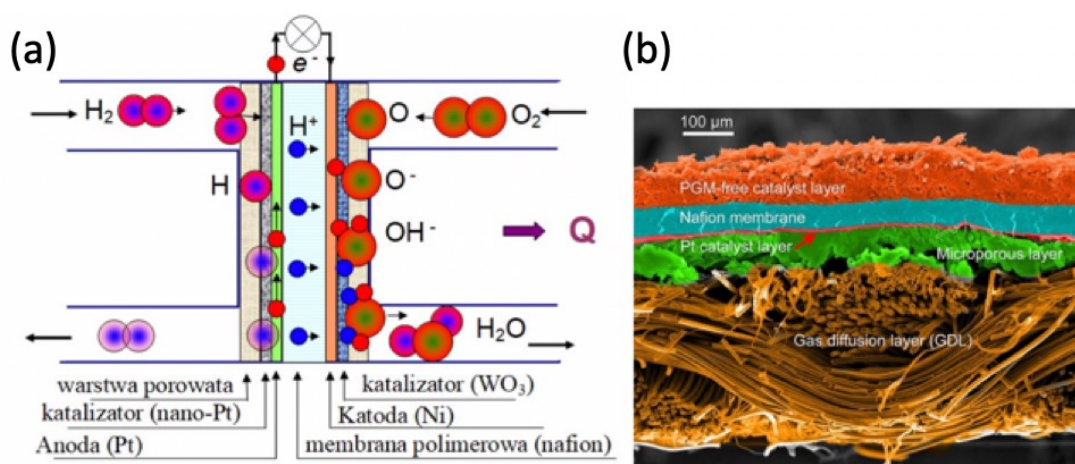
lanie węgla – węgiel jest najbardziej szkodliwym paliwem, i dla środowiska, i dla człowieka (zob. dalej).

¹⁴¹ Polskie media obiegała informacja – „19 na 20 miast w Europie z najgorszym powietrzem, jeśli chodzi o stężenie rakotwórczego benzopirenu, jest w Polsce! W Nowej Rudzie, która jest na pierwszym miejscu rankingu, poziom benzoapirenu BaP wynosi blisko 18 nanogramów na metr sześcienny. W Tomaszowie Mazowieckim – 15 nanogramów, a w Rybniku – 13. Spójrzcie na pierwszą mapkę: miasta, zaznaczone na fioletowo, mają wg raportu EEA normy benzopirenu przekroczone”. Źródło: slaskie.naszemiasto.pl/benzopiren-polska-czarna-plama-europy-a-slaskie-spojrzenie/ar/c4-4866062 (dostęp 02.03.2022).

¹⁴² <https://fchgo.eu> (dostęp 02.03.2022)

ale tak nie jest. Konceptyjnie proste ogniwo na wodór i tlen staje się znacznie bardziej skomplikowane w praktycznej realizacji.

I wodór i tlen są gazami, więc najpierw należy je rozpuścić w wodzie (ale są dość dobrze rozpuszczalne, lepiej niż azot), później należy „zmusić” oba gazy, H_2 i O_2 do przejścia do postaci atomowej, H i O , czyli do *dysocjacji*. Potrzebne są ku temu odpowiednie katalizatory. W przypadku wodoru używa się platyny, w jej koloidalnej (nano-strukturalnej) postaci, tradycyjnie zwanej czernią platynową. W przypadku O_2 próbuje się różnych katalizatorów, metalicznych (Ni) lub tlenkowych (np. tlenków wolframu odpowiednio aktywowanych). Ogniwo ma jednak sporo ograniczeń – mocy, konstrukcji, materiałów (i ceny¹⁴³).



Rysunek 10.6. Schemat szczegółowy procesów chemicznych w wodorowym ogniwie paliwowym. Z dwóch stron dopływa gazowy wodór i tlen. Przegroda rozdzielająca dwa obszary ma wielowarstwową strukturę: zewnętrzne porowate warstwy mają na celu „uwięzienie” gazu, tak aby wszedł on w kontakt z katalizatorem. Membrana z nafionu ma $20\ \mu m$. Od strony wodorowej używa się platyny (warstwa rzędu $1\ \mu m$), od strony tlenowej próbuje się różnych technologii, jak Ni , nano-strukturalny WO_3 , Se itd. Procesy od strony tlenowej są słabiej zrozumiane niż od strony wodorowej. Od strony wodorowej H_2 ulega dysocjacji na H , w kontakcie z katalizatorem traci elektron (ten płynie na drugą stronę ogniwa poprzez obwód zewnętrzny), proton H^+ dyfunduje w kierunku anody. Po stronie anody H^+ łączy się z O (lub OH i OH^- , dokładnie nie wiemy), tworząc wodę. W postaci wyblakłych krążków pokazujemy, że wodór był, ale rozpadł się na e^- i na H^+ . Źródło: GK. (b) Obraz pod elektronowym mikroskopem skaningowym (kolorowany) membrany w ogniwie paliwowym wodorowym niskotemperaturowym (korzystającym z nafionu). Widoczne obszary porowate dla „uwięzienia” gazu, katalizatory dla dysocjacji gazów, film polimerowy (źródło: Wikipedia¹⁴⁴)

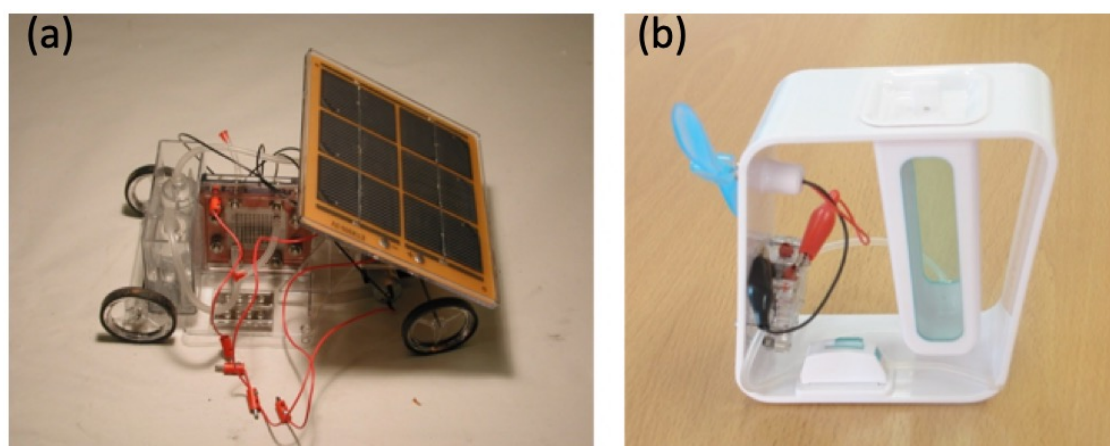
Kluczem ogniwa paliwowego jest membrana oddzielająca dwa obszary. Jak w ogniwie Daniella obwód elektryczny jest zamknięty przez jony NO_3^- i K^+ dyfundujące przez przegrodę (lub inne jony w zewnętrznym kluczu jonowym), tak w ogniwie wodorowym obwód elektryczny jest zamknięty przez przepływ jonów H^+ z obszaru anody do ka-

¹⁴³ Analiza kosztów wskazuje, że dla zasilania samochodu osobowego koszt samego ogniwa jest porównywalny z obecnym kosztem wytworzenia całej „reszty” samochodu (karoserii, wnętrza itd.).

¹⁴⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell (dostęp 02.03.2022)

tody: to tam zachodzi reakcja powstawania H_2O z H^+ i tlenu, zob. rys. 10.6a. Przepływ jonów H^+ (czyli „gołych” protonów, o średnicy ostatnio zmierzonej $0,86 \times 10^{-15}\text{m}$) nie jest jednak procesem fizycznym, a raczej chemicznym. W specjalnym fluoryzowanym polimerze, z grupami kwasu sulfonowego, protony „skaczą” od cząsteczki do cząsteczki polimeru. Membrana ma więc izolować dwa katalizatory, nie przepuszczać wody ani gazów, a transportować protony. Mimo wielu wysiłków, powszechnie używany pozostaje fluorowany polimer z grupą kwasu sulfonowego, tzw. nafion, o grubości $20\text{ }\mu\text{m}$, zob. foto z mikroskopu elektronowego (10.6b).

Nie do końca rozumiemy chemię oraz fizykę ogniwa wodorowego. Nie wiadomo, czy to grupa sulfonowa czy fluoryzowanie polimeru zapewnia transport H^+ . Płatyna jest droga. Nie wiadomo, gdzie traci się część napięcia elektrycznego. Do elektrolizy potrzeba $1,23\text{ V}$, a najwyższe napięcie pozyskane z ogniwa wodorowego to $1,0\text{ V}$. Na razie technologowie nazywają tę stratę „potencjałem aktywacji”. Ale raczej przypomina ona tzw. napięcie polaryzacji ($0,6 - 0,8\text{ V}$) w krzemowym ogniwie fotowoltaicznym. Dydaktycznie polecamy przeprowadzenie choćby prostych doświadczeń z elektrolizą, ogniwami elektrochemicznymi oraz ogniwami wodorowymi (rys. 10.7).



Rysunek 10.7. (a) Dydaktyczny model samochodu „na wodę” (firmy Kosmos & Thames). Do zbiornika z lewej strony wlewa się wodę destylowaną, podłączając do ogniwa paliwowego (w środku) panel słoneczny (z prawej). Prąd powstający w panelu słonecznym dokonuje elektrolizy wody (ogniwo pracuje jako elektrolizer), a H_2 i O_2 trafiają do zbiorników (z lewej strony) - zbiornik na H_2 jest dwukrotnie szerszy. Po wytworzeniu (gazowego) paliwa, przełącza się przewody, tak aby silnik samochodu (pod panelem) był zasilany prądem powstającym w ogniwie paliwowym. Oczywiście, w pełnym słońcu silnik może być zasilany bezpośrednio z panelu fotowoltaicznego (foto GK). (b) Dydaktyczny model ogniwa paliwowego zasilanego 10% etanolem: produktem utleniania jest kwas octowy, Horizon Bio-Energy Kit FCJ-22 (fot. AK)

10.4. Alternatywy dla energetyki uranowej

Podobnie jak w przypadku zmian klimatycznych, tak w temacie energetyki jądrowej dyskusja nie ma charakteru eksperckiego, jak to w nowoczesnym, wykształconym społec-

czeństwie być powinno¹⁴⁵. Brak alternatywnej dla węgla energetyki jest/ będzie w Polsce poważnym ograniczeniem rozwoju. Energetyka jądrowa była jednym z założonych rozwiązań. Jest ona droga na etapie inwestycji (średnio 4 mld dolarów na 500 MW mocy elektrycznej), ale eksploatacja jest tania (nie ma konieczności transportu ogromnych ilości pociągów z węglem). Pojawia się pytanie o składowanie odpadów radioaktywnych - w procesach rozszczepienia jąder uranu powstaje mieszanka izotopów o różnych właściwościach chemicznych i niezwykle zróżnicowanych czasach rozpadu radioaktywnego (od mikrosekund do miliardów lat¹⁴⁶).

Pierwiastki radioaktywne są/ były zawsze obecne w skorupie ziemskiej: można więc je składować w skałach geologicznie stabilnych. I tak np. w artykule o strukturze wewnętrznej Ziemi¹⁴⁷ pokazujemy, że Skandynawia i wschodnia Europa (od Białorusi na wschód) to niezwykle stare, i najgrubsze z istniejących (do 70 km grubości) płyty kontynentalne. Na dzień dzisiejszy nie jesteśmy w stanie dokonać na dużą skalę separacji chemicznej radioizotopów, ale za kilkadziesiąt lat może to być „ulubione” zajęcie dla robotów (podobnie jak odzyskiwanie rzadkich pierwiastków na śmieciowiskach). Ta cała argumentacja stanowi część przekazu dydaktycznego dla uzyskania tzw. kompetencji społecznych: umiejętności dokonywania trudnych wyborów. A jednocześnie, energetyka jądrowa ma swoje alternatywy, nie mniej technologicznie zaawansowane. Jednym z nich jest cykl reakcji promieniotwórczych (i w końcu rozszczepienia) wykorzystujący izotop toru ²³²Th (rys. 10.8).

Złożami rud o dużej zawartości uranu dysponuje obecnie już tylko niewiele krajów (Australia, Kazachstan, Kanada). Ale w tablicy Mendelejewa z uranem sąsiaduje inny pierwiastek, podobnie jak uran bardzo słabo radioaktywny (tzn. o czasie połowicznego rozpadu rzędu miliardów lat) – tor. Izotop ²³²Th (okres połowicznego rozpadu 14 mld lat) nie ulega spontanicznemu rozszczepieniu jak ²³⁵U po wychwycie neutronu, ale ulega transformacji do izotopu ²³³Th, metastabilnego (o okresie połowicznego rozpadu, poprzez emisję elektronu, 22 minuty). Dopiero izotop ²³³U powstały w tej ostatniej reakcji jest rozszczepialny (zob. rys. 10.8).

Ta różnica między ²³²Th a ²³⁵U ma kilka aspektów. Po pierwsze, reaktor torowy jest, potencjalnie, stabilniejszy, jako że czasy życia izotopów w łańcuchu reakcji są dłuższe. Po drugie, dla zainicjowania reakcji potrzebne jest zewnętrzne źródło neutronów (np. uranowe lub plutonowe); jedno z rozwiązań technicznych, propagowane przez noblistę prof. Carlo Rubbię, zakłada użycie zewnętrznego akceleratora protonów (i tarczy Hg) do produkcji neutronów. Po trzecie, nie jest niezbędne wzbogacanie toru jak w przypadku uranu (²³⁸U jest najobfitszym izotopem, a ²³⁵U jest tylko 0,2%). I po czwarte, bogatych

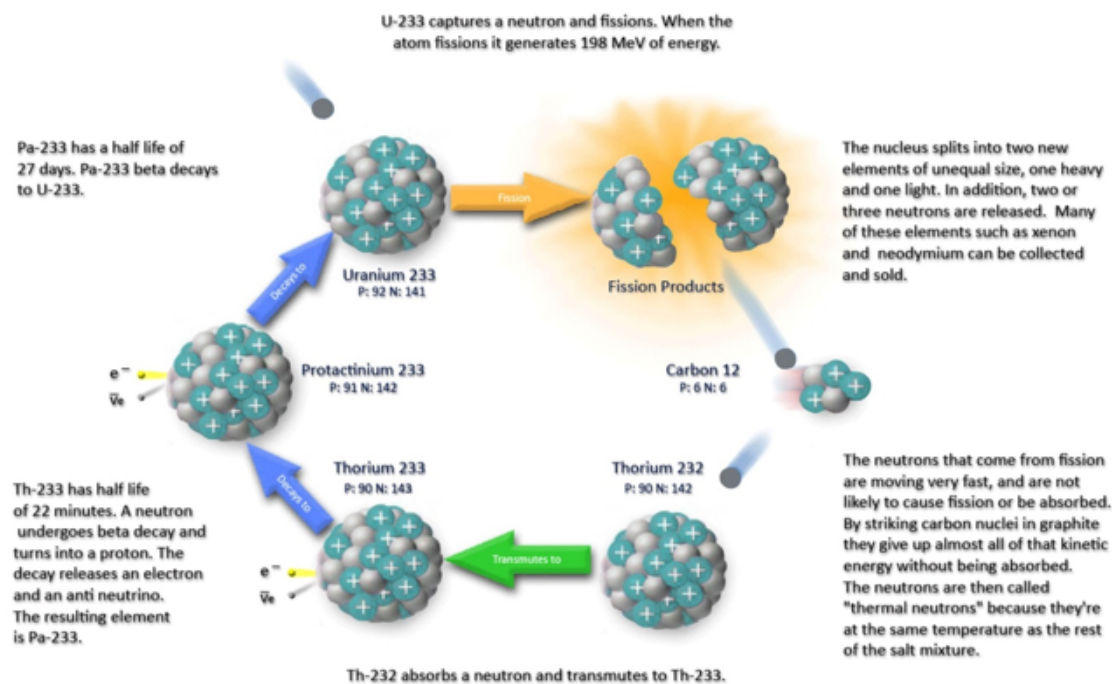
¹⁴⁵ Przypominamy wytyczne UE w tzw. deklaracji lizbońskiej nt. społeczeństwa opartego na wiedzy – celem nie jest wykształcenie obywateli na ekspertów w każdej dziedzinie, ale takie przygotowanie merytoryczne, aby obywatele byli w stanie podejmować *racjonalne* decyzje na podstawie opinii ekspertów.

¹⁴⁶ To zróżnicowanie wynika z zasad mechaniki kwantowej: rozpad alfa jest tunelowaniem przez barierę potencjału jądrowego, rozpad beta - to wynik tzw. oddziaływania słabego wewnątrz składników jądra, tj. protonów i neutronów.

¹⁴⁷ Zob. G. Karwasz, J. Chojnacka, Wewnętrzny ogień, czyli o tektonice płyt Ziemi, *Geografia w Szkole* 3/2012.

¹⁴⁸ <http://watt-logic.com/2017/09/10/thorium/> (dostęp 02.03.2022)

The Thorium fuel cycle



Source: Bradley Nielsen

Rysunek 10.8. Łańcuch reakcji jądrowych w reaktorze opartym na izotopie ^{232}Th (źródło: watt-logic.com¹⁴⁸)

rud toru powinno wystarczyć na jakieś 200 lat, w porównaniu z uranem, którego jest zapewne na 50 lat. Pozostaje wiele „drobnych” problemów technicznych, aby reaktory torowe były ekonomicznie opłacalne (w porównaniu z reaktorami uranowymi¹⁴⁹). Indie planują w 2050 roku uzyskiwać 40% energii elektrycznej z reaktorów jądrowych pracujących na ^{232}Th .

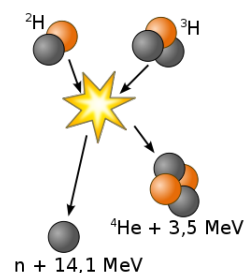
10.5. Reaktor termojądrowy

Głównym „źródłem” energii na Ziemi pozostaje Słońce. Jak pisaliśmy w rozdziale 5, do Ziemi dociera 1366 J w każdej sekundzie na 1 m², a jest to w odległości 150 mln km od tego „termojądrowego” pieca. Słońce świeci prawie niezmiennie od 4,5 mld lat i świecić będzie przez jakieś 9 mld lat. Wodór, z którego w jądrze Słońca jest syntetyzowany hel, występuje na Ziemi w ogromnych ilościach: jeśli szacunek ograniczymy do ciężkiego izotopu wodoru, deuteru ^2H , z którego synteza helu jest technicznie łatwiejsza, energii termojądrowej dla całej ludzkości starczy z oceanu na 3000 lat. Niestety, tak jak w przypadku elektrowni torowej, kilka problemów naukowych, technicznych i ekonomicznych wymaga rozwiązania.

Pojedyncza reakcja termojądrowa (rys. 10.9) dostarcza (na jeden nukleon) kilka-

¹⁴⁹ Zwracamy jednak uwagę, że w wielu przypadkach postępu technicznego, istotną rolę odgrywały czynniki pozaekonomiczne. Budowa bomby atomowej (uranowej, zrzuconej na Hiroshimę i plutonowej, na Nagasaki), czyli tzw. program Manhattan, kosztował USA 2 mld dolarów. Większość prac badawczych i prototypów procesów technologicznych zostało sfinansowane z tego programu.

krotnie więcej energii niż rozszczepienie uranu ^{235}U . Z tego też powodu została zastosowana w bombie „wodorowej” (1952 r.). Ale droga do pokojowego wykorzystania energii termojądrowej jest długa – w jądrze Słońca synteza helu zachodzi, pod gigantycznym ciśnieniem, w temperaturze 15 mln K; na Ziemi, dla przezwyciężenia odpychających sił elektrostatycznych między jądrami wodoru niezbędne jest osiągnięcie temperatury 150 mln K. Spośród wielu różnych koncepcji (wykorzystania fal uderzeniowych, laserów, zapłonu poprzez eksplozję uranową) najlepszą okazało się pułapowanie jąder wodoru za pomocą silnych pól magnetycznych, w reaktorach w formie torusa. Ponieważ plazma w takim torusie odpowiada gigantycznym (dziesiątkom MA) prądom elektrycznym (z rosyjskiego „tok”), reaktory tego typu nazywamy „tokamakami”. Przed rozpoczęciem argumentacji na rzecz nowych źródeł energii należy zidentyfikować *common thinking*. W przypadku ogniw fotowoltaicznych takim przekonaniem powszechnym jest, że są one tańszym źródłem energii niż ropa naftowa. Tak, ale do uzyskania ultraczystego, monokrystalicznego krzemu jest niezbędne jego stopienie w temperaturze 1414°C, a to wymaga energii elektrycznej, zazwyczaj z ropy naftowej.



Rysunek 10.9. Schemat syntezy jąder helu ^4He z jąder deuteru ^2H i trytu ^3H , jak w ITER (źródło: Wikipedia ¹⁵⁰)

W przypadku energii termojądrowej, powszechnym sądem jest, że jest ona energetycznie nieopłacalna - znacznie więcej energii należy włożyć w rozgrzanie plazmy niż w jej powstanie w syntezie termojądrowej. Reaktor JET (Joint European Torus), o średnicy torusa plazmy 2 m, w 1997 roku „otarł się” o granicę zysku energetycznego, uzyskując 16 MW z reakcji syntezy helu z trytu (^3H) i deuteru przy mocy 24 MW dostarczonej do rozgrzania plazmy. Daleko jesteśmy natomiast od progu opłacalności *ekonomicznej* – całość zasilania cewek magnetycznych, utrzymania nadciekłego helu, próżni itd. wymaga w JET 700-800 MW mocy¹⁵¹. Już ruszyły prace konstrukcyjne nad nowym przedsięwzięciem, tym razem wielu krajów (UE, Rosji, Korei, Japonii, Indii, Brazylii, USA) – International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER, w Cadarache we Francji. Budżet projektu opiewa na 13 mld euro¹⁵² i jest to, oprócz lotu załogowego na Marsa, najdroższy projekt badawczy ludzkości.

Promień torusa plazmy w ITER to 6 metrów, a objętość plazmy 830 m³ (zob. rys. 5.6). Impulsy plazmy winny trwać około 600 sekund i osiągać szczytową temperaturę 200 mln K. Przewidywana moc uzyskana z syntezy to 500 MW – czyli próg łącznej mocy niezbędnej do pracy reaktora. Innymi słowy: autonomia energetyczna.

Uruchomienie ITER to ogromny wysiłek techniczny i organizacyjny – potrzebne bę-

¹⁵⁰ <https://en.wikipedia.org/wiki/File:D-t-fusion.png> (dostęp 02.03.2022)

¹⁵¹ https://en.Wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus (dostęp 02.03.2022).

¹⁵² W porównaniu, koszty poniesione przez USA w czasie II wojny światowej szacowane są na 13 mld dolarów (ówczesnych), a Polska otrzymała z UE na reformę systemu edukacji w latach 2007–2020 14 mld euro.

dzie ponad 500 ton drutu z nadprzewodzącego stopu Nb_3Sn (produkcja w częściach równych w EU, USA, Japonii, Korei, Chinach i Rosji). Główny zbiornik próżniowy, ze stali nierdzewnej, o wadze 5300 ton zostanie wyprodukowany przez Indie, Rosję, UE i Koreę. Poważnym problemem pozostaje transport ogromnych elementów na miejsce montażu itd. ITER potrzebuje tysięcy inżynierów, informatyków i fizyków.



Rysunek 10.10. Spotkanie grupy eksperckiej Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej ONZ (IAEA) w Wiedniu w maju 2013. Polskę reprezentuje autor (GK)

Oczywiście przed przemysłowym zastosowaniem fuzji termojądrowej jako źródła energii dla ludzkości pozostaje do rozwiązania wiele problemów. Nie jest możliwy cykl oparty na trycie – jest to sztuczny nuklid, nietrwały, powstający w reaktorach uranowych, a jego obecne zasoby to 27 kg. Tryt powstaje też w reakcjach neutronów z izotopami litu, 6Li (reakcja egzoenergetyczna) i 7Li (endoenergetyczna), ale o zapotrzebowaniu ludzkości na lit pisaliśmy w par. 10.2. Ścianki ITER są wyścielone beryłem (który pochłania neutrony), a najważniejsza część, odbierająca ogromny strumień energii termicznej (1 MW/m^2) – wolframem. Niezbędne jest opracowanie nowych sposobów chłodzenia w procesach zderzeń atomowych, a zasoby berylu i wolframu są ograniczone. Z tego powodu pierwszy, planowany przemysłowy reaktor, DEMO, w Republice Korei, będzie zbudowany z nowych rodzajów stali, nie wiemy jeszcze jakich. DEMO ma być gotowy w 2055 roku. Prace naukowe są w pełnym w toku (rys. 10.10).

11

Rewolucja kwantów i atomów

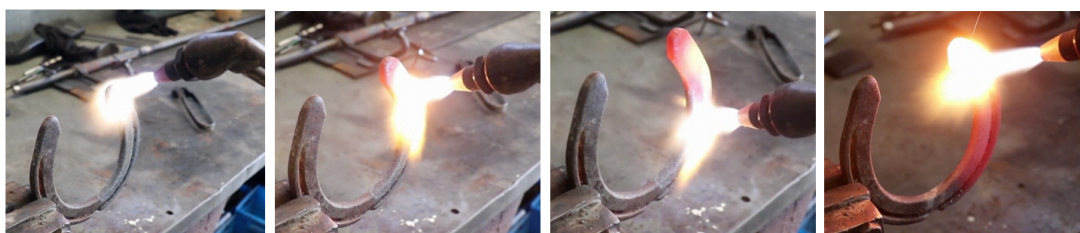
11.1. Hipoteza kwantów światła

Wiele osób uważa, że momentem narodzin fizyki współczesnej jest wyjaśnienie zjawiska emisji ciała doskonale czarnego za pomocą hipotezy kwantów. Teoria została przedstawiona przez Maksa Plancka, profesora Uniwersytetu w Berlinie, na posiedzeniu niemieckiego Towarzystwa Fizycznego w czwartek, 13 grudnia 1900 roku. Ciało doskonale czarne to wyidealizowane ciało fizyczne pochłaniające całkowicie padające nań promieniowanie elektromagnetyczne. Doskonałym modelem ciała doskonale czarnego jest duże czarne pudło z małym otworem (zob. rys. 11.1). Otwór dla obserwatora na zewnątrz wydaje się całkowicie czarny, nawet jeżeli wewnętrzne ścianki pudła są białe. Światło wpadające przez otwór do wnętrza pudła zostaje w nim całkowicie uwięzione (na stronie dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/10 pokazano, w jaki sposób można zademonstrować najważniejsze właściwości ciała doskonale czarnego).

Ciało doskonale czarne nie tylko absorbuje energię, ale również emituje promieniowanie elektromagnetyczne, jeżeli tylko temperatura ciała jest różna od zera bezwzględnego. Kształt widma promieniowania cieplnego ciała doskonale czarnego, tj. zależność natężenia wyemitowanego promieniowania od długości jego fali, zależy jedynie od temperatury ciała. Wiadomo od „zawsze”, że im bardziej rozgrzane ciało, tym świeci bardziej na białło, tzn. emituje fale elektromagnetyczne z coraz szerszego zakresu obszaru widzialnego (począwszy od koloru czerwonego w kierunku niebieskiego wraz ze wzrostem temperatury). Kowale od niepamiętnych czasów tak właśnie oceniają temperaturę kutego żelaza – wiśniowy kolor to około 700°C , jasnoczerwony to ponad 800°C , pomarańczowy to około 1000°C (zob. rys. 11.2).



Rysunek 11.1. Czarne pudło z dziurą jest dobrym modelem ciała doskonale czarnego, nawet gdy wewnętrzne ściany pudła są całkowicie białe. Promieniowanie wpadające do wnętrza odbija się wielokrotnie od jej ścian i jest niemal całkowicie pochłaniane



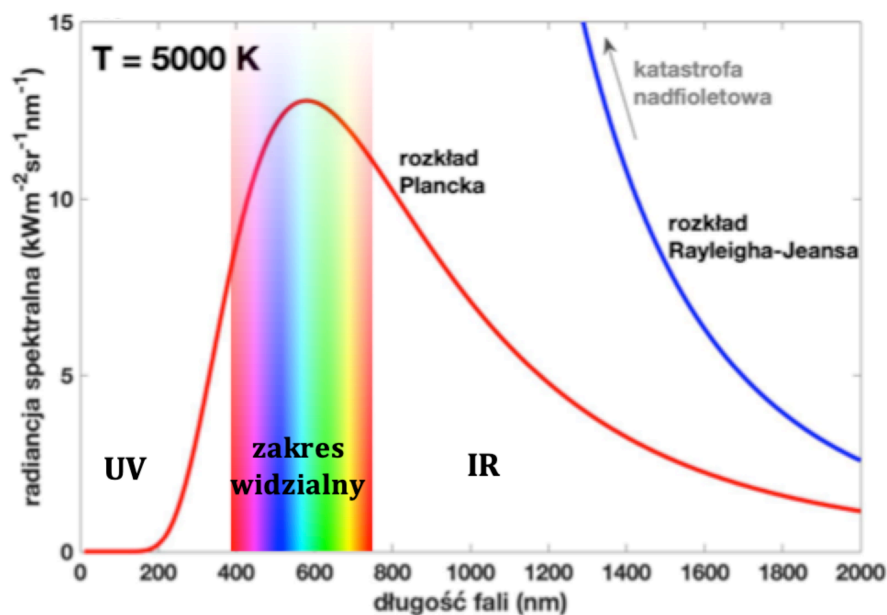
Rysunek 11.2. Zmiana koloru światła emitowanego przez rozgrzaną podkowę wraz ze wzrostem temperatury. Najpierw podkowa zaczyna świecić na czerwono, a przy coraz wyższych temperaturach emitowane są kolejne kolory z widma promieniowania widzialnego, dając wrażenie światła białego (źródło: YouTube.com ¹⁵³)

Problem kształtu widma emisji ciała doskonale czarnego wyłonił się na styku „klasycznej” termodynamiki oraz elektromagnetyzmu – dwóch dziedzin fizyki, które święciły triumfy pod koniec XIX wieku. Z jednej strony, prace takich fizyków, jak Nicolas Carnot, James Watt, James Joule, Ludwik Boltzmann oraz wielu innych pozwoliły na stworzenie efektywnych silników parowych, dzięki którym rozwinęły się koleje, samochody oraz transport morski. Z drugiej strony prace takich ludzi, jak Alessandro Volta, Hans Ørsted, Michael Faraday, Thomas Edison czy Nikola Tesla pozwoliły odkryć i zrozumieć naturę zjawisk elektrycznych i magnetycznych oraz związek między nimi. Dzięki temu powstały silniki elektryczne oraz stworzono pierwsze sieci energetyczne, które dostarczały elektryczność do pojedynczych gospodarstw domowych.

Podstawowe właściwości elektryczności i magnetyzmu zawierają się w czterech równaniach sformułowanych przez Jamesa Clerka Maxwella, które pozwoliły przewidzieć istnienie fal elektromagnetycznych. Co więcej, przybliżyły one nam naturę światła widzialnego, które okazało się właśnie taką falą. Późniejsze prace eksperymentalne, m.in. Heinricha Hertza, nie tylko potwierdziły istnienie fal elektromagnetycznych (poza zakresem widzialnym dla naszego oka), ale również pokazały, że można je wykorzystać praktycznie jako nośniki informacji – dzięki temu powstało radio i telewizja, a pod koniec XX wieku Internet i telefonia komórkowa.

Pomimo że „klasyczne” teorie termodynamiki i elektromagnetyzmu zrewolucjonizowały gospodarkę całego świata, nie są one w stanie wytłumaczyć obserwowalnego

¹⁵³ <https://www.youtube.com/watch?v=ocraEp0hFZg> (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 11.3. Zależności natężenia promieniowania od długości fali dla ciała doskonale czarnego o temperaturze $T = 5000 \text{ K}$ wg modelu Plancka (krzywa czerwona). Krzywa niebieska przedstawia teoretyczny rozkład Rayleigha-Jeansa: natężenie rośnie do nieskończoności, gdy długość fali dąży do zera – jest to tzw. katastrofa w ultrafiolecie

eksperymentalnie kształtu widma promieniowania cieplnego ciała doskonale czarnego, zob. linię koloru czerwonego na rys. 11.3. Próby wyjaśnienia rozkładu promieniowania ciała doskonale czarnego na gruncie fizyki klasycznej doprowadziły do sformułowania przez Rayleigha i Jeansa prawa, że radiancja spektralna (tj. moc emitowanego promieniowania przypadająca na jednostkę powierzchni, jednostkę kąta bryłowego oraz jednostkę długości fali, $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$) ciała doskonale czarnego powinna być proporcjonalna do czwartej potęgi odwrotności długości fali (λ):

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2ck_B T}{\lambda^4}, \quad (11.1)$$

gdzie c to prędkość światła w próżni, k_B to stała Boltzmannowa oraz T to temperatura w kelwinach. Zależność B_{λ} od długości fali (λ) według rozkładu Rayleigha – Jeansa przedstawia krzywa niebieska na rys. 11.3. Jeżeli powyższa zależność byłaby prawdziwa, to w każdej temperaturze ciało powinno promieniować najwięcej energii w pasmie ultrafioletu, a znikomo w zakresie światła widzialnego. Gdy scałkuje się wzór wynikający z prawa Rayleigha-Jeansa po całym zakresie długości fali, to otrzymuje się nieskończone dużą energię emitowaną przez ciało – zjawisko to zyskało nazwę katastrofy w nadfiolecie i było głównym motywem do poszukiwania nowej teorii opisującej promieniowanie ciała doskonale czarnego.

Max Planck rozwiązał problem katastrofy nadfioletowej, zakładając, że energia jest emitowana w ściśle określonych porcjach (kwantach) przez elementarne drgające mini-anteny wewnątrz czarnego pudła – każdy atom ciała doskonale czarnego możemy traktować jako taką antenę. Wielkość tych porcji, niesionych przez fale elektromagnetyczne

tak wyemitowane, zależna byłaby jedynie od częstotliwości fali ν lub równoważnie od długości fali λ , czyli od koloru światła. Energię kwantu wyemitowanego promieniowania opisujemy wzorem:

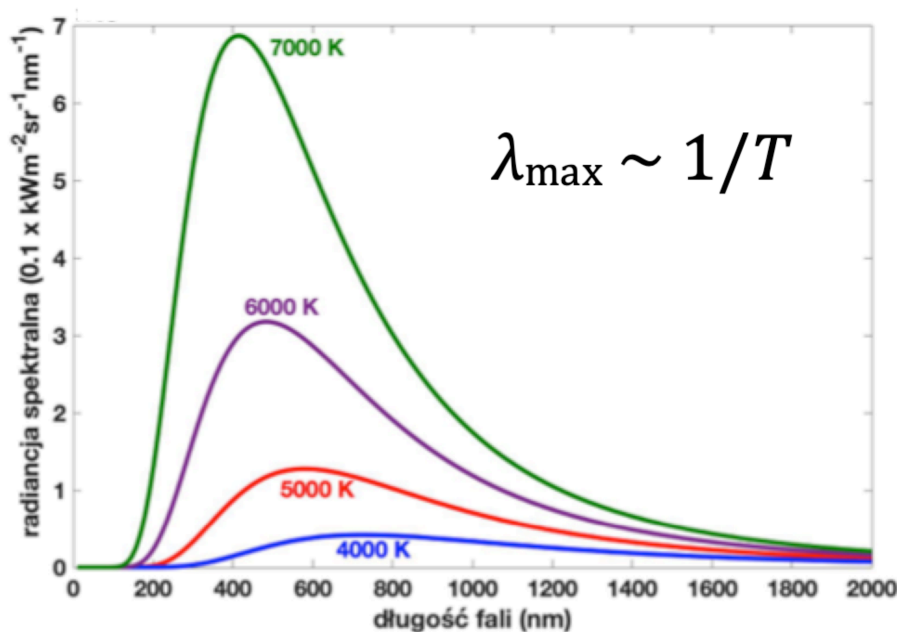
$$E = h\nu, \quad (11.2)$$

gdzie $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Js to stała Plancka, która przypuszczalnie jest taka sama w całym Wszechświecie.

Założenie o kwantowej naturze emisji promieniowania pozwoliło Planckowi wyprowadzić alternatywny rozkład natężenia emisji ciała doskonale czarnego:

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda k_B T}) - 1}. \quad (11.3)$$

Zależność B_λ od długości fali według teorii Plancka przedstawia krzywa czerwona na rys. 11.3. Zależność ta okazała się w doskonałej zgodzie z eksperymentem. W szczególności rozkład Plancka potwierdził prawo przesunięć Wiena, które zostało sformułowane na podstawie danych doświadczalnych kilka lat przed teorią Plancka. Według tego prawa maksimum emisji ciała doskonale czarnego przypada dla coraz mniejszych długości fal wraz ze wzrostem temperatury ciała. Zależność ta pokazana jest na rys. 11.4 i doskonale tłumaczy ona zmianę barw podkowy rozgrzewanej do coraz wyższych temperatur (zob. rys. 11.2). Doskonałą interaktywną symulację widma ciała doskonale czarnego można znaleźć na stronach phet.colorado.edu¹⁵⁴.

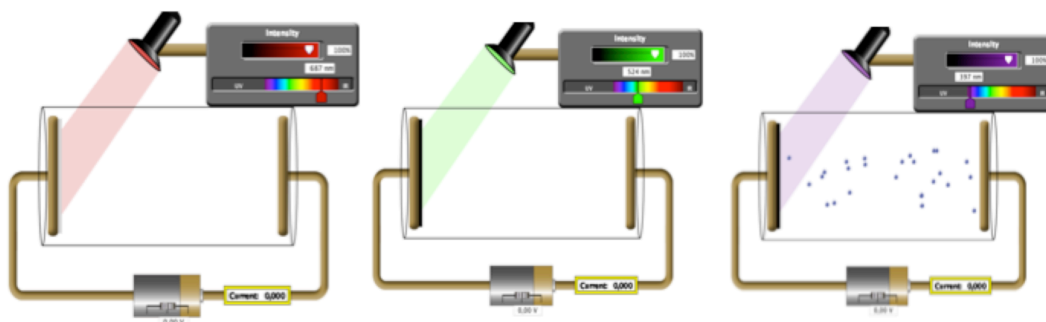


Rysunek 11.4. Rozkład Plancka dla różnych temperatur potwierdzający słuszność prawa Wiena: maksimum radiancji spektralnej przesuwają się w kierunku krótszych długości fal wraz ze wzrostem temperatury

¹⁵⁴ <https://phet.colorado.edu/en/simulations/blackbody-spectrum> (dostęp 27.05.2024)

11.2. Efekt fotoelektryczny

Hipoteza kwantów energii światła, czyli fotonów, była tak rewolucyjna, że sam Planck jeszcze w 1916 roku nie chciał używać słowa „foton”. Oczekiwaliśmy od czasów Demokryta, że materia może składać się z niepodzielnych części, zwanych atomami. Nie spodziewaliśmy się jednak, że światło również jest wymieniane (wysyłane i absorbowane) w postaci minimalnych porcji. W roku 1905 Albert Einstein wykorzystał pomysł Maksa Plancka do wytłumaczenia efektu fotoelektrycznego. Eksperymentalną demonstrację tego efektu można obejrzeć na stronie dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/12. Ogólnie efekt ten polega na wybiciu elektronu z metalu przy pomocy światła. Zjawisko zostało zaobserwowane na samym początku XX wieku¹⁵⁵ – światło padające na płytkę z cynku wybijało z niej elektrony i powodowało przepływ prądu. Trudne do zrozumienia było to, że występowanie efektu oraz energia wybitych elektronów nie zależała od natężenia światła, a jedynie od jego koloru¹⁵⁶. Rys. 11.5 przedstawia komputerową symulację efektu fotoelektrycznego – światło o kolorze czerwonym i zielonym nie jest w stanie wybić elektronów z płytki wykonanej z wapnia (Ca), która umieszczona jest w szklanej bańce pod próżnią. Elektrony są wybijane dopiero wówczas, gdy oświetli się płytkę światłem o kolorze fioletowym. Energia wybitych elektronów nie zależy od natężenia światła, co trudno jest uzasadnić, traktując światło jako falę elektromagnetyczną.



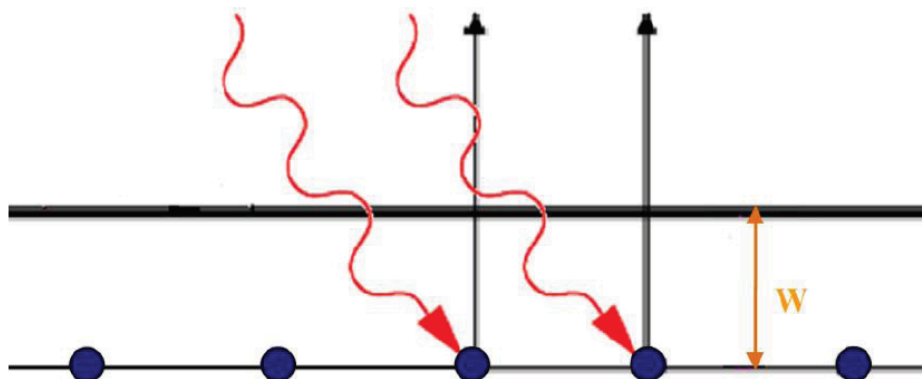
Rysunek 11.5. Efekt fotoelektryczny (wybijanie elektronów z metalu za pomocą światła) pojawia się dla światła o określonym kolorze (tj. długości fali); występowanie efektu fotoelektrycznego nie zależy od natężenia światła. Migawki z symulacji efektu fotoelektrycznego (źródło: phet.colorado.edu¹⁵⁷)

Wyjaśnienia dostarczył Albert Einstein, który założył, że przy opisie tego zjawiska nie należy traktować światła jako fali elektromagnetycznej, ale jako zbiór cząstek – fotonów (czyli kwantów energii postulowanych przez Maksa Plancka) o energii opisanej równaniem 11.2. Padający foton „uderza” w elektron, sam następnie znika (tj. zostaje pochłonięty), a jego energię przejmuje elektron. Aby wybić elektron z materiału, należy mu dostarczyć energii większej niż ta, z jaką on sam jest związany w atomach metalu.

¹⁵⁵ B. R. Wheaton, *Historical Studies in the Physical Sciences* 9, 299–322 (1978); <https://doi.org/10.2307%2F27757381> (dostęp 02.03.2022).

¹⁵⁶ Zjawisko to dosyć obrazowo opisuje E. M. Rogers w książce *Fizyka dla dociekliwych*, zobacz: dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/statki (dostęp 02.03.2022).

¹⁵⁷ <https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric> (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 11.6. Schemat efektu fotoelektrycznego: fotony o energii $h\nu$ wybijają elektrony z materiału. Aby elektron mógł opuścić materiał, energia fotonu musi być większa niż praca W potrzebna na usunięcie elektronu z ośrodka

Nadmiar otrzymanej energii zamienia się w energię kinetyczną elektronu. Zapisujemy to w postaci:

$$E_{kin} = h\nu - W, \quad (11.4)$$

gdzie W nazywamy pracą wyjścia – jest to właśnie minimalna energia potrzebna, aby wyrwać elektron z powierzchni metalu (zob. rys. 11.6). Za podanie tego prostego mechanizmu emisji elektronów w efekcie fotoelektrycznym, czyli za sformułowanie równania 11.4, Albert Einstein otrzymał w roku 1921 Nagrodę Nobla. W przykładzie pokazanym na rys. 11.5 praca wyjścia elektronu z wapnia wynosi $2,87\text{eV}$ ($1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$). Aby wybić elektrony z tej płytki, potrzebne są więc fotony o większych energiach, czyli co najmniej te z krótkofalowego ogona zakresu widzialnego (o kolorze fioletowym) lub z obszaru nadfioletu (UV).

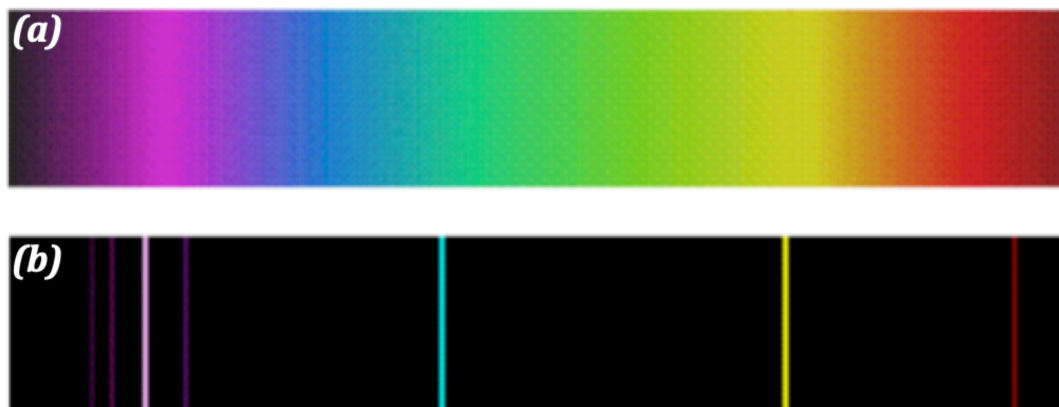
Bez efektu fotoelektrycznego nie byłoby narządu wzroku: w uproszczeniu, w siatkówce oka padające światło wybija elektron, który jako impuls elektryczny wędruje linią neuronową do mózgu. Efekt fotoelektryczny jest też podstawą działania wszelkich kamer profesjonalnych, w telefonach komórkowych, w kamerkach internetowych itd. światło w tym przypadku wybija elektrony z półprzewodnika, który jest „siatkówką” takiej kamery.

Podwójna natura światła – falowa i fotonowa (o tej drugiej mówimy też „ciałowa”, czyli korpuskularna) sprawiła poważny problem fizykom. Newton, który opisał, jak światło białe rozszczepia się w pryzmacie na poszczególne kolory, uważał światło za cząstki, czyli korpuskuły. O ile powstawanie kolorów w pryzmacie da się wyjaśnić za pomocą teorii Newtona, o tyle powstawanie kolorów w bańce mydlanej, interferencję oraz dyfrakcję światła można wyjaśnić tylko teorią falową. Czym jest więc światło? Cząstką czy falą? – odpowiedź: jednym i drugim – w niektórych doświadczeniach światło ujawnia naturę falową, w innych korpuskularną. Takim dwoistym opisem światła posługuje się fizyka współczesna.

11.3. Spektroskopia atomowa

Zależność natężenia światła od długości fali światła nazywamy widmem, po angielsku spektrum (zob. rozdział o spektroskopii). Słowo to pojawiło się w 1704 roku w traktacie Newtona *Opticks*¹⁵⁸, kiedy opisywał kolory powstające z rozdzielenia światła białego na poszczególne kolory za pomocą pryzmatu. Widmo to nie światło, ale rodzaj jego obrazu. Spektroskopia to badania widm.

W zakresie widzialnym światło słoneczne charakteryzuje się widmem ciągłym, tzn. rozłożone na pojedyncze barwy ma postać pasma przechodzącego płynnie od czerwieni do fioletu (rys. 11.7a). Ponieważ światło słoneczne jest mieszaniną wszystkich możliwych kolorów, dla naszego oka wydaje się białe. Źródłem światła słonecznego są powierzchniowe rozgrzane warstwy Słońca, które są dobrym przybliżeniem ciała „doskonale czarnego” w modelu Plancka. We wzorze Plancka (zob. równanie 11.3) występują tylko stałe matematyczne i fizyczne, a natężenie światła zależy wyłącznie od temperatury ciała. Temperatura powierzchniowych warstw Słońca (tzw. fotosfery) to 5750 K i światło ma maksimum w okolicach długości fali 500 nm, czyli koloru zielonego (450 – 560 nm). Światło żarówki z włóknem wolframowym również charakteryzuje się widmem ciągłym, ale wydaje się nieco czerwone w porównaniu ze światłem słonecznym. Rzeczywiście, temperatura włókna wolframowego w żarówce nie przekracza 3000 K, a więc maksimum emisji jest przesunięte ku czerwieni (w kierunku dłuższych fal, zgodnie z prawem Wiena – zob. rys. 11.4).



Rysunek 11.7. (a) Widmo ciągłe – daje je żarówka z włóknem wolframowym lub Słońce. Natężenie poszczególnych kolorów w widmach ciągłych różnych źródeł opisane jest prawem Plancka emisji ciała doskonale czarnego. (b) Widmo dyskretne – dają je pary lub gazy (pojedyncze atomy i molekuly) (źródło: Wikipedia ¹⁵⁹)

Zupełnie innym typem widma charakteryzują się lampy gazowe, które emitują tylko pojedyncze kolory – mówimy o widmie dyskretnym (rys. 11.7b), zobacz symulację takiego widma na stronie www.vascak.cz lub eksperymentalną

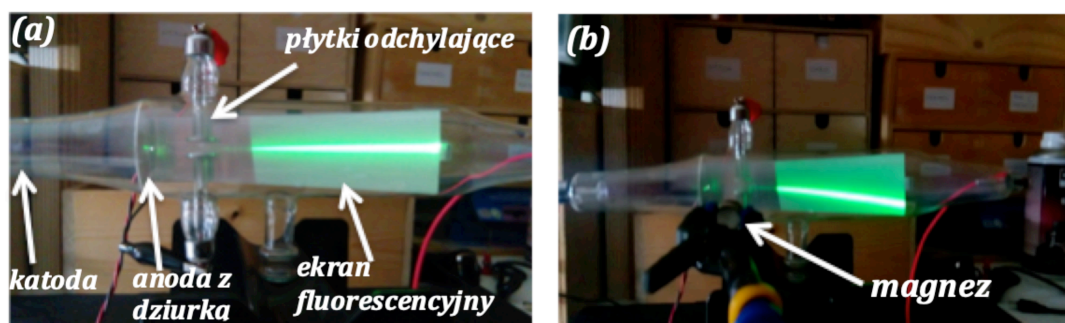
¹⁵⁸ I. Newton, *Opticks: or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light. Also two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures* (1704); Commentary by Nicholas Humez (Octavo ed.). Palo Alto, Calif.: Octavo. ISBN 1-891788-04-3 (1998).

¹⁵⁹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectral_lines_en.PNG (dostęp 02.03.2022)

demonstrację na stronie dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/15 lub dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/16. Dlaczego atomy na powierzchni Słońca (lub we włóknie żarówki) emitują światło o widmie ciągłym, a podobne atomy w bańce żarówki energooszczędnej emitują pojedyncze kolory? Otóż w metalu (lub na powierzchni Słońca) atomy są ułożone gęsto i wzajemnie ze sobą oddziałują; w gazie atomy są swobodne. Odkrywamy w ten sposób bardzo ważne prawo: pojedyncze atomy emitują widma dyskretne. Wytlumaczenie tego zjawiska wymagało zastosowania hipotezy kwantów do opisu atomu. Więcej na temat widm różnych źródeł światła poczytasz (i zobaczysz) na stronach Katedry Dydaktyki Fizyki UMK ¹⁶⁰.

11.4. Współczesny obraz atomu

Narodziny współczesnego obrazu atomu przypadają na podobny okres co początek hipotezy kwantów światła, czyli na przełom XIX i XX wieku. Decydujące były dwa eksperymenty, które pozwoliły odkryć wewnętrzną strukturę atomu: jądro i elektrony. Pierwszy eksperyment wiąże się z odkryciem elektronu. Niemal przez całą drugą połowę XIX wieku prowadzono intensywne badania nad naturą przewodzenia elektryczności w szklanych rurach zawierających rozrzedzony gaz. W czasie takich doświadczeń zauważano dziwny łuk świetlny (zob. rys. 11.8), który rozciągał się od anody (elektrody dodatniej) prawie do katody (elektrody ujemnej), gdy utrzymywana była wysoka różnica potencjałów między nimi. Zjawisko owego świecenia nazwano zjawiskiem promieni katodowych (można je obejrzeć na stronie dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/6) ¹⁶¹.



Rysunek 11.8. (a) Promień katodowy rozchodzący się w szklanej rurze z rozrzedzonym gazem. (b) Odchylenie toru promieni katodowych w polu magnetycznym (źródło: [physicsopenlab](http://physicsopenlab.org) ¹⁶²)

Przez długi czas uważano, że albo świecenie w rurze powodują jakieś cząsteczki, albo promienie katodowe mają naturę falową. Wątpliwości te rozwiązał w roku 1896 Anglik Joseph John Thomson, wykonując eksperyment, w którym wykorzystał rurę z rozrzedzonym gazem służącą do wytwarzania promieni katodowych (rys. 11.8). Zrobił on w anodzie niewielki otwór, dzięki któremu część promieni katodowych, uformowanych

¹⁶⁰ <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/KKK/Kopernik2/index.html> (dostęp 02.03.2022)

¹⁶¹ http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/6.html (dostęp 02.03.2022)

¹⁶² <http://physicsopenlab.org/2017/04/18/esperimenti-con-il-tubo-a-raggi-catodici/> (dostęp 02.03.2022)

w wiązkę, wychodziła poza obszar elektrod. Przechodziła ona przez długą rurę próżniową i padała na fluorescencyjny ekran, który umieszczony był na jej końcu (w komorze na rys. 11.8 ekran umieszczony jest wzdłuż biegu promieni katodowych). Na ekranie, w miejscu padania wiązki, powstawała świecąca plamka. Ponadto w rurze próżniowej umieszczone zostały dwie metalowe płyty odchylające, między którymi wytwarzane było napięcie elektryczne. Wiązka promieni katodowych przebiegała pomiędzy płytkami tak, że kierunek pola był do niej prostopadły. Dodatkowo rura szklana umieszczona była w jednorodnym polu magnetycznym prostopadłym do kierunku wiązki i pola elektrycznego pomiędzy płytkami, tak aby siła magnetyczna mogła przeciwdziałać sile elektrycznej (symulacja wpływu pola magnetycznego na promienie katodowe dostępna na stronie www.vascak.cz)¹⁶³. Zmieniając pole elektryczne oraz magnetyczne, okazało się, że wiązka ulega ugięciu (plamka na ekranie przesuwiała się), co było dowodem na to, że promienie katodowe składają się z cząstek, które obdarzone są ładunkiem elektrycznym (rys. 11.8b). Kierunek ugięcia wiązki wskazywał na to, że cząstki obdarzone są ładunkiem ujemnym. Dobierając odpowiednio wartość pola elektrycznego oraz magnetycznego tak, aby wiązka promieni katodowych nie ulegała odchyleniu, korzystając z równości siły magnetycznej i elektrycznej oraz zasady zachowania energii, Thomson był w stanie wyznaczyć stosunek ładunku elektrycznego do masy cząstek. Dziś wiemy, że jest to $e/m = 1,758820150 \times 10^{11}$ C/kg. Okazało się, że stosunek ten jest niezależny od gazu umieszczonego w rurze, materiału katody oraz innych warunków eksperymentu. Nasunęło to wniosek, że promienie katodowe złożone są z uniwersalnych cząstek, które Thomson nazwał *elektronami*¹⁶⁴.

Piętnaście lat po odkryciu elektronu, Amerykanin Robert Millikan zaprojektował inny eksperyment (zob. dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/9), dzięki któremu zmierzył ładunek elektronu: $e = 1,6021766208(98) \times 10^{-19}$ C. Pomiar ten umożliwił tym samym wyznaczenie masy elektronu, której wartość wynosi: $m = 9,10938215 \times 10^{-31}$ kg.

Thomson zasugerował, że elektrony są składnikami atomów. W tamtych czasach wiadome było, że atomy nie są naładowane elektrycznie, zatem muszą zawierać dodatni ładunek elektryczny, który równoważy ujemny ładunek elektronów. Thomson zaproponował, że dodatni ładunek atomu jest rozłożony równomiernie w całej objętości atomu, a elektrony drgają wokół ściśle określonych położeń. Model takiego atomu nazwany został modelem „ciasta z rodzynkami” (zob. rys. 11.9).

Model atomu zaproponowany przez Thomsona został poddany testowi przez pochodzącego z Nowej Zelandii Ernesta Rutherforda w roku 1911 w eksperymencie, który doprowadził do odkrycia jądra atomowego (zob. rys. 11.10a oraz symulację doświadczenia na stronie www.vascak.cz¹⁶⁵ lub phet.colorado.edu¹⁶⁶). W swoim doświadczeniu Rutherford wykorzystywał cząstki alfa do bombardowania atomów. Natura tych cząstek nie była jeszcze znana, ale wiadomo było, że są one wysyłane z atomów pierwiastków

¹⁶³ https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=elplyn_magnet_elektron&l=pl (dostęp 02.03.2022)

¹⁶⁴ Więcej szczegółów o właściwościach elektronu znajdziesz na stronie dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/elempart_pl (dostęp 02.03.2022).

¹⁶⁵ https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=atom_rutherford&l=pl

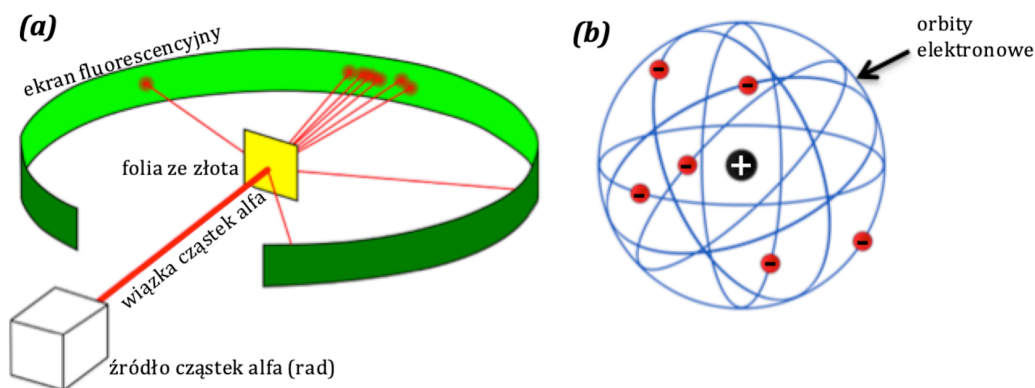
¹⁶⁶ <https://phet.colorado.edu/en/simulation/rutherford-scattering> (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 11.9. Model atomu Thomsona oraz jego kulinarna analogia – ciastko z rodzynkami

promieniotwórczych, czyli są od nich znacznie mniejsze oraz mają ładunek dodatni. Dzisiaj wiemy, że cząstki alfa to jądra helu – dwa protony połączone z dwoma neutronami. Doświadczenie polegało na zbadaniu rozproszenia wiązki cząstek alfa o znacznej energii, które padały na tarczę wykonaną z cienkiej folii ze złota. Cząstki alfa są kilka tysięcy razy cięższe od elektronów, więc ich ruch nie był znacząco zakłócany przez elektrony. Eksperyment polegał na zliczaniu cząstek alfa, które rozpraszają się pod różnymi kątami. W doświadczeniu większość cząstek ulegała odchyleniu o małe kąty, jednakże niewielka ich część rozproszona została pod bardzo dużymi kątami (bliskimi 180 stopni). Było to przełomowe odkrycie, gdyż sądzono, że ładunek dodatni w atomie był rozłożony równomiernie w całej jego objętości (model atomu Thomsona), więc ciężkie cząstki alfa powinny przelatywać przez atom, nieznacznie tylko zmieniając swój kierunek. Rutherford podsumował ten wynik następująco: „To było tak, jakby piętnastocalowy pocisk, wystrzelony w kawałek bibułki, odbił się od niej i trafił w strzelającego”.

Badania przeprowadzone w późniejszym czasie doprowadziły do odkrycia, że samo jądro posiada strukturę wewnętrzną i złożone jest z protonów o dodatnim ładunku elektrycznym oraz neutronów, które są elektrycznie obojętne.



Rysunek 11.10. (a) Schemat eksperymentu Rutherforda – rozpraszanie cząstek alfa na cienkiej folii ze złota (b) model atomu Rutherforda (źródło: large.stanford.edu, wikimedia ¹⁶⁷)

¹⁶⁷ <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/sivulka2/>,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rutherford_atom.svg (dostęp 02.03.2022)

Model atomu zaproponowany przez Rutherforda nie mógł być jednak stabilny według znanych praw fizyki klasycznej. Elektrony poruszające się z bardzo dużymi prędkościami wokół jądra atomu na stałej orbicie (kołowej lub eliptycznej) zmieniałyby ciągle kierunek ruchu (tj. kierunek prędkości), innymi słowy podlegałyby przyspieszeniu. Według równań Maxwell przyspieszające ładunki powinny emitować promieniowanie elektromagnetyczne, tracąc swoją energię. W konsekwencji promień orbity elektronu malałby w sposób ciągły, prowadząc do nieuchronnego zderzenia z jądrem. Ponadto model atomu Rutherforda nie przewidywał dyskretnego charakteru widma promieniowania wysyłanego przez atomy, o którym mowa jest w rozdziale 11.3. Duński fizyk Niels Bohr usunął trudność, proponując model atomu oparty na czterech postulatach, z których dwa są sprzeczne z klasyczną elektrodynamiką. Model atomu wzorował na modelu Kopernika układu słonecznego. Jak w układzie słonecznym lżejsze planety krążą wokół masywnego Słońca, tak w atomie – lżejsze, ujemnie naładowane elektrony krążą dookoła ciężkiego, dodatnie naładowanego jądra. W przypadku Ziemi przyciągającą siłą jest siła grawitacji ze strony Słońca; to ona pełni rolę siły dośrodkowej. Według modelu Bohra rolę siły dośrodkowej pełni przyciągająca siła oddziaływania elektrycznego między jądrem a elektronem:

(1) *Elektron jest utrzymywany na orbicie kołowej (eliptycznej) za pomocą sił elektrycznego oddziaływania z jądrem:*

$$k \frac{Ze^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}, \quad (11.5)$$

gdzie k to stała oddziaływań elektrycznych, Z – ładunek jądra, e – ładunek elektronu, r – promień orbity elektronu, m – masa elektronu, v – prędkość elektronu.

(2) *Całkowita energia elektronu w atomie jest sumą energii kinetycznej oraz energii potencjalnej oddziaływań elektrycznych:*

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - k \frac{Ze^2}{r}. \quad (11.6)$$

Powyższe dwa postulaty są zgodne z fizyką klasyczną. Prawdziwą rewolucję stanowiły postulaty czerpiące z hipotezy kwantów:

(3) *Moment pędu elektronu jest skwantowany:*

$$mvr = n\hbar, \quad (11.7)$$

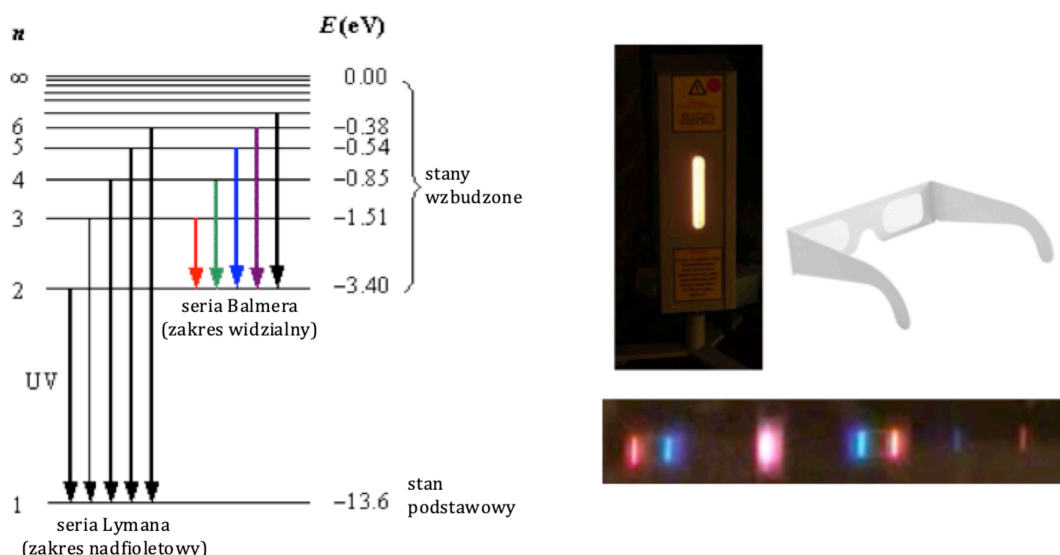
gdzie $\hbar$ to stała Plancka podzielona przez 2π , $n = 1, 2, 3, \dots$ to liczby naturalne.

(4) *Elektron, poruszając się po danej orbicie, nie emituje ani nie pochłania energii. Elektron emituje foton, jeżeli spada z orbity wyższej na niższą, a pochłania foton, jeżeli przechodzi z orbity niższej na wyższą; energia emitowanego (pochłanianego) fotonu jest równa różnicy między energią wyższą i niższą elektronu:*

$$E_2 - E_1 = h\nu, \quad (11.8)$$

gdzie E_2 i E_1 to energie elektronu, odpowiednio, wyższa i niższa.

¹⁶⁸ <http://e-fizyka.info/index.php?t=13&id=490&opis=Widmo-emisyjne-atomu-wodoru>
(dostęp 02.03.2022)



Rysunek 11.11. Układ poziomów energetycznych w atomie wodoru w modelu Bohra – leżąca w zakresie widzialnym seria Balmera odpowiada przeskokom elektronów z orbity o $n = 3$ na orbitę $n = 2$. Rysunek zapożyczony z e-fizyka.info¹⁶⁸. Serię Balmera można oglądać używając okularów dyfrakcyjnych i lampy spektralnej z rurką Plückera wypełnioną wodorem

Powyższe postulaty prowadzą do wniosku, że energia elektronu w atomie jest skwantowana i może przyjmować tylko następujące wartości:

$$E = -\frac{Z^2}{n^2} R, \quad (11.9)$$

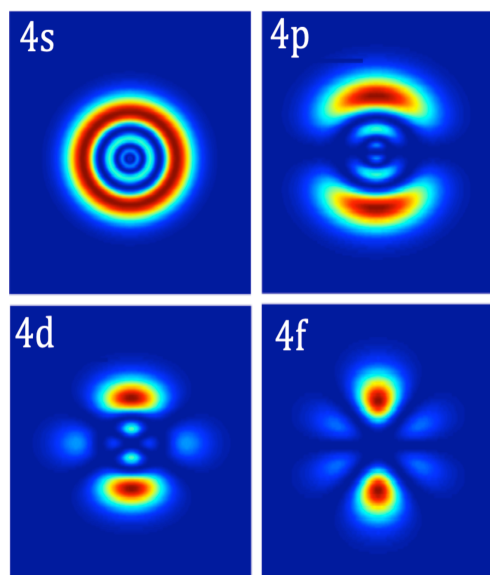
gdzie $R = 13,6 \text{ eV}$ to tzw. stała Rydberga, która jest równa wartości bezwzględnej energii elektronu na pierwszej orbicie w atomie wodoru ($n = 1$, $Z = 1$).

Model atomu Bohra w doskonały sposób tłumaczy obserwowalne widmo promieniowania emitowanego przez atom wodoru. Seria Balmera, którą można oglądać za pomocą siatki dyfrakcyjnej odpowiada przeskokom elektronu z orbit wyższych ($n = 3, 4, 5$ itd.) na orbitę $n = 2$ (zob. rys. 11.11).

Chociaż „półklasyczny” model atomu Bohra całkiem dobrze opisuje jednoelektronowy atom wodoru (zob. symulacje komputerowe phet.colorado.edu¹⁶⁹), dokładny opis atomów wieloelektronowych oraz obserwowalnych widm emisyjnych tych atomów wymaga zastosowania mechaniki kwantowej. Zgodnie z tym obrazem, elektrony w atomie okupują orbitale – są to obszary w przestrzeni wokół jądra, w których prawdopodobieństwo znalezienia elektronu jest różne od zera. Orbitale atomowe różnią się od siebie kształtem geometrycznym, który zależy od energii elektronu oraz jego orbitalnego momentu pędu (mierzonego względem środka masy całego atomu). Przykładowe kształty orbitali (ich przekroje poprzeczne) pokazano na rys. 11.12 – wyliczenia orbitali uzyskano dzięki rozwiązaniu tzw. równania Schrödingera, które leży u podstaw współczesnej mechaniki kwantowej (zob. rozdział 12.3).

Zarówno energia, jak i moment pędu są wielkościami skwantowanymi, tzn. mogą przyjmować tylko określone wartości na danym orbitalu. Do określenia dozwolonych war-

¹⁶⁹ <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/hydrogen-atom> (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 11.12. Przekroje poprzeczne przykładowych orbitali atomowych: $4s, 4p, 4d, 4f$ ($n = 4$ oraz $l = 0, 1, 2, 3$ z $m = 0$ w każdym przypadku). Kolory bliższe czerwonemu oznaczają większe prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w danym obszarze (obliczenia: KF)

tości energii używa się *głównej liczby kwantowej* $n = 1, 2, 3, \dots$, natomiast do określenia dozwolonych wartości orbitalnego momentu pędu używa się *orbitalnej liczby kwantowej* l , która dla danej energii (n) może przyjmować wartości $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$. Ze względu historycznych orbitale z $l = 0$ nazywa się orbitalami typu *s*, orbitale z $l = 1$ nazywa

Pierwiastek	Liczba elektronów	Orbitale			
		1s	2s	2p	3s
Li	3	$\uparrow\downarrow$	1		
Be	4	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$		
B	5	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	1	
C	6	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	1 1	
N	7	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	1 1 1	
Ne	10	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$	
Na	11	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$ $\uparrow\downarrow$	1

Rysunek 11.13. Konfiguracje elektronowe atomów wybranych pierwiastków. Dla danych liczb n i l każdy kwadrat oznacza orbital o innej liczbie magnetycznej m . Strzałki reprezentują spiny elektronów

się orbitalami typu **p**, orbitale z $l = 2$ nazywa się orbitalami typu **d**, a orbitale z $l = 3$ nazywa się orbitalami typu **f**. Badania widm emisyjnych atomów umieszczonych w polu magnetycznym doprowadziły do odkrycia trzeciej liczby kwantowej, tzw. magnetycznej liczby kwantowej $m = -l, -l + 1, \dots, l - 1, l$. Zestaw trzech liczb kwantowych n, l oraz m w pełni charakteryzuje orbitale atomowe.

Do pełniejszego zrozumienia współczesnego obrazu atomu niezbędne jest wprowadzenie pojęcia *spinu* elektronu. Spin jest wielkością fizyczną, która nie ma odpowiednika w fizyce klasycznej. Możemy go sobie wyobrażać jako moment pędu elektronu związany z ruchem obrotowym wokół własnej osi (podobnie jak moment pędu Ziemi krążącej wokół własnej osi). Spin elektronu może przyjmować tylko dwie przeciwne sobie wartości, co często ilustruje się za pomocą strzałki w dół i strzałki w górę (kulka kręcąca się w prawo lub lewo). Spin elektronu decyduje o obsadzaniu elektronami poszczególnych orbitali atomowych. Sam proces obsadzania rządzony jest dwiema regułami:

(i) zakaz Pauliego, każdy orbital może być maksymalnie obsadzony przez dwa elektrony o przeciwnych spinach;

(ii) reguła Hunda, w atomie, w celu uzyskania najbardziej korzystnego energetycznie zapelnienia orbitali atomowych, powinno być jak najwięcej elektronów niesparowanych spinami.

Korzystając z obydwu reguł, można opisać konfigurację elektronową niemal każdego atomu w układzie periodycznym oraz zrozumieć podstawowe właściwości chemiczne atomów. Obsadzenia orbitali atomowych wybranych atomów przedstawia rys. 11.13.

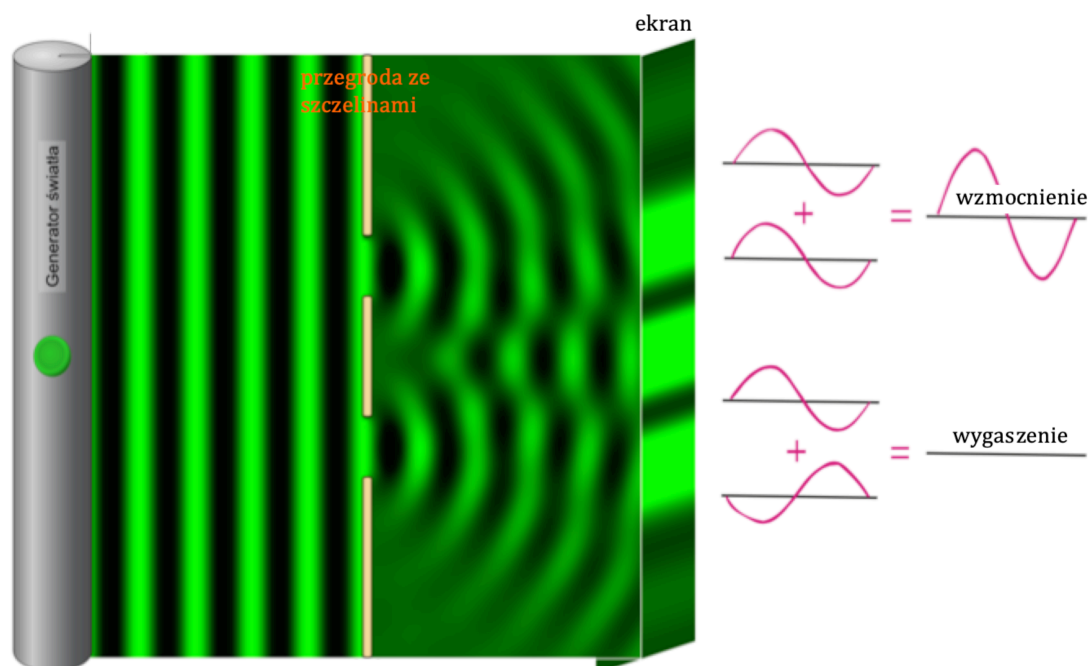
12

Mechanika falowa

12.1. Dualizm korpuskularno-falowy światła

Natura światła widzialnego była tajemnicą, która intrygowała człowieka od wieków. W XVIII wieku uformowane zostały dwie pozornie przeciwstawne koncepcje; jedna postulowała cząsteczkową naturę światła, a druga opowiadała się za naturą falową. Spór o słuszność którejś z tych dwóch koncepcji stał się przedmiotem poważnej dysputy naukowej. Na czele zwolenników korpuskularnej (tj. ciałowej) teorii stał Izaak Newton, który uważał, że światło jest strumieniem cząsteczek, które poruszają się po linach prostych dopóty nie natrafiają na przeszkodę zakrzywiającą ich ruch. W ten sposób Newton był w stanie wytłumaczyć zjawiska odbicia, ugięcia, załamania światła, a także rozszczepienia światła białego na kolory w pryzmacie. Z drugiej strony istniała jednak spora grupa naukowców, która opowiadała się za naturą falową; prym w tej grupie wiódł holender Christian Huygens, który sformułował własną falową teorię światła.

Czynnikiem, który przeważał na rzecz teorii falowej, były badania Anglika Thomasa Younga, który na początku XIX wieku odkrył interferencję światła. Komputerowa symulacja doświadczenia Younga pokazana jest na rys. 12.1. Eksperyment polega na przepuszczeniu światła spójnego przez dwie blisko siebie położone szczeliny i obserwacji obrazu powstającego na ekranie. Wskutek interferencji (sumowania się światła z dwóch szczelin) na ekranie powstają jasne i ciemne prążki w obszarach, w których światło jest wygaszane lub wzmacniane. Fakt istnienia obszarów ciemnych (tzw. interferencji destruktywnej; światło + światło = ciemność) można wyjaśnić tylko w ramach teorii falowej. Zjawisko to obserwuje się nie tylko dla światła, ale także dla innych rodzajów fal, np. fal na powierzchni wody lub fal dźwiękowych.



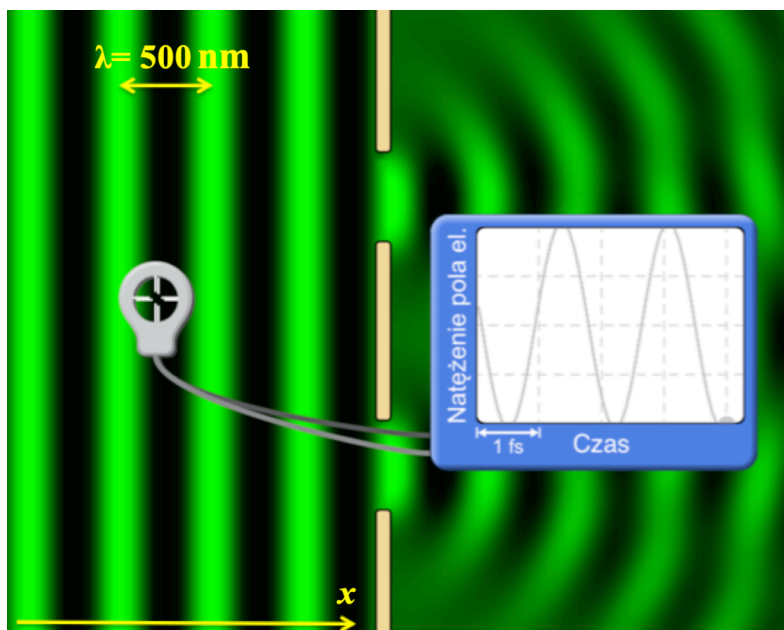
Rysunek 12.1. Symulacja doświadczenia Younga – interferencja światła z dwóch szczelin. Gdy dwa grzbiety fali (zaburzenia) spotykają się ze sobą, to występuje wzmocnienie, jeżeli wychylone są w tę samą stronę, lub wygaszenie, gdy wychylone są w przeciwne strony – na ekranie powstaje obraz interferencyjny (występujące na przemian maksima i minima światła) (źródło: phet.colorado.edu ¹⁷⁰)

„Gwoździem do trumny” dla teorii cząsteczkowej światła (przynajmniej tak początkowo sądzono) było wykazanie przez Jamesa Clarka Maxwella w drugiej połowie XIX wieku, że światło jest falą elektromagnetyczną, czyli zaburzeniem poruszającym się w polu elektrycznym i magnetycznym (podobne do zaburzeń na wodzie lub w powietrzu). Wychodząc ze swoich słynnych czterech równań opisujących elementarne właściwości pól elektrycznych i magnetycznych, Maxwell wyprowadził równanie falowe, które dla pola elektrycznego przyjmuje następującą postać:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \nu^2 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}, \quad (12.1)$$

gdzie E to natężenie pola elektrycznego, ν to prędkość światła. Równanie 12.1 opisuje falę propagującą się w jednym kierunku przestrzennym (wzdłuż osi x wybranego układu współrzędnych). Rozwiązaniem takiego równania różniczkowego jest dowolna funkcja, której argumentem jest szczególna kombinacja zmiennej przestrzennej i czasu, tj. $x - \nu t$. Na przykład rozwiązaniem może być funkcja sinus opisująca falę periodyczną, która pada na dwie szczeliny przedstawione na rys. 12.2: $E(x - \nu t) = A \sin[k(x - \nu t)]$, gdzie A to amplituda (maksymalna chwilowa wartość zaburzenia), $k = 2\pi/\lambda$ to liczba falowa – odwrotnie proporcjonalna do długości fali λ . W próżni prędkość fali świetlnej wynosi $\nu = c = \lambda/T = 3 \times 10^8$ m/s, gdzie T to okres fali periodycznej. Równanie falowe 12.1 opisuje nie tylko drgania pola elektrycznego, lecz także każdy rodzaj propagującego się zaburzenia (fale na wodzie, fale w powietrzu, fale na sznurze).

¹⁷⁰ <https://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-interference> (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 12.2. Fala periodyczna o parametrach: $\lambda = 500 \text{ nm}$ (światło zielone) i okresie $T = 1,66 \text{ fs}$. Prędkość fali wynosi $v = \lambda / T = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ (źródło: phet.colorado.edu¹⁶²)

Teoria falowa światła tłumaczy nie tylko zjawiska charakterystyczne dla fal takie, jak interferencja i dyfrakcja, ale również wyjaśnia odbicie światła, załamanie i rozszczepienie światła na kolory – zjawiska, które Newton tłumaczył koncepcją korpuskularną. Ta ostatnia idea, choć wydawała się spalona pod koniec XIX wieku, została przywrócona do życia dzięki Albertowi Einsteinowi, który posłużył się nią do wyjaśnienia zjawiska fotoelektrycznego, zob. rozdział 11.2. Dzisiaj wiemy, że światło wykazuje tzw. dualizm korpuskularno-falowy – w niektórych eksperymentach zachowuje się jak fala, a w innych jak cząstka. W Toruniu udało się nawet zmierzyć kształt pojedynczego fotonu¹⁷¹, czyli cząstki światła. Należy podkreślić, że obydwa opisy, cząstkowy i falowy, nie wykluczają się, co więcej są one zbieżne w ramach formalizmu falowej mechaniki kwantowej.

12.2. Falowa natura materii – hipoteza de Broglie’a

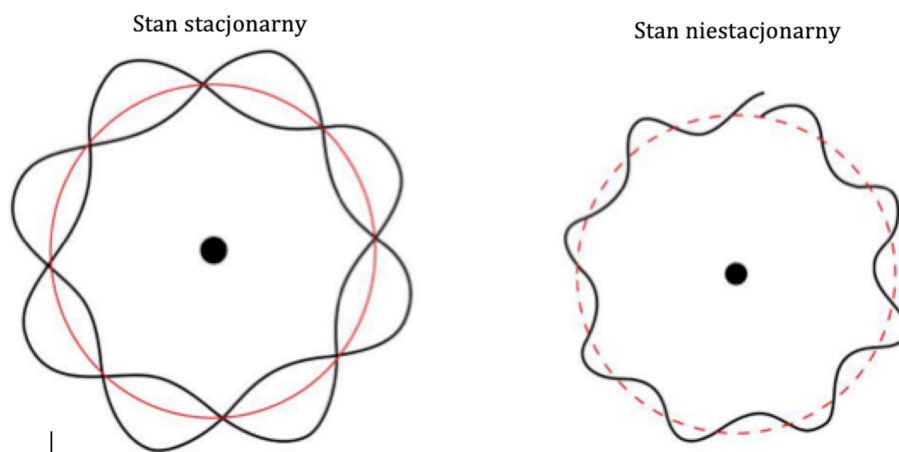
Światło jest falą i cząstką jednocześnie. Dualizm korpuskularno-falowy światła nasunął młodemu arystokracie francuskiemu Luisowi de Broglie pomysł, że cząstki materii również mogą być falami. W 1924 roku opublikował on pracę doktorską pt. *Recherches sur la théorie des quanta* (Badania nad teorią kwantową), która zapoczątkowała falową teorię materii. Zgodnie z jego hipotezą każda poruszająca się cząstka lub obiekt, posiada przypisaną sobie falę. De Broglie nie tylko zasugerował istnienie fal materii, przewidywał również ich długość. Założył, że długość przewidywanych fal materii jest określona tym samym związkiem, który stosuje się do światła (zob. równanie 11.2 z $v = \nu / \lambda$ oraz $E = p^2 / 2m$):

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (12.2)$$

¹⁷¹ W. Wasilewski, P. Kolenderski and R. Frankowski, *Physical Review Letters* 99, 123601 (2007).

gdzie h to stała Plancka, $p = mv$ to pęd cząstki, m to jej masa oraz v to jej prędkość.

Jednym z celów de Broglie'a było uzasadnienie poprawności założenia *ad hoc* wysuniętego przez Nielsa Bohra o stacjonarności dozwolonych orbit atomowych w proponowanym przez niego modelu atomu (zob. rozdział 11.4). Zgodnie z postulatem de Broglie'a, każdy elektron krążący wokół jądra po orbicie kołowej ze stałą prędkością jest reprezentowany przez pewną falę materii – falę elektronową (zob. rys. 12.3). Ta fala, tak jak elektron, przebiega wielokrotnie wzdłuż orbity kołowej, przy czym w każdym kolejnym okresie przebieg ulega dokładnemu powtórzeniu, to znaczy fala jest zgodna w fazie z falami z poprzednich obiegów. W przeciwnym razie powstająca fala wypadkowa miałaby natężenie równe zero. Elektron jest więc falą stojącą na dozwolonych orbitach atomowych. Związanie elektronu ze stojącą falą materii umożliwiło podanie odpowiedzi na podstawowe pytanie, dlaczego elektron krążący po orbicie nie emituje promieniowania elektromagnetycznego pomimo, że jako cząstka nieustannie przyspiesza (tj. zmienia kierunek prędkości). Fale stojące nie przenoszą energii.



Rysunek 12.3. Wyjaśnienie stacjonarnej natury orbit atomowych w modelu Bohra za pomocą hipotezy de Broglie'a. Dozwolone są tylko orbity, na których elektron zachowuje się jak fala stojąca (źródło: wikibook.org¹⁷²)

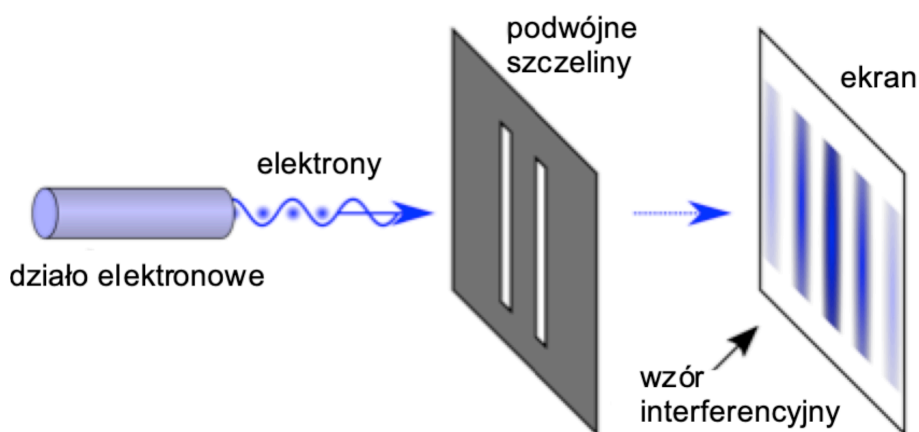
Jeżeli elektron jest falą, to powinniśmy obserwować efekty falowe w jego ruchu, czyli np. interferencję lub dyfrakcję. Hipoteza de Broglie'a została potwierdzona eksperymentalnie zaledwie trzy lata po jej sformułowaniu przez amerykańskich badaczy Clintona Davissona oraz Lestera Germera. W eksperymencie skierowali strumień wolno poruszających się elektronów na tarczę z krystalicznego niklu. Gdy dokonywali pomiaru intensywności odbitych elektronów w zależności od kąta, okazało się, że ma ona taki sam wzór dyfrakcyjny jak przewidziany przez Bragga dla promieniowania rentgenowskiego (czyli dla fal elektromagnetycznych) – komputerowa symulacja eksperymentu Davissona – Germera znajduje się na stronach Phet.Colorado.edu¹⁷³.

Jeszcze bardziej spektakularną demonstracją falowej natury materii było powtórzenie eksperymentu Younga interferencji na podwójnej szczelinie z użyciem elektronów

¹⁷² https://en.wikibooks.org/wiki/High_School_Chemistry/Schrodinger%27s_Wave_Functions (dostęp 02.03.2022)

¹⁷³ <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/davisson-germer> (02.03.2022)

(zob. rys. 12.4). Film demonstrujący tworzenie się obrazu interferencyjnego w takim eksperymencie można obejrzeć on-line: YouTube – *single electrons build up interference pattern*¹⁷⁴ lub przy użyciu symulacji komputerowej z Phet.Colorado.edu¹⁷⁵. Dziwne, że nawet gdy elektrony przechodzą przez jedną lub drugą szczelinę nie w postaci wiązki, ale pojedynczych cząstek, obraz na ekranie jest obrazem interferencyjnym. To tak, jakby kolejny elektron „wiedział”, przez którą szczelinę przeszedł poprzedni tak, aby powstał obraz interferencyjny.



Rysunek 12.4. Schemat eksperymentu Younga (interferencja na podwójnej szczelinie) dla elektronów (źródło: Wikipedia¹⁷⁶)

Długość fali de Broglie’a jest odwrotnie proporcjonalna do masy cząstki, zob. równanie 12.2. Innymi słowy, obiekty makroskopowe (np. piłka pingpongowa lub człowiek), o relatywnie dużych masach, charakteryzują się bardzo krótkimi długościami fali i nie obserwujemy efektów falowych w ich ruchu. Jednym z największych obiektów, dla których zaobserwowano naturę falową to cząsteczki ftalocyaniny ($C_{32}H_{18}N_8$) – w roku 2012 uzyskano obraz interferencyjny tych cząsteczek¹⁷⁷ (zob. rys. 12.5).

Postulat de Broglie’a mówiący, że ruch cząstki mikroskopowej opisywany jest przez zachowanie się stowarzyszonej z nią fali materii stworzył fundament współczesnej teorii opisu stanów atomowych. Sam jednak nie był wystarczający, bo między innymi nie dawał informacji o sposobie rozchodzenia się fal materii. Nie odpowiadał na pytania, jaką postać może mieć funkcja opisująca fale materii, jak ją wyznaczyć oraz jaka jest jej interpretacja. Problem ten został wyjaśniony przez dwóch teoretyków – Austriaka Erwina Schrödingera i Niemca Wernera Heisenberga, którzy zaproponowali nowy sposób opisu świata mikrocząstek: falową mechanikę kwantową.

¹⁷⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=ZUI3lhRje0> (dostęp 02.03.2022)

¹⁷⁵ <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/quantum-wave-interference> (dostęp 02.03.2022)

¹⁷⁶ https://en.Wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment (dostęp 02.03.2022)

¹⁷⁷ B. S. Zhao and W. Schöellkopf, *Nature Nanotechnology* 7, 277–278 (2012), <https://www.nature.com/articles/nnano.2012.44> (dostęp 02.03.2022).



Rysunek 12.5. Obraz interferencyjny cząstek ftalocyaniny (źródło: Nature Nanotechnology)

12.3. Równanie falowe Schrödingera

Jeżeli cząstka materii jest falą, to funkcja falowa opisująca ruch cząstki powinna spełniać równanie falowe podobne do równania 12.1. Równanie takie zaproponował w 1926 roku Erwin Schrödinger, który przy jego wyprowadzeniu wykorzystał analogię do wzoru na energię cząstki w mechanice klasycznej. Dla cząstki poruszającej się po linii prostej (wzdłuż osi x) równanie przyjmuje postać:

$$E = \frac{p_x^2}{2m} + V(x, t), \quad (12.3)$$

gdzie p_x to pęd cząstki, m to masa cząstki, a V to energia potencjalna zależna od położenia (x) oraz czasu t .

W mechanice kwantowej do opisu wielkości fizycznych używamy operatorów matematycznych, czyli działań przekształcających funkcje matematyczne z jednej postaci w drugą. Odpowiednikiem pędu jest operator różniczkowania po zmiennych przestrzennych, np. współrzędna pędu wzdłuż osi x kartezjańskiego układu współrzędnych:

$$p_x \rightarrow -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}, \quad (12.4)$$

gdzie $i = \sqrt{-1}$ to tzw. jednostka urojona, natomiast $\hbar$ to stała Plancka podzielona przez 2π . Podobnie tworzymy operatory dla pozostałych składowych pędu – zamieniamy x na y lub z . Z kolei odpowiednikiem energii w mechanice kwantowej jest operator różniczkowania po czasie: $E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$. Podstawiając wymienione operatory do klasycznego wyrażenia na energię cząstki otrzymamy równanie Schrödingera zależne od czasu. Dla cząstki poruszającej się wzdłuż osi x równanie to ma postać:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x, t) \right] \psi(x, t), \quad (12.5)$$

gdzie $\psi(x, t)$ to funkcja falowa opisująca ruch cząstki. Równanie 12.5 jest odpowiednikiem klasycznego równania falowego 12.1. Interpretacja równania Schrödingera jest podobna jak innych równań opisujących fale. W równaniu fali akustycznej, kwadrat amplitudy fali opisuje natężenie dźwięku (moc fali); w równaniu fali elektromagnetycznej kwadrat amplitudy fali (np. pola elektrycznego) opisuje moc padającego światła. W równaniu Schrödingera kwadrat amplitudy fali $|\psi(x, t)|^2$ określa prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w określonym miejscu i w określonym czasie. Należy podkreślić, że podobnie jak w przypadku innych fundamentalnych równań, równania falowego Schrödingera nie można wyprowadzić w sposób formalny, można jedynie założyć jego formę oraz sprawdzić, czy równanie to prawidłowo przewiduje wyniki doświadczeń.

Rozwiązanie równania Schrödingera, czyli konkretna postać funkcji falowej ψ , zależy od układu fizycznego, który chcemy opisać. Stosując to równanie do opisu elektronu w atomie wodoru, musimy uwzględnić energię potencjalną elektronu w polu elektrycznym protonu:

$$V = -k \frac{e^2}{r}, \quad (12.6)$$

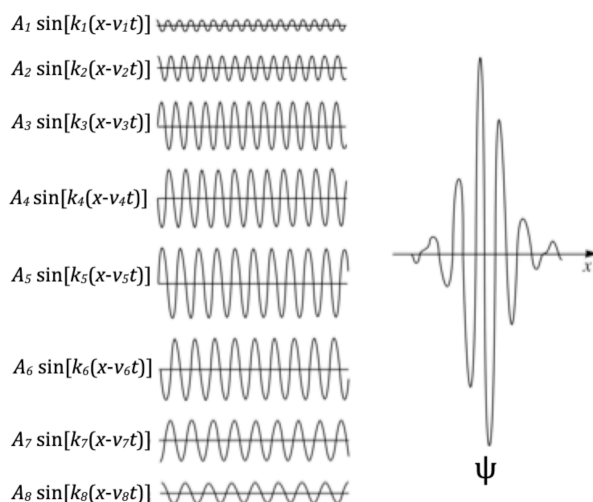
gdzie $k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ to stała elektrostatyczna, e to ładunek elektronu (i protonu) oraz r to odległość pomiędzy elektronem i protonem (traktowanymi jak ładunki punktowe). Jeżeli atom wodoru nie znajduje się w żadnym zewnętrznym polu fizycznym (elektrycznym, magnetycznym) zmiennym w czasie, to energia elektronu jest stała w czasie. Innymi słowy, funkcja falowa elektronu nie zależy od czasu, a więc pochodna $\frac{\partial \psi(x)}{\partial t}$ po lewej stronie równania 12.5 daje stałą E równą energii elektronu (która zależy tylko od położenia cząstki względem jądra). W konsekwencji otrzymujemy równanie falowe Schrödingera, które nie zależy od czasu:

$$E\psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right] \psi(x). \quad (12.7)$$

Ze względu na symetrię sferyczną atomu wodoru wygodniej jest rozwiązać to równanie we współrzędnych sferycznych zamiast kartezjańskich¹⁷⁸. Funkcje falowe, będące rozwiązaniami takiego równania, podniesione do kwadratu dają orbitale przedstawione na rys. 11.12 w rozdziale 11.4. Orbitale są miarą prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w przestrzeni wokół jądra atomu wodoru. Ścisłe matematyczne wyrażenia (o nieco skomplikowanej strukturze) opisujące funkcje falowe atomu wodoru można znaleźć w dowolnym podręczniku do mechaniki kwantowej. Równanie Schrödingera można zastosować do opisu elektronów w atomach innych pierwiastków, jednak wyrażenie na energię potencjalną pojedynczego elektronu jest znacznie bardziej skomplikowane niż w atomie wodoru. Oprócz oddziaływania z jądrem trzeba również uwzględnić oddziaływanie z pozostałymi elektronami w atomie. Aby rozwiązać ten problem, trzeba zastosować zaawansowane narzędzia mechaniki kwantowej. Jednak końcowy wynik jest jakościowo identyczny z rozwiązaniami dla atomu wodoru – elektrony o określonej

¹⁷⁸ G. K. Woodgate, *Struktura atomu*, PWN, 1974; P. T. Matthews, *Wstęp do mechaniki kwantowej*, PWN, 1977.

energii okupują orbitale atomowe. Każdy orbital atomowy można jednoznacznie zidentyfikować za pomocą czterech liczb kwantowych (zob. rozdział 11.4).



Rysunek 12.6. Paczka falowa ψ powstała w wyniku superpozycji ośmiu fal płaskich o różnej amplitudzie A , różnej liczbie falowej k oraz różnej prędkości v (źródło: astro.dur.ac.uk)¹⁷⁹

Innym przykładem wykorzystania równania falowego Schrödingera jest opis ruchu cząstki swobodnej w próżni, czyli takiej cząstki, która nie podlega działaniu żadnych sił zewnętrznych. W takiej sytuacji można przyjąć w równaniu 12.5, że energia potencjalna cząstki $V = 0$. Rozwiązaniem takiego równania jest superpozycja (kombinacja) fal płaskich o zbliżonych pędach i energiach. Dla cząstki poruszającej się w jednym kierunku (np. oś x) można to zapisać następująco:

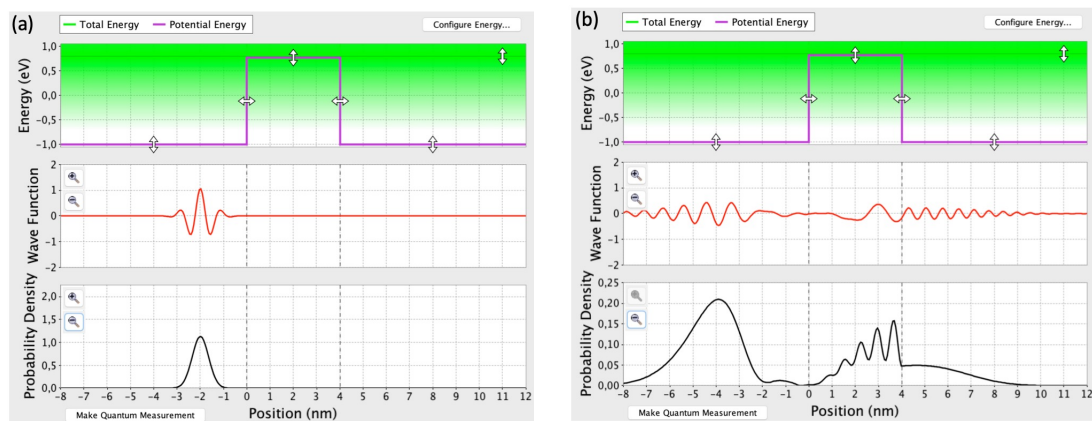
$$\psi(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \sin[k_j(x - v_j t)]. \quad (12.8)$$

Taką kombinację nazywamy paczką falową, którą przedstawiono na rys. 12.6. Zjawisko dudnienia powoduje lokalizację przestrzenną takiej superpozycji. Ponieważ sumę z równania 12.8 wygodnie jest policzyć w notacji zespolonej, funkcja ψ posiada w ogólności część rzeczywistą i urojoną – rys. 12.6 pokazuje tylko część rzeczywistą.

Na przykładzie paczki falowej opisującej ruch cząstek można zademonstrować zadziwiające i nieintuicyjne zachowanie się tych cząstek przy napotkaniu przeszkody w ich ruchu. Elektron przechodzi przez barierę, nawet jeżeli jego energia nie jest wystarczająca z punktu widzenia klasycznego. Zgodnie z prawami fizyki klasycznej piłka lecąca na wysokości $h_1 = 60$ cm nie przejdzie przez gruby mur o wysokości $h_2 = 80$ cm – energia potencjalna piłki w polu grawitacyjnym (mgh_1) jest mniejsza niż energia potencjalna (mgh_2) potrzebna do pokonania muru. Z kolei w świecie mikroskopowym rządzonego prawami fizyki kwantowej elektron analogiczną barierę może pokonać. Symulację komputerową takiego zjawiska¹⁸⁰ pokazuje rys. 12.7. Poprzez barierę potencjału należy rozumieć dowolną przeszkodę w ruchu cząstki, której pokonanie wymaga dodatkowej energii.

¹⁷⁹ <http://astro.dur.ac.uk/done/foundations2A.html> (dostęp 02.03.2022)

¹⁸⁰ Zajrzyj też na stronę dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/kwant1.



Rysunek 12.7. Symulacja zjawiska tunelowania kwantowego przez prostokątną barierę potencjału w dwóch różnych chwilach czasu. (a) Paczka falowa poruszająca się w prawo pada na barierę potencjału o wysokości wyższej niż energia potencjalna cząstki. Pokazana jest tylko część rzeczywista funkcji falowej. (b) Część paczki odbiła się od bariery i porusza się w lewo, druga część tunelowała przez nią i dalej porusza się w prawo. Panel dolny na każdym rysunku przedstawia prawdopodobieństwo znalezienia elektronu wyliczone na podstawie kwadratu funkcji falowej (części rzeczywistej i urojonej) (źródło:Phet.Colorado.edu) ¹⁸¹

Prawdopodobieństwo pokonania bariery zależy od wysokości bariery (V_0) względem energii elektronu (E_0) oraz od szerokości bariery (L):

$$T = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \frac{V_0^2}{E_0(V_0 - E_0)} \sinh^2(\kappa L)}, \quad (12.9)$$

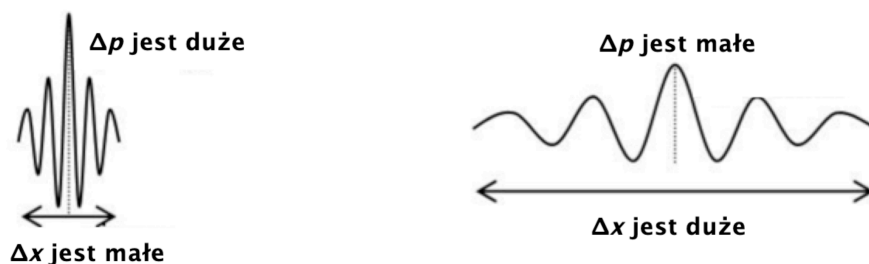
gdzie $\kappa = [2m(V_0 - E_0)/\hbar^2]^{\frac{1}{2}}$. Wyrażenie jest słuszne przy warunku, że energia cząstki jest mniejsza niż wysokość bariery potencjału, tj. $E_0 < V_0$.

Tunelowanie kwantowe o relatywnie dużej transmisji występuje dla barier o grubości kilku nanometrów i jest źródłem ważnych efektów makroskopowych, które znalazły zastosowanie praktyczne. Najbardziej znanym przykładem wykorzystania tego zjawiska jest programowanie bramek logicznych pamięci *flash*. Pamięci *flash* są powszechnie stosowane we wszelkich kartach pamięci, pamięciach USB oraz pamięciach SSD. Tunelowanie leży również u podstaw działania skaningowego mikroskopu tunelowego (STM – *Scanning Tunneling Microscopy*) – pomiar prądu tunelowania pomiędzy igłą mikroskopu a powierzchnią badanego materiału umożliwia obrazowanie pojedynczych atomów. W elektronice półprzewodnikowej tunelowanie kwantowe jest źródłem niepożądanych prądów upływu – nośniki ładunku elektrycznego (elektrony lub dziury) przechodzą przez izolujące obszary w układach scalonych, prowadząc do wzrostu ciepła i spadku mocy układów. Obecność tych prądów determinuje dolną granicę rozmiarów chipów komputerowych. Ponadto kwantowe tunelowanie odpowiedzialne jest za rozpady promieniotwórcze niestabilnych jąder atomowych, za fuzję jądrową we wnętrzach gwiazd oraz za wiele reakcji biochemicznych istotnych dla życia.

¹⁸¹ <https://phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-tunneling> (dostęp 02.03.2022)

12.4. Zasada nieoznaczoności Heisenberga

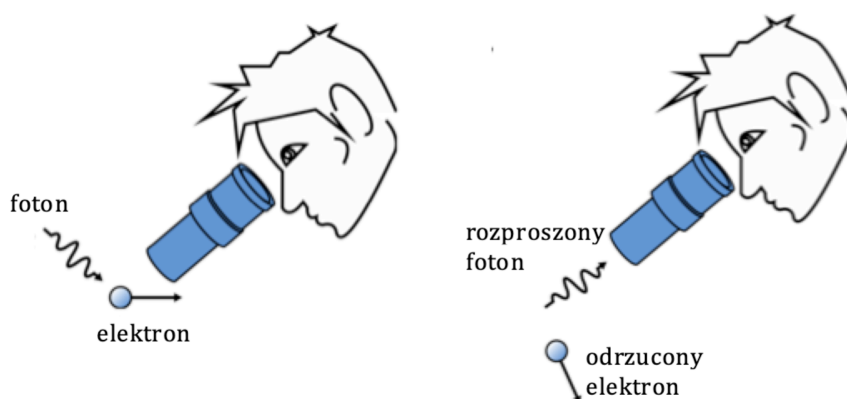
Fakt, że cząstki opisujemy za pomocą paczki falowej, prowadzi do zasady nieoznaczoności Heisenberga¹⁸². Zasada ta jest fundamentalną regułą mechaniki kwantowej, która mówi, że istnieją takie pary wielkości fizycznych, których nie da się jednocześnie zmierzyć z dowolną dokładnością. Każda paczka falowa charakteryzuje się skończoną szerokością Δx (zob. rys. 12.8). Zgodnie z probabilistyczną interpretacją funkcji falowej, cząstkę można znaleźć wszędzie w obrębie paczki falowej opisującej tę cząstkę. Innymi słowy szerokość paczki Δx jest miarą niepewności położenia cząstki.



Rysunek 12.8. Im węższa (bardziej zlokalizowana) jest paczka falowa (Δx), tym większy jest zakres wartości pędu (Δp), jakie może przyjmować cząstka i na odwrót

Można pokazać (zobacz dowolny podręcznik do mechaniki kwantowej), że im szersza jest rozpiętość przestrzenna paczki falowej Δx , tym węższa jest niepewność, z jaką określona jest liczba falowa ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$): $\Delta x \sim \frac{1}{\Delta k}$. Z relacji de Broglie'a (12.2) wynika, że liczba falowa wiąże się bezpośrednio z pędem cząstki: $p = \hbar k$. To bezpośrednio prowadzi do zasady nieoznaczoności dla pędu i położenia:

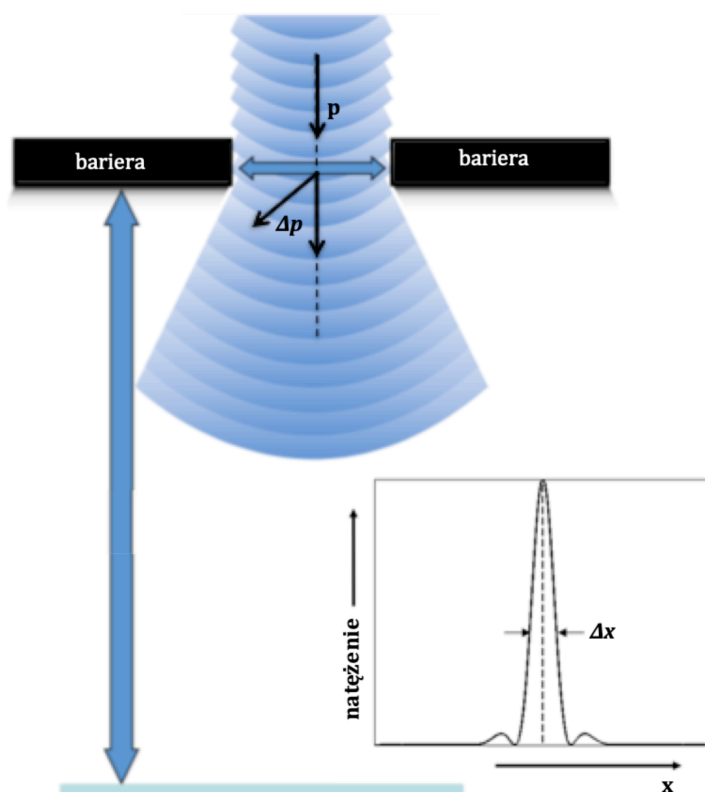
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (12.10)$$



Rysunek 12.9. Pomiar położenia i pędu elektronu za pomocą fotonu. Foton rozprasza się na elektronie w kierunku obserwatora, dokonując jednocześnie zaburzenia prędkości badanej cząstki

¹⁸² Zapoznaj się ze słowami samego Heisenberga opisującego moment odkrycia zasady nieoznaczoności: dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/heisenberg (dostęp 02.03.2022).

Fakt, że prawa strona nierówności 12.10 jest różna od zera, oznacza, że niemożliwy jest jednoczesny pomiar obydwu wielkości z dowolną precyzją. Im więcej informacji uzyskujemy o jednej z tych wielkości, tym mniej wiemy o drugiej. Reguła ta jest konsekwencją faktu, że pomiar cząstki mikroskopowej możliwy jest tylko poprzez wejście z nią w interakcję, która znacząco zaburza stan cząstki. Innymi słowy, sam akt pomiaru jednej wielkości prowadzi do wzrostu niepewności innej wielkości. Jako przykład możemy sobie wyobrazić jednoczesny pomiar położenia i pędu elektronu za pomocą fotonu (zob. rys. 12.9). Precyzyjny pomiar pozycji cząstki wymaga zastosowania fotonu o bardzo krótkiej długości fali. Jednak zgodnie z relacją Plancka (równanie 11.2): $E = \frac{hc}{\lambda}$, im mniejsza jest długość fali, tym większa jest energia fotonu. W konsekwencji krótkofalowy foton spowoduje duży odrzut elektronu znacząco zmieniając jego prędkość (kierunek i wartość). Chcąc zwiększyć precyzję pomiaru prędkości (pędu), trzeba zastosować fotony o większej długości fali tracąc tym samym na precyzji położenia.



Rysunek 12.10. Dyfrakcję światła na pojedynczej szczelinie można jakościowo wytłumaczyć za pomocą zasady nieoznaczoności Heisenberga – im węższa szczelina (precyzyjniej określone położenie fotonów), tym szerszy centralny pik dyfrakcyjny (rozmycie kierunku pędu)

Innym często przytaczanym przykładem na słusność relacji (12.10) jest zjawisko dyfrakcji światła na pojedynczej szczelinie. Wiadomo, że szerokość centralnego piku dyfrakcyjnego rośnie wraz ze zmniejszaniem szerokości szczeliny. Ten nieintuicyjny efekt można wyjaśnić falową naturą światła. Niemniej jednak można się nim również posłużyć, aby jakościowo przedstawić zasadę nieoznaczoności Heisenberga, traktując światło jako zbiór fotonów. Im węższa jest szczelina, tym precyzyjniej określone jest położenie fotonów w obrębie szczeliny (Δx). W konsekwencji, zgodnie z zasadą Heisenberga, ro-

śnie nieoznaczoność pędu tych cząstek Δp (w stosunku do pierwotnego kierunku ruchu), czyli im węższa szczelina, tym szerszy pik dyfrakcyjny w związku ze wzrostem nieoznaczoności kierunku ruchu fotonów (zob. rys.12.10).

Okazuje się, że podobny wzajemny związek jak w równaniu (12.8) istnieje między niedokładnością określenia energii ΔE i niedokładnością określenia czasu Δt :

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (12.11)$$

Jako przykład można podać pomiar widma energetycznego promieniowania emitowanego przez atomy wzbudzone do wyższych stanów elektronowych. Elektrony w stanach wzbudzonych wracają do stanu podstawowego, emitując fotony po pewnym charakterystycznym i precyzyjnie określonym czasie życia. W rezultacie energie wyemitowanych fotonów (a więc również energie wzbudzonych stanów atomowych) określone są z niepewnością odwrotnie proporcjonalną do czasu życia elektronów w stanach wzbudzonych. Efekt ten manifestuje się nieznacznym poszerzeniem obserwowalnych linii widmowych emitowanych przez atom (należy dodać, że istnieją również inne efekty, które mogą poszerzyć linie widmowe).

13

Podzielić niepodzielny

13.1. Promieniowanie α , β i γ – zarys historyczny

Pomysł, że materia składa się z mikroskopijnych składników, których nie da się w nieskończoność dzielić na mniejsze części, był znany już w starożytności. Za twórcę tej koncepcji powszechnie uważa się Demokryta z Abdery¹⁸³, który wprowadził pojęcie *atomu* – cząstki, której nie da się przeciąć ani podzielić. Postulat istnienia takiej cząstki nie opierał się jednak na żadnych danych empirycznych, a jedynie stanowił jedną z filozoficznych koncepcji natury rzeczywistości. Doświadczalne dowody na słuszność atomistycznej budowy materii pojawiły się w wyniku licznych badań prowadzonych w XVIII i XIX wieku. W 1789 roku Francuz Antoine Lavoisier¹⁸⁴ zdefiniował *pierwiastek chemiczny* jako podstawową substancję, która nie może już być rozdzielona metodami chemicznymi. W 1803 roku Anglik John Dalton¹⁸⁵ wysunął wniosek, że każdy pierwiastek składa się z atomów jednego, unikalnego typu i że te atomy mogą się łączyć, tworząc związki chemiczne. Postawienie tych hipotez uczyniło Daltona twórcą współczesnej teorii atomów. W 1827 roku botanik brytyjski Robert Brown¹⁸⁶ odkrył zjawisko spontanicznego chaotycznego ruchu pyłków kwiatowych zawieszonych w wodzie. Zjawisko to zostało potem nazwane ruchami Browna¹⁸⁷ i zasugerowano, że za ich obecność odpowiedzialne są termiczne ruchy cząsteczek wody (1877, Joseph Delsaulx¹⁸⁸) – prawdziwe

¹⁸³ <https://pl.Wikipedia.org/wiki/Demokryt> (dostęp 02.03.2022)

¹⁸⁴ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Antoine_Lavoisier (dostęp 02.03.2022)

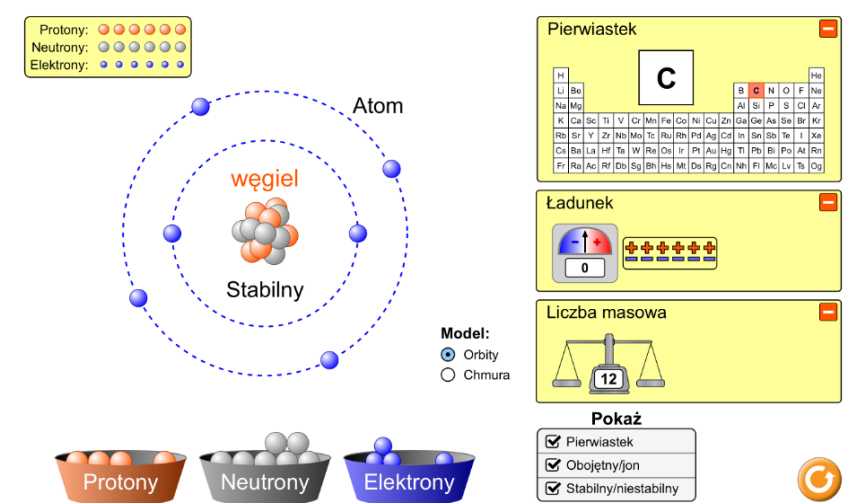
¹⁸⁵ https://pl.Wikipedia.org/wiki/John_Dalton (dostęp 02.03.2022)

¹⁸⁶ [https://pl.Wikipedia.org/wiki/Robert_Brown_\(botanik\)](https://pl.Wikipedia.org/wiki/Robert_Brown_(botanik)) (dostęp 02.03.2022)

¹⁸⁷ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Ruchy_Browna (dostęp 02.03.2022)

¹⁸⁸ J. Delsaulx, *Monthly Microscopical Journal* 18, (1877).

ruchy Browna możesz zobaczyć na stronie dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/1 lub ich symulację na stronie www.vascak.cz¹⁸⁹. Ostateczną analizę matematyczną ruchów Browna przedstawił Albert Einstein w 1905 roku, na podstawie której Jean Baptiste Perrin¹⁹⁰ wyznaczył po raz pierwszy eksperymentalnie masy i „rozmiary” atomów (1908). Wcześniej w 1869 Rosjanin Dmitrij Mendelejew opublikował swój układ okresowy pierwiastków, którego współczesna wersja przedstawiona jest na rys.1.4 (rozdział 1). Układ przedstawia wizualnie prawo okresowości głoszące, że właściwości chemiczne pierwiastków powtarzają się okresowo, gdy uporządkuje się te pierwiastki zgodnie z ich masami. Warto zapoznać się z interaktywną symulacją układu okresowego, która dostępna jest na stronach phet.colorado.edu¹⁹¹ i pozwala poznać budowę atomów każdego pierwiastka, patrz rys. 13.1, a tym samym lepiej zrozumieć prawo okresowości.



Rysunek 13.1. Interaktywna symulacja układu okresowego pierwiastków chemicznych (źródło: phet.colorado.edu)¹⁹¹

Niemal do końca XIX wieku wyniki eksperymentów nie wskazywały, że atom posiada strukturę wewnętrzną. Przełom nastąpił w 1897 roku, kiedy to J. J. Thomson, badając promienie katodowe, odkrył elektrony i doszedł do wniosku, że znajdują się one w każdym atomie. W 1909 roku Ernest Rutherford ze współpracownikami, bombardując złotą folię cząstkami alfa, odkryli, że niewielka część cząstek alfa jest odbijana. Na podstawie tych wyników Rutherford stworzył nowy model atomu, w którym dodatni ładunek i większość masy atomu są skupione w niewielkim jądrze w jego centrum, a ujemnie naładowane elektrony krążą wokół jądra. Odkrycie to zapoczątkowało fizykę jądrową i doprowadziło do odkrycia protonu jako elementarnego składnika jądra. Szczegółowy opis eksperymentów Thomsona i Rutherforda znajduje się w rozdziale 11.4.

W tym samym czasie, w którym Thomson dokonał odkrycia elektronu, francuski profesor Henri Becquerel¹⁹² odkrył przypadkowo zjawisko naturalnej (spontanicznej) promieniotwórczości (1896). Zauważył, że klisza fotograficzna leżąca w pobliżu soli

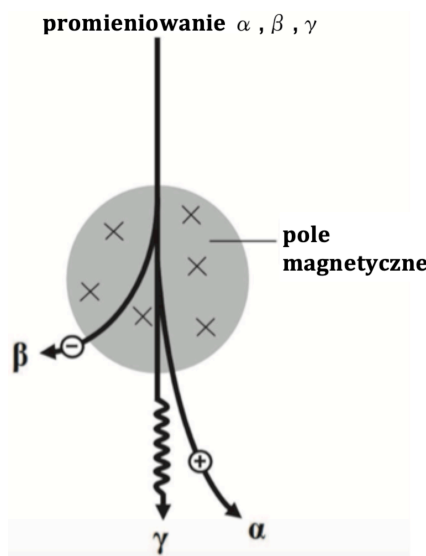
¹⁸⁹ https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=mf_brownuv_pohyb&l=pl

¹⁹⁰ https://en.Wikipedia.org/wiki/Jean_Baptiste_Perrin (dostęp 02.03.2022)

¹⁹¹ https://phet.colorado.edu/sims/html/build-an-atom/latest/build-an-atom_pl.html

¹⁹² https://pl.Wikipedia.org/wiki/Henri_Becquerel (dostęp 02.03.2022)

uranu uległa częściowemu zaczernieniu. Zaczernienie to nie było spowodowane światłem, jako że papier fotograficzny był od światła osłonięty. Poprawnie zinterpretował on obserwację jako „nowy” rodzaj promieniotwórczości generowanej w soli uranowej. Jednak po kilku latach prac nad nowymi promieniami, stwierdził, że wyniki są mało obiecujące i dalsze prace zlecił swojej doktorantce, Polce Marii Skłodowskiej-Curie. Maria, podejmując prace naukowe nad promieniowaniem odkrytym przez Becquerela, zastosowała po raz pierwszy bardzo czuły miernik małych prądów, skonstruowany przez jej męża Pierre’a Curie – pierwowzór współczesnego licznika Geigera–Müllera do detekcji promieniowania jonizującego (współczesną wersję licznika można obejrzeć na stronie: dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/18 – detekcja promieniowania beta emitowanego przez sól potasową). Na podstawie swoich pomiarów stwierdziła, że natężenie promieni zależy od zawartości uranu w próbce i jest do niej proporcjonalne. Zauważyła również, że emisja promieniowania niektórych minerałów zawierających uran (np. tzw. blendy smolistej¹⁹³ lub uranitu¹⁹⁴) jest znacznie silniejsza niż wynikałoby to z zawartości uranu w ich składzie. Wysunęła więc hipotezę, że w skład minerałów wchodzi nowe, nieznane do tej pory pierwiastki. Wspólnie z mężem opracowała metodę ekstrakcji tych pierwiastków i 18 lipca 1898 przedstawili dzieło naukowe, w którym donosili o odkryciu polonu (symbol Po), pierwiastka nazwanego na cześć Polski. Pięć miesięcy później 26 grudnia 1898 donieśli o odkryciu radu (symbol Ra).



Rysunek 13.2. Promieniowanie α , β , γ można rozdzielić, używając pola magnetycznego. Cząstki α i β mają przeciwne ładunki – odchylane są w przeciwne strony, promienie γ nie przenoszą ładunku – nie są odchylane

Późniejsze badania nad naturą promieniowania spontanicznego doprowadziły do odkrycia, że promieniowanie substancji radioaktywnych składa się z trzech grup promieni, które za Rutherfordem nazwano literami α , β i γ . W 1899 roku Rutherford przeprowadził serię prostych eksperymentów, które pozwoliły mu rozróżnić promieniowa-

¹⁹³ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Blendy_uranowe (dostęp o2.03.2022)

¹⁹⁴ <https://pl.Wikipedia.org/wiki/Uraninit> (dostęp 02.03.2022)

nie α (cząstki alfa) i promieniowanie β (cząstki beta). W swoich badaniach użył radioaktywnego uranu i ustalił, że promienie wytwarzane przez to źródło mają różną głębokość penetracji w materiałach oraz zachowują się inaczej w polu magnetycznym (czyli mają różny znak ładunku elektrycznego). Rys. 13.2 przedstawia zachowanie się trzech rodzajów promieniowania w zewnętrznym polu magnetycznym. Jeden typ promieniowania, który miał krótką penetrację (został zatrzymany przez papier) i ładunek dodatni, Rutherford nazwał promieniami α . Drugi typ był bardziej przenikliwy (zdolny do przejścia przez papier, ale nie przez metal) i miał ładunek ujemny, ten rodzaj promieniowania Rutherford nazywał β . Było to promieniowanie, które po raz pierwszy zostało wykryte przez Becquerela z soli uranowej. W 1900 roku francuski naukowiec Paul Villard¹⁹⁵, badając właściwości emisyjne radu odkrył trzeci rodzaj promieniowania, które okazało się być neutralne elektrycznie i znacznie bardziej przenikliwe niż α i β . Promieniowanie to zostało później nazwane przez Rutherforda promieniami gamma (γ). Szybko zauważono, że promieniowanie to jest podobne w swojej naturze do promieni rentgenowskich (promieni X) odkrytych w 1895 roku przez niemieckiego naukowca Wilhelm Röntgena¹⁹⁶. O podobnym charakterze obydwu promieni, γ i X , wspomina Maria Skłodowska-Curie w swojej pracy doktorskiej z 1903 roku¹⁹⁷. Symulację zachowania trzech typów promieniowania w polu magnetycznym oraz ich przenikliwości można znaleźć na stronie: www.vascak.cz¹⁹⁸.

Henri Becquerel udowodnił, że promienie β są szybkimi elektronami, podczas gdy Rutherford wykazał w 1909 roku, że cząstki α to zjonizowany hel (jądra helu). Późniejsze badania dowiodły ostatecznie, że promieniowanie γ (oraz promienie X) to wysokoenergetyczne (czyli krótkofalowe) fotony, które różnią się od światła widzialnego tylko długością fali. Wyjaśnienie przyczyn emisji promieniowania α , β i γ przez atomy niektórych pierwiastki wymaga zrozumienia budowy i właściwości jądra atomowego.

13.2. Budowa i właściwości jądra atomowego

Jądro atomowe skoncentrowane jest w bardzo małym obszarze ($\sim 10^{-15}\text{m}$) w środku atomu. Aby atom pozostawał elektrycznie obojętny, liczba ujemnie naładowanych elektronów musi być równa liczbie cząstek dodatnich w jądrze – protonów. Masa protonu jest 1837 razy większa niż masa elektronu – innymi słowy, to masa jądra determinuje masę całego atomu. Kolejne pierwiastki w tablicy Mendelejewa różnią się liczbą elektronów i protonów: atom wodoru ma jeden elektron i jeden proton, hel – dwa elektrony i protony, lit – trzy elektrony i protony itd. Okazuje się jednak, że masy tych atomów nie rosną jak kolejne liczby naturalne. Atomy o coraz większej liczbie elektronów charakteryzują się na ogół masą znacznie większą niżby to wynikało z prostej sumy mas protonów. Brakującą masę wnoszą cząstki o masie bardzo zbliżonej do masy protonu, ale nieposiadające ładunku. Cząstki te nazywamy *neutronami*. O ich istnieniu wiedziano od początku XX wieku, ale zostały odkryte doświadczalnie dopiero w 1931 roku przez

¹⁹⁵ https://en.Wikipedia.org/wiki/Paul_Ulrich_Villard (dostęp 02.03.2022)

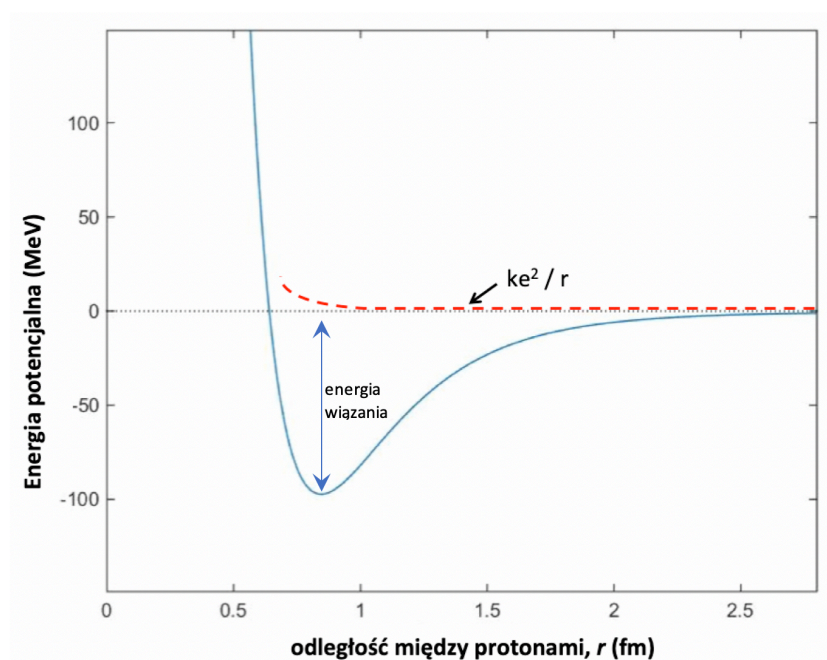
¹⁹⁶ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Röntgen (dostęp 02.03.2022)

¹⁹⁷ <https://wolnelektury.pl/media/book/pdf/sklodowska-badanie-cial-radioaktywnych.pdf>

¹⁹⁸ https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=jadro_zareni&l=pl

Angilka James Chadwicka¹⁹⁹. Składnikami atomu są więc ujemne elektrony krążące wokół jądra oraz dodatnie protony i neutralne elektrycznie neutrony skupione w jądrze.

Protony i neutrony nazywamy nukleonami. Liczba atomowa Z , określa liczbę protonów w jądrze, a liczba masowa A łączną liczbę protonów i neutronów. Atom pierwiastka X o liczbie atomowej Z i liczbie masowej A oznaczamy symbolem: A_ZX . Atomy o różnej liczbie neutronów w jądrze ($A - Z$), ale takiej samej liczbie protonów Z , nazywamy *izotopami*. Listę stabilnych izotopów wszystkich znanych pierwiastków można znaleźć na stronach Wikipedii²⁰⁰. Masa atomów w układzie okresowym podana jest w jednostkach masy atomowej, gdzie za jednostkę przyjmuje się 1/12 masy atomowej izotopu węgla ${}^{12}_6C$. Występowanie izotopów jest przyczyną, że masy atomowe pierwiastków podane w tablicy Mendelejewa nie są liczbami całkowitymi, lecz wartością uśrednioną po wszystkich znanych izotopach.



Rysunek 13.3. Energia potencjalna oddziaływania silnego proton – proton (linia ciągła) w porównaniu z energią ich odpychania elektrostycznego (linia przerywana na podstawie R.V. Reid²⁰¹). Wartość bezwzględna minimum energii potencjalnej oddziaływania silnego określa wartość energii wiązania

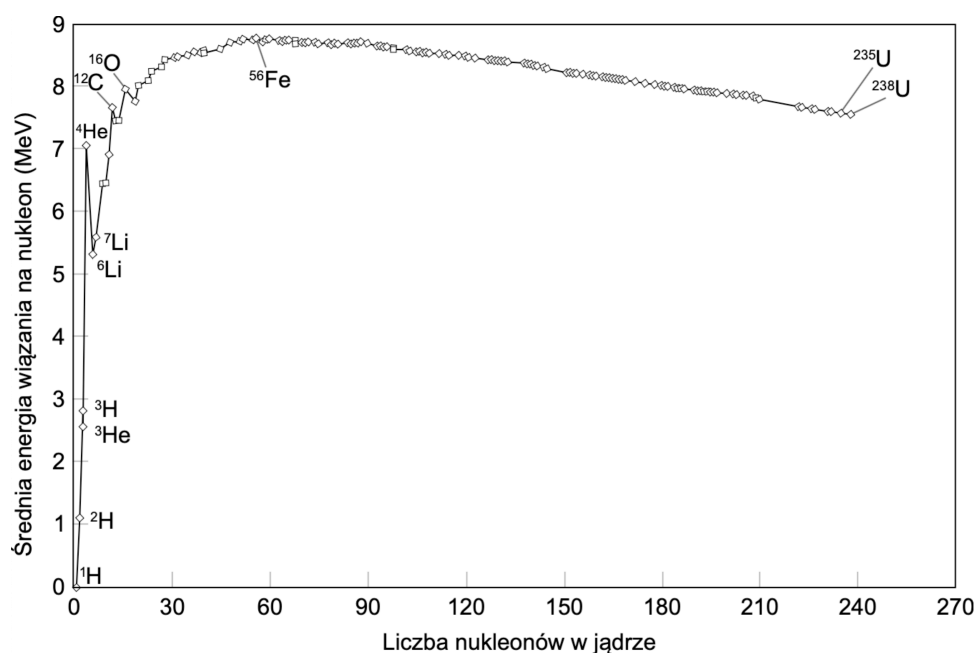
Oddziaływania grawitacyjne oraz elektromagnetyczne nie pozwalają na wyjaśnienie struktury jądra atomowego. Aby wyjaśnić, co tak silnie wiąże nukleony w jądrach atomowych, trzeba wprowadzić nowe oddziaływanie. Ta siła wiążąca musi być większa niż siła odpychania elektrostycznego występująca pomiędzy protonami. Określamy ją mianem siły jądrowej lub oddziaływania silnego. Gdy porównamy masy składników jądra i masę jądra atomowego okazuje się, że masa jądra jest mniejsza niż suma mas jego

¹⁹⁹ https://pl.Wikipedia.org/wiki/James_Chadwick (dostęp 02.03.2022)

²⁰⁰ https://en.Wikipedia.org/wiki/Category:Lists_of_isotopes_by_element (dostęp 02.03.2022)

²⁰¹ R.V. Reid, *Annals of Physics* 50, 411–448 (1968)

składników. Zjawisko to nazywamy niedoborem masy lub defektem masy. Ta różnica wynika stąd, że podczas tworzenia się jądra atomu część tej masy zostaje zamieniona w energię wiązania (zgodnie ze słynnym wzorem Einsteina $E = mc^2$ wyrażającym równoważność masy i energii), która utrzymuje składniki jądra razem. Jest ona dużo większa niż oddziaływanie elektrostatyczne między protonami, więc przewyższa ona siłę odpychania się ładunków dodatnich (zob. rys. 13.3). Jej zasięg jest jednak tak mały, że nukleony będące w jednym jądrze, lecz niesąsiadujące ze sobą, nie oddziałują ze sobą w sposób silny.



Rysunek 13.4. Energia wiązania na jeden nukleon w zależności od liczby nukleonów w jądrze (źródło: Wikipedia ²⁰²)

Wartość przyciągającej siły jądrowej utrzymującej jądro razem jest wprost proporcjonalna do liczby nukleonów (czyli do liczby masowej A), ale całkowita siła elektromagnetyczna usiłująca rozbić jądro jest w przybliżeniu proporcjonalna do kwadratu jego liczby atomowej. Innymi słowy, dla jąder złożonych z dużej liczby nukleonów odpychające oddziaływanie elektrostatyczne może przewyżżyć przyciągające siły jądrowe, prowadząc do rozpadu jądra na mniejsze fragmenty. Wykres średniej energii wiązania przypadającej na jeden nukleon w funkcji liczby masowej jądra przedstawiony jest na rys.13.4. Średnia energia wiązania szybko narasta dla małych liczb masowych, a stopniowo opada dla dużych. Wynika stąd, że dla pierwiastków lekkich (o małej liczbie masowej) synteze nukleonów jąder towarzyszy wydzielanie się energii – im większa energia wiązania, tym niższa jest całkowita energia potencjalna układu. Zaś w przypadku pierwiastków ciężkich (o dużej liczbie masowej) wydzielanie energii towarzyszy rozszczepianiu, czyli podziałowi jąder. Z tego również powodu jądra pierwiastków lekkich charakteryzują się dużą trwałością, zaś jądra pierwiastków ciężkich mają tendencję do rozpadu.

²⁰² https://pl.Wikipedia.org/wiki/Energia_wiazania (dostęp 02.03.2023)

Reakcje jądrowe łączenia (fuzji) jąder dążą do uzyskania wyraźnego wzrostu energii wiązania. Relatywnie dużą energią wiązania wśród pierwiastków lekkich charakteryzuje się jądro ${}^4_2\text{He}$, czyli cząstka α , która produkowana jest w obfitych ilościach podczas fuzji protonów i neutronów w Słońcu. W przypadku reakcji rozpadu (np. uranu) energia wiązania jądra jest mniejsza niż energia wiązania produktów reakcji. Z wykresu 13.4 wynika również, że największą energią wiązania na nukleon ma jądro atomu żelaza. Jest to przyczyną względnie dużej obfitości żelaza we Wszechświecie.

13.3. Rozpady promieniotwórcze

Protony i neutrony są uwięzione w jądrach przez siły wzajemnego oddziaływania, coś w rodzaju bariery, która ogranicza ich wydostanie się na zewnątrz. Mechanika kwantowa mówi jednak, że nawet jeżeli cząstka nie ma energii dostatecznie dużej, aby przejść ponad taką barierą, może ona przeniknąć przez tę barierę (zob. rozdział 12.3). Zjawisko takie nazywamy tunelowaniem kwantowym, a prawdopodobieństwo przeniknięcia przez barierę zależy od jej szerokości, wysokości oraz energii cząstki padającej (zob. równanie 12.9). Rozpady promieniotwórcze to zjawisko kwantowego tunelowania stabilnych energetycznie fragmentów jądra przez barierę potencjału. Innymi słowy, rozpadami promieniotwórczymi rządzą prawa prawdopodobieństwa. Dla każdego izotopu definiujemy „czas połowicznego rozpadu”. Jest to czas, po którym połowa z początkowej ilości izotopu ulegnie rozpadowi. Jeżeli okres połowicznego rozpadu uranu ${}^{238}_{92}\text{U}$ wynosi 4,2 mld lat, to po tym właśnie czasie z kilograma uranu pozostanie jedynie pół kilograma wyjściowego materiału. Rys. 13.5 przedstawia czasy połowicznego rozpadu większości znanych izotopów. Rozpiętość czasów połowicznego zaniku jest bardzo szeroka: od bardzo niestabilnych jąder o czasach rzędu 10^{-8}s do jąder stabilnych osiągających czasy większe niż 10^{14} lat.

Rozpady α

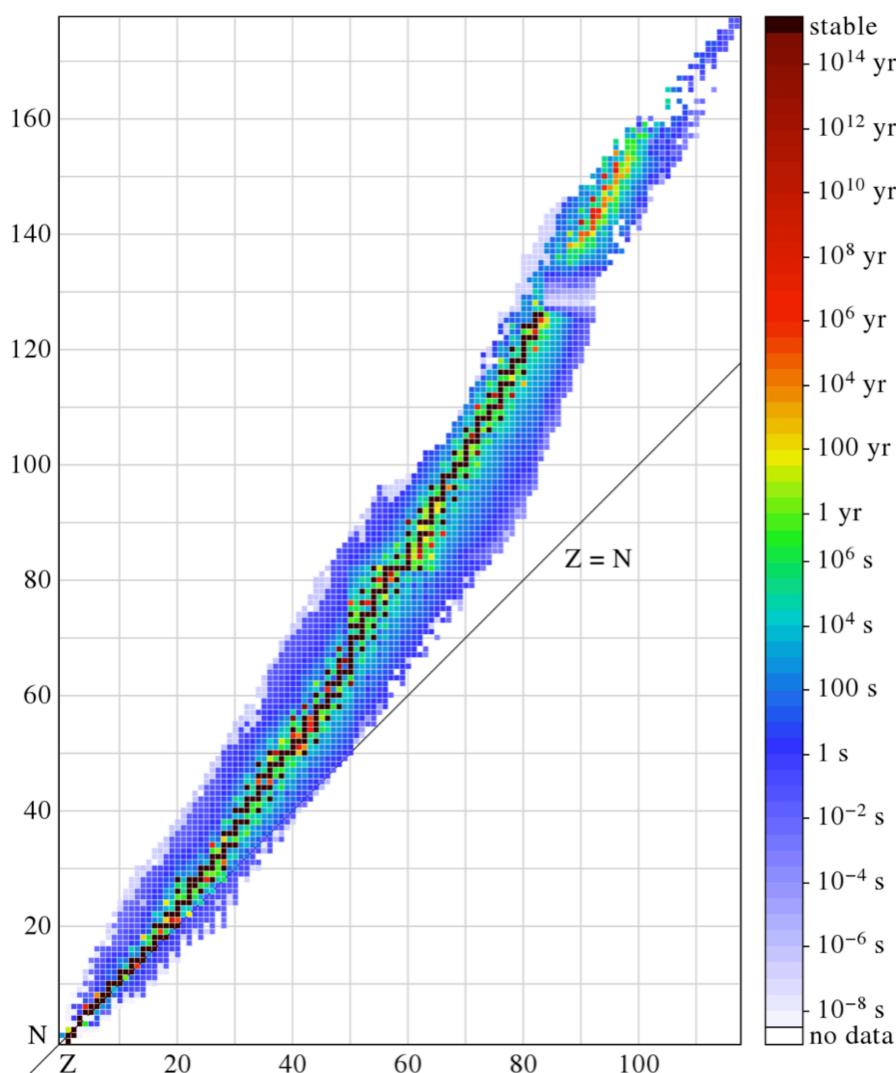
Rozpady alfa to najczęstszy typ *naturalnych* rozpadów promieniotwórczych. Dzisiaj, metodami fizyki jądrowej, potrafimy wytworzyć wiele sztucznych izotopów, ale Maria Skłodowska-Curie obserwowała jedynie *naturalne* rozpady jądrowe w ciężkich pierwiastkach – uranie i torze. Te ciężkie pierwiastki rozpadają się, emitując dodatnio naładowaną cząstkę, nazwaną przez Ernesta Rutherforda *alfa*, która złożona jest z dwóch protonów i dwóch neutronów. Taki układ charakteryzuje się relatywnie dużą energią wiązania wśród pierwiastków lekkich (zob. rys. 13.4). Schemat rozpadów α ma następującą postać:



W rozpadach α liczba masowa A zmniejsza się o 4, a liczba atomowa Z zmniejsza się o 2. W konsekwencji w wyniku rozpadu powstaje jądro pierwiastka leżącego o dwa miejsca na lewo w tablicy Mendelejewa. Przykładem rozkładu α jest rozpad polonu ${}^{210}_{84}\text{Po}$:



²⁰³ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Tabela_nuklidów (dostęp 02.03.2022)



Rysunek 13.5. Diagram ukazujący czas połowicznego rozpadu różnych jąder w zależności od liczby protonów Z i neutronów N (źródło: Wikipedia ²⁰³)

W czasie reakcji wydziela się energia 5.4 MeV, która unoszona jest przez wyrzuconą cząstkę ${}^4_2\text{He}$. Czas połowicznego zaniku polonu wynosi 138 dni, a moc wydzielana w jednym gramie to 140 W – z tego powodu polon jest używany jako źródło energii w bateriach termoelektrycznych dla satelitów. Promieniowanie α jest mało przenikliwe – naskórek, kartka papieru lub kilka centymetrów powietrza potrafią całkowicie je pochłoniąć. Symulację rozpadu α można znaleźć na stronach phet.colorado.edu ²⁰⁴.

Rozpady β

Promieniowanie β to rozpad jądra, któremu towarzyszy emisja elektronów (nazwanych pierwotnie cząstkami β). O ile w rozpadach α wyrzucane cząstki istnieją wewnątrz jądra, to elektrony muszą powstać z rozpadu neutronu, który przemieniany jest na proton. Rozpady β zachodzą więc na ogół w jądrach, w których jest względny nadmiar neutronów. W latach 30. XX wieku zauważono pewną trudność w wynikach doświadczeń nad rozpadami β . O ile cząstki α mają dobrze określony zasięg w różnych

²⁰⁴ <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/alpha-decay> (dostęp 02.03.2022))

materiałach, to cząstki β (czyli elektrony) zatrzymują się na różnych głębokościach: od zera do pewnej głębokości maksymalnej. Enrico Fermi, włoski fizyk jądrowy, który w czasie II wojny światowej był kierownikiem naukowym prac nad bombą atomową w USA, wydedukował o istnieniu dodatkowej cząstki w produktach rozpadu. Nazwał tę cząstkę małym neutronem, po włosku *neutrino*. Zamiana neutronu na proton przebiega według następującego schematu (tzw. rozpad β^-):

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (13.3)$$

gdzie $\bar{\nu}_e$ to antyneutrino, które różni się od neutrina jedynie kierunkiem spinu. Powyższa przemiana zachodzi w sposób spontaniczny i rządzi ją tzw. oddziaływania słabe, które obok oddziaływań silnych, elektromagnetycznych i grawitacyjnych, należą do czterech fundamentalnych oddziaływań w przyrodzie. Oddziaływania słabe opisują siły pomiędzy kwarkami – cząstkami elementarnymi, z których złożone są protony i neutrony (zob. rozdział 14).

Sam proces rozpadu β jądra można przedstawić następująco:

$${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{X} + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (13.4)$$

W rozpadach β liczba masowa nie zmienia się, a powstaje jądro pierwiastka leżącego na prawo w tablicy Mendelejewa. Przykładem rozpadu β jest rozpad izotopu potasu ${}^{40}_{19}\text{K}$:

$${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (13.5)$$

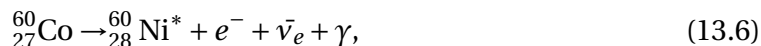
Czas połowicznego zaniku ${}^{40}_{19}\text{K}$ jest tylko czterokrotnie mniejszy niż wiek Ziemi, stąd ${}^{40}_{19}\text{K}$ jest, obok uranu i ołowiu, jednym z najlepszych zegarów dla geologów. Cząstki β (czyli elektrony), przy tej samej energii co cząstki α , mają większą prędkość. Ich zasięg w powietrzu to kilkadziesiąt centymetrów, a prawie całkowicie zatrzymuje je aluminiowa blacha o grubości 1 mm. Symulację rozpadu β można znaleźć na stronach phet.colorado.edu²⁰⁵.

Promieniowanie γ

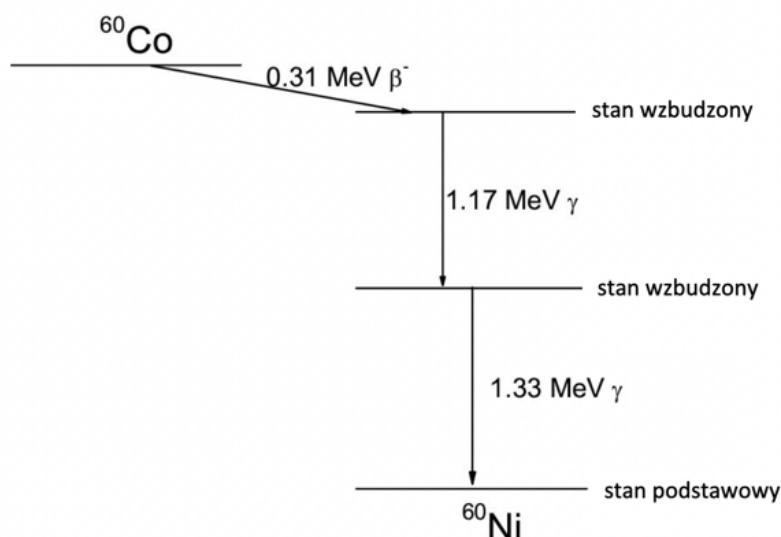
Promieniowanie γ wiąże się z przebudową struktury jądra, które zachodzi na skutek takich procesów, jak wychwyt neutronów, rozszczepienie jądrowe lub fuzja jądrowa. Promieniowanie to często towarzyszy również wymienionym wcześniej rozpadom α i β . Podobnie jak w przypadku atomów, przebudowa struktury jądra związana jest z emisją lub absorpcją kwantu promieniowania elektromagnetycznego między dozwolonymi poziomami energetycznymi. Stany energetyczne jądra podobie jak atomu są skwantowane. W tym przypadku energie kwantów są jednak znacznie wyższe niż w przypadku przeskoków elektronów między orbitami w atomie – emitowane lub absorbowane promieniowanie γ ma energię rzędu megaelektronowoltów. Przykładem przemiany jądrowej, której towarzyszy produkcja promieni γ , jest rozpad izotopu ${}^{60}\text{Co}$,

²⁰⁵ <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/beta-decay> (dostęp 02.03.2022)

który przebiega dwustopniowo:



Schemat tego rozpadu pokazano również na rys. 13.6. W pierwszej kolejności zachodzi rozpad β , któremu natychmiast towarzyszy emisja kwantu gamma o energii 1,17 MeV. W rezultacie powstaje jądro ${}^{60}_{28}\text{Ni}$, które znajduje się w stanie wzbudzonym. Jądro to, przechodząc do stanu podstawowego (czyli najbardziej korzystnego energetycznie), wypromieniowuje nadmiar energii w postaci kwantu γ 1,33 MeV. W odróżnieniu od cząstek α i β , promieniowanie γ jest bardzo przenikliwe. Dla zatrzymania cząstki α o energii 1 MeV wystarczy kartka papieru, elektronów o tej energii – blacha Al o grubości 1 mm. Osłabienie o połowę promieniowania γ o tej energii wymaga ołowianej cegły o grubości 5 cm! Promieniowanie γ jest jednocześnie bardzo energetyczne – to ono czyni główne spustoszenie w organizmie człowieka, powodując wiele przypadków nowotworów.



Rysunek 13.6. Schemat rozpadu β^- jądra ${}^{60}_{27}\text{Co}$. Procesowi towarzyszy emisja promieniowania o dużej energii kwantów (czyli promieniowanie γ)

13.4. Rozszczepienie jądra atomowego

Zjawisko rozszczepienia jądra atomowego odkryli w 1938 roku niemieccy naukowcy Otto Hahn²⁰⁶ i Fritz Straßmann²⁰⁷. Zauważyli, że jądro uranu bombardowane neutronami dzieli się na dwa nierówne jądra średniej wielkości. W 1939 roku Lise Meitner²⁰⁸ wraz ze swoim siostrzeńcem Otto Robertem Frischem²⁰⁹ opublikowali artykuł *Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction* (Nature, 143, 239–240),

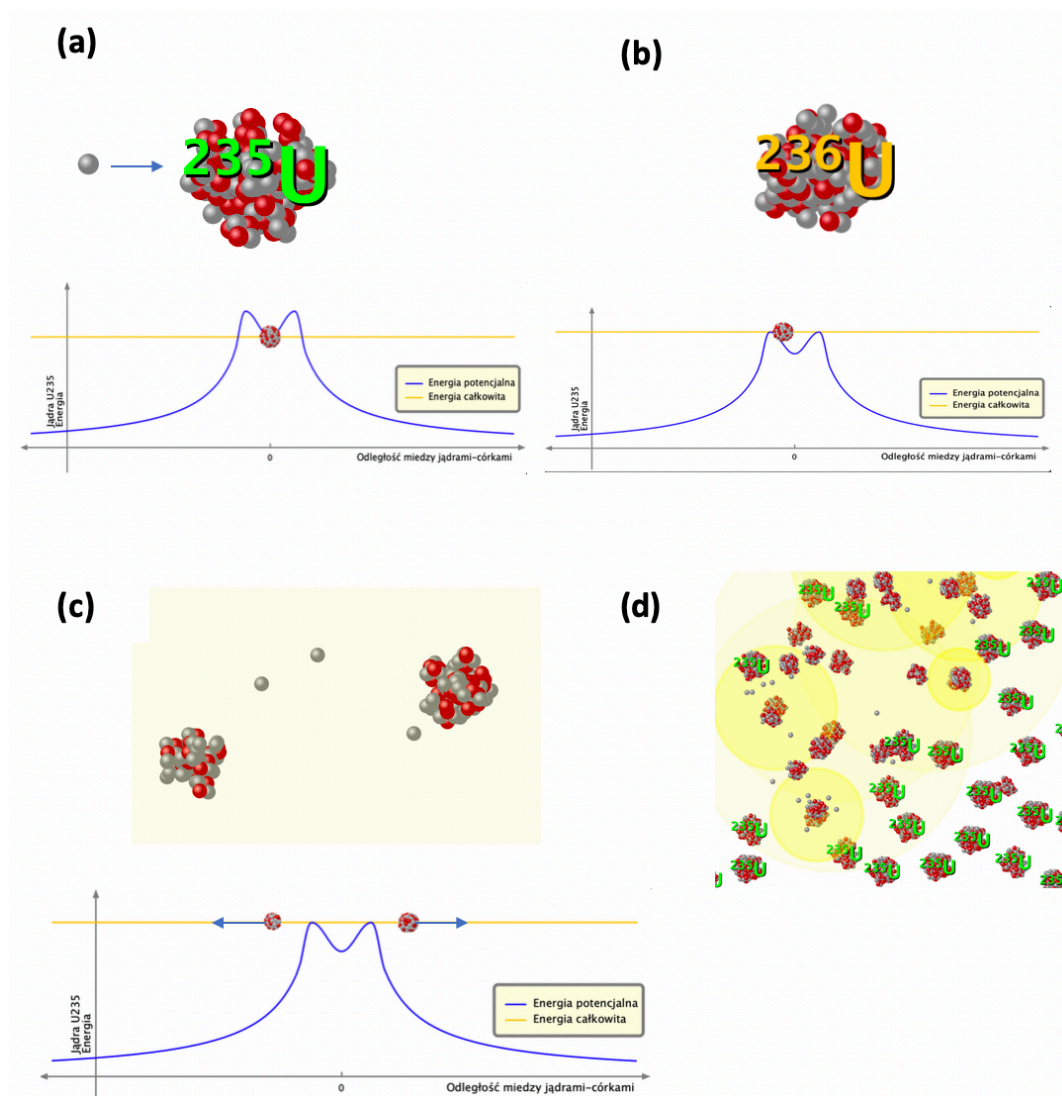
²⁰⁶ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Otto_Hahn (dostęp 02.03.2022)

²⁰⁷ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Fritz_Straßmann (dostęp 02.03.2022)

²⁰⁸ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Lise_Meitner (dostęp 02.03.2022)

²⁰⁹ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Otto_Frisch (dostęp 02.03.2022)

wyjaśniając w nim podstawy teoretyczne zjawiska rozszczepienia jądra atomowego. W późniejszym czasie stwierdzono, że istnieje kilka izotopów uranu i plutonu, które bardzo łatwo ulegają rozszczepieniu, jeśli oddziałują z neutronami. Izotopy te osiągają stan bardziej korzystny energetycznie po rozszczepieniu, innymi słowy energia uwalniana w czasie reakcji jest większa niż energia potrzebna do jej wywołania.



Rysunek 13.7. Rozszczepienie jądra uranu ^{235}U : (a) neutron zderza się ze stabilnym jądrem i zostaje przez nie pochłonięty, (b) powstaje niestabilne jądro ^{236}U , które po krótkim czasie (c) rozpada się na dwa mniejsze jądra i neutrony. Część energii wyzwala jest w postaci promieni γ (co symbolizuje żółte tło). (d) Uwolnione neutrony mogą inicjować podobne rozpady w kolejnych atomach, prowadząc do reakcji łańcuchowej (źródło: phet.colorado.edu ²¹⁰)

Uran występujący w przyrodzie składa się z 99,3% izotopu ^{238}U i 0,7% izotopu ^{235}U . Aby rozszczepić cięższy izotop, potrzeba neutronów o bardzo dużej prędkości, a efektywność tego procesu jest bardzo mała. Z kolei ^{235}U rozpada się bardzo efektywnie, jeżeli zderza się z powolnymi neutronami. Co więcej, w produktach rozpadu ^{235}U znajdują się kolejne neutrony, które mogą inicjować podobne rozpady kolejnych atomów, prowadząc do reakcji łańcuchowej. W każdej takiej reakcji wyzwala jest energia rzędu kilkuset MeV – tak działa bomba atomowa, na tej zasadzie działają również elektrownie

jądrowe. Interaktywną symulację procesu rozszczepienia jądra atomowego uranu ^{238}U i ^{235}U oraz reakcji łańcuchowej można znaleźć na stronach phet.colorado.edu²¹⁰. Schemat rozpadu jądra ^{235}U przedstawia również rys. 13.7. Należy podkreślić, że obydwa izotopy uranu są bardzo słabo radioaktywne – czas połowicznego rozpadu ^{235}U to około 700 milionów lat. Innymi słowy, izotopy ^{238}U i ^{235}U są bardzo stabilne (procesy rozpadu α oraz β są bardzo słabe) i do ich rozszczepienia potrzebne są czynniki zewnętrzne (jak neutrony) wymuszające rozpad jądra.

Produkty reakcji rozszczepienia jądra uranu ^{235}U mogą być różne, a zachowana jest jedynie sumaryczna liczba protonów (czyli liczba atomowa). Jądro uranu to modelowo duża kropla, która rozpada się na dwie mniejsze, o rozmiarach trudnych do przewidywania. To oznacza, że w wypalonym paliwie jądrowym znajdują się najróżniejsze pierwiastki chemiczne i izotopy o różnych czasach połowicznego zaniku – od pojedynczych dni do milionów lat.

Różnorodność powstających pierwiastków chemicznych stwarza poważne problemy bezpieczeństwa w przechowywaniu i recyklingu produktów rozszczepienia uranu i innych pierwiastków (np. plutonu). W produktach rozszczepienia znajdują się też izotopy, które mogą zostać zaabsorbowane przez człowieka. Technologie jądrowe wymagają szczególnych środków ostrożności.

Podczas reakcji rozszczepienia jądra uranu ^{235}U uwalniana jest średnio energia około 200 MeV lub $3,2 \times 10^{-11}$ J. Odpowiada to około 82×10^{12} J/kg. Średnie roczne zużycie energii w Polsce to około 3×10^{18} J. Innymi słowy, zaledwie 35 ton ^{235}U wystarczyłoby do zaspokojenia rocznych potrzeb całej Polski.

²¹⁰ <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/nuclear-fission> (dostęp 02.03.2022)

14

Kwarki i skwarki

14.1. Kwarki

Rozpad β^- opisany w rozdziale 13.3 polega na przeistoczeniu się neutronu w proton, któremu towarzyszy emisja elektronu oraz „egzotycznego” antyneutrino elektronowego. Dodatkowo niektóre jądra (jak ^{22}Na , ^{19}F z nadmiarem protonów względem neutronów) rozpadają się w procesie jakby odwrotnym – β^+ , w którym proton przeobraża się w neutron i któremu towarzyszy emisja pozytonu (antyelektronu) i neutrino elektronowego. Co wydaje się dziwne, masa protonu jest troszeczkę mniejsza niż masa neutronu, chociaż sumaryczna masa elektronu i antyneutrino jest taka sama jak suma mas pozytonu i neutrino. Wspomniane trudności w rozumieniu natury rozpadów β doprowadziły do przekonania, że proton i neutron wcale nie są cząstkami elementarnymi, ale się jeszcze z czegoś składają. Kolejnym argumentem za założoną strukturą protonu i neutronu były odkrycia innych cząstek poczynając od lat 40. XX wieku. Postępy w badaniu promieniotwórczości kosmicznego oraz budowa przyspieszaczy cząstek, czyli akceleratorów otworzyły prawdziwy „róg obfitości” dla badaczy cząstek.

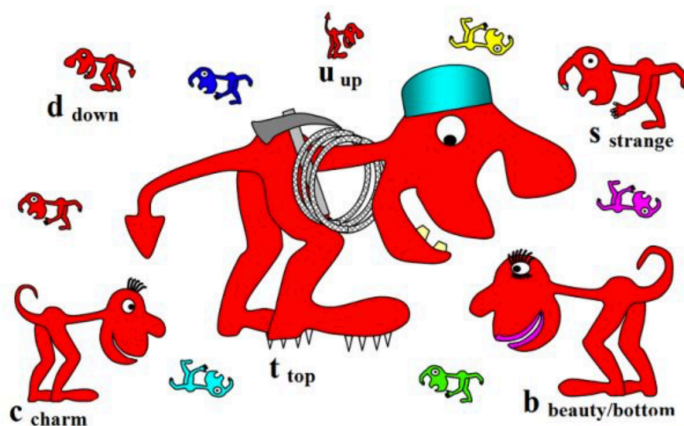
Badania eksperymentalne i teoretyczne dowiodły, że proton i neutron składają się z mniejszych cząstek, które nazwane zostały „kwarkami”²¹¹. W sumie odkryto sześć kwarków pogrupowanych w trzy rodziny o rosnących masach: *up-down* (górny-dolny), *strange-charm* (dziwny-powabny) oraz *top-bottom* (wysoki - niski). W celach dydaktycznych, rodzinę kwarków możemy przedstawić poglądowo jako grupę "stworków", zob.

²¹¹ G. Karwasz, Ile jest kwarków w protonie, w serii: W tym dwutygodniu, Na ścieżkach fizyki współczesnej, Wystawa wirtualna, Uniwersytet w Trento, 2005

dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/kwarki_w_protonie (dostęp 02.03.2022).

rys. 14.1, tak jak wyobraża je sobie dr Tomasz Wróblewski z Akademii Pomorskiej w Słupsku. Rozmiary "stworków" są proporcjonalne do ich masy, a kierunek mordki wskazuje na znak ładunku. Mordka skierowana w prawo oznacza $+2/3e$, a w lewo to $-1/3e$, gdzie e oznacza ładunek elementarny (tj. $1,602 \times 10^{-19} \text{C}$). Ładunki elektryczne kwarków są więc ułamkowe.

Tylko dwa najbliższe z nich, kwark *up* i kwark *down*, wchodzi w skład protonów i neutronów. Proton złożony jest z dwóch kwarków *up* i jednego *down*, które w sumie dają cząstkę o ładunku $+1e$, zobacz rys. 14.2. Neutron składa się z jednego kwarku *up* i dwóch *down*, które w sumie tworzą cząstkę obojętną elektrycznie.

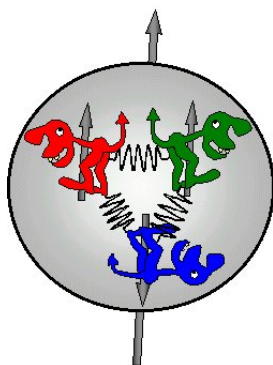


Rysunek 14.1. Kwarkowe „zoo”, według dr T. Wróblewskiego (Akademia Pomorska w Słupsku); rozmiary kwarków są tak dobrane, że czwarta potęga ich rozmiarów liniowych jest proporcjonalna do ich masy; „morda” kwarka – prawo, lewo wskazuje na znak ładunku, kwarki występują w trzech kolorach. Na rysunku pokazano również antykwarki - stworki w kolorze cyjan, magenta i żółty (źródło: G. Karwasz, Zagadkowe kwarki, Plakat dydaktyczny, w serii: On the track of Modern Physics, Wystawa wirtualna, Uniwersytet w Trento, 2005)²¹²

Rozpad β^- polega na przemianie jednego kwarka *down* w neutronie na kwark *up*, natomiast rozpad β^+ polega na przemianie jednego kwarka *up* w protonie na kwark *down*. Sumaryczny spin w obydwu rozpadach jest zachowany. Masy kwarków znamy z bardzo słabą dokładnością i wciąż są one przedmiotem intensywnych badań. Wiemy jednak, że masy kwarków są relatywnie lekkie. Według różnych szacunków masa kwarku *up* mieści się w przedziale $1,5 - 5 \text{ MeV}/c^2$ a kwarku *down* w przedziale $5 - 9 \text{ MeV}/c^2$. Dla porównania masa elektronu to $0,511 \text{ MeV}/c^2$ a protonu $938 \text{ MeV}/c^2$. Wyraźnie widać, że sumaryczna masa trzech kwarków z rodziny *up-down* nie sumuje się do masy protonu lub neutronu. Dlaczego nukleony są więc tak ciężkie – jest to efekt relatywistyczny – kwarki w nukleonach są tak „rozpędzone”, że ich gigantyczna energia kinetyczna obserwowana jest jako wzrost masy.

Mówi się, że kwarki są cząstkami, których ładunki posiadają kolory RGB (patrz rys. 14.1). „Kolor ładunku” nie ma nic wspólnego z kolorami tęczy, które znamy z optyki. Jest to po prostu wygodna konwencja pozwalająca zrozumieć reguły grupowania się

²¹² G. Karwasz, Zagadkowe kwarki, plakat dydaktyczny w serii: On the Track of Modern Physics, projekt EU "Physics is Fun", 2005, (dostęp 02.06.2024).



Rysunek 14.2. Proton zbudowany z dwóch kwarków *up* i jednego kwarku *down*. Strzałki towarzyszące stworkom reprezentują spin kwarku (źródło: G. Karwasz, 2004, rysunki kwarków - dr T. Wróblewski, Akademia Pomorska w Słupsku)

kwarków. Kwarki nie mogą bowiem istnieć jako samodzielnie cząstki i tworzą kompozyty, które są kolorystycznie neutralne (białe). Innymi słowy tylko cząstki białe mogą istnieć jako samodzielne obiekty. Na przykład proton i neutron złożone są z trzech kwarków o kolorze czerwonym, niebieskim i zielonym, które wymieszane dają cząstkę białą. Wszystkie cząstki złożone z trzech różnokolorowych kwarków nazywamy **barionami**.

Każdy kwark posiada swój antykwark (cząstkę o przeciwnym ładunku elektrycznym), która może charakteryzować się jedną z barw dopełniających kolory RGB: cyjan (anty-czerwony), magenta (anty-zielony) oraz żółty (anty-niebieski); patrz rys. 14.1. Możliwe jest więc istnienie cząstek złożonych z kwarku i antykwarku o kolorach wzajemnie uzupełniających się, które zmieszane dają barwę białą. Takie cząstki nazywamy **mezonami**²¹³. W szczególności mezony π (tzw. piony) pełnią istotną rolę, ponieważ odpowiedzialne są za oddziaływanie silne pomiędzy nukleonami w jądrze – wymiana mezonu π między protonem i neutronem utrzymuje jądro w całości. Piony powstają w wyniku połączenia kwarku i antykwarku z rodziny *up* - *down*.

14.2. Cząstki niepodzielne i podzielne

Z cząstek elementarnych zbudowane są wszystkie inne cząstki. Na przykład atomy zbudowane są z mniejszych cząstek takich, jak elektrony, protony i neutrony. Protony i neutrony są również cząstkami złożonymi z innych, bardziej podstawowych cząstek – kwarków. Najważniejszym problemem w fizyce cząstek jest znalezienie czegoś, co można uznać za cząstki fundamentalne, z których, jak z budulca, złożone byłyby wszystkie inne cząstki „elementarne”, a które same nie byłyby już złożone z niczego innego.

Wszystkie cząstki „niepodzielne” według najpowszechniej akceptowanej teorii cząstek elementarnych, tj. modelu standardowego²¹⁴, pogrupowane są w tabeli na rys. 14.3. Według naszej najlepszej teorii materia zbudowana jest z 12 fermionów, natomiast antymaterię tworzy 12 antyfermionów. **Fermiony** oznaczają cząstki o spinie połówkowym. Elementarne fermiony składają się z sześciu kwarków oraz 6 leptonów: elektron, mion,

²¹³ <https://pl.Wikipedia.org/wiki/Mezony> (dostęp 02.03.2022)

²¹⁴ https://pl.Wikipedia.org/wiki/Model_standardowy (dostęp 02.03.2022)

trzy generacje cząstek materii (elementarne fermiony)			trzy generacje cząstek antymaterii (elementarne antyfermiony)			nośniki oddziaływań (elementarne bozony)		
masa ładunek spin	I	II	III	I	II	III		
	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0
	u up	c charm	t top	$\bar{u}$ antiup	$\bar{c}$ anticharm	$\bar{t}$ antitop	g gluon	H higgs
KWARKI	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	
	d down	s strange	b bottom	$\bar{d}$ antidown	$\bar{s}$ antistrange	$\bar{b}$ antibottom	γ foton	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ 1 $\frac{1}{2}$	0 0 1	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$
	e elektron	μ mion	τ taon	e^+ pozyton	$\bar{\mu}$ antymion	$\bar{\tau}$ antytaon	Z Z ⁰ bozon	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	1 1 1	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$
	ν_e neutrino elektronowe	ν_μ neutrino mionowe	ν_τ neutrino taonowe	$\bar{\nu}_e$ antyneutrino elektronowe	$\bar{\nu}_\mu$ antyneutrino mionowe	$\bar{\nu}_\tau$ antyneutrino taonowe	W⁺ W ⁺ bozon	W⁻ W ⁻ bozon

Rysunek 14.3. Cząstki niepodzielne według modelu standardowego²¹⁴

taon, neutrino elektronowe, mionowe i taonowe. Z kolei antyfermiony to 6 antykwarków i 6 antyleptonów. **Leptony** to cząstki o relatywnie małej masie – słowo *lepton* pochodzi z języka greckiego i oznacza *lekki*. Obok fermionów do cząstek elementarnych zaliczamy również niektóre **bozony**, czyli cząstki o spinie całkowitym, które przenoszą trzy z czterech fundamentalnych oddziaływań: elektromagnetyczne (foton), silne między kwarkami (gluon) i słabe (bozony W i Z). Poszukuje się również grawitonu, cząstki, która przenosiłaby oddziaływanie grawitacyjne, ale do tej pory jeszcze nie potwierdzono jej istnienia. Według współczesnej elektrodynamiki kwantowej oddziaływania polegają na wymianie wspomnianych bozonów między oddziaływającymi cząstkami – przypomina to trochę grę w ping-ponga - jedna cząstka wysyła bozon, druga go przechwytuje i „odbija” w kierunku pierwszej.

Do grona cząstek elementarnych zalicza się również bozon Higgsa, którego istnienie potwierdzono w 2012 roku w akceleratorach CERN²¹⁵. Dzięki oddziaływaniu z tym bozonem kwarki i leptony posiadają masę. Więcej na temat tej fascynującej cząstki można poczytać w artykule prof. Grzegorza Karwasza (*Niezbyt krótka historia o cząstkach elementarnych*)²¹⁶.

Wszystkie cząstki wymienione w tabeli na rys. 14.3 są niepodzielne według obecnego stanu wiedzy. Na przykład do tej pory nigdy nie zaobserwowano rozpadu elektronu na mniejsze fragmenty (co więcej nie znamy również rozmiarów elektronu, który cały czas traktujemy jak ładunek punktowy). Pozostałe kilkadziesiąt znanych cząstek materii (lub antymaterii), które zostały odkryte na przestrzeni ostatnich 80 lat, stanowią na ogół kombinację kwarków. Takie cząstki nazywamy **hadronami**. Hadrony mają zarówno spiny połowkowe (**bariony** złożone z trzech kwarków), jak i całkowite (**mezony** złożone z kwarku i antykwarku), a ich masy mieszczą się w bardzo szerokim zakresie od 135

²¹⁵ <http://home.web.cern.ch/about/updates/2013/03/new-results-indicate-new-particle-higgs-boson> (dostęp 02.03.2022)

²¹⁶ G. P. Karwasz, *Fizyka w Szkole z Astronomią* 5, (2015).

MeV/c² dla neutralnego pionu π^0 do 11 020 MeV/c² dla jednego ze stanów bottomonium²¹⁷. Bariony są na ogół bardzo stabilne. Do barionów należy neutron i proton (czas połowicznego rozpadu protonu jest rzędu 10³³ lat, czyli przekracza o wiele rzędów wielkości wiek Wszechświata – proton jest stabilny!). Z kolei mezony, z których najważniejszy jest tzw. mezon π , 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 anegdota (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 roku²¹⁸ (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 roku²¹⁹, 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 Misztal, 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.

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

²¹⁸ https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/index-pl.html

²¹⁹ https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/ (dostęp 02.06.2024)

