Dydaktyka
Fizyki Współczesnej

Grzegorz Karwasz
Andrzej Karbowski
Kamil Fedus



UNIWERSYTET MIKOŁAJA KOPERNIKA W TORUNIU
Fundusze Europejskie Wiedza Edukacja Rozwój
Rzeczpospolita Polska
Unia Europejska Europejski Fundusz Społeczny

Dydaktyka Fizyki Współczesnej

Grzegorz P. Karwasz

Andrzej Karbowski

Kamil Fedus



Materiał dydaktyczny opracowany w ramach projektu

Innowacyjne metody nauczania fizyki

POWR.03.01.00-00-KN04/18

finansowanego przez Unię Europejską

Program Operacyjny Wiedza Edukacja Rozwój 2014 – 2020

DYDAKTYKA FIZYKI WSPÓŁCZESNEJ

Materiały dydaktyczne przygotowane przez Katedrę Dydaktyki Fizyki UMK

KATEDRA DYDAKTYKI FIZYKI

Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika
ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń
tel. (056) 61-13-253, fax: (056) 62-25-397
www: dydaktyka.fizyka.umk.pl

AUTORZY:

prof. dr hab. inż. Grzegorz Karwasz (karwasz@fizyka.umk.pl)
dr Andrzej Karbowski (akarb@fizyka.umk.pl)
dr hab. Kamil Fedus, prof. UMK (kamil@fizyka.umk.pl)

OKŁADKA:

dr hab. Marek Zajko, prof. UMK (Katedra Grafiki UMK)

SKŁAD:

dr hab. Kamil Fedus, prof. UMK

©G. KARWASZ & A. KARBOWSKI & K. FEDUS
KATEDRA DYDAKTYKI FIZYKI UMK, TORUŃ 2019

DRUK - WYDAWNICTWO NAUKOWE UMK
MATERIAŁY PRZYGOTOWANE PRZEZ KATEDRĘ DYDAKTYKI FIZYKI UMK

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 kursu . . . 14

2 Fizyka i astronomia: Harmonia sfer 17

2.1 Już starożytni Maltańczycy... . . . 17
2.2 Kepler: w poszukiwaniu zależności matematycznych . . . 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 . . . 39

4 Klimat, środowisko, energia - czyli o efekcie cieplarnianym 43

4.1 Równowaga termodynamiczna . . . 43
4.2 Cykle Milankovicia . . . 45
4.3 Sprzężenia 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 Zmiany klimatyczne . . . 52

6 Fala grawitacyjna 56

6.1 Dlaczego fala? . . . 56
6.2 Ogólna teoria względności . . . 60
6.3 Zadrżała czasoprzestrzeń . . . 63
6.4 Inne efekty OTW . . . 67

7 Laser, największy(?) wynalazek XX wieku 71

7.1 Zasada działania lasera . . . 71
7.2 Laser gazowy He-Ne . . . 72
7.3 Zastosowania laserów . . . 73
7.4 Podwójna natura światła . . . 74

8 Zagadkowe promieniowanie 77

8.1 Promienie Röntgena 77
8.2 Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) 80

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 103
11.1 Hipoteza kwantów światła 103
11.2 Efekt fotoelektryczny 106
11.3 Spektroskopia atomowa 108
11.4 Współczesny obraz atomu 110

12 Mechanika falowa 117
12.1 Dualizm korpuskularno - falowy światła 117
12.2 Falowa natura materii - hipoteza de Broglie'a 119
12.3 Równanie falowe Schrödingera 122
12.4 Zasada nieoznaczoności Heisenberga 125

13 Podzielić niepodzielny 129
13.1 Promieniowanie α, β i γ - zarys historyczny 129
13.2 Budowa i właściwości jądra atomowego 132
13.3 Rozpady promieniotwórcze 135
13.4 Rozszczepienie jądra atomowego 138

14 Kwarki i skwarki 141
14.1 Kwarki 141
14.2 Cząstki niepodzielne 143
14.3 Klasyfikacja cząstek elementarnych 144

ROZDZIAŁ 1

Co to jest fizyka współczesna?

Zazwyczaj jako "Fizykę Współczesną" określa się fizykę XX wieku. Ale jesteśmy już (2019) dość głęboko w XXI wieku i to wyjaśnienie niedługo nie będzie miało racji bytu. Tradycyjnie też, za początek fizyki współczesnej uważa się wykład Maxa Plancka, w Niemieckim Towarzystwie Fizycznym w czwartek[1], 13 grudnia 1900 roku, o 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.

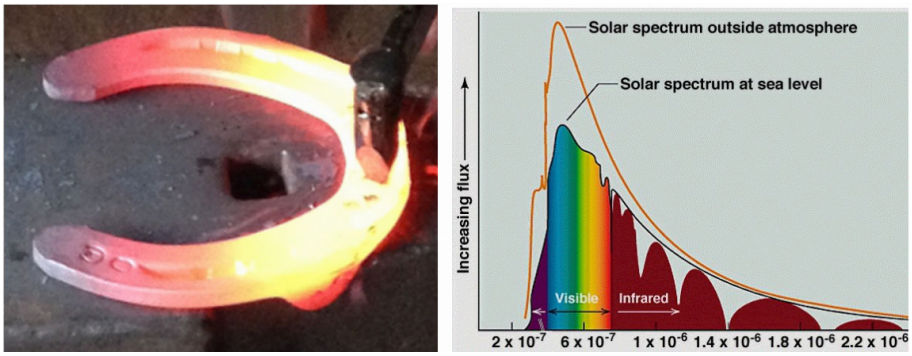
1.1 Fizyka kwantowa

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 16:30. Zostały one zapoczątkowane przez prof. Aleksandra Jabłońskiego, założyciela Instytutu Fizyki w 1946 roku, a przed XX 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 podkowa zmienia swój kolor w miarę wzrostu temperatury? I podkowa, i powierzchnia Słońca i włókno wolframowe żarówki emitują światło jak tzw. ciało doskonale czarne (tj. duże pudło, z małym otworem). Rozkład natężenia światła emitowanego przez ciało doskonale czarne można opisać wzorem wyprowadzonym przez Maxa Plancka (widmo Słońca, na rys. 1.1b jest w przybliżeniu widmem ciała doskonale czarnego). Źródło: Nure Aglio; WorldPress

fizyczna. Należy rozważyć, co jest *źródłem* światła.

Było już wiadomo, że materia ma strukturę atomową, a w 1897 roku J. J. Thomson "odkrył" [3] 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.

Ale, o ile dla długich fal jasne było, że fale *dłuższe* niż rozmiary pudła się w nim 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:

$$E = h\nu, \tag{1.1}$$

gdzie ν jest częstością 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: $h = 6.626x10^{-34}$Js. Ale jest to porcja energii, która dla pojedynczego atomu czy cząsteczki jest "właściwa". Kwant światła fioletowego (λ = 380 nm) niesie energię, w jednostkach elektronowolt [4], 3.6 eV, a światła czerwonego (λ = 760nm) - energię 1.8 eV.

[3] 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.

[4] 1 eV jest to energia, jaką zyskuje ładunek jednego elektronu (czyli 1.6×10^{-19}C) przyspieszony różnicą potencjału 1 volta. Różnica potencjału 1 V jest "namacalna", czyli charakterystyczna dla procesów

Założenie o kwantach światła, dziś zwanych fotonami [5], 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

W końcu XIX wieku miało miejsce ważne odkrycie fizyki doświadczalnej – tzw. efektu foto-elektrycznego. Wcześniej nieco zbudowano źródła wysokiego napięcia (np. tzw. cewka Ruhmkorffa[6]), nauczono się odpompowywać powietrze ze szklanych ampułek 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 J.J. 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:

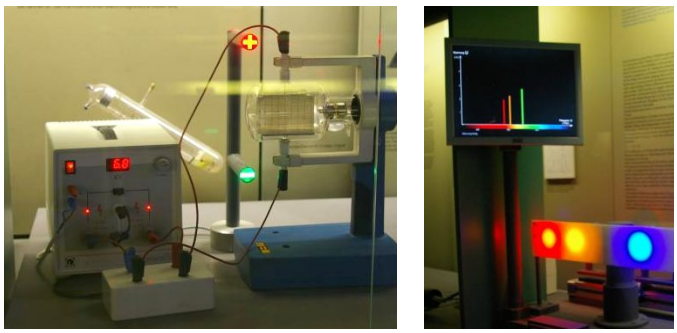
$$h\nu = W + eU, \tag{1.2}$$

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

atomowych: jest to potencjał wytwarzany przez dwa kawałki metalu, Cu i Zn zanurzone w szklance z wodą (czyli ogniwo Volty). Różnica potencjału 13.6 V wyrywa elektron z atomu wodoru (czyli dokonuje jonizacji atomu wodoru): jest to już dość duża energia.

[5] Określenie "foton" nie podobało się Planckowi, który jeszcze kilka lat po wprowadzeniu tego pojęcia (po pracach Einsteina z 1905 roku) protestował.

[6] G. Karwasz, "Zapalacz Ruhmkorffa", Fizyka i Zabawki, CD-Rom, Soliton, Sopot, 2005, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/elmag/zapalacz-pl.html



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 (max 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 Y wielkość tego napięcia hamującego: dla światła niebieskiego jest ona największa. Na osi X oznaczona jest energia kwantów światła różnych kolorów, zgodnie ze wzorem Plancka $E = h\nu$. (Foto 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 Manchestrze, 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, Johan 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 nr n w serii Balmera wynosi

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

gdzie R jest stałą (i wynosi, w znanych już nam jednostkach $R = 13.6$ eV).

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, zob. Rys.1.3. Bohr podał to w innej postaci, korzystając w wielkości fizycznych znanych w 1913 roku[7].

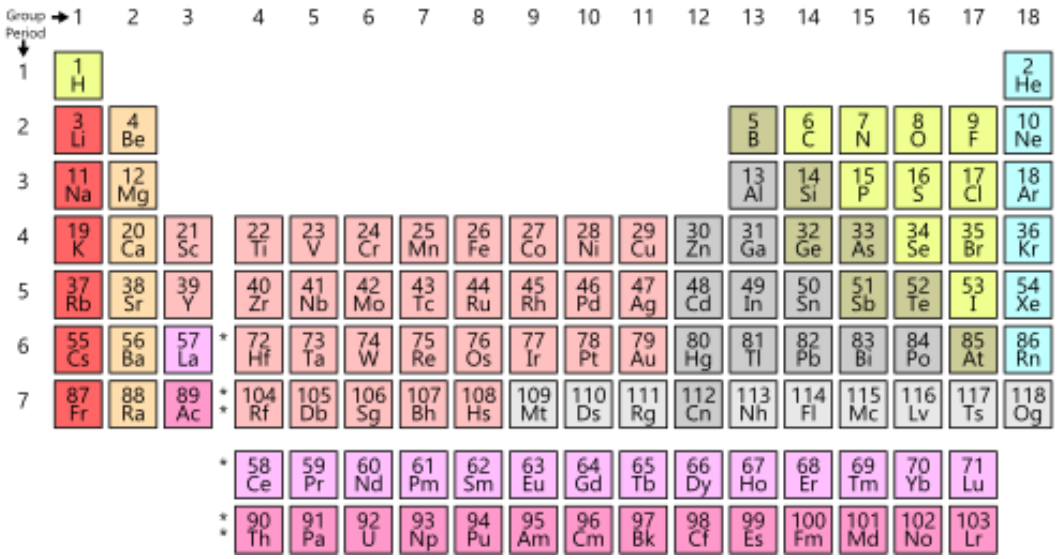
[7] Warunek Bohra to kwantowanie wartości momentu pędu elektronu na określonej orbicie, zob. rozdział 12



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: 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. Podobnie działa wykonana z brązu, „tybetańska” misa. Źródło: G. Karwasz, „Bohr i (nie) jego postulaty”, w: On the Track of Modern Physics, Uniwersytet w Trento, 2005, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/html/bohr-en.html

1.1.4 Kwantowa mechanika falowa

Fotony Plancka (i Einsteina) i 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 w układzie okresowym Mendelejewa: dlaczego atomy grupują się po 2, 8 lub 18 w linii, czyli w „okresie”.



Rysunek 1.4: Układ okresowy pierwiastków, w jego prostszej postaci. Podobne własności chemiczne powtarzają się najpierw po 10 atomach (He, Ne, Ar), później, w miarę przybywania „orbit” w atomie, po 18 atomach. Źródło: Wikipedia

“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

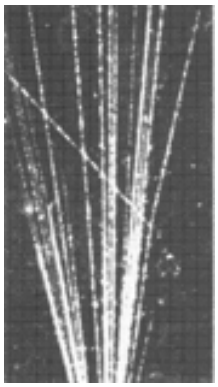
zjawisku fotoelektrycznym zachowuje się jak cząstka, tak elektron w rozpraszaniu na atomach argonu zachowuje się jak fala: dla ściśle określonej energii przechodzi przez atom praktycznie bez zaburzenia (dokładniej: bez rozpraszania).

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 "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 nowych leków i barwników.

Równanie falowe Schrödingera pozwoliło określić poziomy energii elektronów w atomie wodoru bez uciekania się do postulatów Bohra. Ale, aby wyjaśnić układ 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, doszedł on 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 Werner 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: 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 ^{4}He z jądrem ^{1}H). Zwraca uwagę, że tory nie są liniami ciągłymi: jest to zbiór punktów. Tam gdzie cząstka zderzyła się z elektronami atomów wodoru, jest jasny punkt, tam gdzie przeleciała bez zderzenia, jest ciemna przerwa. Możemy więc stwierdzić, albo gdzie cząstka była, albo między jakimi punktami przelatywała. Heisenberg ujął to w formie zasady nieoznaczoności.

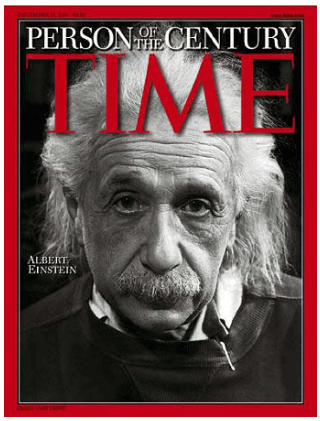
Ale z samego już równania Schrödingera wynika paradoks. Matematycznie, o ile rozwiązaniem równania mogą być określone funkcje Ψ_1 i Ψ_2, to również kombinacja liniowa (czyli suma tych dwóch funkcji z odpowiednimi współczynnikami liczbowymi) też może być rozwiązaniem. Rozpad jąder promieniotwórczych jest 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 pisto-

let 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 (2019). Kot jest nieco żywy nieco martwy, ale tylko tak długo, jak długo na niego nie spojrzymy. Wówczas jego stan jest ściśle określony, jak to argumentował Einstein.

1.2 Teoria względności

1.2.1 Wiek XX – wiek Einsteina



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 zawiesinach, 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 (a niektóre – nawet w dwa takie urządzenia). 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: $c^2 = 1/(\mu_0\epsilon_0)$, 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, 30 km/s to zaledwie ułamek prędkości światła, 300 tys. km/s. Ale pochodzący ze Strzelna amerykański fizyk, Abraham Michelson za pomocą wymyślnej metody postanowił zweryfikować, czy przez pomiar zmiany prędkości światła można zweryfikować ruch orbitalny Ziemi. Wynik doświadczenia przeprowadzonego najpierw w Poczdamie (1881 r.), a następnie powtórzonego z większą dokładnością w Cleveland był zaskakujący: nie obserwuje się żadnej zmiany prędkości światła. Tak jak by ośrodek, w którym rozchodzi się światło, jakiś hipotetyczny *eter* był pociągany jakby przez kulę ziemską. Albo, jakby Ziemia spoczywała w kosmosie. Konsternacja! Wymyślono więc wyjaśnienia ad hoc: jedno z ramion urządzenia, za pomocą którego Michelson badał prędkość światła w prostopadłych kierunkach skraca się (!) pod wpływem ruchu.

1.2.2 Konsekwencje szczególnej teorii względności

Einstein, z rozważań o energii i pędzie światła wywnioskował, że nie ma powodu, dla którego prędkość światła nie miałaby być stała – niezależnie od ruchu obserwatora[8].

[8] 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

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 anty-cząstka, dodatni pozyton, anihilują gdy się spotkają: cała masa zamienia się w energię dwóch (lub trzech) fotonów. W syntezie termojądrowej jąder helu z jądrami 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 Einstein postawił pytanie, czy zasada ta dotyczy również układów poruszających się ruchem przyspieszonym. Innymi słowy, czy w windzie potrafimy rozróżnić ruch przyspieszony windy od nagłej zmiany przyciągania ziemskiego. Tak, potrafimy! Otóż przyspieszenie windy jest w pionie, natomiast przyciąganie ziemskie skierowane do środka Ziemi. Niby nieduża różnica, ale dwie spuszczone 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.

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 na odległość 13,78 mld lat świetlnych). Pisał genialnie Kopernik: "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 wiemy, że zapewne nie będzie miał końca – rozszerza się coraz szybciej.

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 ogra-

ośrodkiem jest próżnia.

nicza naszą wiedzę w zakresie wielkich odległości (Rys. 1.6), mechanika kwantowa – dla obiektów mikroświata.



Rysunek 1.6: Drzeworyt Flammariona z końca XIX wieku miał na celu ośmieszenie myślenia średniowiecznego o granicach wszechświata. W tym samym czasie doświadczania Michelsona udowodniły poprawność teorii Einsteina (powstała ona 20 lat później): z powodu ograniczonej prędkości światła nie możemy znać granic naszego Wszechświata. Miał rację Kopernik. Źródło: Wiki

1.3 Zastosowania fizyki współczesnej

1.3.1 Fizyka w medycynie, komputerze i nawigacji

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

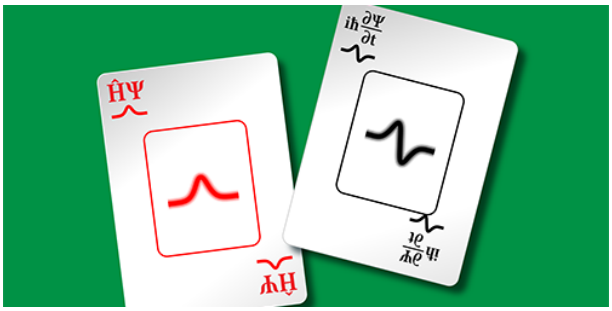
Układy nawigacji satelitarnej "rozeszłyby się" o kilka kilometrów w parę dni, gdyby nie uwzględniały poprawek wynikających z dwóch teorii względności. W inżynierii materiałów korzystamy z promieniowania rentgenowskiego, defektoskopii i dyfrakcji neutronowej, anihilacji pozytonów. Najszersze zastosowania znajduje jednak fizyka współczesna w medycynie. Budowa wyposażenia do diagnostyki (tomografów komputerowych, aparatów do rezonansu magnetycznego, tomografów anihilacji pozytonów) dla dużych firm przemysłu elektrycznego stanowią główne źródło przychodu.



Rysunek 1.7: 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.

1.3.2 Fizyka współczesna – fizyka in *statu nascendi*

Nikt dziś nie poprawia ani nie kwestionuje rozwiązań równań Maxwella w próżni, a jedynie korzysta z tych równań 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.



Rysunek 1.8: 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. http://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevLett.116.128701

Podobnie w ciągłej dyskusji 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, 14/09/2015 jest tylko częścią tych prac. Wrócimy do zagadnień teorii względności w rozdziale 6.

Natomiast szczególna teoria względności została więcej niż doświadczalnie zweryfikowana: 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 wzrostu jego prędkości do granicy bliskiej prędkości światła, oraz na wydłużenie czasu życia cząstek elementarnych, tzw. mezonów, powstających w atmosferze ziemskiej pod wpływem promieniowania kosmicznego[9].

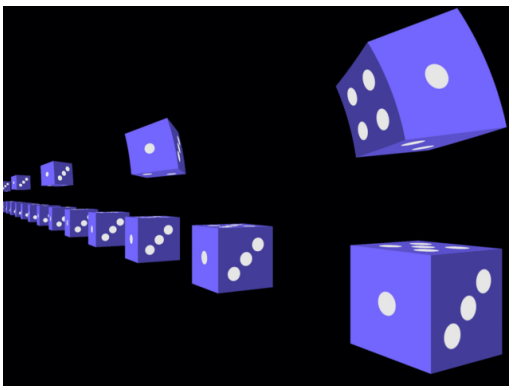
Ale już wzór na relatywistyczne skrócenie długości ciągle wywołuje trudności interpretacyjne. Ostatnio (2019) pojawiło się pytanie, jak wygląda obiekt trójwymiarowy poddany takiemu skróceniu. Wydaje się, że obraz poruszającego się obiektu jest nie tylko skrócony, ale i obrócony, jak na Rys. 1.9.

Definicją fizyki współczesnej powinno więc być: ta część fizyki, która jest nadal dyskutowana. A to może oznaczać, że większa część fizyki należy do współczesnej.

1.4 Struktura kursu

Kurs składa się z 15 wykładów (łącznie z dwoma wykładami wstępnymi) w różnych tematykach fizyki współczesnej – osiągnięciach i zastosowaniach, a także tematykach interdyscyplinarnych. Nie jest to kurs "Fizyki współczesnej" ale Dydaktyki Fizyki Współczesnej – ilustracja zagadnień, które mogą potencjalnie zainteresować ucznia. Stąd "wycieczki" w kierunku astronomii, klimatologii, matematyki. Z tego też względu wykład

[9] B. Rossi, D. B. Hall, Phys. Rev. 59, 223 (1941)



Rysunek 1.9: 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*, 13/08/2019. https://physicsworld.com/a/the-invisibility-of-length%e2%80%afcontraction/

jest uproszczony – podkreślamy swego rodzaju minimum programowe takie, aby uczeń 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 innych podręcznikach, ale "wilczki"[10], 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 małym "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 – hyper-konstruktywizmu i neorealizmu, konstruujemy narrację krok po kroku i możliwie często sięgamy do praktycznych przykładów. Tradycyjne podręczniki fizyki współczesnej 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. Pisał Einstein: "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, jak tylko zauważy, że przedmioty wyrzucone z kojca same do niego nie wrócą.

Pożyteczne dla rozbudzenia zainteresowania fizyką są strony internetowe Katedry Dydaktyki Fizyki UMK: dydaktyka.fizyka.umk.pl.

W szczególności polecamy strony powstałe na Uniwersytecie w Trydencie w latach

[10] Pomysł GK, inspirowany nagrodą Nobla dla prof. Franka Wilczka, realizacja graficzna dr Tomasz Wróblewski, Akademia Pomorska w Słupsku.

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.

Polecamy w szczególności monotematyczne plakaty, jak np. “Czy świat się kręci w prawo” o symetriach CPT. Plakaty pochodzą z 2005 roku: w międzyczasie wielu z wymienionych na nich naukowców otrzymało nagrody Nobla (za badania w zakresie neutrin, bozonu Higgsa itd.): dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/html/posters.

Na stronach dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi od czasu do czasu, niestety nie co dwa tygodnie jak to było początkowo, pojawiają się historyjki o fizyce współczesnej. Polecamy też artykuły popularno-naukowe w “Fizyce w Szkole” i “Uranii” o aktualnych odkryciach, jak fale grawitacyjne, pierwiastek nr 118 oganesson, ogniwa wodorowe, cząstki elementarne itd.



Rysunek 1.10: Okładka L. Lernera, 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 i izolacyjne, *piankowe* materiały polimerowe (przypuszczalna zawartość paczek) to produkty nowoczesnej inżynierii materiałowej, a tej nie byłoby bez chemii kwantowej, mikroskopii elektronowej, promieni Röntgena itd.

ROZDZIAŁ 2

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 błądzących 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 przyrodoznawczych: "ten jasny obiekt na zachodzie to nie gwiazda, ale planeta Wenus, nam najbliższa".

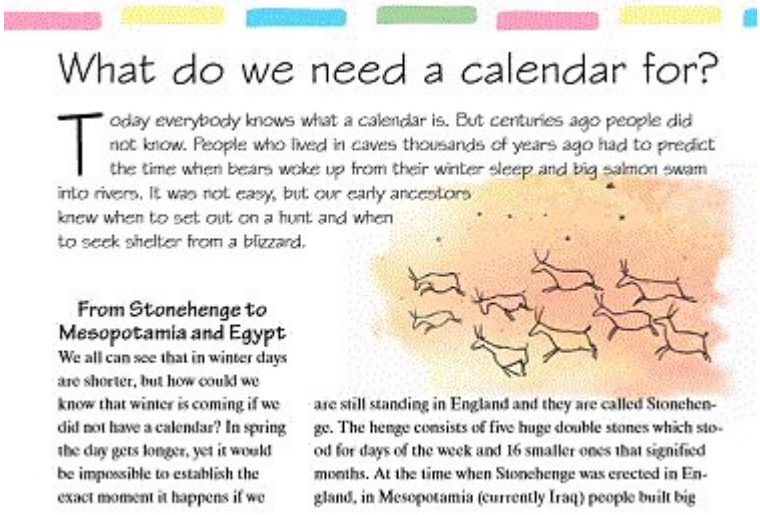
2.1 Już starożytni Maltańczycy...

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 rozkwitały 4 tysiące lat p.n.e, a w Jerychu w Palestynie znaleziono ślady stałego osadnictwa sprzed 10 tys. lat p.n.e[11]. Wraz z wynalezieniem pisma wiedza mogła być przekazywana na wiele pokoleń (więcej o Mezopotamii w rozdziale 3.1).

[11] https://en.wikipedia.org/wiki/Jericho

Znajomość astronomii była niezbędna od początku inteligencji gatunku Homo sapiens (100 tys. lat temu[12]?). Nawet ludy żyjące z łowiectwa musiały planować okresy polowań.



What do we need a calendar for?

Today everybody knows what a calendar is. But centuries ago people did not know. People who lived in caves thousands of years ago had to predict the time when bears woke up from their winter sleep and big salmon swam into rivers. It was not easy, but our early ancestors knew when to set out on a hunt and when to seek shelter from a blizzard.

From Stonehenge to Mesopotamia and Egypt

We all can see that in winter days are shorter, but how could we know that winter is coming if we did not have a calendar? In spring the day gets longer, yet it would be impossible to establish the exact moment it happens if we

are still standing in England and they are called Stonehenge. The henge consists of five huge double stones which stood for days of the week and 16 smaller ones that signified months. At the time when Stonehenge was erected in England, in Mesopotamia (currently Iraq) people built big

Rysunek 2.1: Ilustracja do rozdziału „Do czego służy kalendarz?”, pierwszego w książce GK „Mały astronom” (wyd. Publicat, 2017, ilustracje Adam i Olga Błaszczak). Kalendarz potrzebny jest i rolnikom i myśliwym. W starożytnej Grecji kalendarz nie istniał. Stąd łacińskie powiedzenie „ad calendas graecas” oznacza – nigdy.

Najstarsze zachowane budowle, menhiry ze Stonehenge i megalityczne świątynie na Malcie (3500 lat p.n.e.) 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 Kongo[13] 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.

Z VII wieku p.n.e pochodzi, zachowany na glinianej tabliczce Mul.Apin, pierwszy podręcznik astronomii. W nim znajdujemy po raz pierwszy podział roku na 12 miesięcy po 30 dni. To 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[14]”, 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.

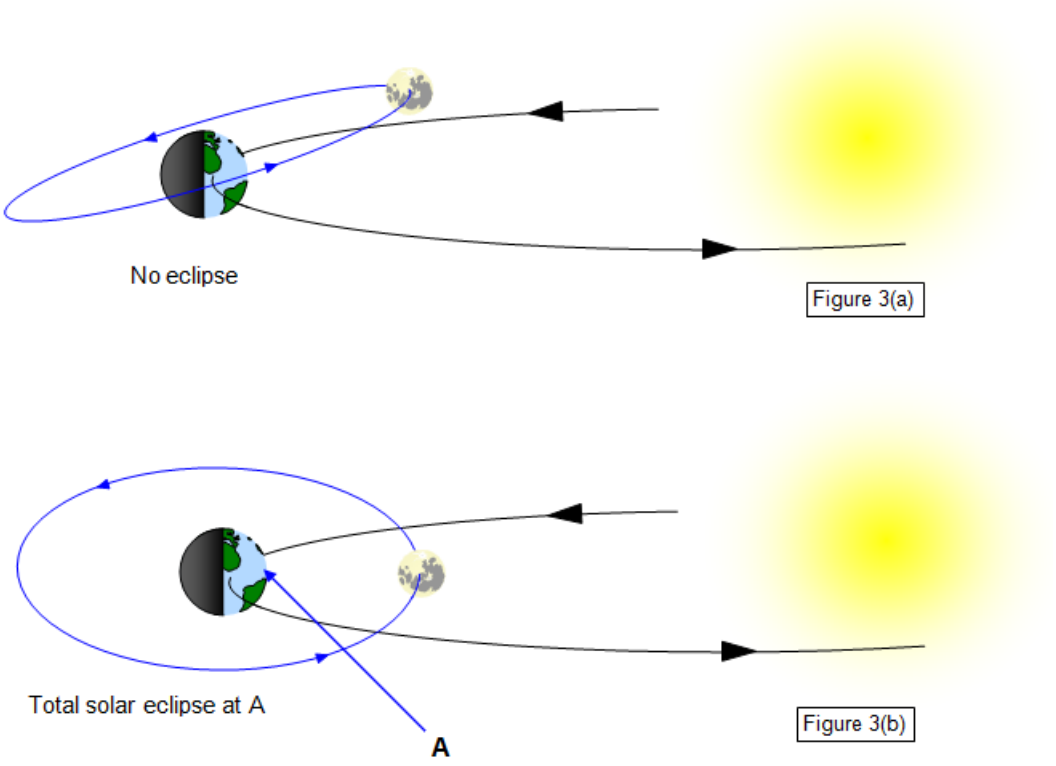
[12] Najstarsze ślady inteligencji twórczej, porysowany w kratkę kawałek ochry pochodzi z Bloombos Cave i jest datowany na 80 tys. lat temu.

[13] https://afrolegends.com/2013/08/29/the-ishango-bone-craddle-of-mathematics/

[14] https://en.wikipedia.org/wiki/Saros_(astronomy)



Rysunek 2.2: Fragment świątyni (a) w Hagar Qim na Malcie, z 3500 lat p.n.e., przypuszczalnie obserwatorium astronomiczne. (b) Gliniana tabliczka Mul.Apin z Babilonii, z VII w. p.n.e., kompendium wiedzy astronomicznej.



Rysunek 2.3: Ilustracja z podręcznika internetowego fizyki (wiek 11-14 lat) ilustrujący powtarzalność cykli saros, czyli zaćmień Słońca i Księżyca. Źródło: Keith Gibbs, Scholphysics, http://www.schoolphysics.co.uk/age11-14/Astronomy/text/Eclipses/index.html

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.

Po pierwsze, Kopernik urodził się siedem lat po II Pokoju Toruńskim, 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, czyli nauki.

A przede wszystkim, znany wierszyk "Wstrzymał Słońce, ruszył Ziemię" zaciera sens odkrycia Kopernika. Na jego pomniku w Toruniu, niemiecki rzeźbiarz wyrył: "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 obarczony 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 niebo[15] człowiek stawiał pytanie o regularność ruchów planet, Księżyca i Słońca[16].

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 (należy raczej powiedzieć: odkrycia Kopernika, bo słowo "model" nie ma właściwej wagi) jest niebywałe uproszczenie analizy mechaniki nieba. To już nie jakieś ruchy do przodu i do tyłu jak w skomplikowanych zębatkach ("epicy-

[15] Pisał o nim też Immanuel Kant: "niebo gwieździste nade mną"

[16] Nie jest ważne, ruchy planet i Księżyca są realne, jak myślano jeszcze w czasach Ptolemeusza, czy pozorne, jak to wiemy od Kopernika: teorię względności Einsteina przywołuje się czasem, nieco bezpodstawnie, na "uprawomocnienie" geocentrycznego punktu odniesienia w stosunku do Układu Słonecznego.



Rysunek 2.4: Animacja Google'a z okazji 540 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). https://www.google.com/doodles/nicolaus-copernicus-540th-birthday

klach" Ptolemeusza) ale uporządkowane kręcenie się wszystkich planet[17]. 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: Mikołaj przejawił tę samą ciekawość w poszukiwaniu matematycznych zależności ruchu planet jak sto lat później Kepler.

W jakim kierunku kręci się kula ziemska? Pokazują to czołówki dzienników telewizyjnych w wielu krajach (w niektórych 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 ziemska 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 19 lutego 2013 roku, 540 rocznicy urodzin Astronoma.

2.2 Kepler: w poszukiwaniu zależności matematycznych

2.2.1 Magiczne bryły Platona

Jan Kepler, urodzony w Grazu współpracownik Tycho Brahe, podobnie jak ten drugi miał możliwość obserwacji rozbłysku super-nowej: gwiazdy kończącej swój żywot efektownym wybuchem, a z ziemi widocznej w jasny dzień (w 1572 i 1604 roku[18], odpowiednio). Ale astronomią Kepler zajął się jeszcze przed 1604 rokiem, poszukując "magicznych" za-

[17] Jedynie Wenus kręci się dookoła osi w "odwrotnym" kierunku, i to bardzo wolno – raz na swój własny rok. Oś obrotu Urana jest natomiast ustawiona prawie wzdłuż ekliptyki, czyli "poprzecznie" w stosunku do innych planet.

[18] 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. Ale po dwóch wybuchach, od 1604 roku – dokładnie nic.

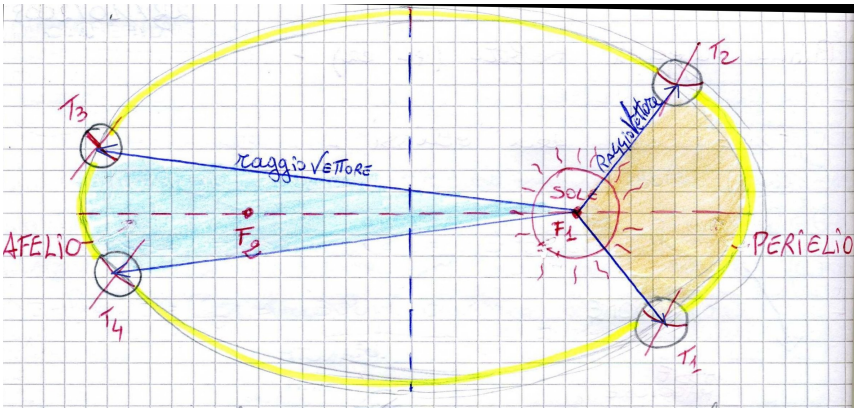
leżności między rozmiarami orbit poszczególnych planet.



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. Pomysł dobry, ale “niecelny”[19].

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

Trzecie prawo Keplera (oparte oczywiście na prawie grawitacji Newtona) stwierdza, że sześciany odległości planet od Słońca mają się do siebie jak kwadraty ich okresów obiegu. “Magiczność” takiego sformułowania polega na tym, że i kwadraty i sześciany potrafimy wyobrazić sobie jako figury geometryczne. II prawo jest nie mniej magiczne: zakreślane w stałym czasie pola są stałe, zob. rysunek gimnazjalistki z Włoch, rys. 2.6. Największe trudności sprawia uczniom I prawo Keplera: są oni przekonani, że Słońce jest w środku elipsy, a nie w jej ognisku[20].

[19] Podobnie niecelnych pomysłów jest pełna historia fizyki: 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. 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.

[20] 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.

Dokładne wyprowadzenie orbit eliptycznych z zasady zachowania momentu pędu w polu newtonowskim nie jest proste: pokazujemy je przy okazji "Fizyki zabawek" i lejka grawitacyjnego[21].

Kepler nie znalazł magicznych zależności dla planet. Ale odkrył prawa, które stały się jednymi z najpiękniejszych zależności, jakimi można zafascynować młodego człowieka[22].

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. Identyczny (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 okresu[23].

W pewnego rodzaju rezonansie pozostają okresy Jowisza i Saturna: planety silnie między sobą oddziałują i przypuszcza się, że w dalekiej przyszłości okresy obiegów będą się miały do siebie jak 1:2. "Zegarowe" wręcz synchronizacje wykazują trzy najbliższe Jowiszowi satelity, Io, Europa i Ganimede, z okresami obiegu swej planety mającymi się do siebie jak 1: 2: 4.

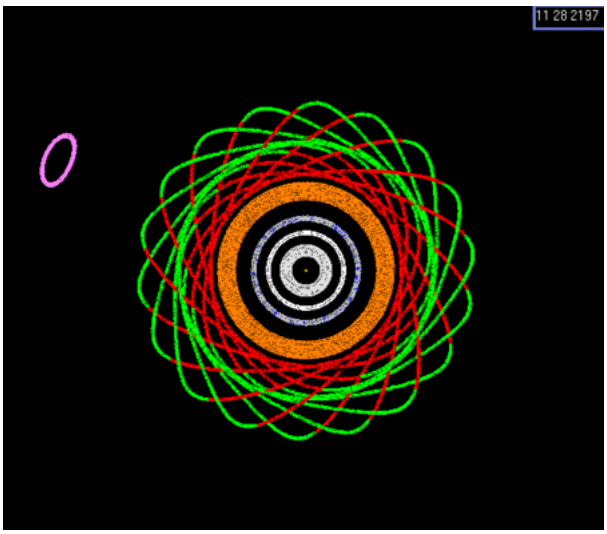
Skąd się biorą rezonanse? Licząc wiek Układu Słonecznego na 4,567 mld lat, od tego czasu minęła nieskończona prawie liczba "revolutio" jak je określał Kopernik. Każdy obrót to oddziaływanie grawitacyjne miedzy wieloma ciałami: tak jak brzeg kieliszka delikatnie pocierany po pewnej chwili zacznie drgać rezonansowo, tak i ciała w kosmosie "uzgadniają" swe okresy obrotu. Ale wiąże się to ze zmianami energii (potencjalnej i kinetycznej) tych ciał[24]: 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 "ucieka nam" Księżyc: 3 cm na rok. Za kilka

[21] Monika Jurek, Lejek grawitacyjny, w: Fizyka zabawek, PAP Słupsk, 2004, dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/mech/kepler.htm

[22] Więcej o dydaktyce astronomii w artykule autora w Uranii, nr 4/2019 "Dlaczego warto uczyć astronomii?"

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

[24] Natomiast całkowity moment pędu jest zachowany.



Rysunek 2.6: Artystycznie ciekawy rysunek rezonansu między orbitami Jowisza i planetoidy Pallas (18:7). https://en.wikipedia.org/wiki/Orbital_resonance

tysiącleci nie będzie już zaćmień.

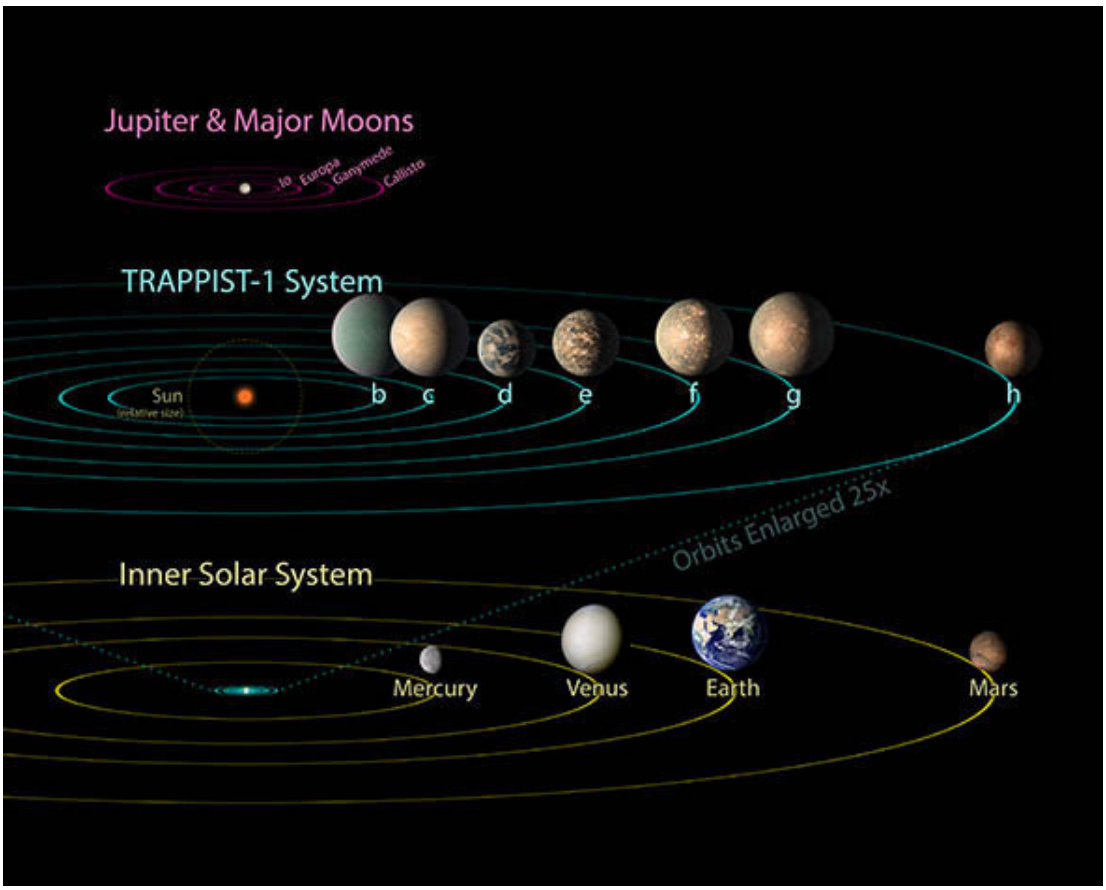
Keplerowi nie udało się znaleźć zależności matematycznych dla odległości planet od Słońca; nie udaje się to również to współczesnym astronomom – być może, nie ma żadnej zależności. Cały Układ Słoneczny powstał z rozkręconej mgławicy po wybuchu poprzedniczki Słońca a mechanika takiej plazmowej chmury 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, 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.

2.2.4 „Kepler" na tropie

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

Pierwszy poza-słoneczny układ planetarny został odkryty za pomocą radio-teleskopu przez naukowca toruńskiego, prof. Aleksandra Wolszczana, 09/02/1990. W kontekście międzynarodowym znaczenie tego odkrycia próbuje się pomniejszyć, wymieniając jako pierwszy układ planetarny dookoła gwiazdy Pegasi-51. Dziś (01/09/2019) wikipedia wymienia ponad 4 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 odległo-



Rysunek 2.7: Jeden z „obiecujących" poza-słonecznych systemów planetarnych: odkryty przez satelitę „Kepler" układ Trappist-1, czyli 7 skalistych, przypuszczalnie, planet, krążących na bardzo ciasnych orbitach dookoła czerwonego karła. System bardziej przypomina Jowisza i jego księżyce niż Układ Słoneczny. https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA21428

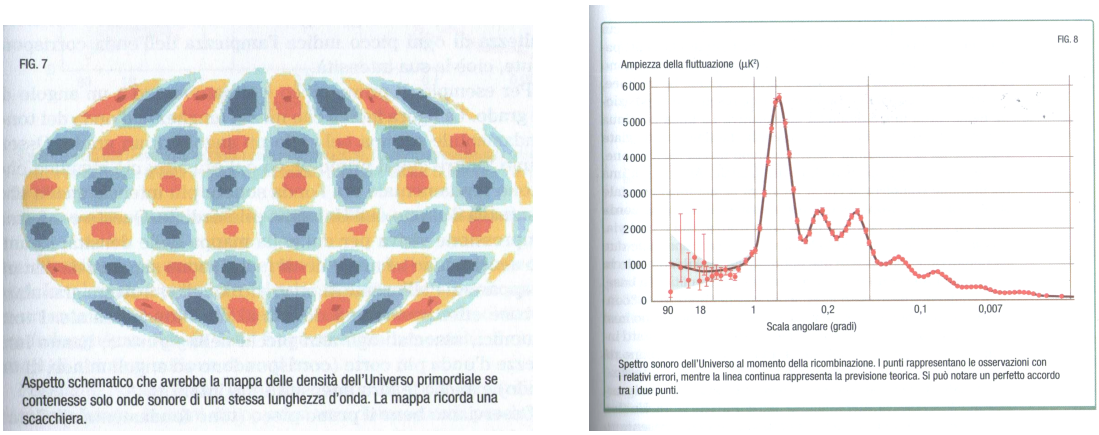
ściach od swoich gwiazd, rys. 2.8. We wrześniu 2019 doniesiono o odkryciu wody w atmosferze jednej z poza-słonecznych planet[25].

2.2.5 Harmonia Wszechświata

W poszukiwaniu interdyscyplinarnych skojarzeń, pomocnych w zainteresowaniu młodzieży fizyką i astronomią sięgniemy do „harmonii" z kosmologii. Ta dziedzina astrofizyki nastręcza 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 materią i ciemną energią, jedynie 4% .

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 „Palec Boży" (Finger_of_God). Z pomiarów promieniowania mikrofalowego tła wnioskuje się, że „granulacja" rozkładu materii w obecnym wszechświecie jest odzwierciedleniem

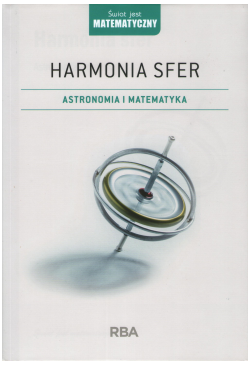
[25] A. Tsiaras, i in. Nature Astronomy, https://www.nature.com/articles/s41550-019-0878-9; https://physicsworld.com/a/water-vapour-is-spotted-on-a-distant-rocky-planet/



Rysunek 2.8: 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 przypomina rozkład harmoniczny dźwięków klarnetu (posłuchaj muzyki na nagranym wykładzie).

rozkładu masy w „primordialnej" zupie kwantowej. A jeśli w tej „zupie" ktoś zamieszał?

Przeprowadzono trójwymiarową analizę Fouriera (podobną do analizy składowych harmonicznych dźwięków) rozkładu temperatury promieniowania tła, zob. model na rys. 2.8. Rozkład temperatury przypomina rozkład harmonicznych w dźwiękach klarnetu. Analogia daleka, ale pozwala na posłuchanie na lekcji fizyki koncertów na klarnet, na obój i na flet, Wolfganga Amadeusza Mozarta.



Rysunek 2.9: „Harmonia sfer", tytuł zaczerpnięty z poszukiwania przez Keplera muzyki wytwarzanej przez obracające się planety (Zob. np. stronę http://uebergreifen.blogspot.com/2012/10/coltrane-and-kepler.html). Ta „Harmonia" jest częścią znakomitej, przetłumaczonej również na język polski, serii hiszpańskich książek popularyzujących matematykę. Podobna seria z fizyki nie została jeszcze (2019) przetłumaczona.

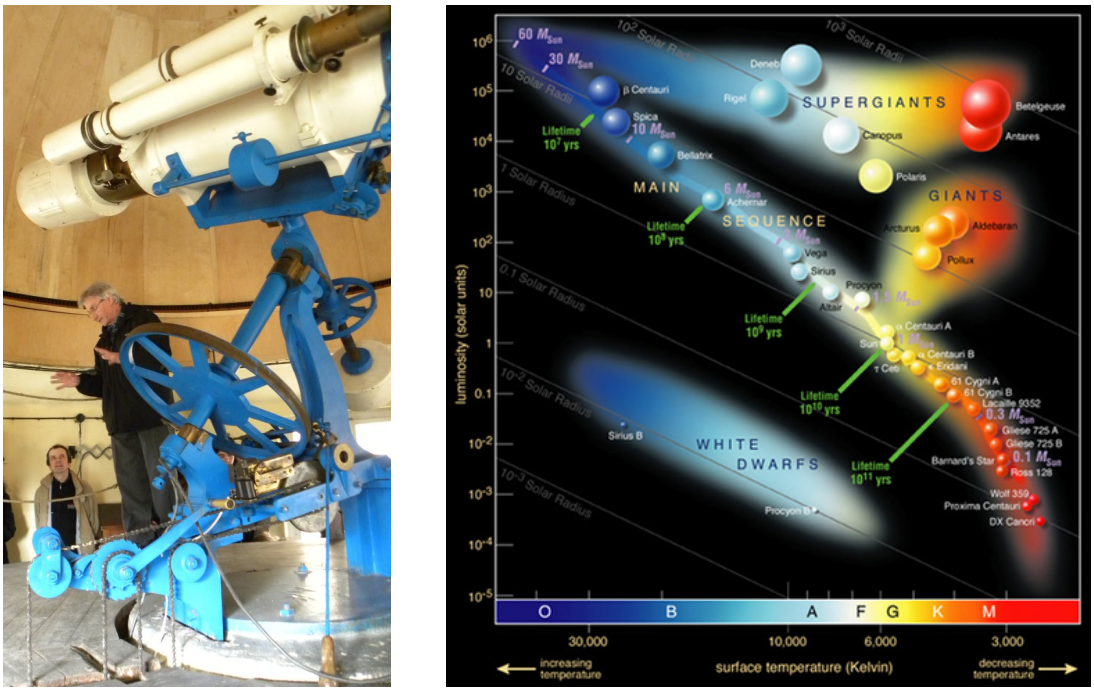
2.3 Kosmologia

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 nie żyjące, podczas gdy trzeba wiedzieć, że one rozwijają działalność i cieszą się życiem"[26]. Nikt, oczywiście, nie traktował starego filozofa serio. A on miał rację!

W końcu XIX wieku, tuż przed powstaniem teorii kwantowych i teorii względności, fizycy byli przeświadczeni o własnej wszechwiedzy – uważano, że głównym zajęciem w

[26] Arystoteles, O niebie. Księga II, XII Gwiazdy i ich ruchy. PWN, Warszawa, 1980, str. 83.



Rysunek 2.10: (a) Teleskop z Harvardu, na którym na początku XX wieku grupa astronomek skatalogowała około milion gwiazd, co pozwoliło na stworzenie diagramu Herzsprunga-Russella (b). Opowiada prof. Andrzej Strobel. Foto Maria Karwasz

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 miąższości 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 ewolucji gwiazd, nazwali typy gwiazd literami, od czerwonych do niebieskich, A, B, C itd. „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. fot. 2.10(a)) pozwoliło na stworzenie swego rodzaju „drzewa życia” gwiazd, zwanego diagramem Herzsprunga-Russella[27], rys. 2.10(b).

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.

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 wybucha.

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 się[28] określić stałe fizyczne reakcji termojądrowych w naszej gwieździe.

2.3.2 Poszukiwanie motywacji dydaktycznych

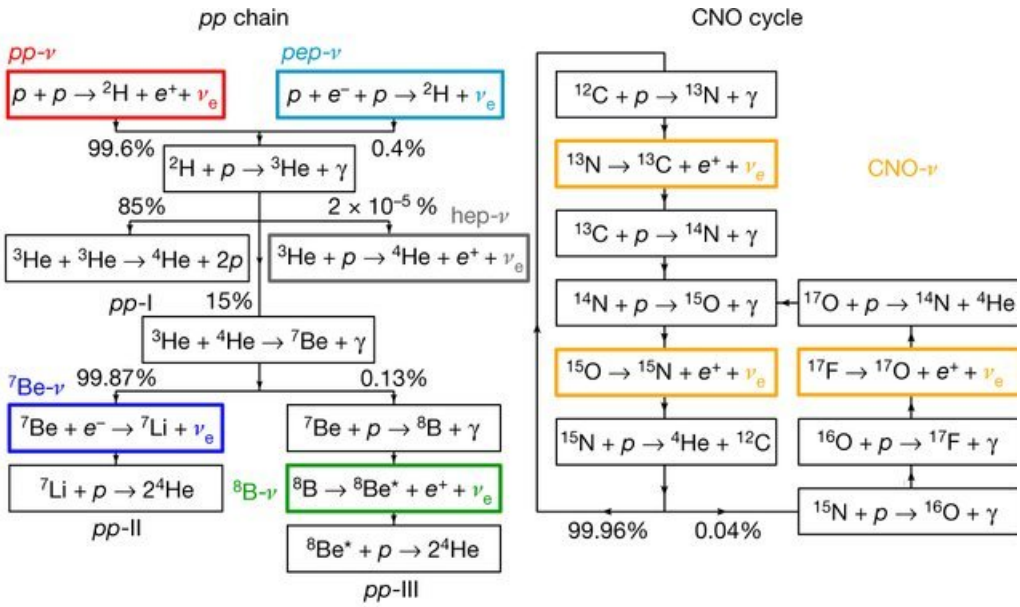
Astronomia okazuje się całkiem wdzięcznym partnerem w nauczaniu fizyki. Loty kosmiczne – w zimną i pustą dal są pretekstem do pokazania zagadnień próżni, napędu odrzutowego, własności atmosfery, doświadczeń z ciekłym azotem, itd. (zob. relacje z pokazów na stronach dydaktyka.fizyka.umk.pl). Jeziora ciekłego 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, folie izolacyjne, teflon itd. są znakomitym argumentem motywującym do zainteresowania i astronomią i technologiami materiałowymi.

Fizyka współczesna, poprzez coraz bardziej precyzyjne metody spektroskopii i coraz czulsze detektory dostarcza zarówno osiągnięć spektakularnych, jak np. pierwsza fo-

[27] https://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung%E2%80%93Russell_diagram

[28] The Borexino Collaboration, Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos, Nature, 562, 505–510 (2018), https://www.nature.com/articles/s41586-018-0624-y



Rysunek 2.11: "Mapa drogowa", czyli kierunki i prawdopodobieństwa zachodzenia reakcji termojądrowych w Słońcu. Reakcje podzielone 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: Nature https://www.researchgate.net/publication/328611556_Comprehensive_measurement_of_pp-chain_solar_neutrinos/figures?lo=1

tografia czarnej dziury spoza naszej Galaktyki[29] 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 gwiazd[30], jakieś 180 mln lat po Wielkim Wybuchu.

Zadaniem dydaktyki fizyki współczesnej jest włączenie tych osiągnięć do programów nauczania, nie jako prasowe ciekawostki, 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 dla dalszej przygody poznawczej ucznia czy dorosłego.

[29] https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7372

[30] https://www.theguardian.com/science/2018/feb/28/cosmic-dawn-astronomers-detect-signals-from-first-stars-in-the-universe

ROZDZIAŁ 3

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 Mezopotamii. Skąd się wzięła matematyka? - dyskutują nad tym nie tylko matematycy. I nad drugim pytaniem, jeszcze ważniejszym: dlaczego matematyka, nauka zupełnie abstrakcyjna[31], 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 elektro-statyczne, magneto-statyczne, generację pola magnetycznego przez przepływ ładunku elektrycznego oraz indukcję elektromagnetyczną – zjawiska znane prawie od początku XIX wieku. Ale z rozwiązania równań Maxwella „pojawiały się" fale elektromagnetyczne, 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.

[31] Twory matematyczne nie muszą mieć odpowiedników w rzeczywistości, aby móc się o nich wypowiadać – przykładem jest choćby pojęcie punktu i prostej.

Matematycy czasem żartują, że Bóg jest matematykiem, więc się z nim dobrze 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 (czyli 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 Rhind z roku 1550 p.n.e. zawiera rysunek trójkąta, trapezu i opisy hieroglifami. Jeszcze starszy papirus „moskiewski" z 1850 r. 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 Rhind to rozkład ułamków o liczniku 2 i mianowniku nieparzystym na ułamki o liczniku 1 i mianowniku parzystym, np. 2/77=1/44+1/308. Przekaz dydaktyczny bardzo pożyteczny: „Egipcjanie już 4 tysiące lat temu potrafili sprowadzać ułamki do wspólnego mianownika".

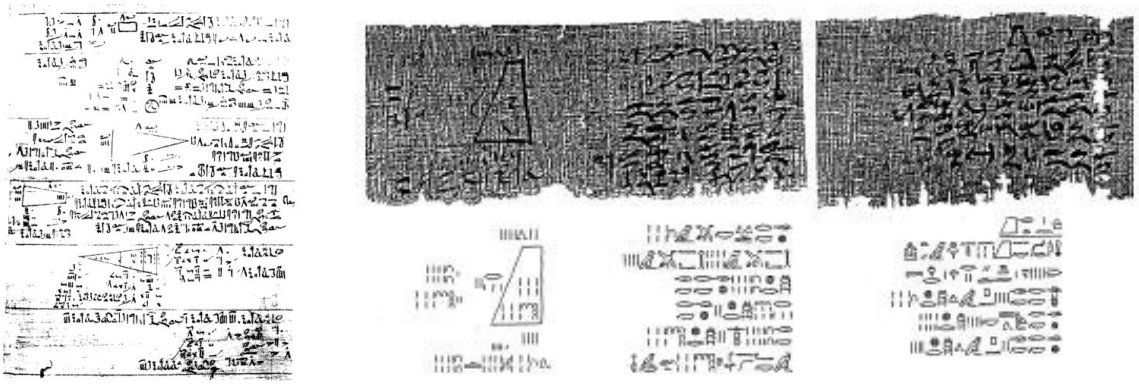
Ogólnie, jak w fizyce tak w matematyce motywacja do przyswojenia odpowiednich umiejętności musi wynikać z ich zastosowań. Tabelki do znajdowania najmniejszego wspólnego mianownika i największego podzielnika staną się bardziej zrozumiałe, gdy je potraktujemy jako sumy i iloczyn w algebrze zbiorów Boole'a. A z kolei te mają wszechstronne zastosowania[32] („znajdź 10 szczegółów, którymi różnią się dwa rysunki").

3.1.3 Archimedes i kwadratura koła

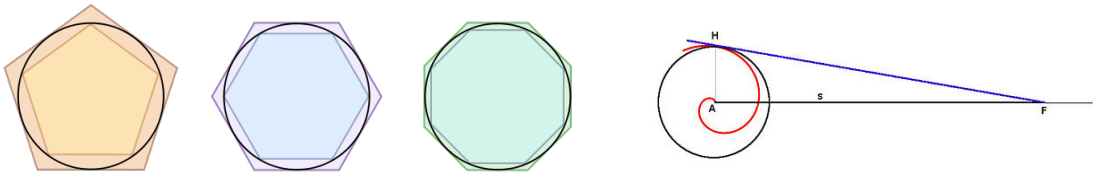
Matematyka bardzo szybko stała się nie tyle koniecznością praktyczną, co przyjemnością poznawczą. Kwadratura koła, czyli konstrukcja kwadratu o powierzchni równej danemu kołu, czyli innymi słowy znalezienie sposobu na „dokładne" wyznaczenie liczby π jest tego najlepszym przykładem.

Egipski sposób wyznaczenia liczby π, opisany w papirusie Rhind, mówił: „Odejmij 1/9 od średnicy, i na tym co zostanie, zbuduj kwadrat". Dokładność wyznaczenia liczby π tym sposobem jest lepsza niż 1%, mimo użycia tylko jednej cyfry znaczącej w recepcie.

[32] Włoskie ministerstwo edukacji, reformując w ostatnich latach system nauczania przygotowało programy (i podręczniki) „matematyki dla obywateli", gdzie uczy się obliczania odsetek od kredytów, rozwiązywania sudoku, rysowania rzutów technicznych brył, itd.



Rysunek 3.1: Papirus Rhind (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.



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

Archimedes (281-212 p.n.e.) rozwiązał zagadnienie w sposób iteracyjny, wpisując i opisując na okręgu wieloboki foremne, zob. rys. 3.2a. Podał on[33] 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%.

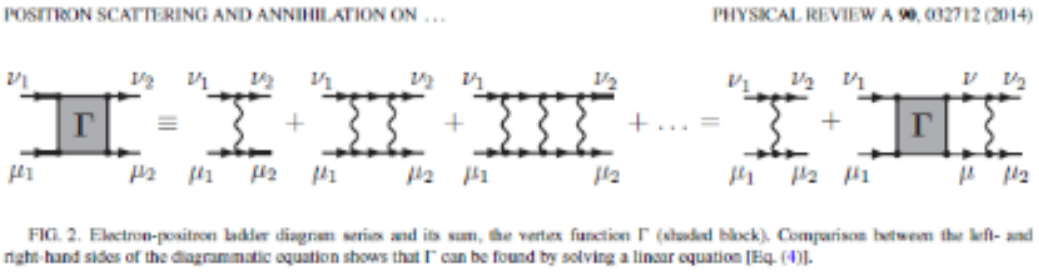
Archimedes podał też sposób geometryczny na wyznaczenie obwodu koła, korzystając ze „swojej" spirali: styczna do tej spirali (rys. 3.2b) odcina na prostej wychodzącej ze środka koła odcinek AF równy obwodowi koła. Sposób o tyle ciekawy, że łączy spiralę opisaną równaniem parametrycznym z wartością pochodnej i „przekłada" to na konstrukcję geometryczną. Języki programowania opracowane na potrzeby dydaktyki (np. GeoGebra) pozwalają na tworzenie apletów on-line ilustrujących to zagadnienie[34].

Liczba π stanowiła hobby-wyzwanie dla wszystkich pokoleń matematyków. Szeregi algebraiczne przybliżające π podali Leibniz (prosty wzór, ale wolno zbieżny[35]), Euler, Viète i wielu innych. Z konstrukcji za pomocą cyrkla i linijki podaje się sposób zaproponowany przez polskiego jezuitę Adama Kochańskiego (1631-1700) nadwornego matematyka Jana Sobieskiego. Błąd absolutny wyznaczenia π w konstrukcji Kochańskiego wynosi 0,00006. Konstrukcja z 1914 roku, autorstwa hinduskiego matematyka Ramanujana wyznacza liczbę π z dokładnością do 8 cyfr po przecinku. Multimedialna sekwen-

[33] Bill Cherovitzo, Squaring the Circle, University Denver Colorado, http://www-math.ucdenver.edu/ wcherowi/courses/history2/quad.pdf

[34] G. Rubinstein, Archimede Spiral to Square the Circle, https://www.geogebra.org/m/FJHrU53b

[35] $\pi = 4 - 4/3 + 4/5 - 4/7 + 4/9 \ldots$.



Rysunek 3.3: Diagramy pokazujące kolejne przybliżenia niezbędne do uwzględnienia w obliczeniach rozpraszania pozytonów na atomach. Źródło: Gleb Gribakin.

cja tej konstrukcji jest dostępna w internecie[36]. 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 szereg 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 energetyczne elektronów. Dziś dokładność wyznaczenia poziomów energetycznych elektronów w atomie wodoru sięga 10^{-14}: nie są to jeszcze poprawki grawitacyjne, ale niewiele brakuje[37]. 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”[38].

Na rys. 3.3 pokazujemy, jako ilustrację, kolejne przybliżenia jakie trzeba uwzględnić w obliczeniach rozpraszania pozytonów (anty-elektronów) 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 kwantową[39]) poprawia na 2.002319043617(15).

[36] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:01-Squaring_the_circle-Ramanujan-1914.gif

[37] Zob. np. V. A. Yerokhin, K. Pachucki i V. Patkoš, Theory of the Lamb Shift in hydrogen and light hydrogen-like ions, Annalen der Physik 531, 1800324 (2019)

[38] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/index-pl.html

[39] https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_electrodynamics

Według najnowszych obliczeń elektrodynamiki kwantowej, iloczyn prędkości światła c i stałej Rydberga (czyli energii jonizacji atomu wodoru, R_∞) wynosi[40]

$$cR_\infty = 3289841960248.9(3.0)\,kHz \tag{3.1}$$

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 szczegółów[41].

Jeszcze sto lat temu do analizy częstotliwości niezbędne były skomplikowane urządzenia, w rodzaju mosiężnych kieliszków z wąskimi „dziubkami", do których przykładało 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(ω), określoną w dziedzinie częstotliwości ω.

„Muzyka kosmosu" przedstawiona w rozdziale II jest właśnie taką transformatą. Można też dokonać transformacji odwrotnej F(ω) → 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.

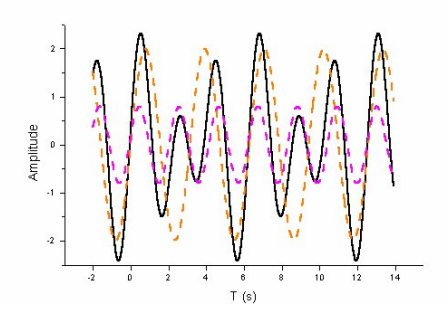
Bardzo pouczająca dydaktycznie jest analiza Fouriera dźwięku prostych instrumentów. Wbrew pozorom, trudno znaleźć instrument generujący dźwięki o jednej tylko skła-

[40] Zob. Yerokhin et al., op. cit..

[41] https://en.wikipedia.org/wiki/Interval_(music)

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

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



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

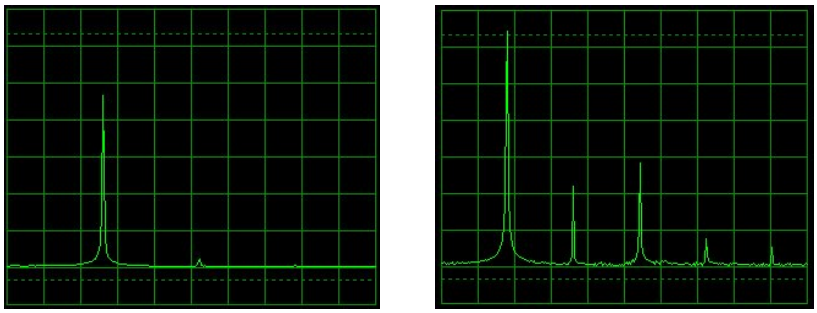
$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cos nx dx$$

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

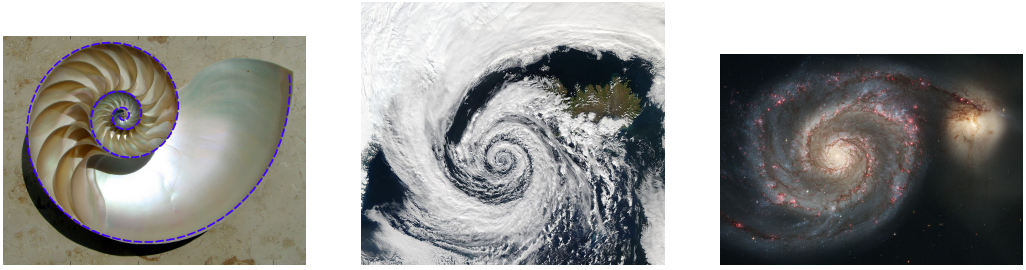
Rysunek 3.4: Ilustracja transformaty Fouriera: funkcja wykreślona linią ciągłą jest sumą $\sin t$ i $2\sin(2t)$ – linie przerywane: sprawdzamy, że w badanej funkcji można zauważyć zmienność z odpowiednimi okresami. (b) To samo metodą analizy – współczynniki rozwinięcia transformaty Fouriera uzyskuje się z odpowiednich całek.

dowej harmonicznej: i 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 jakiekolwiek 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 zmia-



Rysunek 3.5: (a) Widmo Fouriera dźwięku kieliszka pocieranego na brzegu i (b) widmo zabawkowego fletu.



Rysunek 3.6: Muszla nautilusa, niż nad Islandią i galaktyka Whirpool mają ten sam kształt – opisany spiralą logarytmiczną. Źródło: Internet; By Dicklyon - Own work, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35543222, http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=6204, http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap050428.html, https://www.daringgourmet.com/wp-content/uploads/2013/06/Sunflower-public-domain-4-sm.jpg

nach klimatycznych).

W klimatologii analizuje się okresowość zmian temperatury, opadów, wiatrów. Analiza danych meteorologicznych (zmian krótkookresowych) i zmian paleoklimatycznych pozwala wydzielić pogodę, makropogodę, klimat, makroklimat i megaklimat, z okresami zmienności około 7-10 dni, 50 lat, 80 tys. lat, 0.5 mln lat. W krótkiej skali czasowej zmiany pogody są znaczne (różnice temperatur 5°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°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 zupełne 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 dialogiem, jak to było u Platona – bez wzorów, rysunków, tabel. Natomiast praca Newtona przypomina podręcznik geometrii: rysunki cyrklem i linijką, założenia, twierdzenia

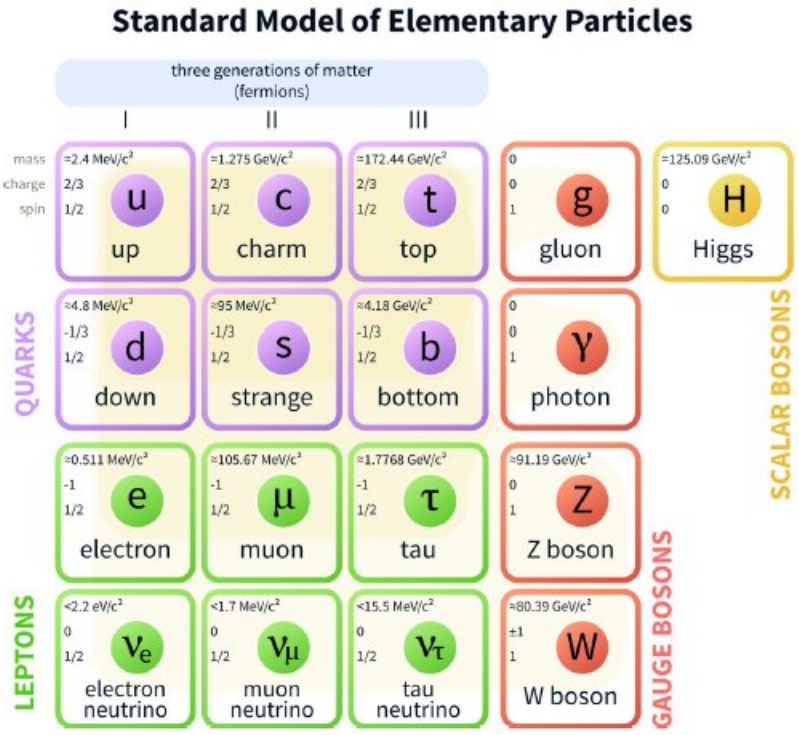


Figure 1. The particles of the Standard Model of particles physics. (Image Credit: MissMJ.)

Rysunek 3.7: Najbardziej aktualne, poglądowe zestawienie własności kwarków, bozonów cechowania i leptonów. Źródło: Martin White, *What's next for particie physics, IOP 2017*.

i wnioski. Można by zaryzykować tezę, że Newton wziął za wzór „Elementy" Euklidesa.

Geometria Euklidesa to naukowy system: ze ściśle określonej listy założeń (aksjomatów) wyprowadza się całe mnóstwo twierdzeń. Bardzo skomplikowaną *fenomenologię* cząstek elementarnych (odkryto ich doświadczalnie tysiące) uporządkowano począwszy od lat 60'tych 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*.

To, czego 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. asymetrie ładunku (*Charge*), parzystości (tzn. obrotów, *Parity*) i czasu (*Time*). Jeszcze w latach 50-ych XX wieku okazało się, że rozpady promieniotwórcze *beta* (z emisją elektronu) wykazują orientację przestrzenną (w zależności od krętu, czyli spinu elektronu)[42]. Innymi słowy, złamana jest symetria ła-

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

dunku: upraszczając, ujemny elektron ma kręt „w prawo” a dodatni anty-elektron, pozyton ma kręt w lewo. W 1964 roku, w badaniach czasu życia cząstek elementarnych zawierających „trzeci” 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 tyłu. Dlaczego? Model nie wyjaśnia.

Konkluzja dydaktyczna? Nauczeni „wpadką” Lorda Kelvina, chwaląc 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 nieznanych kontynentów[43]. Ale to nie wystarcza: aby dokonać prawdziwego, przełomowego odkrycia, uczony musi stworzyć sobie sam tzw. „warsztat pracy”. Doświadczenia z interferencją światła były trudne w czasach Witelona[44], Younga i Michelsona – wymagały świeczek, pryzmatów lub lusterek do prowadzenia promienia światła. Od czasów laserów, wystarczy tania 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 $v = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t$, gdzie $\mathrm{d}x$ są przyrostami drogi, a $\mathrm{d}t$ przyrostami czasu. Ale jest jeszcze inny, trudniejszy do zrozumienia powód powstania rachunku różniczkowego. Newton wyjaśnił prawa Keplera wprowadzając wzór na siłę grawitacji F_G

$$F_G = \frac{GMm}{r^2}, \tag{3.2}$$

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.

[43] Kolumb, oczywiście nie płynął zupełnie w nieznane, choć sporo ryzykował. Znane były rozmiary kuli ziemskiej, i od czasów wyprawy Marco Polo, rodaka Kolumba do Chin – znana odległość Indii od „słupów Herkulesa”. Kolumb dysponował i kompasem i zapewne wiadomościami (plotkami) 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 Harleya, plus siła Coriolisa, która globalną cyrkulację wiatrów „zakręca” wirowo).

[44] Witelon (1237-1300?) w traktacie o optyce *De perspectiva*, opisał m.in. zwierciadła, peryskop, anatomię oka, percepcję wizyjną. Witelon definiował się jak „syn Turyngii i Polski”. Jego dzieło z łaciny na polski przetłumaczyli prof. Andrzej Bielski i Andrzej Wróblewski z UMK.

$$F_C = \frac{mv^2}{r}, \tag{3.3}$$

gdzie v jest prędkością (liniową) ruchu po okręgu, a r – promieniem okręgu[45].

Ale i wzór na siłę odśrodkową Newton też musiał wyprowadzić. Z jego własnych praw dynamiki[46] 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 granicy" do nieskończenie 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.

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 dajace jakąkolwiek receptę. Trzeba przywołać tzw. równanie podstawowe rachunku całkowego, które łączy całkę oznaczoną, ale o „kroczącej" granicy górnej, z funkcją pierwotną, *f(x)*:

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

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"[47] przytaczamy przykład pytania, ile metrów przejedzie

[45] 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.

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

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

ferrari jeśli przyspiesza „do stówy” (czyli dla łatwiejszego rachunku 108 km/h = 30m/s) w trzy sekundy. Interaktywne rozumowanie nauczyciela z całą grupą daje wynik właściwy, 45 m. Przejście formalne od a = 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, mimo upływu 40 lat od odkrycia doświadczalnego, wyjaśnić zjawiska nadprzewodnictwa wysoko-temperaturowego: ceramiki o skomplikowanych wzorach chemicznych, oparte np. o tlenki miedzi, baru, itru, w temperaturze pokojowej są znakomitymi izolatorami, a w temperaturach ciekłego powietrza (77 K) a nawet wyższych stają się nadprzewodnikami. „Żonglerka” elektronami 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...

ROZDZIAŁ 4

Klimat, środowisko, energia - czyli o efekcie cieplarnianym

4.1 Równowaga termodynamiczna

Źródłem ciepła na Ziemi jest Słońce. Co prawda, z rozpadów promieniotwórczych (^{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 W/m^2 $\pi(6370\times10^3\ \mathrm{m})^2 = 174\times10^3$ TW docierających do powierzchni Ziemi bezustannie ze Słońca [48]. Stała słoneczna **1361 W/m^2** to energia, jaka w jednostce czasu trafia na 1 m^2 powierzchni ustawionej prostopadle do promieniowania słonecznego, docierająca w okolice Ziemi.

Jaka powinna być temperatura globu w stanie równowagi termodynamicznej – promieniowania padającego i wysyłanego w przybliżeniu Ziemi bez atmosfery możemy oszacować, korzystając z modelu 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:

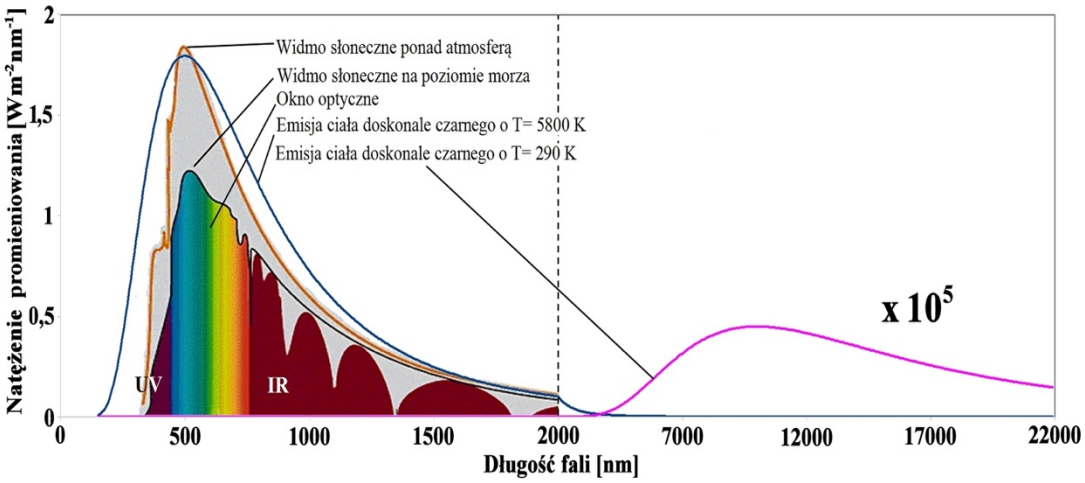
$$I = \frac{1}{4}1366\ \mathrm{W/m^2} = 341.5\ \mathrm{W/m^2}. \tag{4.1}$$

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

$$I = \sigma T^4, \tag{4.2}$$

gdzie stała $\sigma = 5.67\times10^{-8}\ \mathrm{Wm^{-2}K^{-4}}$, otrzymujemy $T = 278$ K (czyli +5°C). Podana stała

[48] Jako promień Ziemi przyjęliśmy $R = 6370$ km, mimo że Ziemia nie jest kulą.



Rysunek 4.1: Powyższy rysunek przedstawia 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 $\lambda = 0.5\mu$m. Maksimum emisji dla $T = 290$ K odpowiada $\lambda = 10\mu$m. Natężenie promieniowania poza atmosferą ma w maksimum wartość około 2 W m^{-2} 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.

słoneczna I jest wynikiem pomiarowym uzyskanym z użyciem satelitów. Podobny wynik na ekwiwalentną temperaturę Ziemi doskonale czarnej można uzyskać również z geometrycznych danych astronomicznych [49].

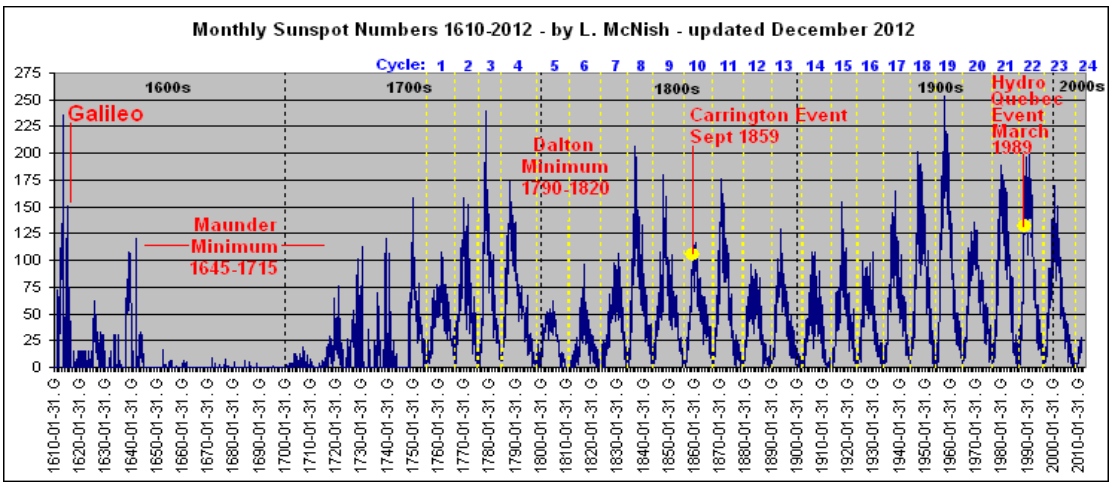
Słońce nie oświetla Ziemi przez cały czas z tą samą intensywnością. Aktywność Słońca rośnie raz na 11 lat, kiedy przybywa plam słonecznych [50], ale zmiany w ilości energii docierającej do Ziemi nie przekraczają ±0.1%. Mimo to, brak plam słonecznych przez dłuższy czas, jak np. obserwowany przez Jana 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 lodowej, zob. Rys. 4.2.

Na podstawie analizy zawartości węgla ^{14}C w słojach drzew możemy ocenić aktywność Słońca również w okresach dawniejszych [51]. Wydaje się, że aktywność słoneczna była niższa niż zwykle również pod koniec średniowiecza (minimum Wolfa, około roku

[49] Jeżeli znamy temperaturę powierzchni Słońca (5780 K), to temperaturę Ziemi można obliczyć bez stałej Stefana-Boltzmana, korzystając jedynie z danych astronomicznych (promień Ziemi, średnica Słońca 1.4 mln km i odległość Ziemia-Słońce 150 mln km), zob. Zadania czeskie , ZDF UMK, „Temperatura Ziemi" physicstasks.eu

[50] Plamy słoneczne, to w uproszczeniu gigantyczne wiry pola magnetycznego docierające na powierzchnię Słońca. Wzrostowi ilości plam odpowiada wzrost „zerwanych" wirów czyli słonecznych erupcji, wyrzucających w kosmos zwiększone ilości ultra-gorącej plazmy. Nie ma dotychczas przekonywującego modelu magneto-hydro-termo-dynamiki Słońca wyjaśniającej cykle 11-letnie.

[51] Niestabilny izotop ^{14}C powstaje w atmosferze w reakcji pochłonięcia neutronu przez izotop ^{14}N a produkowany jest proton, według schematu ${}^1_0n + {}^{14}_7N \rightarrow {}^1_0n + {}^{14}_6C + {}^1_1p$. Neutrony w atmosferze pochodzą z tzw. promieniowania kosmicznego, a to głównie z wiatru słonecznego.



Rysunek 4.2: Okresowe zmiany liczby plam słonecznych. Minimum Maundera na tle obserwowanej liczby plam słonecznych w latach 1610–2010.

1300 n.e.). Nie do końca jednak minima temperatury (uśrednione po okresach kilkuletnich) odpowiadają minimom aktywności słonecznej.

4.2 Cykle Milankovicia

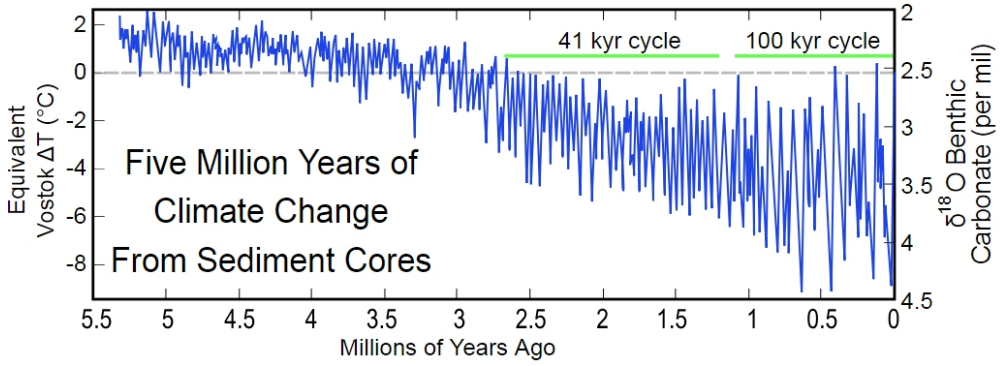
Nie tylko zmiany aktywności Słońca mają wpływ na klimat. Wiemy, choćby z obserwacji morenowego krajobrazu północnej Polski, że co mniej więcej sto tysięcy lat zdarzają się wielkie zlodowacenia. Podobnie długiego okresu są tzw. cykle Milankoviča. Wydaje się, że za cykle rzędu dziesiątków i setek tysięcy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

Wiadomo od czasów Keplera, że planety krążą dookoła Słońca po elipsach. Podejrzenia o orbity niekołowe planet znajdujemy też w dziele Kopernika. 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 – spłaszczenia i nachylenia 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° do 24.5°). Zsumowanie tych ruchów jest trudne, jak to omawia angielska wersja wikipedii [52]. Efektem są niewielkie zmiany nasłonecznienia, ale powodujące zmiany temperatury od +2°C do −8°C, zob. Rys. 4.3.

I wreszcie najdłuższe z postulowanych okresowości, ok. 140 mln lat, wynikać mogą z obiegu całego Układu Słonecznego dookoła centrum Galaktyki [53].

[52] Wikipedia, *Milankovitsch Cycles*, en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles

[53] Zauważmy jednak, że podobnego rzędu (200 mln lat) są również okresy zbijania się i rozbiegania płyt kontynentalnych Ziemi, też niezwykle istotnie wpływające na klimat poprzez aktywność wulkaniczną.



Rysunek 4.3: Zmiany klimatu i temperatury na Ziemi w ciągu minionych 5.5 mln lat.

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.

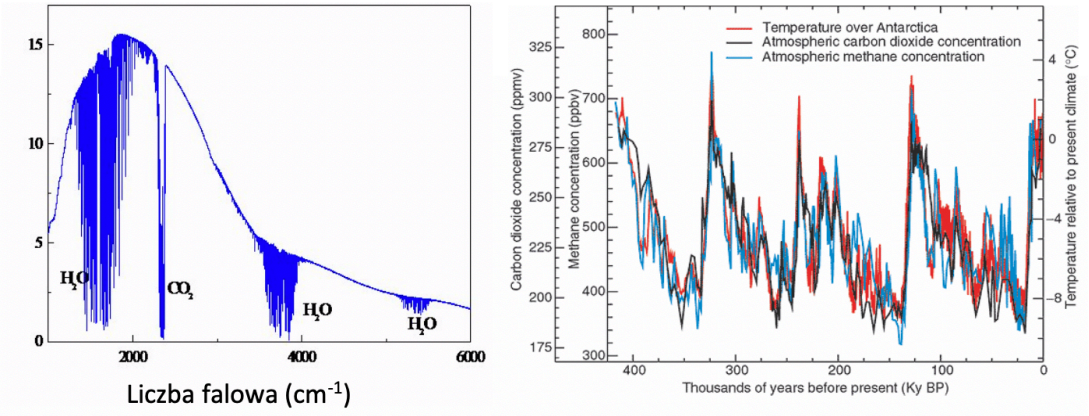
Po prześledzeniu skomplikowanego bilansu ciepła na Ziemi okazuje się, że nasza planeta ma nadwyżki (Ziemia się nie grzeje), ale nie ma też *manka*. Naukowcy konstruują coraz bardziej skomplikowane komputerowe modele "Global Climate Circulation". Obrazowo można natomiast powiedzieć, że atmosfera działa jak pierzynka – nie grzeje tak, jak grzałka, ale zapobiega ucieczce ciepła.

W całościowym bilansie atmosfera podnosi efektywną (średnią) temperaturę na Ziemi, z −18°C dla piaskowej kuli bez atmosfery (jak to ma miejsce na Marsie) do +15°C. Te dodatkowe **+33°C** to *naturalny efekt cieplarniany*. Te dodatkowe **+33°K** to "zbieg okoliczności" szczęśliwy dla życia na Ziemi – zamiast średnio syberyjskiej zimy mamy (średnio) 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.

Wieloatomowa struktura pozwala tym gazom efektywnie pochłaniać promieniowanie podczerwone (którego niesie około 40% energii w widmie Słońca). Promieniowanie podczerwone dociera do powierzchni Ziemi, ale w swej powrotnej drodze w kosmos jest



Rysunek 4.4: Mechanizmy efektu cieplarnianego: (**lewy rysunek**) widmo (natężenie, jednostki względne) promieniowania elektromagnetycznego w temperaturze 290 K ma maksimum w zakresie podczerwieni (długość fali około 9 μm); N_2 i O_2 w tym zakresie długości fal nie pochłaniają energii, więc atmosfera jest "przezroczysta"; energia jest jednak dobrze pochłaniana przez H_2O i CO_2 – ich zakresy absorpcji się uzupełniają; CO_2 skutecznie zamyka możliwe okno ucieczki ciepła z Ziemi (pomiary GK); (**prawy rysunek**) w ciągu ostatnich 400 tys. lat temperatura na Antarktydzie (linia czerwona) i zawartość CO_2 w atmosferze (linia czarna) były ściśle skorelowane (źródło: NAOA).

pochłaniane przez gazy wieloatomowe [54]. W skutek tego, średnia temperatura na Ziemi jest wyższa niż to wynikałoby z danych “astronomicznych”, aż o 33 K, i wynosi +18°C. Dla życia opartego na wodzie, 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 temperatury [55], to ilość pary wodnej zależy niezwykle silnie: od zawartości prawie 0% w temperaturze 0°C do zawartości 100% w temperaturze 100°C[56]. Mały wzrost temperatury na Ziemi powoduje znaczny wzrost ilości H_2O w atmosferze, co potęguje efekt cieplarniany. Jest to rodzaj dodatniego sprzężenia zwrotnego, jak piszczące głośniki, kiedy w pobliżu jest mikrofon!

Dokładna temperatura zależy od wielu czynników; w przypadku Europy jest to np. ciepły prąd morski z rejonu Morza Sargassowego. To przyjemne +15°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.

[54] Ta dziwna pozornie zależność jest konsekwencją prawa Plancka. Docierające do Ziemi promieniowanie ma „temperaturę” 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. Gazy cieplarniane przeszkadzają w tej ucieczce, co w konsekwencji podnosi średnią temperaturę na Ziemi.

[55] Jak to pokazuje przykład Wenus z gigantycznymi ilościami CO_2 w atmosferze i ogromną temperaturą (do 500°C), ilość CO_2 w atmosferze nie zależy od temperatury tylko w „rozsądnym” zakresie temperatur.

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

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 Celsjusza [57].

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 tundry [58]. 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 Antarktydzie [59] 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 być 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 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

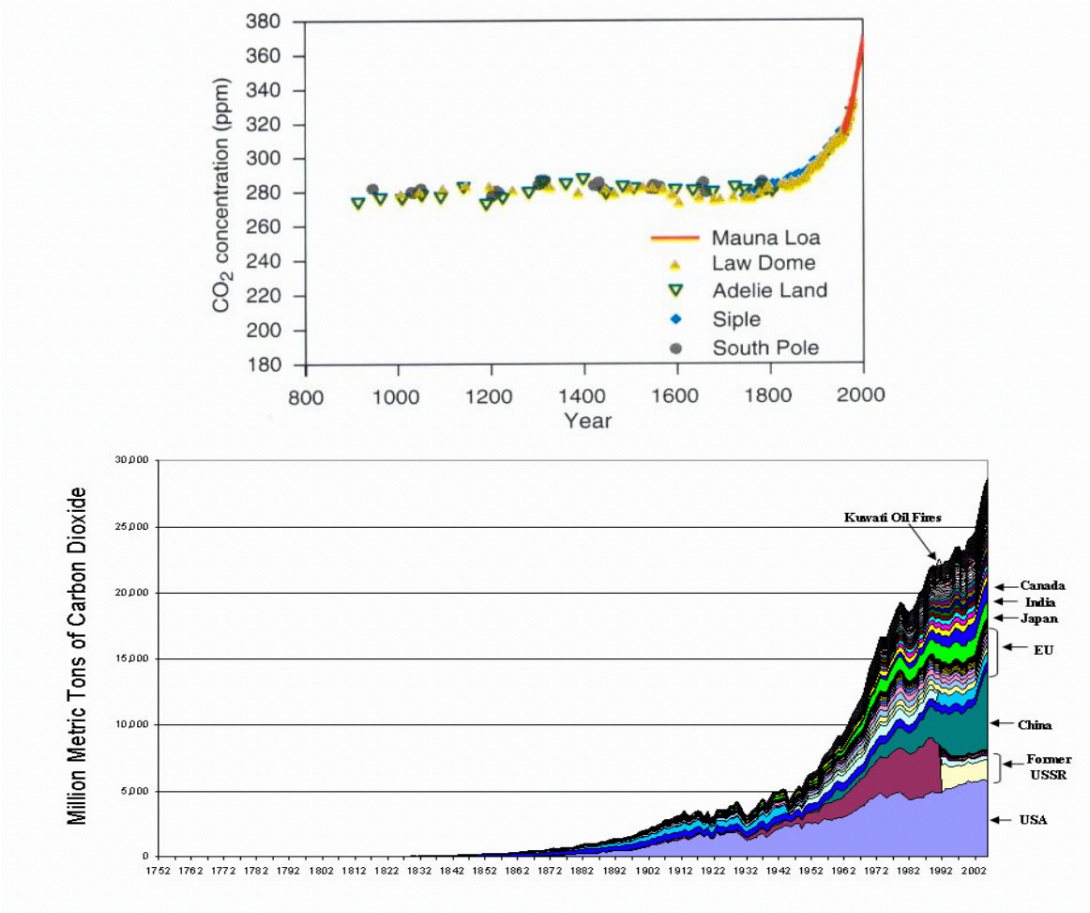
[57] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/termo/psychometr_big-pl.html, http://en.wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water

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

[59] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vostok_Petit_data.svg pomiary z radzieckiej stacji Vostok, opracowane we współpracy z badaczami z Francji i USA.

stała przez ostatnie parę tysięcy lat, na poziomie paleontologicznie wysokim, 280 ppm a od początku ery przemysłowej rośnie monotonicznie.

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



Rysunek 4.5: (**górny rysunek**) Koncentracja CO_2 (ppm) od roku 1800 do 2000. (**dolny rysunek**) Wzrost CO_2 w atmosferze ziemskiej z wyszczególnieniem emisji antropogenicznej CO_2 z różnych części Świata.

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°C. Jest to nieco mniej niż −0.7°C w okresie wojny trzydziestoletniej i dużo mniej niż +3°C w czasach, kiedy żyły dinozaury na naszych szerokościach geograficznych. Niestety dla nas, nie potrafmy 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 (ponad 25%) 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?

ROZDZIAŁ 5

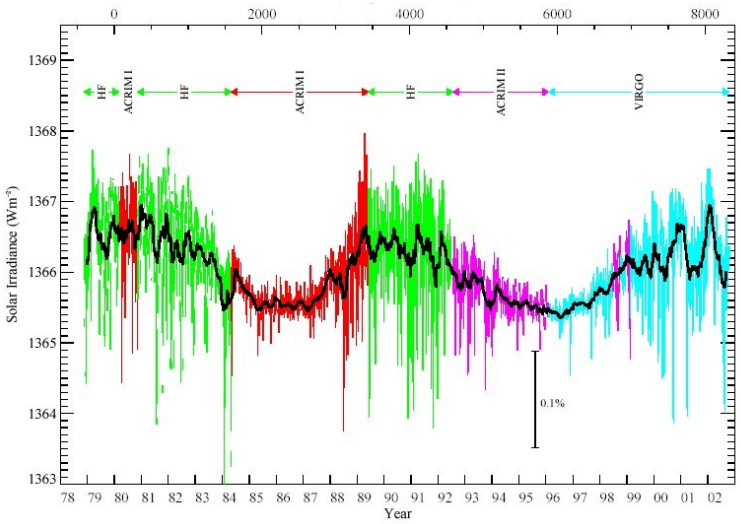
Klimat i środowisko - alternatywne źródła energii

5.1 „Produkcja" energii

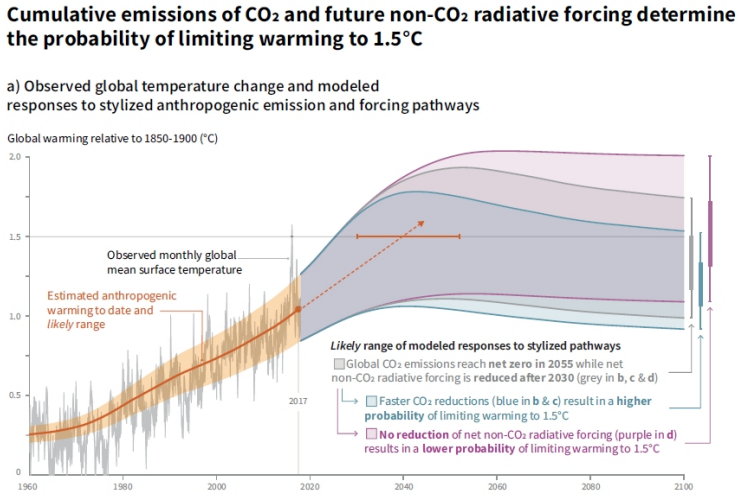
Energii nie możemy wytwarzać, energii nie możemy produkować, energię możemy tylko przetwarzać, jedną formę energii w drugą. Zgodnie z równaniem Einsteina $E = mc^2$ całkowita ilość energii we Wszechświecie od jego początku do dzisiaj powinna być taka sama. Jeżeli policzymy masę sumaryczną i energię sumaryczną Wszechświata, to ona musi być taka sama. Jest to podstawowe prawo fizyki, czyli prawo zachowania energii. Energię możemy jedynie przetwarzać i nie możemy jej wytwarzać.

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 cyklach słonecznych 11-letnich, 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 lub 1 j.a.) 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 1361 W/m^2 [60]. Zmiany klimatyczne zachodzące na Ziemi nie wynikają więc ze zmiany ilości energii docierającej ze Słońca, ponieważ ta jest stała w jednostce czasu. Energia słoneczna dostarczana jest do Ziemi w postaci światła widzialnego (ok. 40%), podczerwonego (50%) i nadfioletu (10%).

[60] N. Scafetta, R. C. Willson. ACRIM total solar irradiance satellite composite validation versus TSI proxy models. *Astrophysics and Space Science* 350 (2), s. 421-442.



Rysunek 5.1: Zmiany stałej słonecznej w cyklu 11-letnim, dane satelitarne z lat 1978 – 2003. Pomiary z różnych satelitów zostały przedstawione na powyższym wykresie w odmiennych kolorach.



Rysunek 5.2: Przewidywane zmiany globalnej temperatury do roku 2100.

5.2 Zmiany klimatyczne

W grudniu 2018 r. opublikowano raport, który sumuje przewidywania do końca tego stulecia i stwierdza, że możemy się spodziewać wzrostu temperatury o 1.5°C nawet już w 2040 roku [61].

Jeśli przejdziemy na alternatywne źródła energii, to wzrost globalnej temperatury zostanie zahamowany już w 2040 roku, jeśli tego nie zrobimy, to w 2060 roku grozi nam duży wzrost temperatury aż o 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 CO_2 do atmosfery, czyli wyeliminować węgiel z możliwych źródeł energii. Spalanie benzyny (C_6H_{14},

[61] https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf



Rysunek 5.3: Kolumny w elektrowni jądrowej, w których jest chłodzony czynnik roboczy napędzający reaktor.

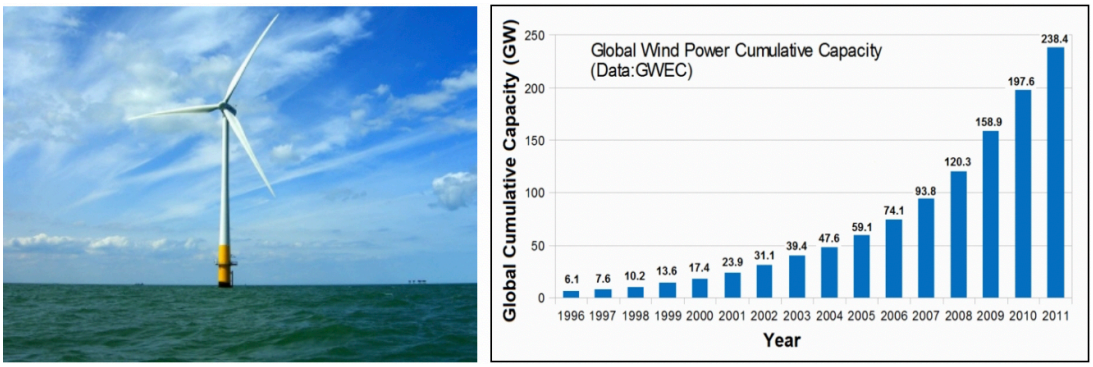
heksanu) dostarcza mniej więcej 50% CO_2 w porównaniu z tą samą energią uzyskaną ze spalenia węgla. Podczas spalania metanu (CH_4), czyli gazu ziemnego trafia jeszcze mniej CO_2 do atmosfery, gdyż jest to zaledwie 20%. Gdybyśmy spalali jedynie wodór (H_2), wówczas 0% CO_2 trafiłoby do atmosfery ziemskiej. Czyli bardzo dobrym pomysłem i najlepszą receptą na zmniejszenie zawartości CO_2 w atmosferze jest wyeliminowanie węgla z możliwych i używanych źródeł energii.

Wodór jako nośnik energii wytwarzany jest najczęściej z elektrolizy wody. W jednym zbiorniku powstaje wodór H_2 w postaci gazowej, a w drugim tlen O_2, także jako gaz. Następnie specjalnymi przewodami tlen i wodór trafiają do ogniwa paliwowego, w którym powstaje prąd elektryczny i płynie on do silnika elektrycznego napędzającego koła w samochodzie.

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 i energia z nowoczesnych elektrowni, w których zachodzić będzie fuzja jądrowa. 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, iż z małej ilości 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 domowych. W Polsce również obserwujemy coraz więcej wybudowanych wiatraków i planuje się budowę farm wiatrowych na Bałtyku. Mniej więcej 5% całkowitej produkcji



Rysunek 5.4: Coraz bardziej popularne są wiatraki i farmy wiatrowe budowane na morzu.

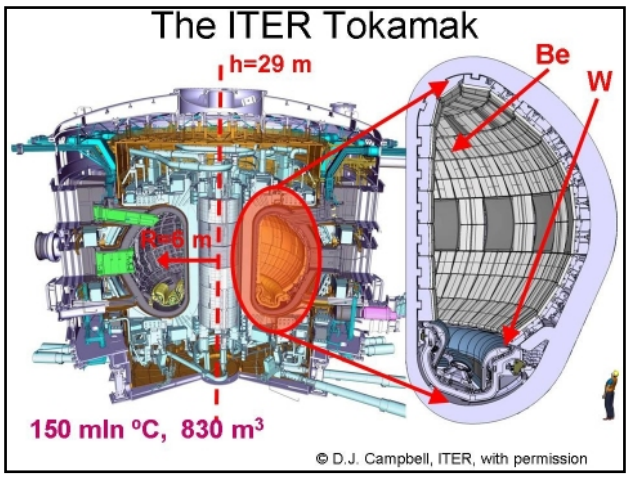
energii na świecie wytwarzanej jest przez wiatraki. Najwięcej energii tego typu wytwarza się w Chinach, USA, Niemczech, Hiszpanii i Danii.



Rysunek 5.5: Bardzo obiecujące są coraz bardziej udoskonalane panele fotowoltaiczne.

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 rozdzieleniu i popłynie prąd elektryczny. Ogniwa łączymy w panele fotowoltaiczne, aby uzyskać z nich większe napięcie elektryczne. Efektywność obecnie stosowanych ogniw fotowoltaicznych wynosi kilkanaście procent. Wiele krajów zachęca swoich mieszkańców do instalacji paneli fotowoltaicznych na swoich domach i do produkcji tego typu energii odnawialnej. Działanie baterii słonecznych można obejrzeć na stronie dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/13.

We Francji i w Korei Południowej budowane są elektrownie z reaktorami termojądrowymi, w których zachodzą reakcje syntezy wodoru H i helu He. Niestety temperatura w reaktorze musi wynosić 150 mln °C i w jego wnętrzu musi znajdować się plazma o takiej temperaturze. Przy budowie takiego typu reaktora trzeba rozwiązać wiele problemów naukowych i technicznych. Na rysunku 5.6 przedstawiony jest schemat tokamaka ITER z układem cewek do utrzymania potężnych pól magnetycznych, układy chłodzenia cewek, stacje diagnostyki procesów jądrowych i atomowych, wewnętrzna komora „spalania” deuteru i trytu po prawej oraz schemat ścian odprowadzających energię 500



Rysunek 5.6: Schemat budowy reaktora termojądrowego ITER Tokamak w Cadarache w pobliżu Marsylii we Francji z zachowaniem skali. Po prawej stronie na dole stoi dorosły człowiek.

MW [62]. Pierwszy zapłon przewidywano na rok 2019, lecz w wyniku opóźnień, nastąpi on najwcześniej w 2025 roku. Według projektu, ITER ma każdorazowo podtrzymywać reakcję fuzyjną przez około 1000 sekund, osiągając moc 500-1100 MW.

Korea Południowa planuje zbudowanie pierwszego przemysłowego reaktora termojądrowego w roku 2050 i będzie mogła sprzedać go innym państwom. Warto dodać, że energii termojądrowej wystarczy nam na kilka tysięcy lat.

[62] D. J. Campbell, *Progress towards Fusion Energy at ITER*, IAEA Technical Meeting, Deajeon, Republic of Korea, 15-19.12.2014.

ROZDZIAŁ 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" potwierdzeniem ogólnej teorii względności (OTW) Einsteina: czekano na falę 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 ogólna teoria względności (OTW) z 1915-17 roku została potwierdzona przez obserwacje zaćmienia Słońca w 1919 roku. Jednak nie dostał nagrody za teorię względności, ale za wyjaśnienie efektu foto-elektrycznego (zob. rozdział I). Podobno jeden z profesorów w Komitecie nie wierzył w tę teorię. Jednym z efektów przewidzianych przez ogólną teorię względności było grawitacyjne odchylanie 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 spo-

sób „ulepszona” pozwala więc wyznaczyć 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” [63].

6.1.2 Case study

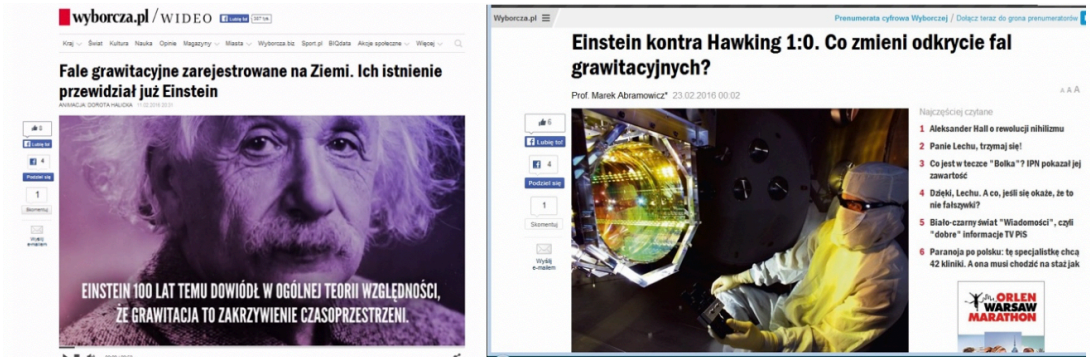
Fale grawitacyjne są jednym z efektów przewidzianych przez OTW. Doświadczalne odkrycie fal elektromagnetycznych przez Hertza, mniej więcej dwadzieścia lat po sformułowaniu praw przez Maxwella, miało zasadnicze znaczenie dla całego dalszego rozwoju techniki, w szczególności telekomunikacji. Od sformułowania 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 ta wynosi 0.84×10^{-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: fala nadeszła, akurat kiedy zakończyły się testy próbne [64].

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.

[63] Polecamy znakomitą biografię Einsteina autorstwa Abrahama Paisa, wydaną również po polsku.

[64] 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” dla pokazania atrakcyjności fizyki współczesnej: pierwsze strony gazet (drukowanych i internetowych) 12 lutego 2016 roku, w dzień po ogłoszeniu detekcji fali grawitacyjnej 14/09/15.

6.1.3 Fałszywy alarm

Fale grawitacyjne, rozumując naiwnie, mogłyby istnieć również w teorii grawitacji Newtona: poruszająca się masa przypomina poruszający się ładunek elektryczny. Ale tak nie jest: o ile źródłem fal elektromagnetycznych jest dipol elektryczny, czyli układ dwóch ładunków poruszających się po odcinku prostej, źródłem fal grawitacyjnych musi być *kwadrupol* [65] czyli np. *wirujący* w przestrzeni układ dwóch mas. Nobliści Barish i Weisse 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 LIGO [66] powinna mieć dla fal o częstotliwości około 100 Hz.

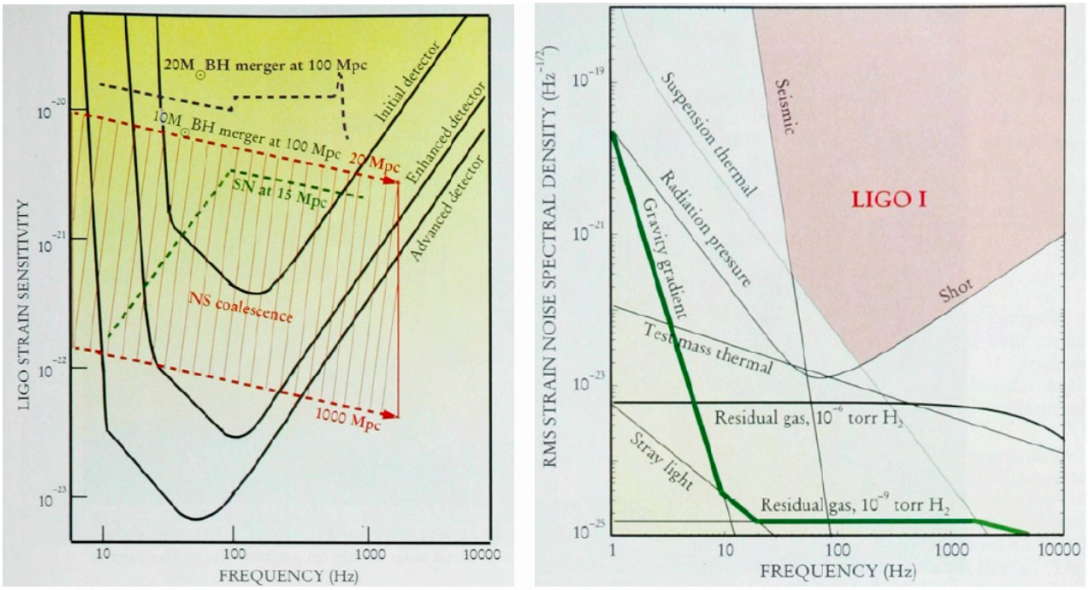
Presja odkrycia była jednak ogromna: w latach 60-tych XX wieku Joseph Weber (1919-2000) w USA zbudował „detektor” fal grawitacyjnych, w postaci aluminiowego cylindra o długości 2 m i średnicy 1 m, umieszczonego w próżni w temperaturze ciekłego helu (4K). Joe Weber twierdził, że jego cylinder rejestruje 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-tych 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.

6.1.4 Dwie gwiazdy

Nagroda 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

[65] Kwadrupol, czyli w elektrostatyce układ czterech ładunków, dwóch o znaku dodatnim i dwóch o znaku ujemnym.

[66] Light Interferencje Gravitational wave Observatory



Rysunek 6.2: (a) Przewidywany sygnał fali grawitacyjnej (względne wydłużenie się anteny LIGO i częstotliwość drgań) dla różnych kataklizmów kosmicznych: czerwony zakreskowany obszar to zlanie się dwóch czarnych dziur o masach 10 mas Słońca w odległości do 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 logarytmiczna!). 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 zawieszeń luster, drgania sejsmiczne, ciśnienie światła na lustra, ciśnienie niepożądanego światła, drgania luster wywołane obecnością gazu w warunkach bardzo wysokiej próżni itd. Źródło: B.C. Barish, R. Weiss, „LIGO and the Detection of Gravitational Waves" Physics Today, 52 (10) 44 (1999).

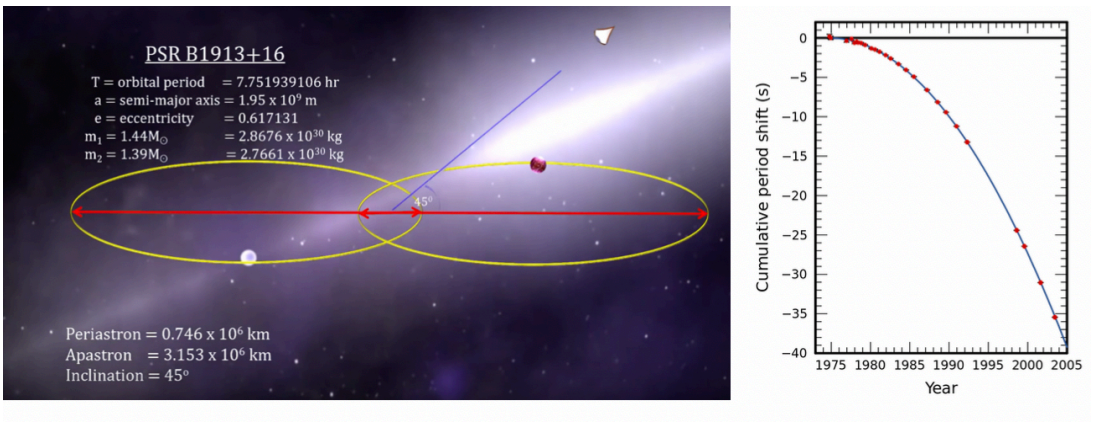
roku za 20 lat obserwacji fal radiowych wysyłanych przez *pulsar*[67] odległy o 21 lat świetlnych od Ziemi. Impulsy od tego pulsara trwają 59 ms, ale sygnał przesuwa się cyklicznie o 3 sekundy co 7 dni, co jest dowodem, że pochodzi od dwóch gwiazd neutronowych [68] wirujących bardzo szybko, w odległości 1 mln km od siebie, zob. Rys. 6.3a [69].

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 emitowanej przez Słońce. Utrata energii może zachodzić jedynie przez emisję fal gra-

[67] 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.

[68] 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.

[69] https://en.wikipedia.org/wiki/Hulse%E2%80%93Taylor_binary, http://edu-observatory.org/olli/GR/Week4.html, https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1993/summary/



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 μs/rok (rys. b): układ traci energię i za 300 mln lat dwie gwiazdy zleją się w jedną. Utrata energii następuje poprzez fale grawitacyjne, zgodnie z OTW Einsteina. (Wykres przedstawia, rok po roku, skumulowane od 1975 roku przesunięcie okresu.)

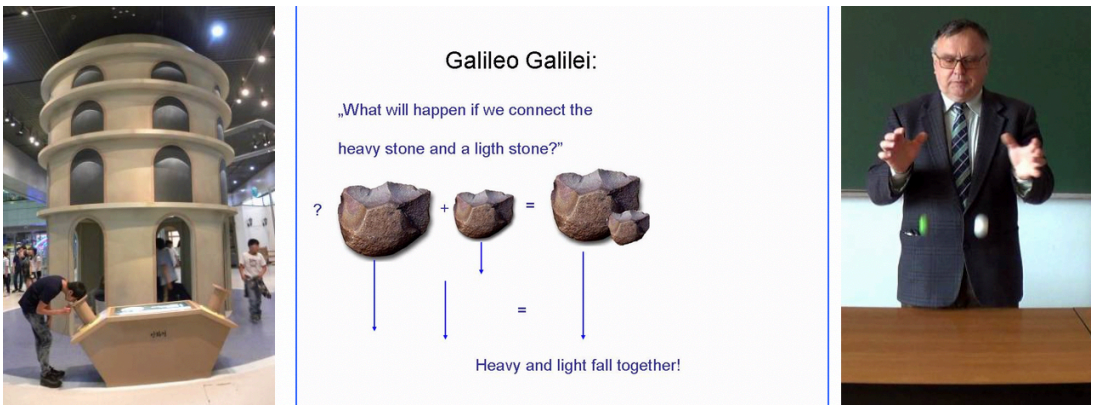
witacyjnych. Obliczenia wykazały, że szybkość utraty energii jest zgodna z przewidywaniami OTW.

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 Galileusza/ 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 $s = 1/2at^2$ gdzie s jest drogą przebytą od początku ruchu a t czasem liczonym 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: wszystkie ciała, i 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 masy grawitacyjnej 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:



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 (foto Maria Karwasz).

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

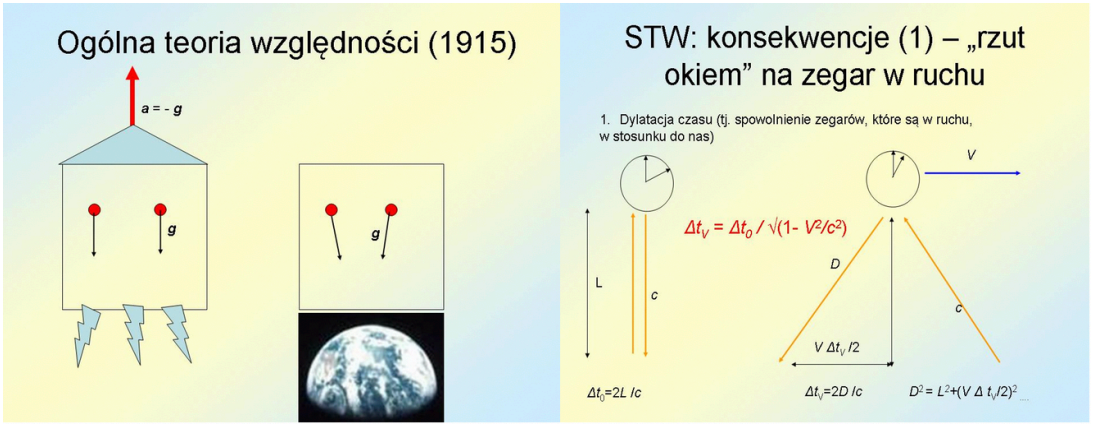
gdzie F_a jest siłą, powodującą przyspieszenie a, G - stałą grawitacji, M – masą Ziemi, a r – odległością do środka Ziemi. Ponieważ G, M i r nie zależą od masy ciała spadającego, o ile więc m_i i m_G są identyczne, przyspieszenie w spadku swobodnym *nie zależy do masy ciała* (i wynosi $g = GM/r^2$).

Galileusz nie znał tych wzorów, więc przeprowadził rozumowanie, które dziś nazywamy *Gedankenexperiment*. Jeśli, za Arystotelesem, kamień cięższy spada szybciej niż lekki, to jeśli je związemy sznurkiem, to będą spadały z prędkością średnią: lekki spowalnia ciężki a ciężki przyspiesza lekki. Ale jeśli je związemy 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 zasnąwszy 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 Ziemi. Oczywiście, w zasadzie nie do odróżnienia: spadające piłki lecą też równolegle,



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.

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.

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

$$\boxed{\boldsymbol{G} = \frac{8\pi G}{c^4}\boldsymbol{E}.} \tag{6.2}$$

6.2.3 Dlaczego Wszechświat ocalał?

Równanie powyższe 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 siłę 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 nobliści pod

kierunkiem Saula Perlmuttera [70], to puchnięcie jest coraz szybsze (poszukaj w Internecie więcej informacji na temat „ciemnej energii").

6.3 Zadrżała czasoprzestrzeń

I fale elektromagnetyczne (w próżni) i fale grawitacyjne są falami poprzecznymi, tzn. drgania zachodzą w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali. Ale o ile fala elektromagnetyczna polega na wzajemnie przemiennych drganiach wektora natężenia pola magnetycznego i prostopadłego do niego wektora pola elektrycznego, 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 płytka), 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 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 jej brak) z dokładnością do 1/10 prędkości Ziemi na orbicie (a ta wynosi 30 km/s).

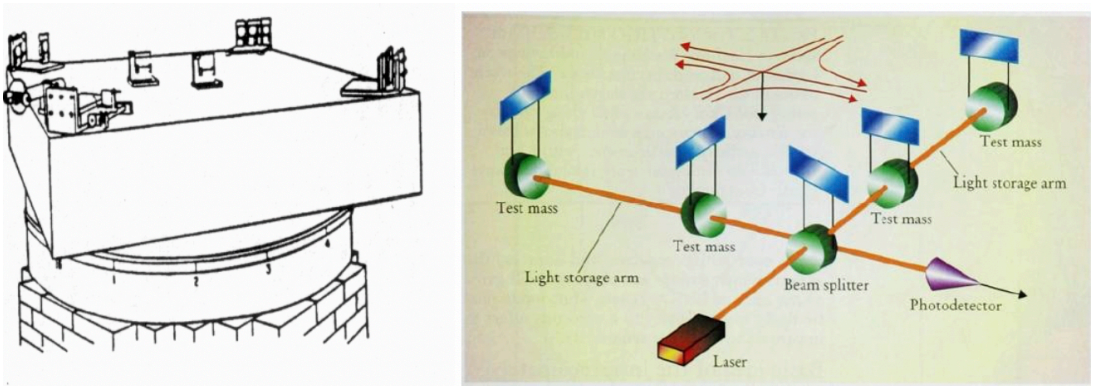
Długość ramion interferometru w doświadczeniu Michelsona wynosiła około dwóch metrów, w LIGO – 4 km (w rurach o bardzo wysokiej próżni). Dodatkowo, dla zwiększenia dokładności pomiaru, promień w LIGO wędrował 300 razy. Zastosowan superstabilne lasery i układy kształtowania wiązki światła (Rys. 6.7a), bezstratne zwierciadła, trójstopniowe zawieszenia dla wyeliminowania drgań (Rys. 6.7b), specjalną obróbkę sygnału dla usunięcia przewidywalnych zakłóceń [71]. 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 naukowym [72].

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 nade-

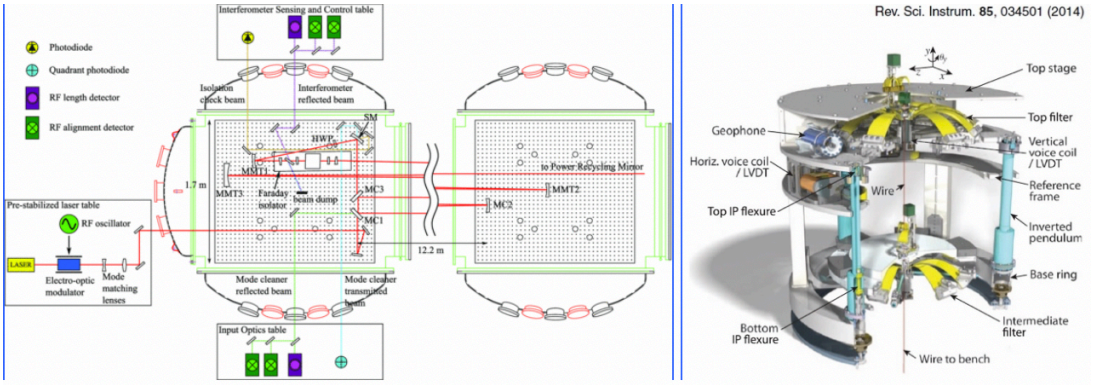
[70] https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2011/perlmutter/lecture/

[71] K. L. Dooley,Thermal effects in the Input Optics, Rev. Sci. Instr. 83, 033109 (2012)

[72] Więcej szczegółów technicznych na stronach http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/530, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/697



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) zmienią się, gdy przez układ przejdzie fala grawitacyjna. Źródło: Physics Today 52, 44 (1999)



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

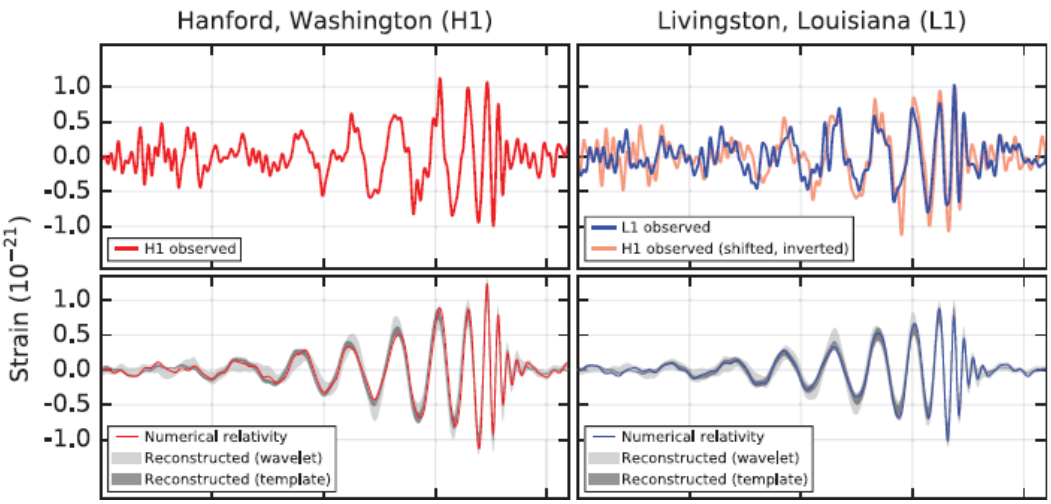
szła fala 14/09/15).

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, odległych o 3 ms czasu propagacji światła pozwoliło na precyzyjne nałożenie dwóch sygnałów, zob. prawy górny panel na Rys. 6.8.

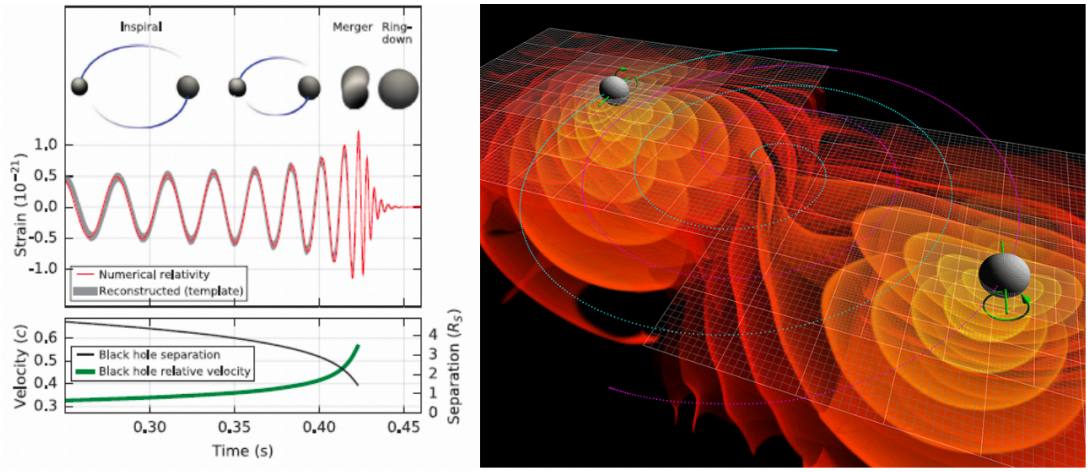
Ale nie sam fakt zarejestrowania fali jest najbardziej fascynujący: kilka miesięcy trwało „dopasowanie" zaobserwowanego sygnału do różnych modeli kosmicznych kataklizmów – i to był prawdziwy test OTW Einsteina. Fizycy teoretycy wywnioskowali, że zderzyły się (połknęły nawzajem) dwie czarne dziury, o masach około [73] 30 mas Słońca: wyznaczono prędkość i odległość (300 km) początkową tych dziur przed zderzeniem a nawet ich kierunek rotacji, Rys. 6.9. Znaleziono przybliżony rejon zderzenia oraz zwery-

[73] Dokładniej $36 \pm 4\ M_o$ i $29 \pm 4\ M_o$



Rysunek 6.8: Oryginalny sygnał pierwszej rejestracji fali grawitacyjnej: trwał on 0,12 sekundy, początkowo jako drgania o częstości 200 Hz a później coraz silniejsze i szybsze, aż do ich nagłego zaniku. Źródło: B.P. Abbott et al. (LIGO) *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).

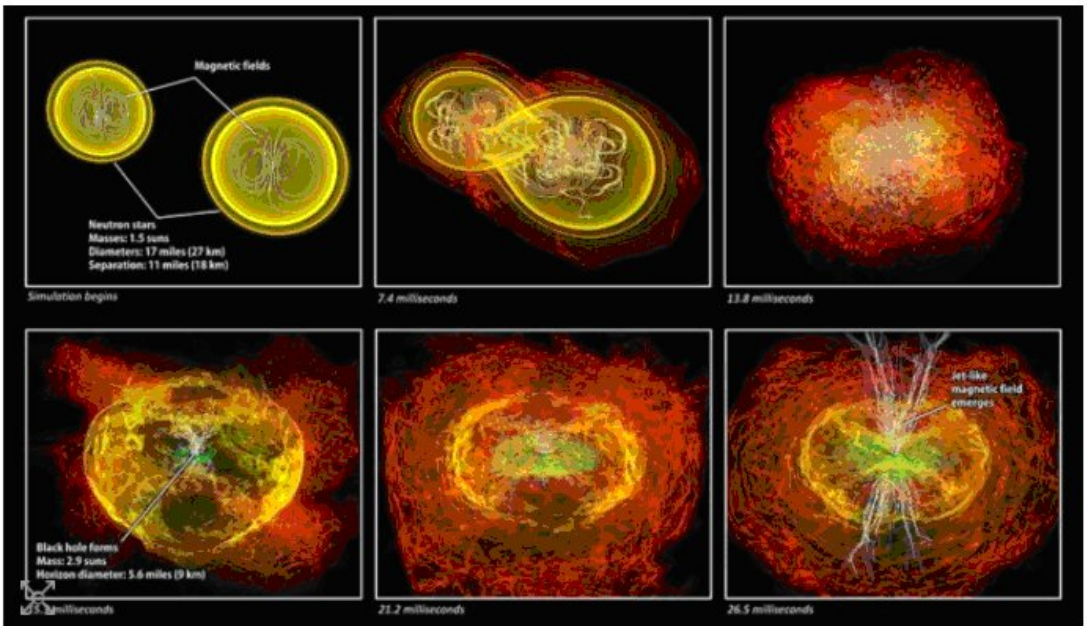
fikowano, że prędkość rozchodzenia się fal grawitacyjnych jest równa, z dużą dokładnością, prędkości światła [74].



Rysunek 6.9: Porównanie sygnału teoretycznego dla zderzenia dwóch czarnych dziur (z wydedukowanymi parametrami) i sygnału zarejestrowanego (źródło jw.) oraz grafika przedstawiające zderzenie i wysyłane fale (American Institute of Physics, 16.02.2016).

W trakcie ułamka sekundy poprzedzającego „sklejenie się" dwóch czarnych dziur, w kosmos uleciała energia równa trzem masom Słońca: większość z niej w formie fali grawitacyjnej. Prawdziwy kosmiczny kataklizm, na szczęście daleko od nas: 1.3 mld lat świetlnych odległości (czyli 1.3 mld lat temu). A nasza Galaktyka, o średnicy około 130 tys. lat świetlnych (trudno to przeliczyć na kilometry) na ułamek sekundy rozciągnęła

[74] Co pośrednio oznacza, że masa hipotetycznej cząstki pola grawitacyjnego, grawitonu, wynosi zero.



Rysunek 6.10: Wizja artystyczna zderzenia dwóch gwiazd neutronowych zarejestrowanego przez LIGO. Źródło: Physics World.

się (i skurczyła) o jeden metr [75].

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, ale nie powstała czarna dziura: nowo powstała gwiazda błysnęła jako krótko-życiowa 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 mieć miejsce w momencie powstania Układu Słonecznego, 4.567 mld lat temu.

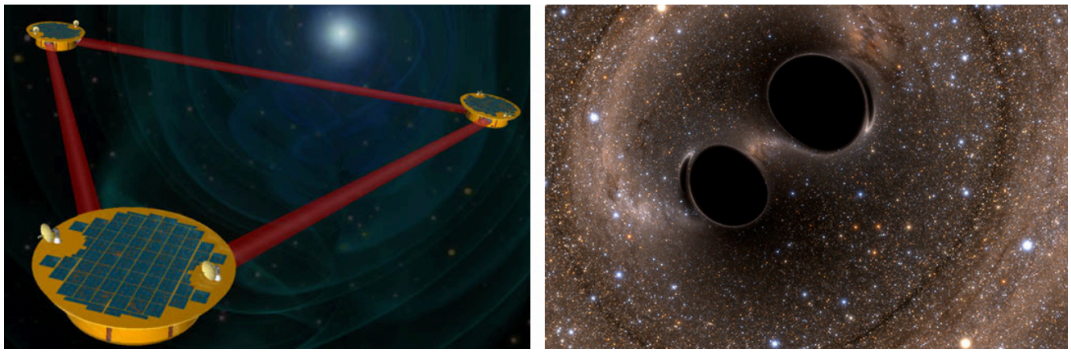
6.3.4 Nie tylko LIGO

Nie tylko trzy obserwatoria LIGO (i kolejne w budowie, np. w Indiach) poszukują fal grawitacyjnych. Projektem, który jest chwilowo zawieszony (w czasie) jest LISA (Laser Interferometr Space Antenna): układ trzech satelitów odległych od siebie o 5 mln km, Rys. 6.11 (Źródło: ESA [76] i INFN [77], Italy). Dzięki temu obserwatorium, byłoby możliwe poszukiwanie fal o niskich częstotliwościach, ale dużych długościach fali – może odgłosów grawitacyjnych Wielkiego Wybuchu.

[75] Zob. też, G. Karwasz, *Fala z grawitacyjnej otchłani*, Fizyka w Szkole, 2/2016, G. Karwasz, *I zadrżała czasoprzestrzeń*, Urania 2/2016.

[76] http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/57559-a-perfectly-still-laboratory-in-space/

[77] The SXS (Simulating eXtreme Spacetimes) Project,
http://w3.lnf.infn.it/ligo-e-virgo-osservano-le-onde-gravitazionali-per-la-seconda-volta/



Rysunek 6.11: Projekt LISA – układ trzech satelitów odległych o 5 mln km, wykorzystujący tę samą ideę interferencji laserowej, nie wyszedł do tej pory (sierpień 2019) 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: ESA i INFN, Italy.

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 Newtona i 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) peryheliom orbity Merkurego. Pierwsze globalne rozwiązania dla wszechświata znalazł de Sitter: wszechświat był stacjonarny, niestety, o zerowej gęstości masy (czyli pusty). Kilka lat później (około 1921-23) belgijski ksiądz Lemaître i radziecki meteorolog Friedman 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 odległych galaktykach: uciekają one (tzn. galaktyki) od nas, tym szybciej im są dalej. Wszechświat puchnie we wszystkich kierunkach, jak ciasto drożdżowe.

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 punkcie wyjścia (poprawka Sagnaca). Zegary spóźniają się nie tylko w poruszających się układach odniesienia, ale też w polach grawitacyjnych (precyzyjny zegar atomowy wymaga poprawki, w zależności od wysoko-

$$\frac{\partial \Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}}{\partial x_{\alpha}} + \Gamma^{\alpha}_{\mu\beta}\,\Gamma^{\beta}_{\nu\alpha} = -\varkappa\left(T_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2} g_{\mu\nu} T\right),$$

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

Equation of motion to post-Newtonian order

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

Newtonian acceleration

Precession of periapsis (like for Mercury)

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

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.

ści usytuowania nad poziomem morza). Cały zestaw poprawek opracowany na potrzeby GPS pokazany jest na Rys. 6.13.

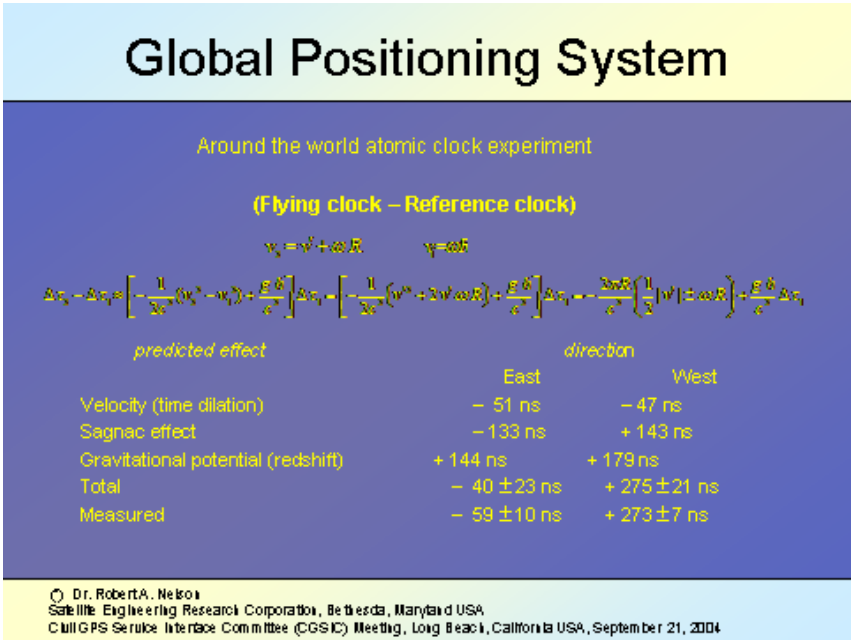
6.4.3 Kolejne weryfikacje

Rysunki rakiet 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" 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 $.

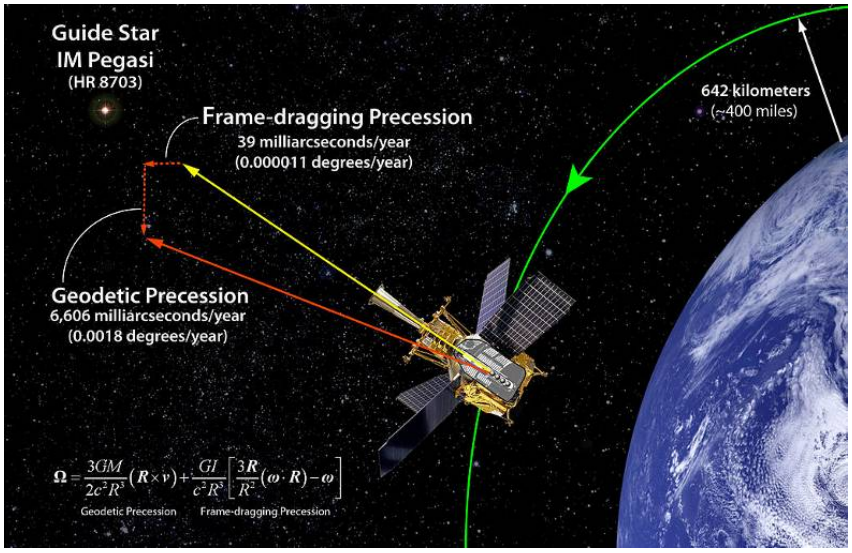
6.4.4 Jedyna „wpadka" Einsteina

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 podróże 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



Rysunek 6.13: Poprawki relatywistyczne do GPS.

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.



Rysunek 6.14: Schemat doświadczenia “Gravity – probe B” Źródło: Wikipedia

ROZDZIAŁ 7

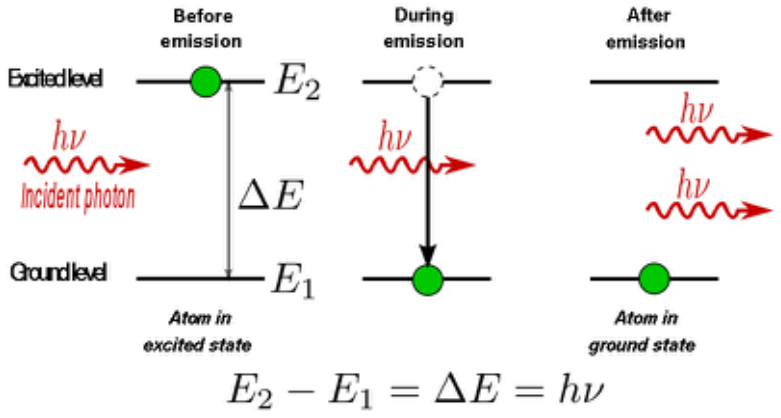
Laser, największy(?) wynalazek XX wieku

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 trzej 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/cm^2.

7.1 Zasada działania lasera

W laserze wykorzystuje się zjawisko emisji wymuszonej. Pojęcie to zaproponował w 1917 roku Albert Einstein.



Rysunek 7.1: Schemat emisji wymuszonej dla pojedynczego atomu

Atom na Rys. 7.1 znajduje się w stanie wzbudzonym w obecności promieniowania elektromagnetycznego o częstości opisywanej równaniem:

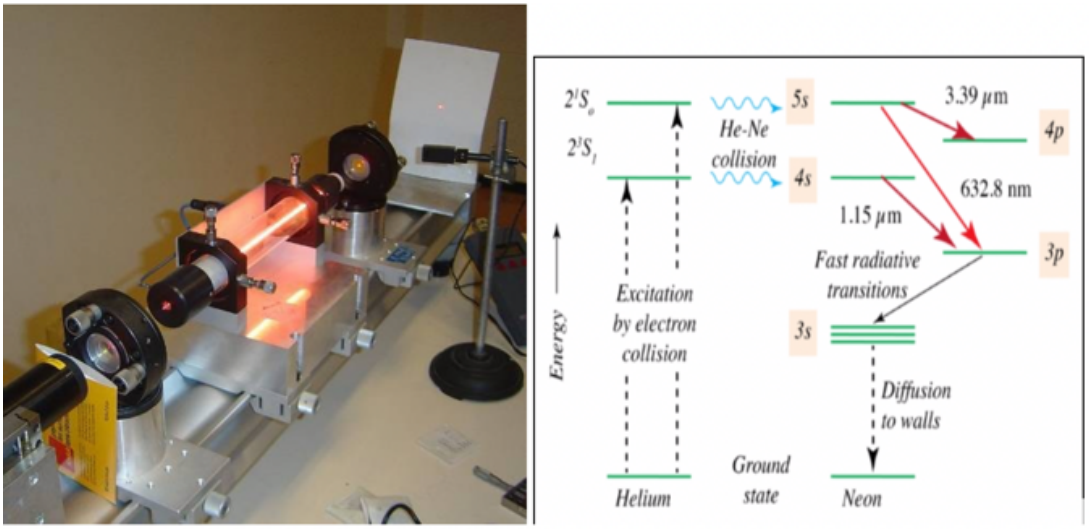
$$h\nu = E_2 - E_1. \tag{7.1}$$

Foton o energii $h\nu$ może wymusić na 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. Aby emisja fotonu była procesem dominującym, musi nastąpić odwrócenie (inwersja) obsadzeń, a więc w stanie o wyższej energii musi być więcej atomów niż w stanie o energii niższej. Aby wytworzyć światło laserowe, musi być więcej atomów emitujących światło, niż atomów które je pochłaniają (absorbują). Musi zaistnieć sytuacja, w której dominuje emisja wymuszona. Bezpośrednim sposobem do doprowadzenia do takiej sytuacji jest zapoczątkowanie procesu z większą liczbą atomów w stanie wzbudzonym niż w stanie podstawowym.

7.2 Laser gazowy He-Ne

Laser helowo-neonowy to laser gazowy o działaniu ciągłym, w którym substancją roboczą wewnątrz rury próżniowej jest mieszanina helu pod ciśnieniem parcjalnym 1 mm Hg i neonu pod ciśnieniem parcjalnym 0.1 mm Hg (stosunek ciśnień gazów He:Ne wynosi 10:1). Emituje on wiązkę światła o długości fali λ = 632.8 nm (czerwień) i w podczerwieni o długości fali 1.15 μm. Został on zbudowany po raz pierwszy w 1961 r. przez Ali Jadana i jego zespół.

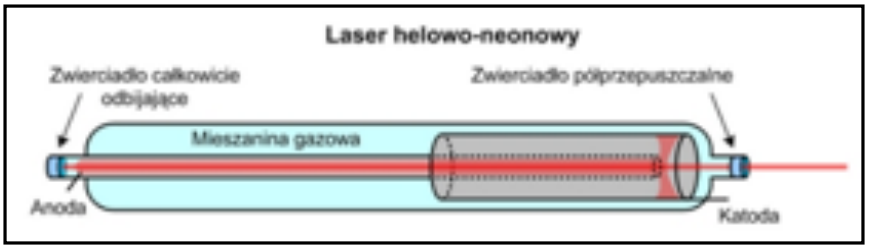
W wyniku przepływu prądu elektrycznego przez mieszaninę gazów He i Ne, które znajdują się w szklanej rurze, rośnie energia atomów helu zderzających się z elektronami. Na skutek tych zderzeń atomy helu przechodzą do stanu 2^1S_0, który jest metatrwały. W zderzeniu metatrwałego atomu helu i atomu neonu w stanie podstawowym wzbudzenie atomu helu jest często przenoszone do atomu neonu, który przechodzi do



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

stanu o energii 5s. W taki sposób w atomach neonu stan 5s może stać się silniej obsadzony niż stan 3p. Akcja laserowa zachodzi pomiędzy poziomami neonu 5s i 3p i emitowane jest światło o długości fali $\lambda = 632.8$ 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 wyładowczej. 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 przy tym silniejszą emisję światła przez atomy neonu. Część światła wydostaje się przez zwierciadło półprzepuszczalne, tworząc wiązkę laserową.



Rysunek 7.3: Schemat budowy lasera He-Ne.

Działanie laserów można również opisać za pomocą diagramów Aleksandra Jabłońskiego - założyciela i patrona Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK. Więcej na temat tych diagramów na stronie: dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/33.

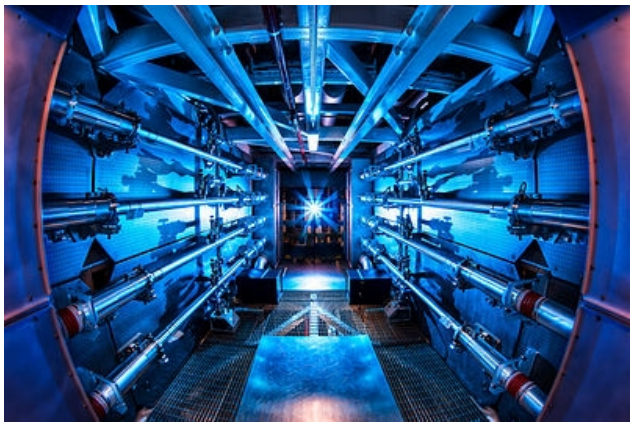
7.3 Zastosowania laserów

Są one ogromne i bardzo różnorodne. 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.



Rysunek 7.4: a) Laser półprzewodnikowy o mocy 3 mW stosowany w czytnikach CD i DVD, b) laser gazowy na CO_2 o mocy 3 kW.

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

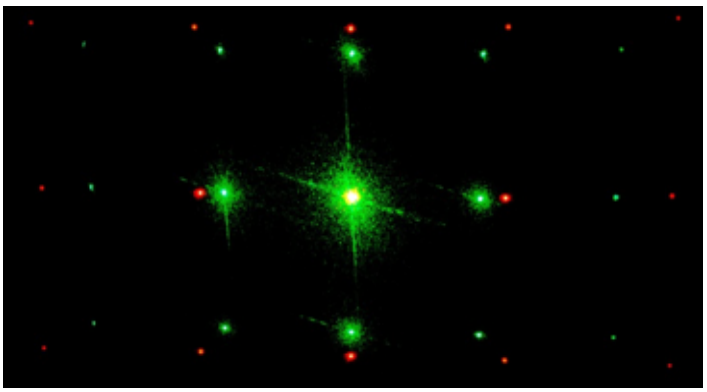


Rysunek 7.5: Układ kilkuset laserów neodymowych o mocy 3 TW w USA.

Wielki układ kilkuset laserów zogniskowanych w jednym miejscu ma na celu uzyskanie syntezy termojądrowej, czyli wytworzenie plazmy o temperaturze ok. 100 mln °C. W takich warunkach w plaźmie jądra wodoru połączyłyby się i powstałyby jądra helu.

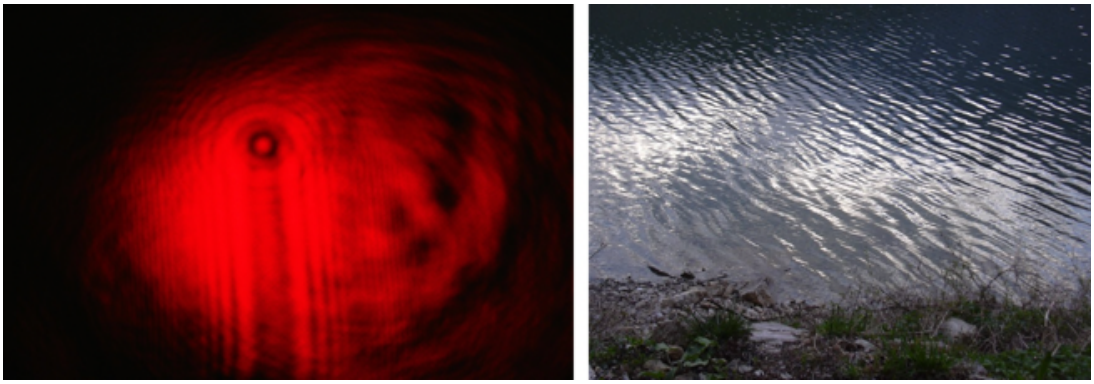
7.4 Podwójna natura światła

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, powstawanie kolorów w bańce mydlanej czy w okularach dyfrakcyjnych wymaga teorii falowej światła. Ogólnie okulary dyfrakcyjne, podobnie jak płyta CD to szereg regularnie nacięć położnych 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 (λ = 500 nm) położone są bliżej plamki centralnej (światła nieugiętego) niż światło lasera czerwonego (λ = 700 nm) (Foto Krzysztof Służewski.)

W zjawiskach ugięcia (dyfrakcji) na płycie CD lub w okularach dyfrakcyjnych światło uwidacznia swoją naturą falową. 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 (foto Krzysztof Służewski) i ugięcie fal na wodzie (foto Maria Karwasz)

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 „pstrokate", 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 dyfrakcji [78]. Zjawisko ugięcia światła na mini-łepku szpilki pokazujemy na Rys. 7.7.

Lasery pozwalają nam bez trudu zaobserwować naturę falową światła. W laserowej rurze (lub mini-strukturze w półprzewodniku) światło propagujące w lewo i w prawo również nakłada się, tworząc falę stojącą.

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

ROZDZIAŁ 8

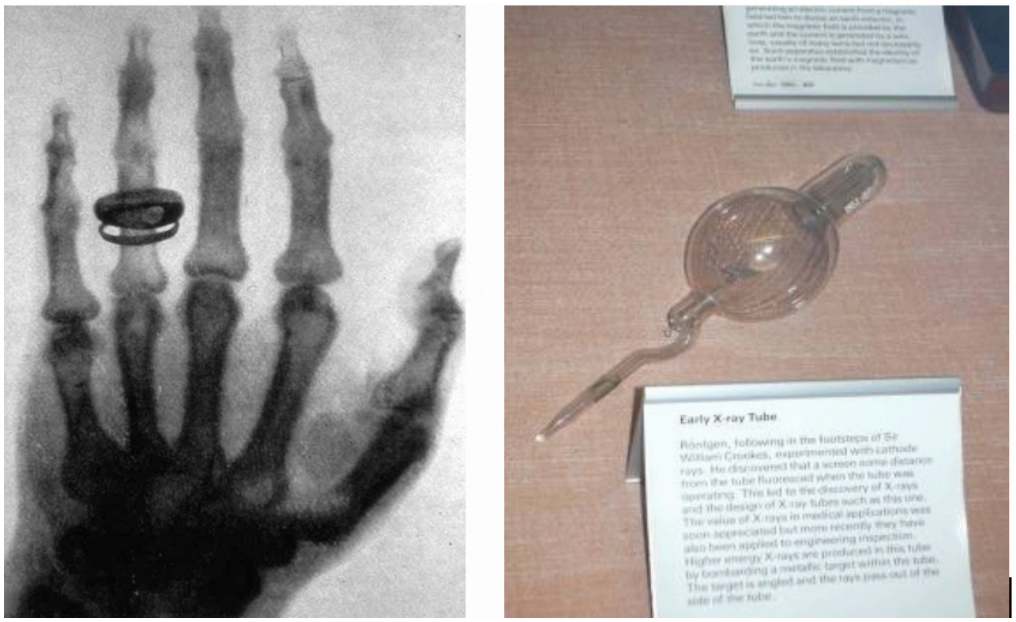
Zagadkowe promieniowanie

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 elektromagnetyczymi, 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.

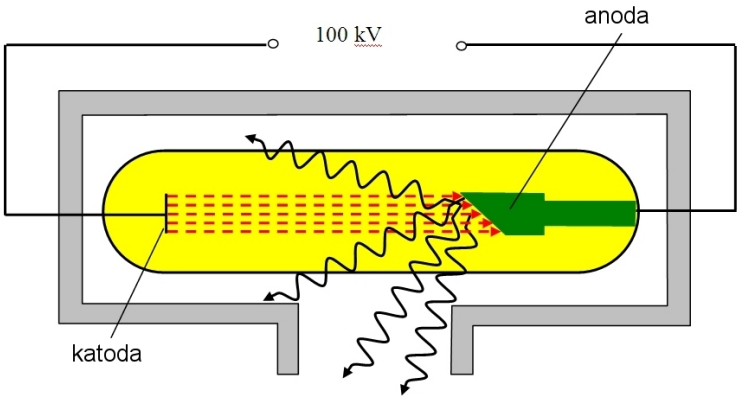
Promieniowanie rentgenowskie uzyskuje się w praktyce np. w lampie rentgenowskiej (Rys. 8.1) [79] poprzez wyhamowywanie rozpędzonych elektronów na materiale o dużej (powyżej 20) liczbie atomowej (promieniowanie hamowania). W wyniku tego powstaje promieniowanie o charakterystyce ciągłej, na której widoczne są również piki pochodzące od promieniowania charakterystycznego anody, ponieważ rozpędzone elektrony wybijają elektrony z atomów anody. Wolne miejsca po wybitych elektronach na

[79] Wikipedia, https://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_rentgenowskie,
Strona www pt. "Droga do fizyki współczesnej – wystawa wirtualna", http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/index-pl.html



Rysunek 8.1: a) Zdjęcie rentgenowskie dłoni Alberta von Köllikera wykonane przez Röntgena na Uniwersytecie w Würzburguu 23 stycznia 1896, b) Lampa rentgenowska, Science Museum, Londyn, foto GK

dolnych powłokach elektronowych pozostają puste do momentu, aż zapełnią je elektrony z wyższej powłoki. Elektron przechodząc w atomie anody z wyższego stanu emituje kwant promieniowania rentgenowskiego i następuje emisja charakterystycznego promieniowania X.

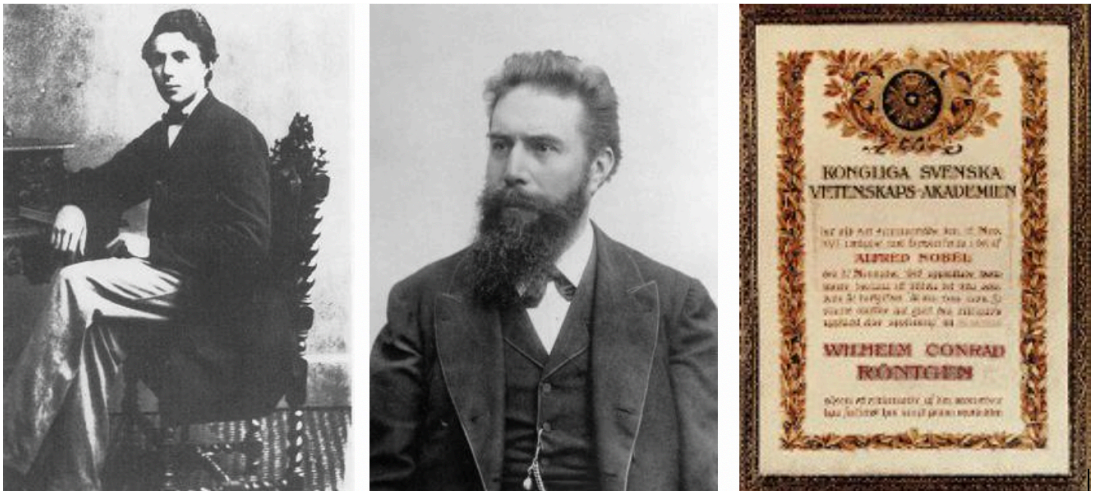


Rysunek 8.2: Schemat lampy rentgenowskiej. Rysunek Eryk Rajch.

Promieniowanie X może powstać także w inny sposób, a mianowicie w wyniku wychwytu elektronu, 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 działającego w oparciu o 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).

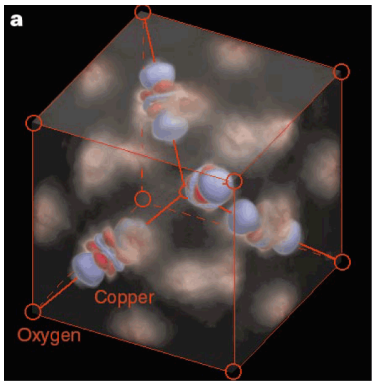
Zasługa Röntgena polega nie na „odkryciu” – ale na postawieniu roboczych hipotez, ich sprawdzeniu, błyskawicznym opublikowaniu wyników oraz ich ogłoszeniu publicz-

nym. Röntgen spędził w laboratorium 8 tygodni, aż do Bożego Narodzenia 1895 roku, a w styczniu 1896 r. „jego" promienie już stosowano w amerykańskich szpitalach. Za to odkrycie Röntgen otrzymał pierwszą nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 1901 roku.



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".

Promienie Roentgena (promieniowanie X) mają wszechstronne zastosowania – od medycyny i stomatologii, do badania materiałów, sprawdzania bagaży na lotniskach i prześwietlania egipskich mumii. W szczególności promienie Roentgena mogą służyć do obrazowania pojedynczych atomów, a nawet orbitali elektronów w tych atomach (zob. Rys. 8.4).

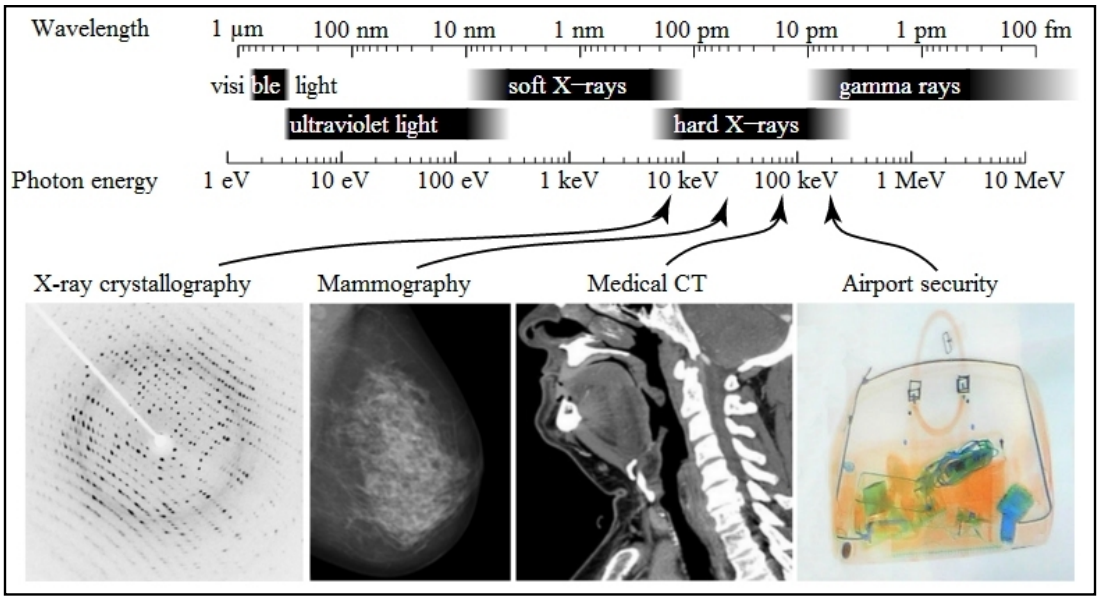


Rysunek 8.4: Zmierzony za pomocą promieni Roentgena rzeczywisty rozkład gęstości elektronów w krysztale tlenku miedziawym Cu_2O – orbitale *d* (Źródło: Science)

Promieniowanie rentgenowskie jest wykorzystywane bardzo często w szpitalach do uzyskiwania zdjęć rentgenowskich, które pozwalają m.in. na diagnostykę złamań kości i chorób płuc oraz do rentgenowskiej tomografii komputerowej [80]. Wysokoenergetyczne promieniowanie rentgenowskie (rzędu MeV) stosowane jest zaś jako wygodna

[80] https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray

alternatywa napromieniowania za pomocą radioizotopów w radioterapii niektórych nowotworów, ponieważ występuje tu dogodny dla pacjentów brak konieczności okresowej wymiany materiału promieniotwórczego. Promieniowanie takie generowane jest zwykle w wyniku bombardowania tarczy wolframowej (lub z dużym udziałem tego metalu) strumieniem elektronów pochodzących z akceleratorów liniowych. Do naświetleń powierzchownych 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).

Promieniowanie rentgenowskie wykorzystuje się także w badaniu dzieł sztuki, badaniu struktury wewnętrznej ciał stałych (dyfrakcja rentgenowska) oraz badaniu struktur biologicznych – dyfrakcja DNA, białek, wirusów itd.

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 Światowej [81], poprzez terapie nowotworów za pomocą izotopów promieniotwórczych, do nowoczesnych komputerowych metod diagnostycznych.

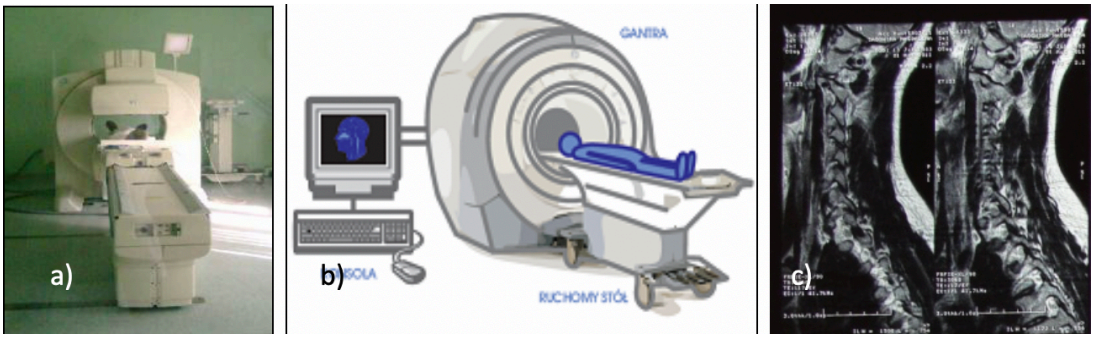
8.2 Rentgenowska tomografia komputerowa (CT [82])

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

[81] 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 miniciężarówkach, przeprowadziła 1,5 mln badań rentgenowskich rannych na froncie żołnierzy.

[82] ang. *computer tomography*

obróbka serii zdjęć pozwala uzyskać kilkuwarstwowy obraz, na którym można zaobserwować nawet niewielkie symptomy choroby (zob. Rys. 8.6) [83].



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.

[83] *Toruński poręcznik do Fizyki. Fizyka współczesna i astrofizyka.* G. Karwasz, M. Więcek, Materiały dydaktyczne Zakładu Dydaktyki Fizyki UMK, Toruń 2015.

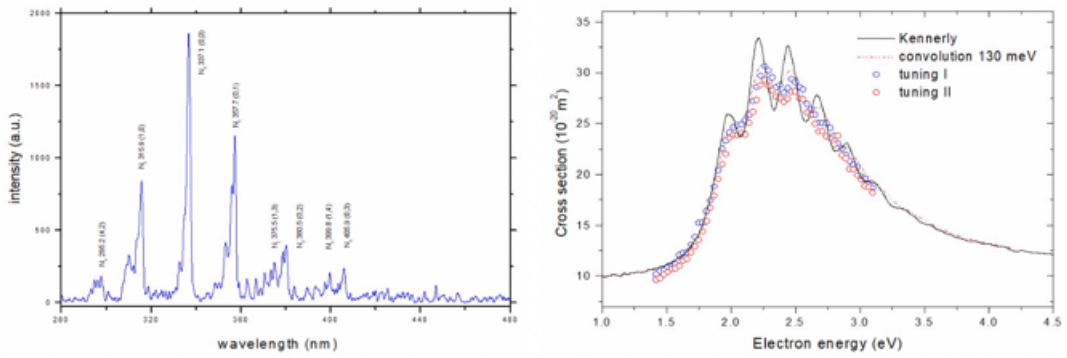
ROZDZIAŁ 9

Spektroskopia czyli nauka o duchach

Większość słów języka naukowego jest pochodzenia greckiego; takimi jest „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 Cycerona; 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 Immanuael 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.



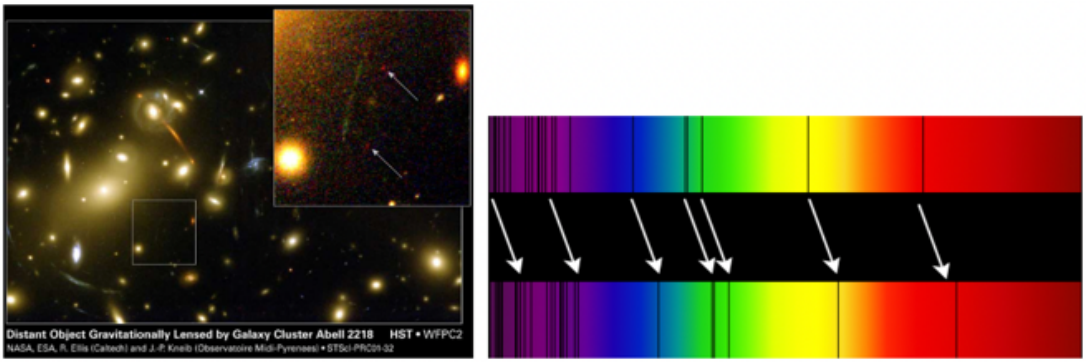
Rysunek 9.1: Znaczenie słowa “spektroskopia” jako badanie obrazu danej substancji: tu dwa “widma” azotu cząsteczkowego. (a) widmo emisji optycznej w wyładowaniu elektrycznym – widoczne linie emisyjne w zakresie nadfioletu (315-380 nm); linie emisyjne odpowiadają zazwyczaj liniom absorpcji, innymi słowy 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 emisji 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 rozdziału 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 własności atmosfery (różna zawartość pyłów, obecność kryształków lodu lub kropel wody w chmurach) powodują, że każdy zachód słońca może być inny.



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. H.T. STOKES, BYU.



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.

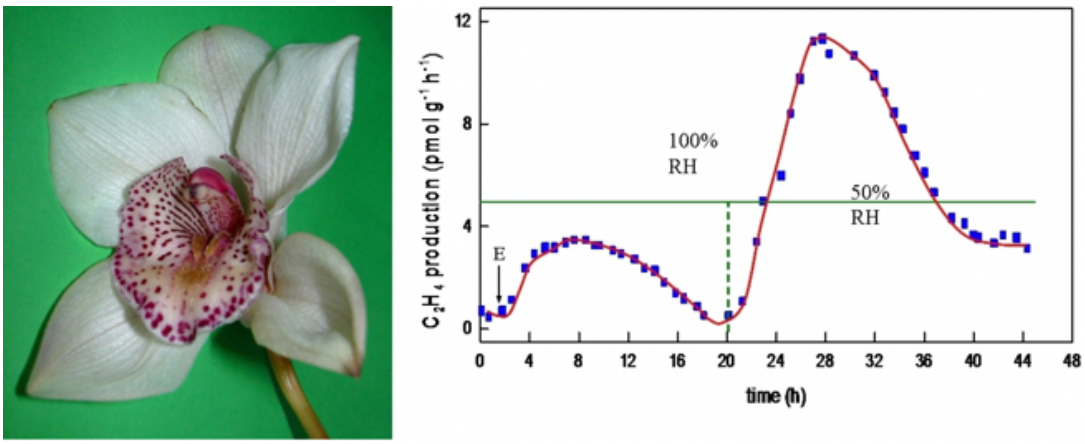
9.2 Spektroskopia fotoakustyczna

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

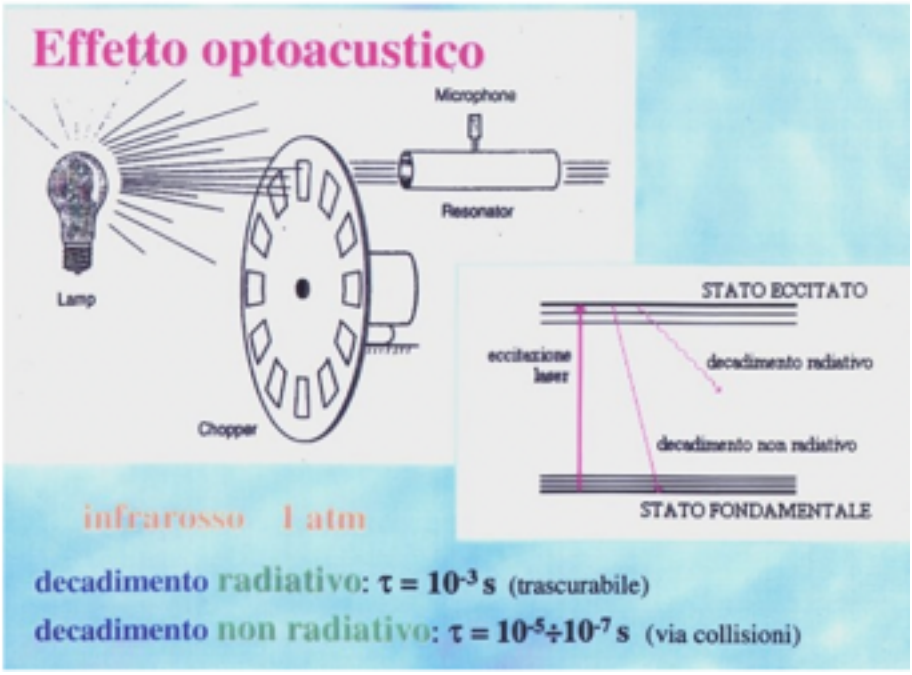
Zasada działania spektroskopii fotoakustycznej, metody czułej na poziom części na miliard (ppb) korzysta z własności emisji światła przez układy atomowe: im niższa częstość emitowanego światła, tym dłuższy czas układ pozostaje w stanie wzbudzonym. Zamiast więc badać emisję w zakresie widzialnym, bada się zakres podczerwieni. Kolejny warunek umożliwiający stosowanie tej techniki to odpowiednie, silne źródło światła wzbudzającego układ, np. laser CO_2 w podczerwieni. Jeśli niektóre z linii emisyjnych laseru odpowiadają jakimś liniom absorpcyjnym poszukiwanej drobiny, mówimy o „odcisku palca" (fingerprint). Tak jest np. w przypadku etylenu.

Dla osiągnięcia 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 z



Rysunek 9.4: a) zdjęcie orchidei, b) kwiaty orchidei zaczynają emitować etylen (C_2H_4) zaraz po zapyleniu.



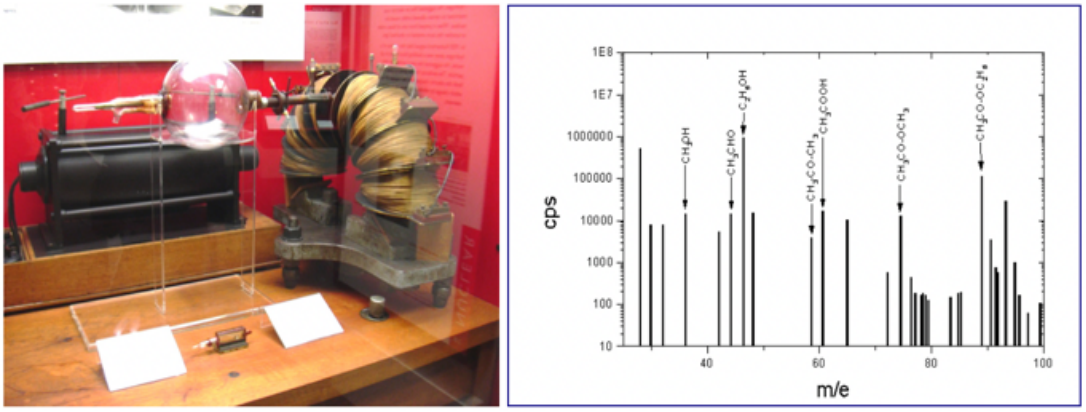
Rysunek 9.5: Schemat zestawu doświadczalnego: koło zębate służy jako przesłona dla światła lasera podczas pomiarów fotoakustycznych. Autor: dr Andrea Boscetti, CNR i IRST, Trydent, Włochy.

bramkowaniem odpowiadającym częstotliwości przesłony: mikrofony wychwytują dźwięk o częstości modulacji. Etylen jako hormon powoduje m.in. dojrzewanie bananów, jest wydzielany przez orchidee w trakcie kwitnięcia lub np. przez winorośl, po urwaniu liścia [Źródło: dr A. Boschetti, informacja prywatna].

9.3 Spektroskopia transferu protonu

Spektroskopia masowa, czyli pomiar masy atomów i cząsteczek w fazie gazowej datuje się od lat 20-tych zeszłego stulecia. Wówczas Aston zbudował pierwszy spektrometr używający pola magnetycznego do separacji jonów o różnych masach. Spektrometria prze-

kazu protonu pozwala na „miękką” jonizację, tzn. taką, w której jonizowana cząsteczka nie zostaje rozbita na fragmenty a jedynie przyłącza proton H^+. Spektroskopia ta, szczególnie przydatna w fazie gazowej, pozwala np. na analizowanie oddechu człowieka dla 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 gąsienice [84]. 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, foto 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.

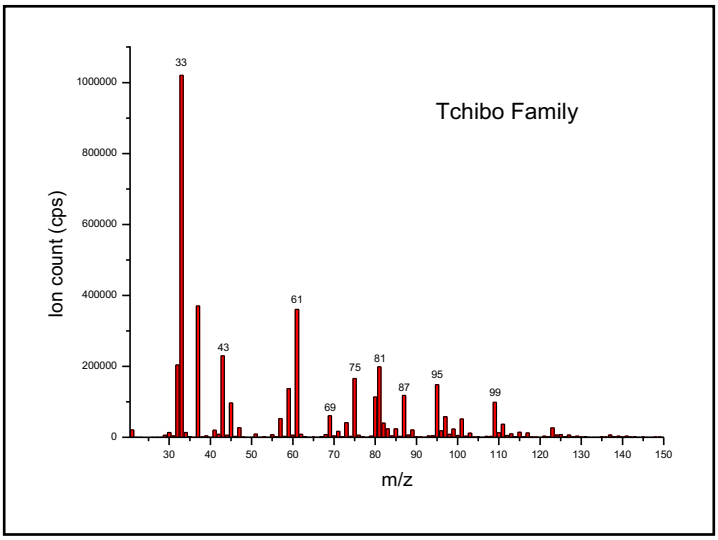
Jednym z najważniejszych zagadnień związanych z badaniami składu chemicznego substancji za pomocą metod spektroskopii masowej jest sposób jej jonizacji. Procesowi jonizacji związków chemicznych, przeprowadzanemu np. za pomocą wyładowania elektrycznego, naświetlania światłem laserowym, wiązką elektronów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

[84] http://www.ionicon.com/applicationshowcases/biological-research

wie widma masowego jest bardzo trudne.

Spektroskopia masowa transferu protonu wykorzystuje proces przyłączania 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, 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. Podziękowania: Dr Tomasz Wróblewski, Akademia Pomorska w Słupsku.

ROZDZIAŁ 10

Od ogniwa Volty do reaktora termojądrowego

10.1 Pilna konieczność

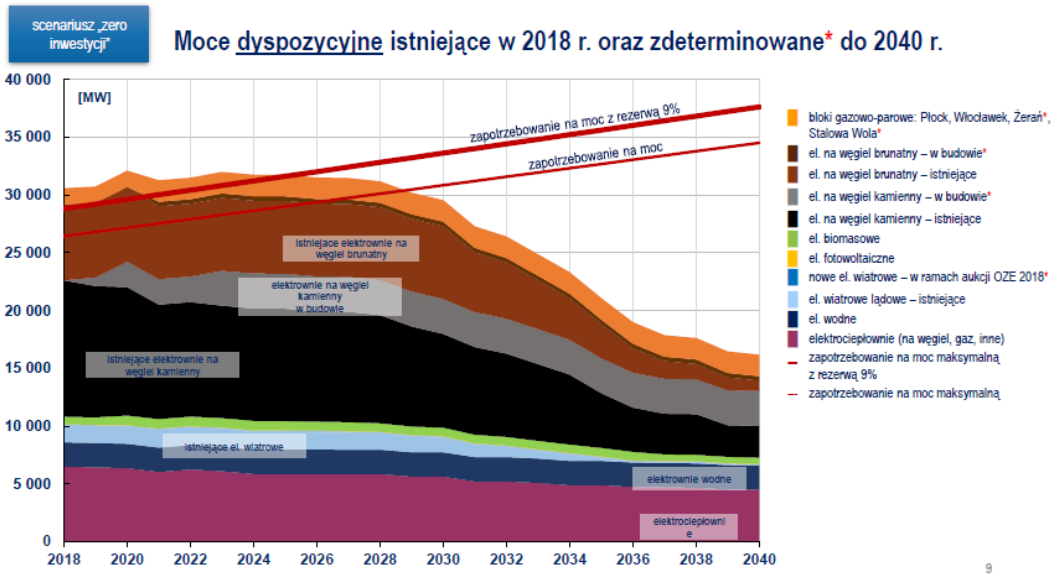
Zachodzi pilna konieczność rozwoju nowych sposobów pozyskiwania i magazynowania energii [85]. Dysponowanie źródłami energii (w zamierzchłych czasach oznaczało to – pożywienia) było w dziejach ludzkości jednym z głównych powodów konfliktów zbrojnych. Dzieje się tak i dzisiaj – zasoby paliw kopalnych wyczerpują 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 „energie alternatywne") – najważniejszym problemem dla następujących po nas pokoleniach będzie problem niewystarczających „zasobów energetycznych": już nie tylko wytwarzania prądu elektrycznego, ale magazynowania „energii", w czasie, kiedy ani ogniwa fotowoltaiczne ani elektrownie wiatrowe jej nie dostarczają.

To samo czasopismo „Nature", które w 2002 roku ostrzegało przed wyczerpaniem się kopalin, w 2019 roku opublikowało [86] szczegółową perspektywę energetyczną dla

[85] 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.

[86] D. Bogdanov et al., Radical transformation [...], Nature Communications, 10 (2019) 1077.



Rysunek 10.1: Raport Ministerstwa Energii (22/1/2019): 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. https://www.gov.pl/web/energia/raport-mit-o-przyszlosci-energii-jadrowej

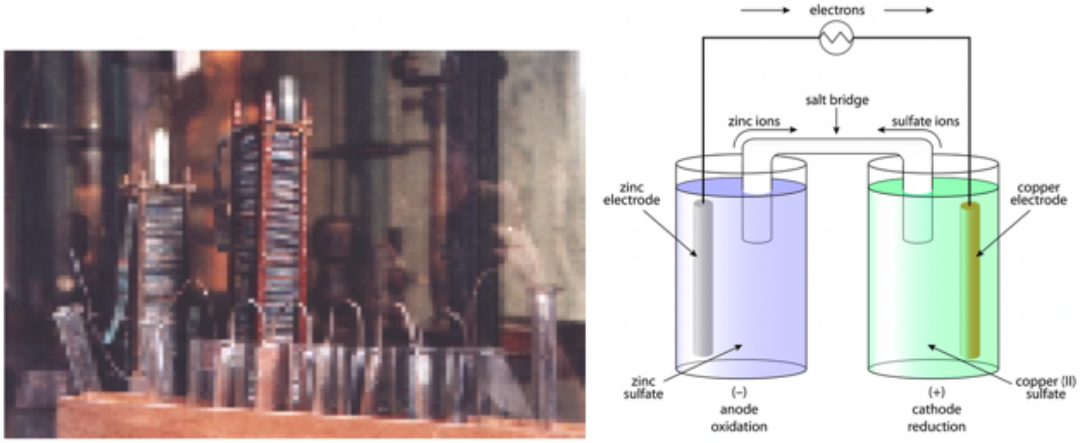
całej planety do roku 2050 z uwzględnieniem specyfiki poszczególnych krajów. Wynika z tej prognozy, że energetyka jądrowa i węglowa będą stopniowo zanikały, głównie na rzecz ogniw fotowoltaicznych. Ale nadal nie ma jasności w sprawie „magazynowania" energii: gigantyczne baterie elektrochemiczne, sztuczne 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 globu [87] 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.

[87] 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 roku [88], że prąd ze stosu Volty odchyla igłę magnetyczną: otworzyła się droga do pomiaru natężenia prądu elektrycznego [89]. 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. (b) Ogniwo Daniella ma dwa oddzielne pojemniki z elektrolitem: w jednym są jony Zn^{+} w drugim Cu^{2+}: zapobiega to wydzielaniu się wodoru na elektrodzie miedzianej. Dla zamknięcia obwodu elektrycznego dwa naczynia są połączone „kluczem" jonowym – żelem z KNO_3. Dzięki ogniwie Daniella, w połowie XIX wieku całe Stany Zjednoczone zostały połączone siecią telegraficzną. Źródło: GK; Wikipedia.

Schemat dla ogniwa wodorowego w par. 10.3. wyjaśnia, że potencjał elektryczny pochodzi z reakcji chemicznej $H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$. 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 nano-strukturalnej platyny, tzw. czerni platynowej i obmywanej strumieniem gazowego wodoru.

Niestety, nie potrafimy jeszcze wyliczyć, mimo ogromnego rozwoju metod mechaniki kwantowej, jakie napięcie powstanie między srebrem, miedzią a cynkiem w eletroli-

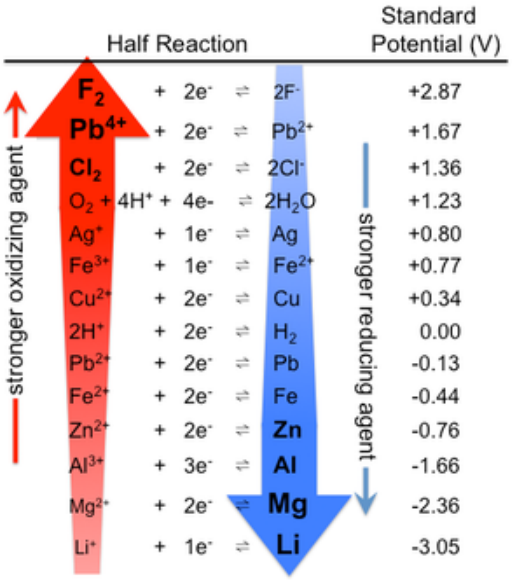
[88] Doświadczenie powtórzone w 1820 roku przez Duńczyka Hansa Christiana Ørsteda.

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

cie. 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^+):

$$\begin{aligned} Zn &\rightarrow Zn^+ + e \qquad \text{(utlenianie)} \\ Cu^+ + e &\rightarrow Cu \qquad \text{(redukcja)} \end{aligned} \tag{10.1}$$

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) [90]: 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 wodzie [91], 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.

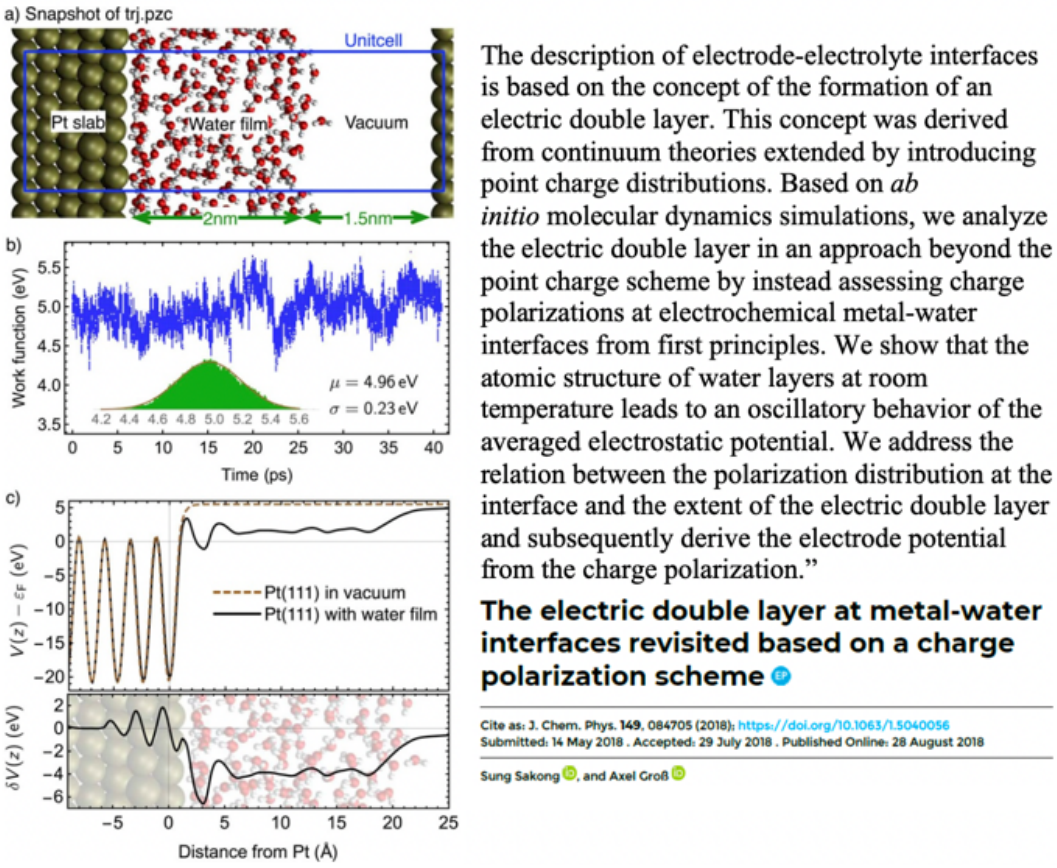


Rysunek 10.3: Szereg elektrochemiczny (Volty): pokazana jest reakcja jonowa, która dostarcza określonego potencjału (w stosunku do elektrody „wodorowej", zob. par. 10.3) Największy potencjał ujemny uzyskuje się z reakcji $Li^+ + e^- \rightarrow Li$. Lit jest przy tym pierwiastkiem bardzo lekkim, stąd jego zastosowanie w bateriach telefonów komórkowych. Niestety, nie jest zbytnio 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: wikipedia.

10.3 Ogniwo wodorowe

Zasada działania ogniwa Volty polega na zamianie „energii chemicznej" w prąd elektryczny. Pojęcie „energii chemicznej" jest tu umowne: w reakcjach chemicznych egzotermicznych, 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

[90] https://phys.org/news/2018-10-whiskers-surface-growth-dendrites-lithium.html
[91] Sung Sakong, Axel Croß, J. Chem. Phys. 149, 084705 (2018)



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).

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 wody [92]. 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:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \tag{10.2}$$

Nawet jeśli najnowsze rodzaje turbin gazowych [93] 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 węgla [94]. Bezpośrednie spalanie wodoru dla uzyskania pracy mechanicznej napędzającej np. samo-

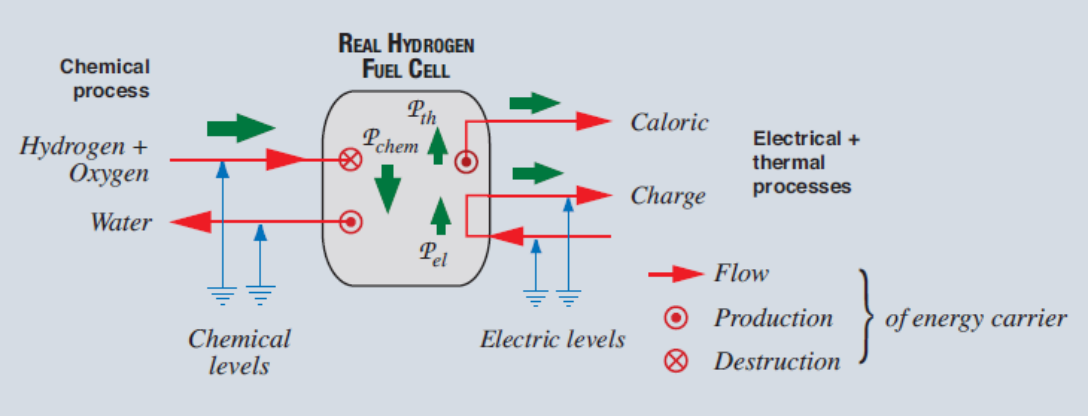
[92] 2,31eV = 1/2 $(4 \times 3,79 – 10,54)$ eV. W chemii dla energii wiązania (a właściwie energii swobodnej Gibasa) używane były jednostki kcal/mol. 1 eV = 23 kcal/mol.

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

[94] W tym sensie, spalanie metanu (CH_4) wytwarza mniej CO_2 na jednostkę uzyskanego ciepła niż spalanie węgla: węgiel jest najbardziej szkodliwym paliwem, i dla środowiska i dla człowieka (zob. dalej).

chody 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-krotnie [95]. 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.

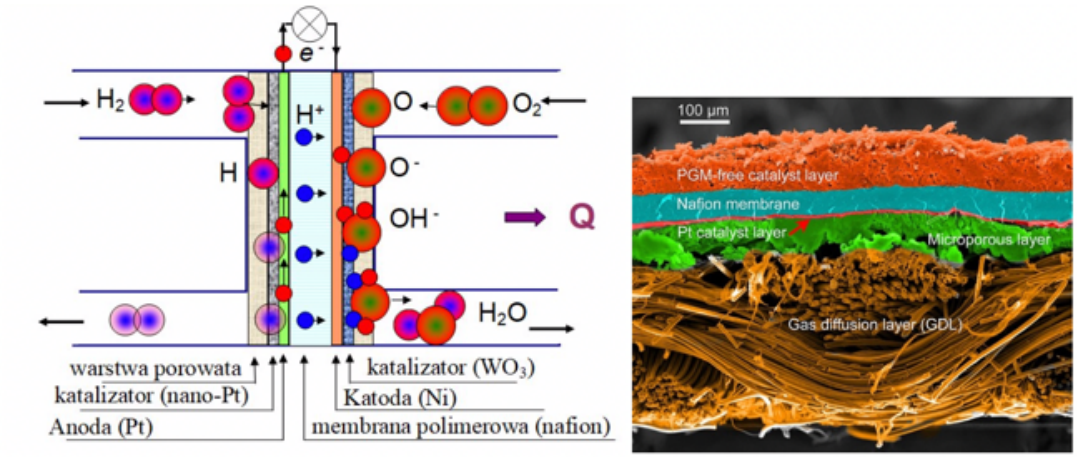


Rysunek 10.5: Schemat koncepcyjny ogniwa wodorowego (lub ogólnie – ogniwa elektrochemicznego): przemiana chemiczna (synteza katalityczna wody z wodoru i tlenu) polega na obniżeniu potencjału chemicznego (lewa strona diagramu). Prawa strona diagramu pokazuje, że ładunki elektryczne są przenoszone do wyższego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

Ogniwo wodorowe jest niejako odwróceniem elektrolizy. Dla dysocjacji (podziału na atomy) wody w procesie elektrolizy niezbędna jest różnica potencjału 1,23 V. Można by się podziewać, że ogniwo wodorowe „produkuje" takie samo napięcie, ale tak nie jest. Koncepcyjnie proste ogniwo na wodór i tlen staje się znacznie bardziej skomplikowane w praktycznej realizacji.

[95] Polskie media obiegła 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. Zresztą, spójrzcie na pierwszą mapkę: miasta, zaznaczone na fioletowo, mają wg. raportu EEA normy benzopirenu przekroczone. https://slaskie.naszemiasto.pl/benzopiren-polska-czarna-plama-europy-a-slaskie-spojrzcie/ar/c4-4866062

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 (nanostrukturalnej) postaci, tradycyjnie zwanej czernią platynową. W przypadku O_2 próbuje się różnych katalizatorów, tak metalicznych (Ni) jak tlenkowych (np. tlenków wolframu odpowiednio aktywowanych). Ogniwo ma jednak sporo ograniczeń – mocy, konstrukcji, materiałów (i ceny [96]).



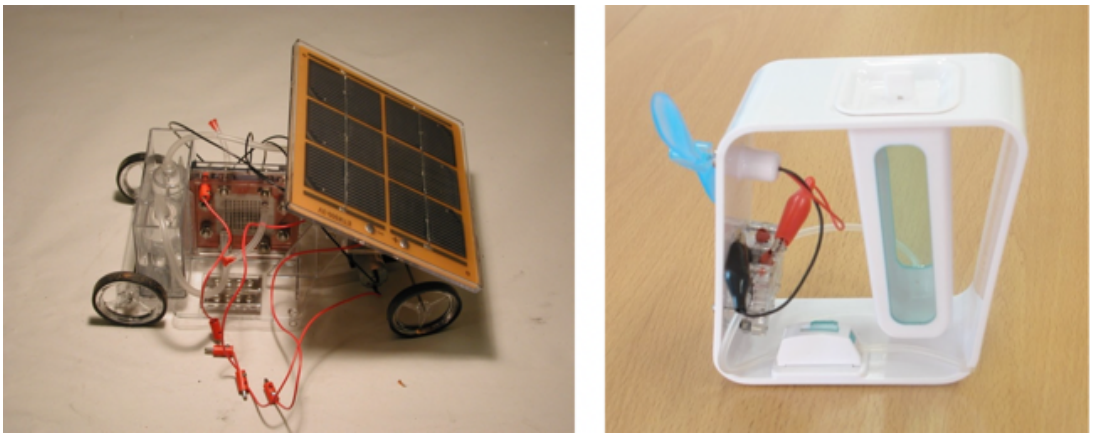
Rysunek 10.6: Schemat szczegółowy procesów chemicznych w wodorowym ogniwie paliwowym. Z dwóch stron dopływa gazowy wodór i tlen. Przegroda rozdzielająca dwa obszary ma wielowarstwową strukturę: zewnętrzne porowate warstwy mają na celu „uwięzienie" gazu, tak aby wszedł on w kontakt z katalizatorem. Membrana z nafionu ma 20 μm. Od strony wodorowej używa się platyny (warstwa rzędu 1 μm), 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: autor. (b) Obraz pod elektronowym mikroskopem skaningowym (kolorowany) membrany w ogniwie paliwowym wodorowym nisko-temperaturowym (korzystającym z nafionu). Widoczne obszary porowate dla „uwięzienia" gazu, katalizatory dla dysocjacji gazów, film polimerowy. Źródło: Wikipedia.

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 katody: 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 $0,86 \times 10^{-15}$m) nie jest jednak procesem fizycznym, a raczej chemicznym. W specjalnym fluoryzowanym

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

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 μm, zob. foto z mikroskopu elektronowego, 10.6b.

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



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 (foto AK).

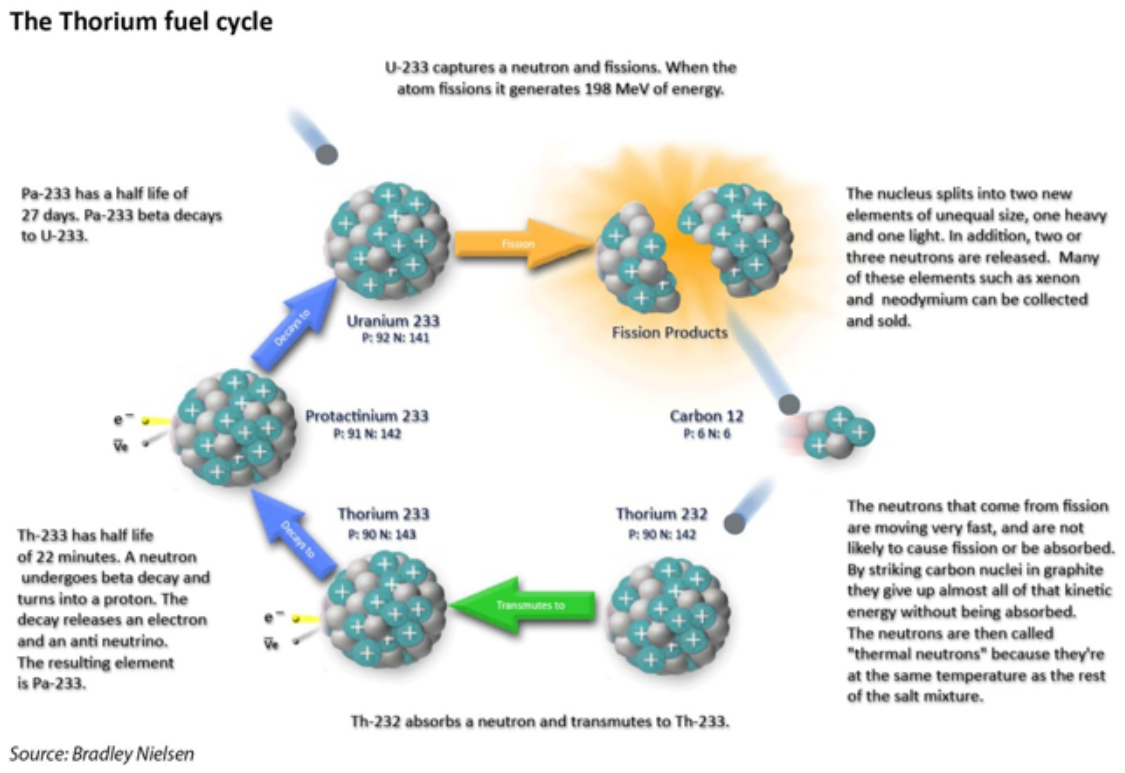
10.4 Alternatywy dla energetyki uranowej

Podobnie jak przypadku zmian klimatycznych tak w temacie energetyki jądrowej dyskusja nie ma charakteru eksperckiego, jak to w nowoczesnym, wykształconym społeczeństwie być powinno [97]. Brak alternatywnej dla węgla energetyki jest/ będzie w Polsce poważnym ograniczeniem rozwoju. Energetyka jądrowa była jednym z założonych

[97] 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 w oparciu o zdania ekspertów.

rozwiązań. Jest ona droga na etapie inwestycji (średnio 4 mld $ 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 własnościach chemicznych i niezwykle zróżnicowanych czasach rozpadu radioaktywnego (od mikrosekund do miliardów lat [98]).

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 Ziemi [99] 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 kilkaset 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 ^{232}Th, rys. 10.8.



Rysunek 10.8: Łańcuch reakcji jądrowych w reaktorze opartym o izotop ^{232}Th. Źródło: http://watt-logic.com/2017/09/10/thorium/

[98] To zróżnicowanie wynika z zasad mechaniki kwantowej: rozpad alfa jest tunelowaniem przez barierę.

[99] G. Karwasz, J. Chojnacka, „Wewnętrzny ogień, czyli o tektonice płyt Ziemi" Geografia w Szkole 3/2012

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 ^{232}Th (okres połowicznego rozpadu 14 mld lat) nie ulega spontanicznemu rozszczepieniu jak ^{235}U po wychwycie neutronu, ale ulega transformacji do izotopu ^{233}Th, metastabilnego (o okresie połowicznego rozpadu, poprzez emisję elektronu, 22 minuty). Dopiero izotop ^{233}U jest rozszczepialny, zob. rys. 10.8.

Ta różnica między ^{232}Th a ^{235}U 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 ma to miejsce w przypadku uranu (^{238}U jest najobfitszym izotopem a ^{235}U jest tylko 0,2%). I po czwarte, bogatych 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 uranowymi [100]). Indie planują w 2050 roku uzyskiwać 40% energii elektrycznej z reaktorów jądrowych pracujących na ^{232}Th.

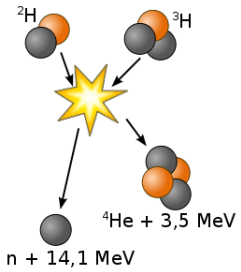
10.5 Reaktor termojądrowy

Głównym „źródłem" energii na Ziemi pozostaje Słońce. Jak pisaliśmy, do Ziemi dociera 1361 J w każdej sekundzie na 1 m^2, 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 ^{2}H, 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 tak naukowych jak technicznych i ekonomicznych wymaga rozwiązania.

Pojedyncza reakcja termojądrowa, rys. 10.9, dostarcza (na jeden nukleon) kilkakrotnie 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,

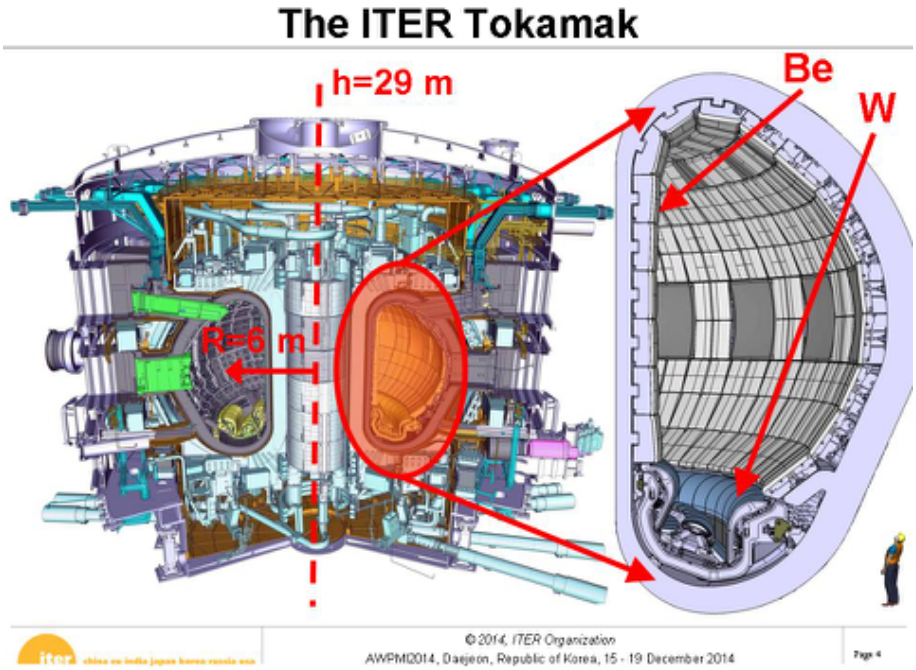
[100] Zwracamy jednak uwagę, że w wielu przypadkach postępu technicznego, istotną role odgrywały czynniki poza-ekonomiczne. Budowa bomby atomowej (uranowej, zrzuconej na Hiroshimę i plutonowej, na Nagasaki), czyli tzw. program Manhattan, kosztował USA 2 mld $. Większość prac badawczych i prototypów procesów technologicznych zostało sfinansowane z tego programu.

zapłonu poprzez eksplozję uranową) najlepszą okazało się pułapkowanie 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 ultra-czystego, 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 ^{4}He z jąder deuteru ^{2}H i trytu ^{3}T, jak w ITER. Źródło: European Nuclear Agency.

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 (^{3}H) 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



Rysunek 10.10: Schemat reaktora termojądrowego ITER w Cadarache. Credit: dr D. J. Campbell, 2014.

w JET 700-800 MW mocy [101]. 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 euro [102] i jest to, oprócz lotu załogowego na Marsa, najdroższy projekt badawczy ludzkości.

Promień torusa plazmy w ITER to 6 metrów, a objętość plazmy 830 m^3, zob. rys. 10.10. 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 będzie 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 10.11: 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 o tryt: 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 (rekcja egzo-energetyczna) i ^7Li (endo-energetyczna), ale o zapotrzebowaniu ludzkości na lit pisaliśmy w par. 10.2. Ścianki ITER są wyścielone berylem (który pochłania neutrony) a najważniejsza część, odbierająca ogromny strumień energii termicznej

[101] https://en.wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus

[102] 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.

(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...

ROZDZIAŁ 11

Rewolucja kwantów i atomów

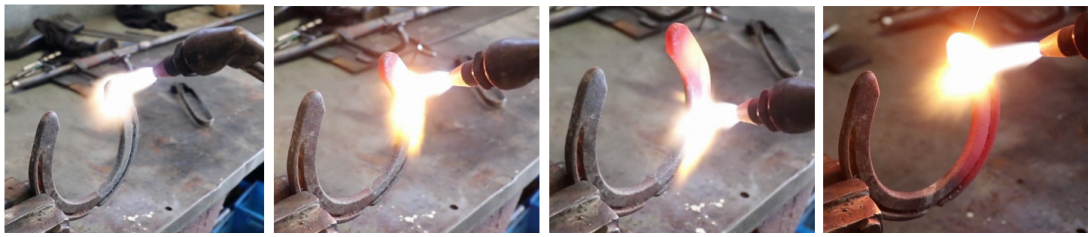
11.1 Hipoteza kwantów światła

Wiele osób uważa, że momentem narodzin fizyki współczesnej jest wyjaśnienie zjawiska emisji ciała doskonale czarnego w oparciu o hipotezę kwantów. Teoria została przedstawiona prze Maxa 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 (odwiedź stronę dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/10, na której 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 biało - 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 wnęki odbija się wielokrotnie od jej ścian i jest niemal całkowicie pochłaniane.

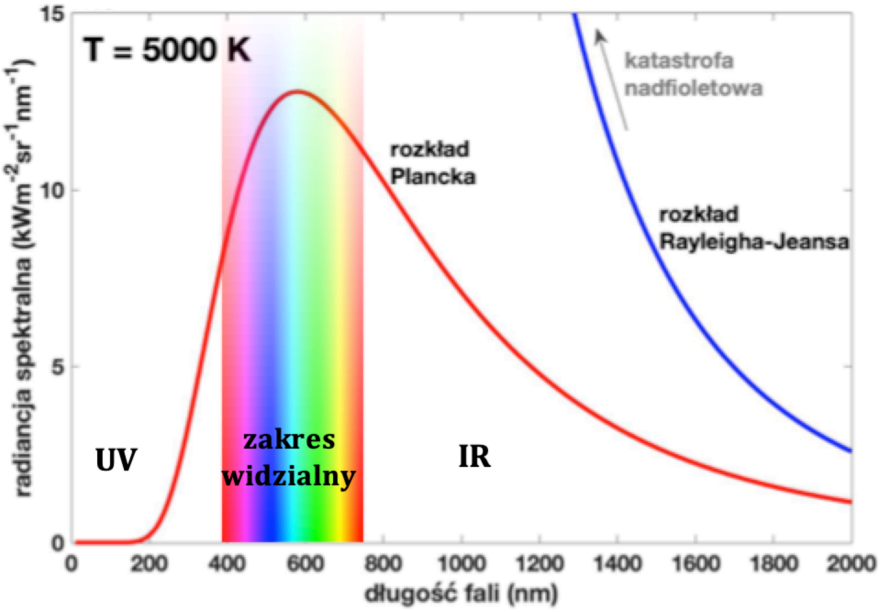


Rysunek 11.2: Zmiana koloru światła emitowanego przez rozgrzaną podkowę wraz ze wzrostem temperatury. Najpierw podkowa zaczyna świecić na czerwono, a przy coraz wyższych temperaturach emitowane są kolejne kolory z widma promieniowania widzialnego dając wrażenie światła białego. Źródło: youtube.com

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 Nicolaus 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 James'a Clark'a Maxwella, które pozwoliły przewidzieć istnienie fal elektromagnetycznych. Co więcej, przybliżyły one nam naturę światła widzialnego, które okazało się być 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 gospodarki całego świata, nie są one w stanie wytłumaczyć obserwowalnego eksperymentalnie kształtu widma promieniowania cieplnego ciała doskonale czarnego,



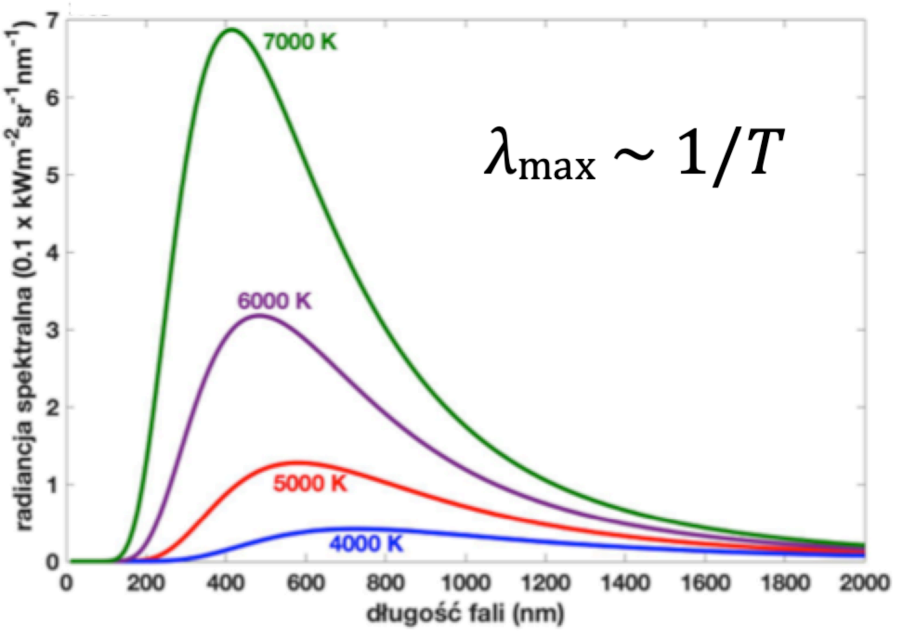
Rysunek 11.3: Zależności natężenia promieniowania od długości fali dla ciała doskonale czarnego o temperaturze $T = 5000$ K wg. modelu Plancka (krzywa czerwona). Krzywa niebieska przedstawia teoretyczny rozkład Rayleigha-Jeansa: natężenie rośnie do nieskończoności, gdy długość fali dąży do zera - jest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

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, W $m^{-2}sr^{-1}nm^{-1}$) ciała doskonale czarnego powinna być proporcjonalna do czwartej potęgi odwrotności długości fali (λ):

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

gdzie c to prędkość światła w próżni, k_B to stała Boltzmanna 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 nieskończenie 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 promieniowa-



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

nia opisujemy wzorem:

$$E = h\nu, \tag{11.2}$$

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:

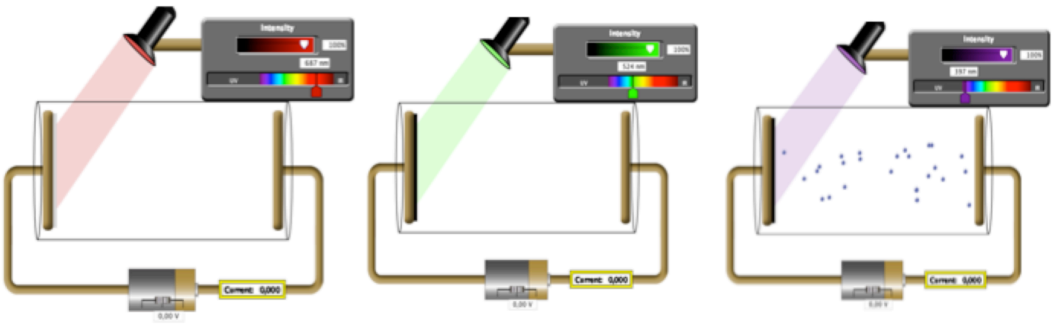
$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda k_B T}) - 1}, \tag{11.3}$$

gdzie c to prędkość światła w próżni, k_B to stała Boltzmanna oraz T to temperatura w Kelwinach.

Zależność B_λ od długości fali według teorii Plancka przedstawia krzywa czerwona na rys. 11.3. Zależność ta okazała się być 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).

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 Demo-



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.edu.

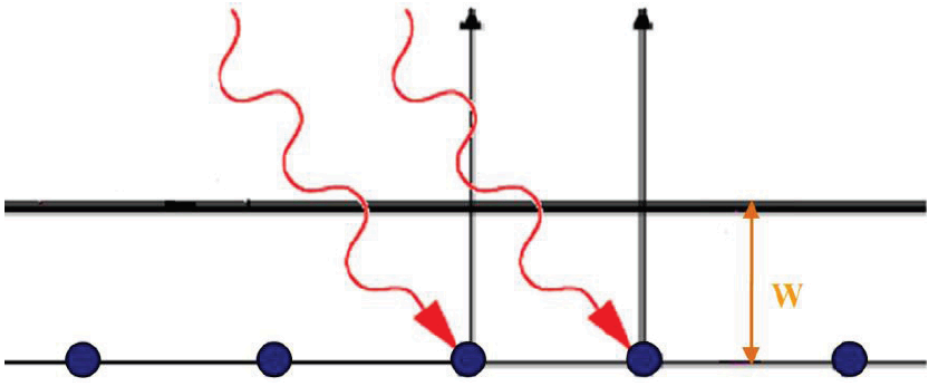
kryta, że materia może składać się z niepodzielnych części, zwanych atomami. Nie spodziewaliśmy się jednak, że światło również jest wymieniane (wysyłane i absorbowane) w postaci minimalnych porcji. W roku 1905 Albert Einstein wykorzystał pomysł Maxa Plancka do wytłumaczenia efektu fotoelektrycznego. 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 wieku[103]: 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 koloru[104]. 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.

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 Maxa Plancka) o energii opisanej równaniem 11.2. Padający foton „uderza" w elektron, sam następnie znika (=zostaje pochłonięty), a jego energię przejmuje elektron. Aby wybić elektron z materiału, należy mu dostarczy energii większej niż ta, z jaką on sam jest związany w atomach metalu. Nadmiar otrzymanej energii zamienia się w energię kinetyczną elektronu. Zapisujemy to w postaci:

$$E_{kin} = h\nu - W, \tag{11.4}$$

[103] Wheaton, Bruce R. (1978). "Philipp Lenard and the Photoelectric Effect, 1889-1911". Historical Studies in the Physical Sciences. 9. pp. 299–322; https://doi.org/10.2307%2F27757381

[104] Zjawisko to dosyć obrazowo opisuje E. M. Rogers w książce "Fizka dla dociekliwych", zobacz: dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/statki.



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.

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 2.87eV (1eV = 1.6×10^{-19} 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, powstawanie kolorów w bańce mydlanej, interferencję oraz dyfrakcję światła można wyjaśnić tylko w oparciu o teorię 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 (patrz rozdział o spektroskopii). Słowo to pojawiło się w 1704 roku w traktacie



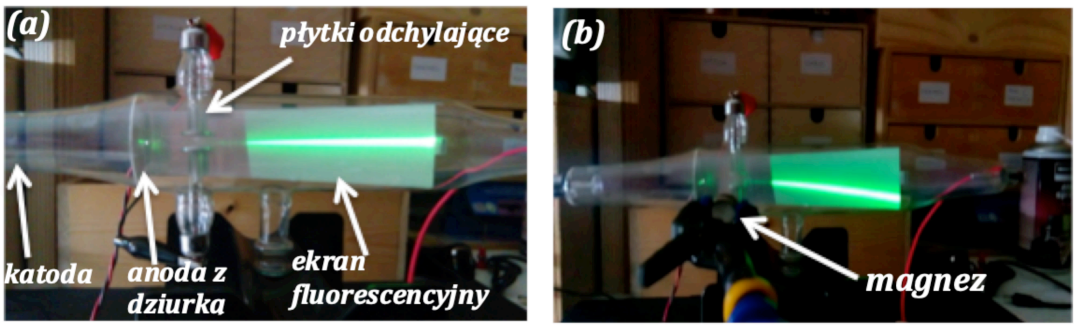
Rysunek 11.7: (a) Widmo ciągłe – daje je żarówka z włóknem wolframowym lub Słońce. Natężenie poszczególnych kolorów w widmach ciągłych różnych źródeł opisane jest prawem Plancka emisji ciała doskonale czarnego. (b) Widmo dyskretne – dają je pary lub gazy (pojedyncze atomy i molekuły).

Newtona „Opticks”[105], 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 być białe. Źródłem światła słonecznego są powierzchniowe rozgrzane warstwy Słońca, które są dobrym przybliżeniem ciała „doskonale czarnego” w modelu Plancka. We wzorze Plancka (patrz 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 czerwonawe 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 - patrz rys. 11.4).

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 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 wzajem-

[105] Newton, Isaac (1998). Opticks: or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light. Also two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures. Commentary by Nicholas Humez (Octavo ed.). Palo Alto, Calif.: Octavo. ISBN 1-891788-04-3. (Opticks was originally published in 1704).



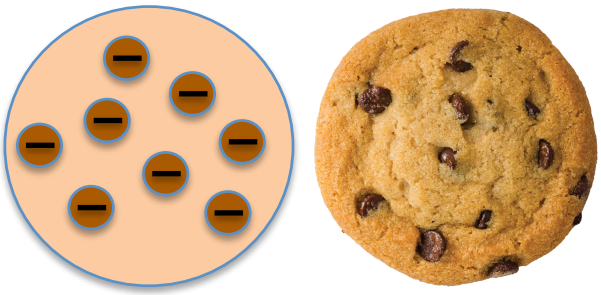
Rysunek 11.8: (a) Promienie katodowe rozchodzące się w szklanej rurze z rozrzedzonym gazem. (b) Odchylenie toru promieni katodowych w polu magnetycznym. Źródło: physicsopenlab.org .

nie ze sobą oddziałują; w gazie atomy są swobodne. Odkrywamy w ten sposób bardzo ważne prawo: pojedyncze atomy emitują widma dyskretne. Wytłumaczenie 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.

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 zauważono 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).

Przez długi czas uważano, że albo świecenie w rurze powodują jakieś cząsteczki, albo promienie katodowe mają naturę falową. Wątpliwości te rozwiał w roku 1896 Anglik Joseph John Thomson w oparciu o swój 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 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 płytami tak, że kierunek pola był do niej prostopadły. Dodatkowo rura szklana umieszczona była w jednorodnym polu magnetycznym prostopadłym do kierunku wiązki i



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

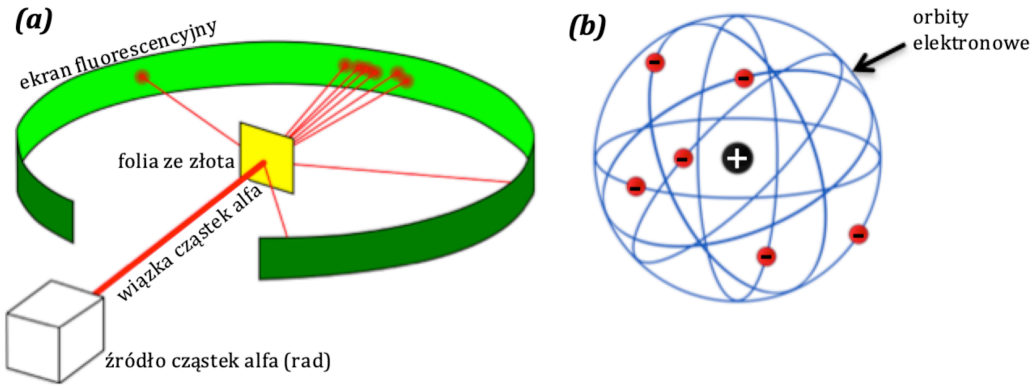
pola elektrycznego pomiędzy płytkami, tak aby siła magnetyczna mogła przeciwdziałać sile elektrycznej (symulacja wpływu pola magnetycznego na promienie katodowe dostępna na stronie www.vascak.cz). Zmieniając pole elektryczne oraz magnetyczne okazało się, że wiązka ulega ugięciu (plamka na ekranie przesuwała 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*[106].

Piętnaście lat po odkryciu elektronu, Amerykanin Robert Millikan zaprojektował inny eksperyment (patrz 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 precyzyjna 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", patrz 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 (zobacz symulację doświadczenia na stronie www.vascak.cz lub phet.colorado.edu). 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 promieniotwór-

[106] Więcej szczegółów o właściwościach elektronu znajdziesz na stronie dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/elempart_pl.



Rysunek 11.10: (a) Schemat eksperymentu Rutherforda – rozpraszanie cząstek alfa na cienkiej folii ze złota. Źródło: large.stanford.edu; (b) model atomu Rutherforda - źródło: commons.wikimedia.org.

czych, 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 rozpraszały 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.

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 podlegałby 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 te 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*:

$$k\frac{Ze^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}, \tag{11.5}$$

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*:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - k\frac{Ze^2}{r}, \tag{11.6}$$

Powyższe dwa postulaty są zgodne z fizyką klasyczną. Prawdziwą rewolucję stanowiły postulaty czerpiące z hipotezy kwantów:
(3) *Moment pędu elektronu jest skwantowany*:

$$mvr = n\hbar, \tag{11.7}$$

gdzie $\hbar$ to stała Plancka podzielona przez 2π, $n = 1,2,3,\ldots$ 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*:

$$E_2 - E_1 = h\nu, \tag{11.8}$$

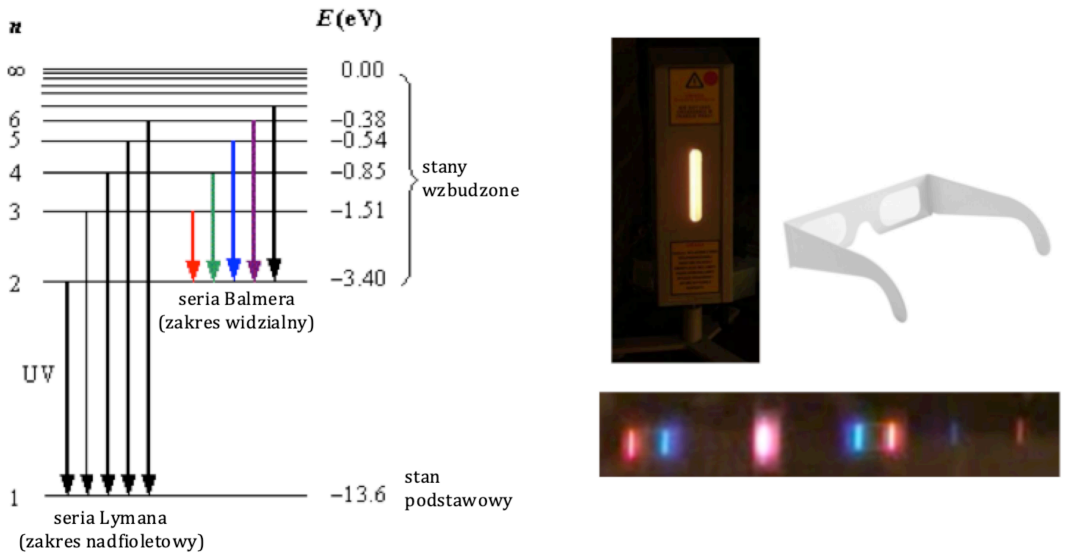
gdzie E_2 i E_1 to energie elektronu, odpowiednio, wyższa i niższa.
Powyższe postulaty prowadzą do wniosku, że energia elektronu w atomie jest skwantowana i może przyjmować tylko następujące wartości:

$$E = -\frac{Z^2}{n^2}R, \tag{11.9}$$

gdzie $R = 13.6$eV to tzw. stała Rydberga, która jest równa wartości bezwzględnej energii elektronu na pierwszej orbicie w atomie wodoru ($n = 1$, $Z = 1$).

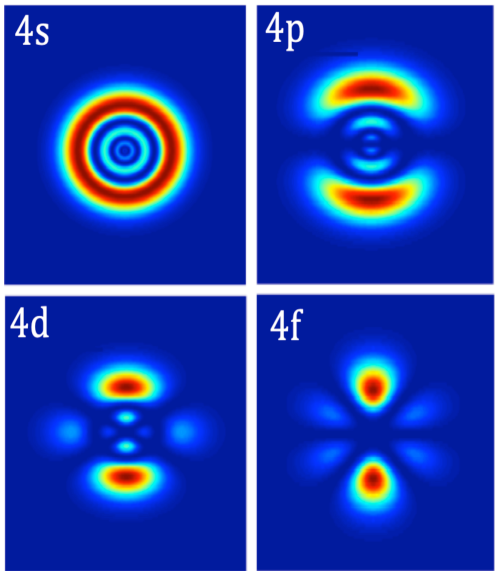
Model atomu Bohra w doskonały sposób tłumaczy obserwowalne widmo promieniowania emitowanego przez atom wodoru. Seria Balmera, którą można oglądać za pomocą siatki dyfrakcyjnej odpowiada przeskokom elektronu z orbit wyższych ($n = 3,4,5$ itd.) na orbitę $n = 2$ - patrz rys. 11.11.

Chociaż "półklasyczny"model atomu Bohra całkiem dobrze opisuje jedno - elektronowy atom wodoru (patrz symulacje komputerowe phet.colorado.edu), dokładny opis atomów wieloelektronowych oraz obserwowalnych widm emisyjnych tych atomów wymaga zastosowania mechaniki kwantowej. Zgodnie z tym obrazem, elektrony w atomie



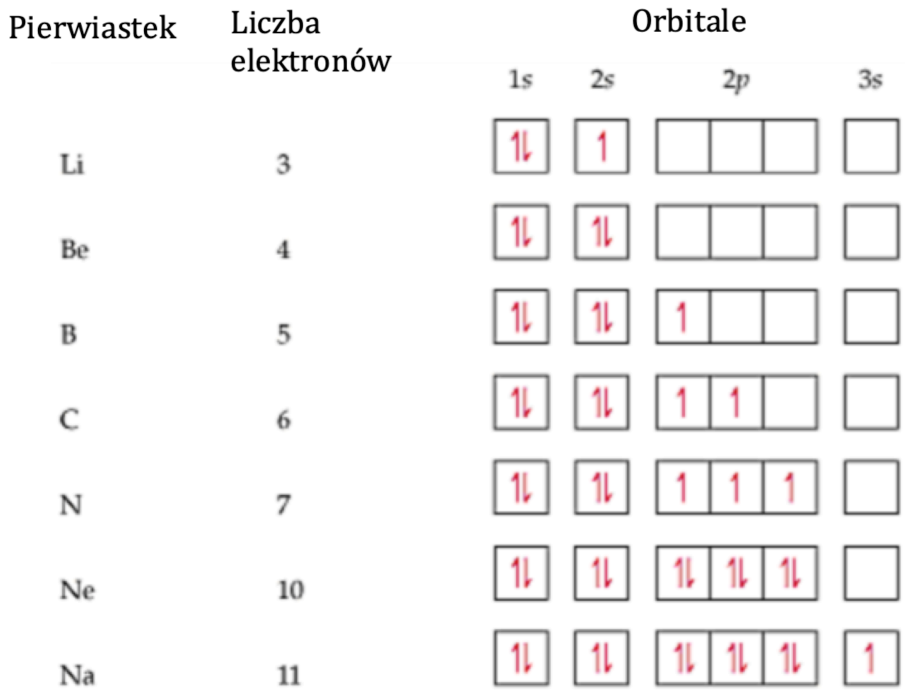
Rysunek 11.11: Układ poziomów energetycznych w atomie wodoru w modelu Bohra; leżąca w zakresie widzialnym seria Balmera odpowiada przeskokom elektronów z orbity o $n = 3$ na orbitę $n = 2$. Rysunek zapożyczony z e-fizyka.info. Serię Balmera można oglądać przy pomocy okularów dyfrakcyjnych i lampy spektralnej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

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 (patrz rozdział 12.3).



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.

Zarówno energia jak i moment pędu są wielkościami skwantowanymi, tzn. mogą przyjmować tylko określone wartości na danym orbitalu. Do określenia dozwolonych wartości energii używa się *głównej liczby kwantowej* $\boldsymbol{n} = 1, 2, 3 \ldots$, natomiast do określenia dozwolonych wartości orbitalnego momentu pędu używa się *orbitalnej liczby kwantowej* $\boldsymbol{l}$, która dla danej energii ($\boldsymbol{n}$) może przyjmować wartości $\boldsymbol{l} = 0, 1, 2, \ldots n-1$. Ze względów historycznych orbitale z $\boldsymbol{l} = 0$ nazywa się orbitalami typu $\boldsymbol{s}$, orbitale z $\boldsymbol{l} = 1$ nazywa się orbitalami typu $\boldsymbol{p}$, orbitale z $\boldsymbol{l} = 2$ nazywa się orbitalami typu $\boldsymbol{d}$, a orbitale z $\boldsymbol{l} = 3$ nazywa się orbitalami typu $\boldsymbol{f}$. Badania widm emisyjnych atomów umieszczonych w polu magnetycznym doprowadziły do odkrycia trzeciej liczby kwantowej, tzw. magnetycznej liczby kwantowej $\boldsymbol{m} = -l, -l+1, \ldots, l-1, l$. Zestaw trzech liczb kwantowych n, l oraz m w pełni charakteryzuje orbitale atomowe.



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.

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 energetycz-

nie zapełnienia orbitali atomowych, powinno być jak najwięcej elektronów niesparowanych spinami.
W oparciu o dwie powyższe reguły można opisać konfigurację elektronową niemal każdego atomu w układzie periodycznym Mendelejewa oraz zrozumieć podstawowe właściwości chemiczne atomów. Obsadzenia orbitali atomowych wybranych atomów przedstawia rys. 11.13.

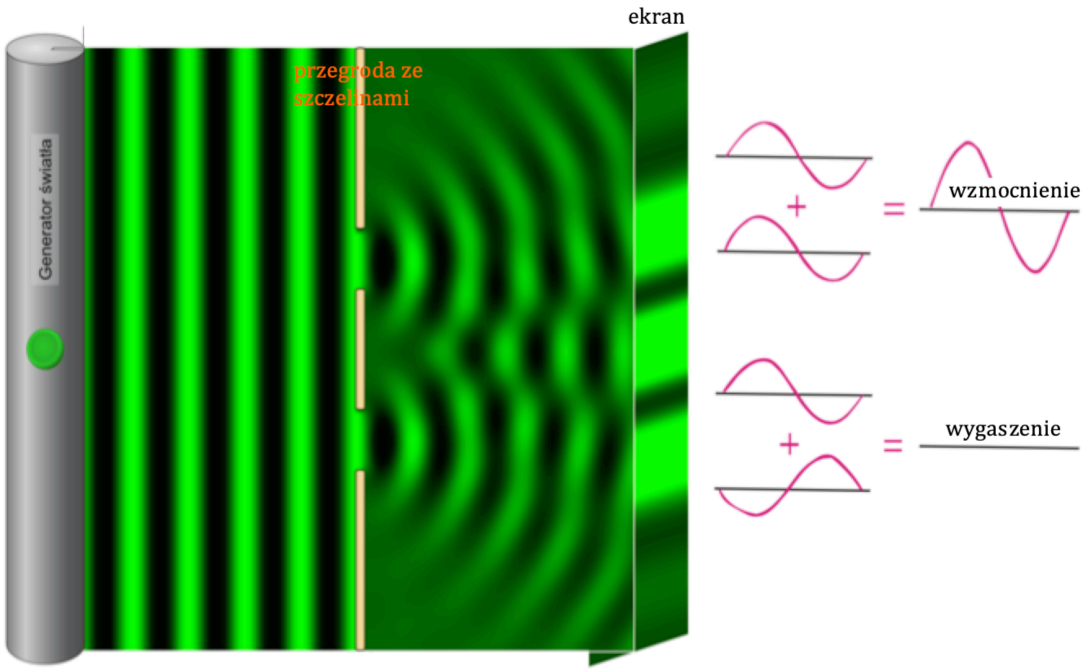
ROZDZIAŁ 12

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 natrafią na przeszkodę, która zakrzywia 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 przeważył 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 oparciu o teorię falową. Zjawisko to obserwuje się nie tylko dla światła, ale także dla innych rodzajów fal, np. fal na powierzchni wody lub fal dźwiękowych.



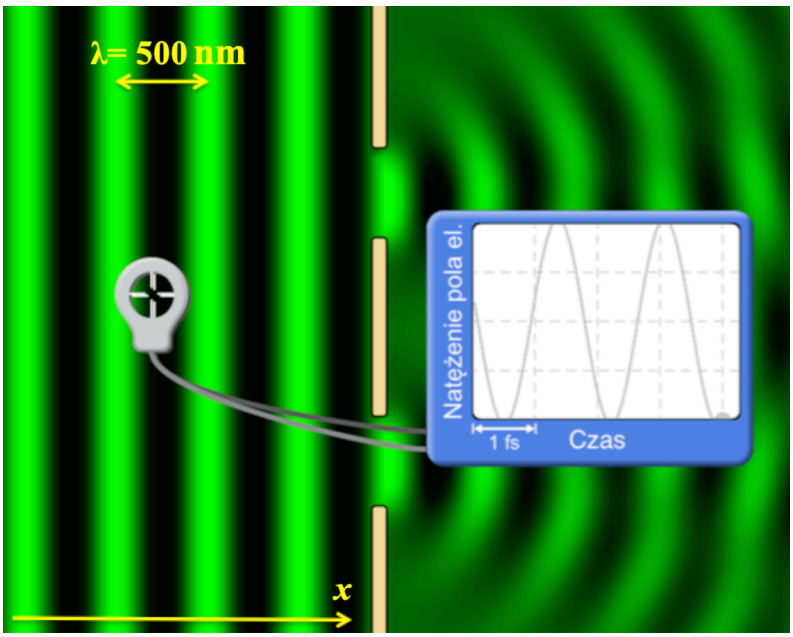
Rysunek 12.1: Symulacja doświadczenia Younga - interferencja światła z dwóch szczelin. Gdy dwa grzbiety fali (zaburzenia) spotykają się ze sobą to występuje wzmocnienie, jeżeli wychylone są w tę samą stronę lub wygaszenie, gdy wychylone są w przeciwne strony - na ekranie powstaje obraz interferencyjny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

„Gwoździem do trumny" dla teorii cząsteczkowej światła (przynajmniej tak początkowo sądzono) było wykazanie przez James'a Clark'a Maxwella w drugiej połowie XIX, 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:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}, \tag{12.1}$$

gdzie E to natężenie pola elektrycznego, v 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. $x - vt$. Na przykład rozwiązaniem może być funkcja sinus opisująca falę periodyczną, która pada na dwie szczeliny przedstawione na rys. 12.2: $E(x - vt) = A\sin[k(x - vt)]$, 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 $v = c = \lambda/T = 3 \times 10^8$ m/s, gdzie T to okres fali periodycznej. Równanie falowe 12.1 opisuje nie tylko drgania pola elektrycznego, ale każdy rodzaj propagującego się zaburzenia (fale na wodzie, fale w powietrzu, fale na sznurze).

Teoria falowa światła tłumaczy nie tylko zjawiska charakterystyczne dla fal takie, jak



Rysunek 12.2: Fala periodyczna o parametrach: $\lambda = 500$ nm (światło zielone) i okresie $T = 1.66$ fs. Prędkość fali wynosi $v = \lambda/T = 3 \times 10^8$ m/s. Źródło: phet.colorado.edu.

interferencja i dyfrakcja, ale również wyjaśnia odbicie światła, załamanie i rozszczepienie światła na kolory - zjawiska, które Newton tłumaczył w oparciu o koncepcję 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, patrz 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 fotonu[107] - 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

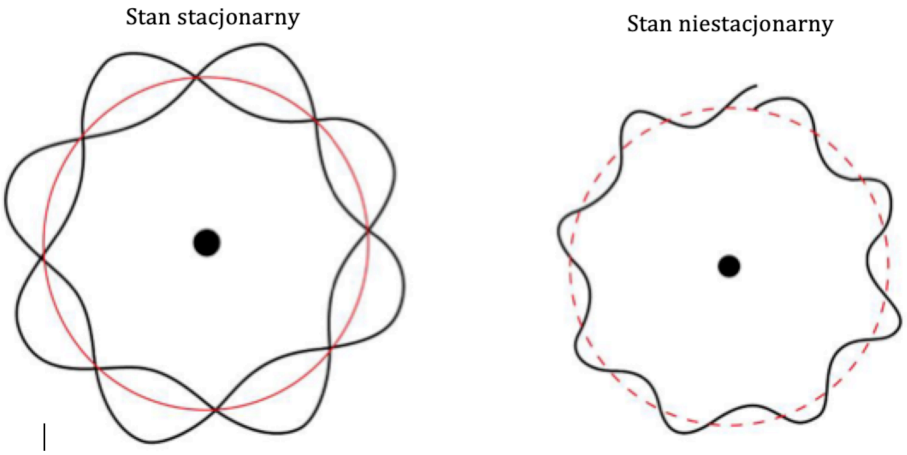
Światło jest falą i cząstka jednocześnie. Dualizm korpuskularno-falowy światła nasunął młodemu arystokracie francuskiemu Luisowi de Broglie pomysł, że cząstki materii również mogą być falami. W 1924 opublikował on pracę doktorską pt. *Recherches sur la théorie des quanta* (Badania nad teorią kwantową), 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, ale również przewidział ich długość. Założył, że długość przewidywanych fal materii jest określona tym samym związkiem, który stosuje się do światła (patrz równanie 11.2 z $\nu = v/\lambda$ oraz $E = p^2/2m$):

$$\lambda = \frac{h}{p}, \tag{12.2}$$

[107] W. Wasilewski, P. Kolenderski and R.Frankowski, Phys. Rev. Lett. 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 (patrz 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. 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 zeru. Elektron jest więc falą stojącą na dozwolonych orbitach atomowych. Związanie elektronu ze stojąca 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.

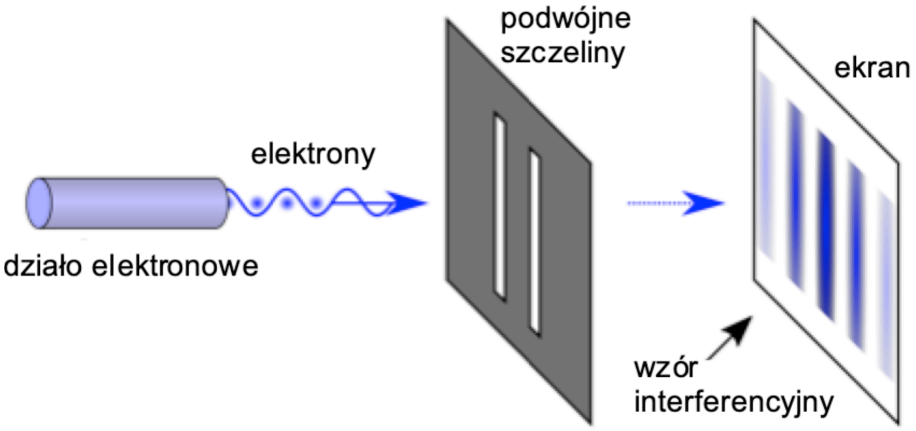


Rysunek 12.3: Wyjaśnienie stacjonarnej natury orbit atomowych w modelu Bohra w oparciu o hipotezę de Broglie'a. Dozwolone są tylko orbity, na których elektron zachowuje się jak fala stojąca. Źródło: wikibook.org.

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.edu.

Jeszcze bardziej spektakularną demonstracją falowej natury materii było powtórzenie eksperymentu Younga interferencji na podwójnej szczelinie z użyciem elektronów, zob. rys. 12.4. Film demonstrujący tworzenie się obrazu interferencyjnego w takim eksperymencie można obejrzeć pod następującym linkiem lub przy użyciu symulacji komputerowej z Phet.Colorado.edu. Dziwne pozostaje, 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: wikipedia.org.

Długość fali de Broglie'a jest odwrotnie proporcjonalna do masy cząstki, patrz 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 ftalocyjaniny ($C_{32}H_{18}N_8$) - w roku 2012 uzyskano obraz interferencyjny tych cząsteczek[108], patrz rys. 12.5.



Rysunek 12.5: Obraz interferencyjny cząstek ftalocyjaniny. Źródło: Nature Nanotechnology.

[108] B. S. Zhao and W. Schöellkopf, Nature Nanotechnology 7, 277–278 (2012), https://www.nature.com/articles/nnano.2012.44

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 pytanie jaką postać może mieć funkcja opisująca fale materii - funkcja falowa, 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.

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:

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

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: $p_x \rightarrow -i\hbar\frac{\partial}{\partial x}$, 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:

$$i\hbar\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m}\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x,t)\right]\psi(x,t), \tag{12.4}$$

gdzie $\psi(x,t)$ to funkcja falowa opisująca ruch cząstki. Równanie 12.4 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 zapostulować 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: $V = -k\frac{e^2}{r}$, gdzie $k = 9 \times 10^9$ Nm^2/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 12.4 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:

$$E\psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m}\Big[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x)\Big]\psi(x). \tag{12.5}$$

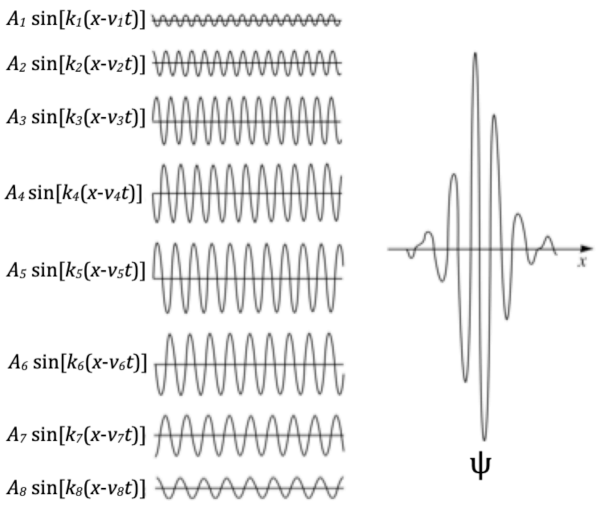
Ze względu na symetrię sferyczną atomu wodoru wygodniej jest rozwiązać to równanie we współrzędnych sferycznych zamiast kartezjańskich[109]. Funkcje falowe, będące rozwiązaniami takiego równania, podniesione do kwadratu dają orbitale przedstawione na rys. 11.12 w rozdziale 11.4. Orbitale są miarą prawdopodobieństwa 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 energii okupują orbitale atomowe. Każdy orbital atomowy można jednoznacznie zidentyfikować za pomocą czterech liczb kwantowych, patrz rozdział 11.4.

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 12.4, 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:

$$\psi(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \sin[k_j(x - v_j t)] \tag{12.6}$$

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

[109] G. K. Woodgate, Struktura atomu, PWN, 1974; P. T. Matthews, Wstęp do mechaniki kwantowej, PWN, 1977



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

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 rządzonym prawami fizyki kwantowej elektron analogiczną barierę może pokonać. Symulację komputerową takiego zjawiska[110] pokazuje rys. 12.7. Poprzez barierę potencjału należy rozumieć dowolną przeszkodę w ruchu cząstki, której pokonanie wymaga dodatkowej energii.

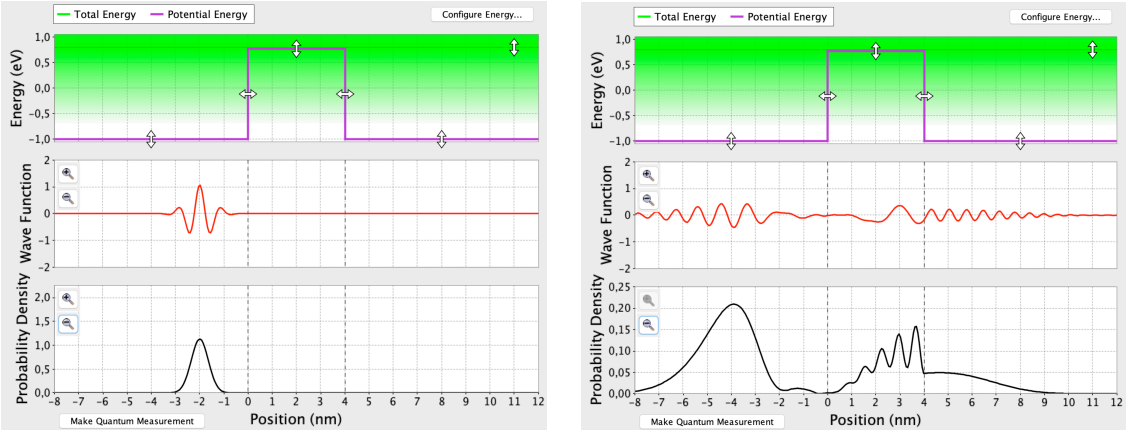
Prawdopodobieństwo pokonania bariery zależy od wysokości bariery (V_0) względem energii elektronu (E_0) oraz od szerokości bariery(L):

$$T = \frac{1}{1 + \frac{1}{4}\frac{V_0^2}{E_0(V_0-E_0)}\sinh^2(\kappa L)}, \tag{12.7}$$

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 ato-

[110] 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. *Rysunek lewy*: paczka falowa poruszająca się w prawo pada na barierę potencjału o wysokości wyższej niż energia potencjalna cząstki. Pokazana jest tylko część rzeczywista funkcji falowej. *Rysunek prawy*: 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.Colordo.edu.

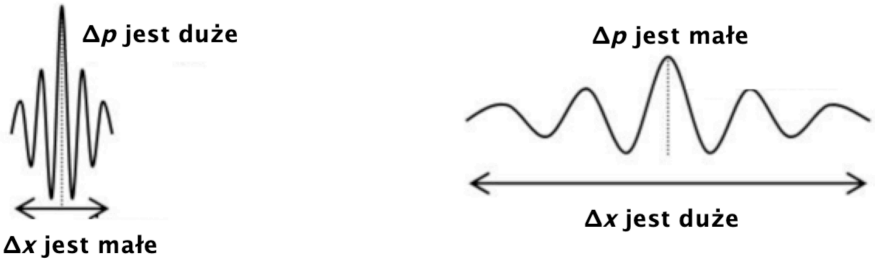
mów. W elektronice półprzewodnikowej tunelowanie kwantowe jest źródłem niepożądanych prądów upływu - nośniki ładunku elektrycznego (elektrony lub dziury) przechodzą przez izolujące obszary w układach scalonych prowadząc do wzrostu ciepła i spadku mocy układów. Obecność tych prądów determinuje dolną granica 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.

12.4 Zasada nieoznaczoności Heisenberga

Fakt, że cząstki opisujemy za pomocą paczki falowej prowadzi do zasady nieoznaczoności Heisenberga[111]. 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, patrz 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.

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:

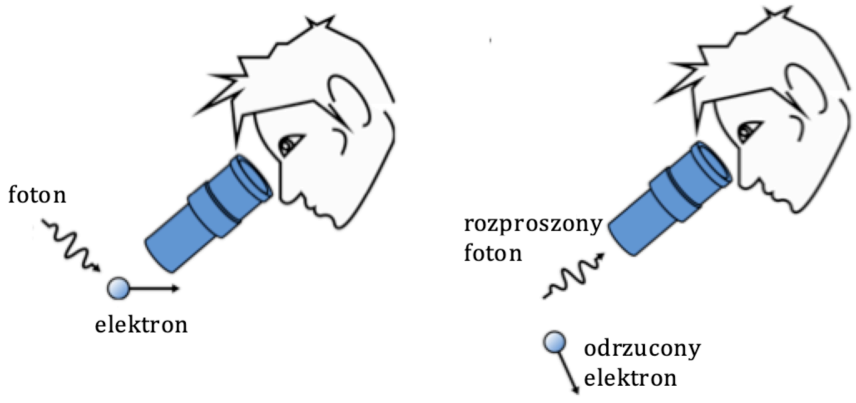
[111] Zapoznaj się ze słowami samego Heisenberga opisującego moment odkrycia zasady nieoznaczoności: dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/heisenberg



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.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \tag{12.8}$$

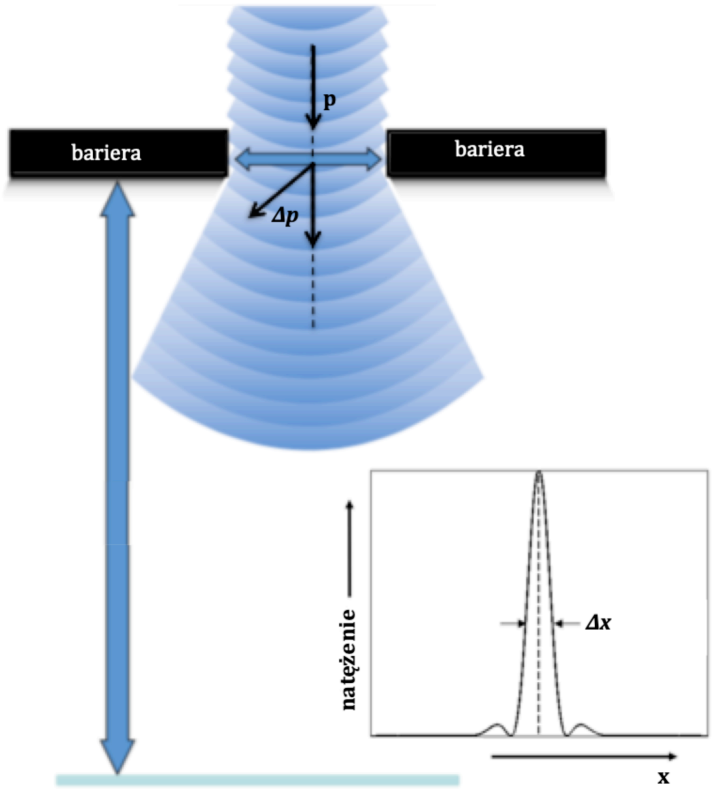
Fakt, że prawa strona nierówności 12.8 jest różna od zera oznacza, że niemożliwy jest jednoczesny pomiar obydwu wielkości z dowolną precyzją. Im więcej informacji uzyskujemy o jednej z tych wielkości, tym mniej wiemy o drugiej. Reguła ta jest konsekwencją faktu, że pomiar cząstki mikroskopowej możliwy 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, patrz rys. 12.9. Precyzyjny pomiar pozycji cząstki wymaga zastosowania fotonu o bardzo krótkiej długości fali. Jednak zgodnie z relacją Plancka (rów. 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 12.9: Pomiar położenia i pędu elektronu za pomocą fotonu. Foton rozprasza się na elektronie w kierunku obserwatora dokonując jednocześnie zaburzenia prędkości badanej cząstki. Rysunek pożyczono z ocw.mit.edu.

Innym często przytaczanym przykładem na słuszność relacji 12.8 jest zjawisko dyfrakcji światła na pojedynczej szczelinie. Wiadomo, że szerokość centralnego piku dy-

frakcyjnego rośnie wraz ze zmniejszaniem szerokości szczeliny. Ten nieintuicyjny efekt można wyjaśnić w oparciu o falową naturę 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, rośnie 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, patrz rys.12.10.



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).

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

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}. \tag{12.9}$$

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 wid-

mowych emitowanych przez atom (należy dodać, że istnieją również inne efekty, które mogą poszerzyć linie widmowe).

13 ROZDZIAŁ

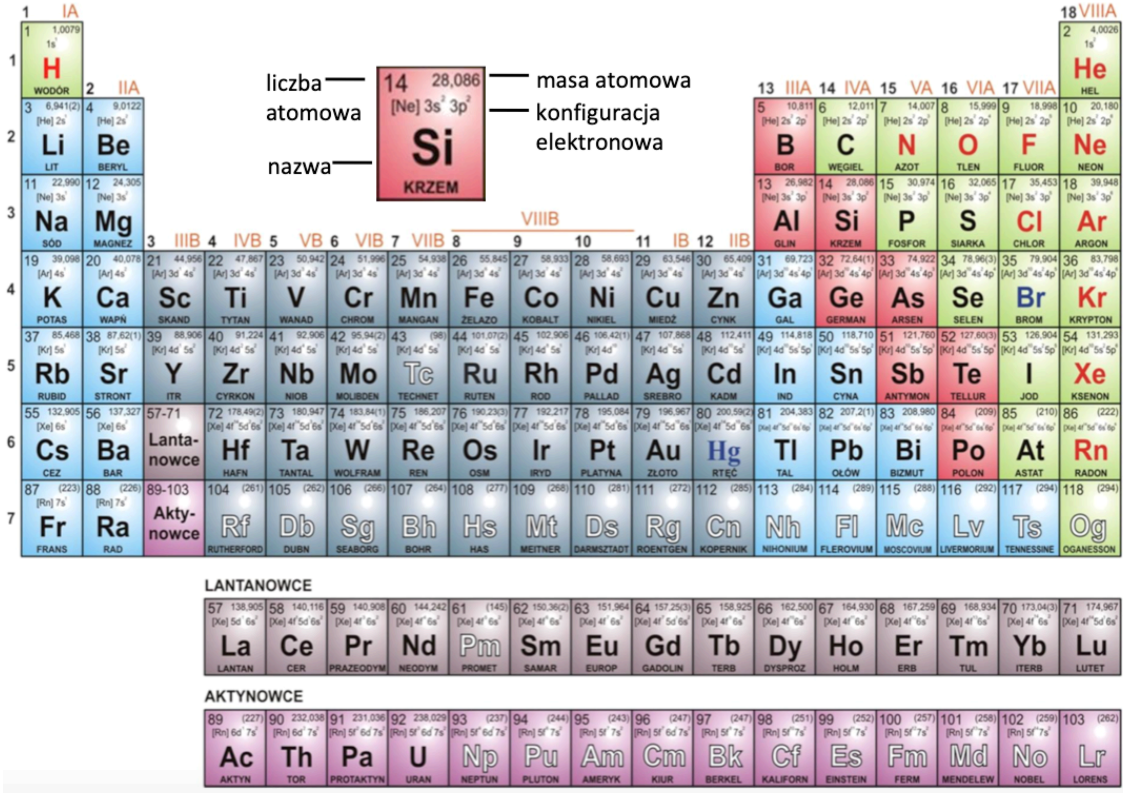
Podzielić niepodzielny

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 Abdery, 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 Lavoisier zdefiniował *pierwiastek chemiczny* jako podstawową substancję, która nie może już być rozdzielona metodami chemicznymi. W 1803 roku Anglik John Dalton 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 Brown odkrył zjawisko spontanicznego chaotycznego ruchu pyłków kwiatowych zawieszonych w wodzie. Zjawisko to zostało potem nazwane ruchami Browna i zasugerowano, że za ich obecność odpowiedzialne są termiczne ruchy cząsteczek wody (1877, Joseph Delsaulx[112]) - prawdziwe ruchy Browna możesz zobaczyć na stronie dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/1 lub ich symulację na stronie www.vascak.cz. Ostateczną analizę matematyczną ruchów Browna przedstawił Albert Einstein w 1905 roku, na podstawie której Jean Baptiste Perrin wyznaczył po

[112] J. Delsaulx, "Thermo-dynamic Origin of the Brownian Motions", Monthly Microscopical Journal, 18 (1877)

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.13.1. Układ przedstawia wizualnie prawo okresowości głoszące, że właściwości chemiczne pierwiastków powtarzają się okresowo, gdy uporządkuje się te pierwiastki zgodnie z ich masami.



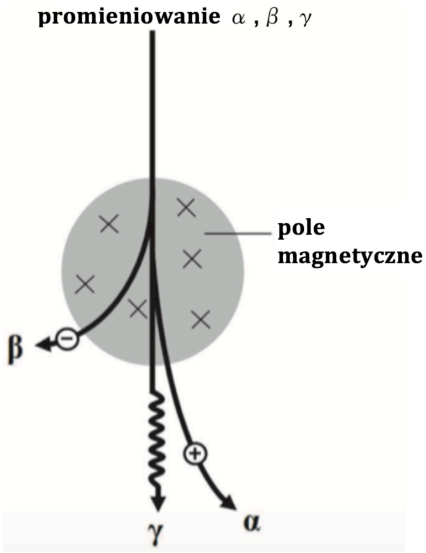
Rysunek 13.1: Układ okresowy pierwiastków chemicznych. Źródło: ug.edu.pl.

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 Becquerel odkrył przypadkowo zjawisko naturalnej (spontanicznej) promieniotwórczości (1896). Zauważył, że klisza fotograficzna leżąca w pobliżu soli 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 smolistej lub uranitu) jest znaczne silniejsza niż wynikałoby to z zawartości uranu w ich składzie. Wysunęła więc hipotezę, że w skład minerałów wchodzą 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).

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 prze-



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.

prowadził serię prostych eksperymentów, które pozwoliły mu rozróżnić promieniowanie α (cząstki alfa) i promieniowanie β (cząstki beta). W swoich badaniach użył radioaktywnego uranitu 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 Villard 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 Röntgena. O podobnym charakterze obydwu promieni, γ i X, wspomina Maria Skłodowska-Curie w swojej pracy doktorskiej z 1903 roku[113]. Symulację zachowania trzech typów promieniowania w polu magnetycznym oraz ich przenikliwości można znaleźć na stronie: www.vascak.cz.

Henri Becquerel udowodnił, że promienie β są szybkimi elektronami, podczas gdy Rutherford wykazał w 1909 r., 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

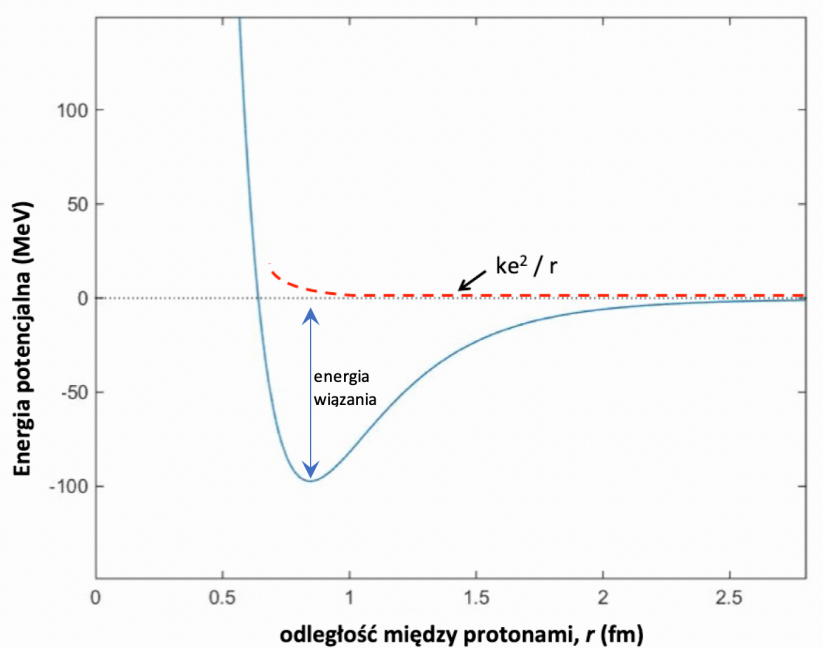
Jądro atomowe skoncentrowane jest w bardzo małym obszarze ($\sim 10^{-15}$m) w środku atomu. Aby atom pozostawał elektrycznie obojętny, liczba ujemnie naładowanych elektronów musi być równa ilości cząstek dodatnich w jądrze - protonów. Masa protonu jest 1837 razy większa niż masa elektronu - innymi słowy to masa jądra determinuje masę całego atomu. Kolejne pierwiastki w tablicy Mendelejewa różnią się ilością elektronów i protonów: atom wodoru posiada 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, patrz rys. 13.1. 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 Angilka James Chadwicka. 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, patrz rys. 13.1, 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: ${}^{A}_{Z}\mathbf{X}$. Atomy o różnej liczbie neutronów w jądrze $(A-Z)$, ale takiej samej liczbie protonów

[113] M. Skłodowska-Curie, praca doktorska pt. "Badanie ciał radioaktywnych", Uniwersytet Paryski, https://wolnelektury.pl/media/book/pdf/sklodowska-badanie-cial-radioaktywnych.pdf

Z, nazywamy *izotopami*. Listę stabilnych izotopów wszystkich znanych pierwiastków można znaleźć na stronach Wikipedii. Masa atomów w układzie okresowym na rys. 13.1 podana jest w jednostkach masy atomowej, gdzie za jednostkę przyjmuje się 1/12 masy atomowej izotopu węgla $^{12}_{6}$C. Występowanie izotopów jest przyczyną, że masy atomowe pierwiastków podane w tablicy Mendelejewa nie są liczbami całkowitymi lecz wartością uśrednioną po wszystkich znanych izotopach.

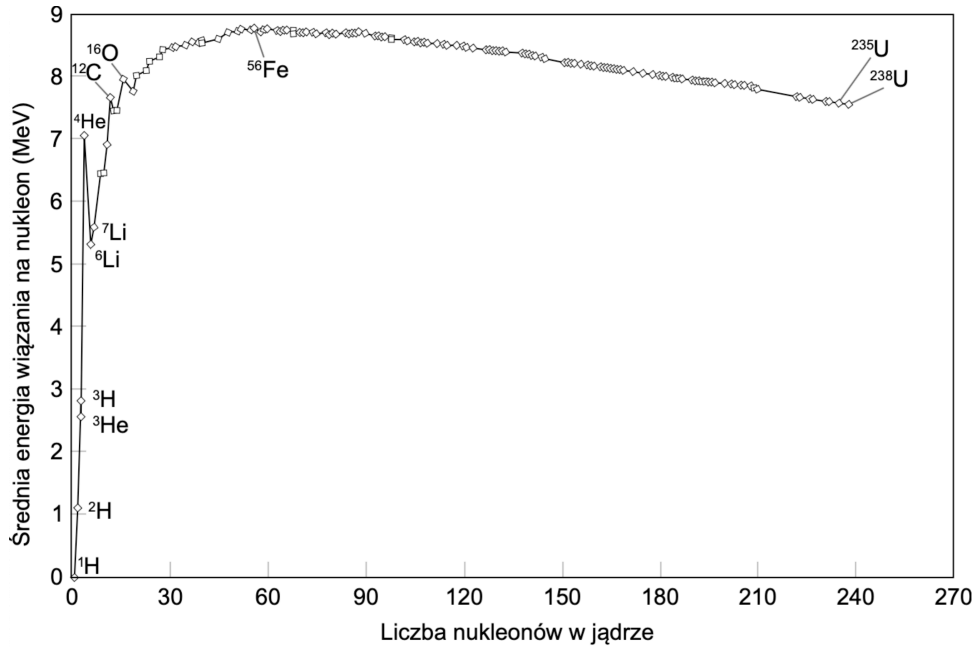
Oddziaływania grawitacyjne oraz elektromagnetyczne nie pozwalają na wyjaśnienie struktury jądra atomowego. Aby wyjaśnić co tak silnie wiąże nukleony w jądrach atomowych, trzeba wprowadzić nowe oddziaływanie. Ta siła wiążąca musi być większa niż siła odpychania elektrostatycznego występująca pomiędzy 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 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 przezwycięża ona siłę odpychania się ładunków dodatnich, patrz rys. 13.3. Jej zasięg jest jednak tak mały, że nukleony będące w jednym jądrze, lecz niesąsiadujące ze sobą, nie oddziaływują ze sobą w sposób silny.



Rysunek 13.3: Energia potencjalna oddziaływania silnego proton - proton (linia ciągła) w porównaniu z energią ich odpychania elektrostatycznego (linia przerywana na podstawie R.V. Reid, *Local phenomenological nucleon–nucleon potentials*, Annals of Physics 50: 411–448, 1968). Wartość bezwzględna minimum energii potencjalnej oddziaływania silnego określa wartość energii wiązania.

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 przezwyciężyć 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) syntezie 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.

Reakcje jądrowe łączenia (fuzji) jąder dążą do uzyskania wyraźnego wzrost energii wiązania. Relatywnie dużą energią wiązania wśród pierwiastków lekkich charakteryzuje się jądro $^4_2$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 energię wiązania na nukleon ma jądro atomu żelaza. Jest to przyczyną względnie dużej obfitości żelaza we Wszechświecie.



Rysunek 13.4: Energia wiązania na jeden nukleon w zależności od liczby nukleonów w jądrze. Źródło: Wikipedia.

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, patrz rozdział 12.3. Zjawisko takie nazywamy tunelowaniem kwantowym a prawdopodobieństwo przeniknięcia przez barierę zależy od jej szerokości, wysokości oraz energii cząstki padającej, patrz równanie 12.7. 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 $^{238}_{92}$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 E. Rutherforda *alfa*, która złożona jest z dwóch protonów i dwóch neutronów. Taki układ charakteryzuje się relatywnie dużą energią wiązania wśród pierwiastków lekkich, patrz rys. 13.4. Schemat rozpadów α ma następującą postać:

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}\mathrm{X} + ^{4}_{2}\mathrm{He}. \tag{13.1}$$

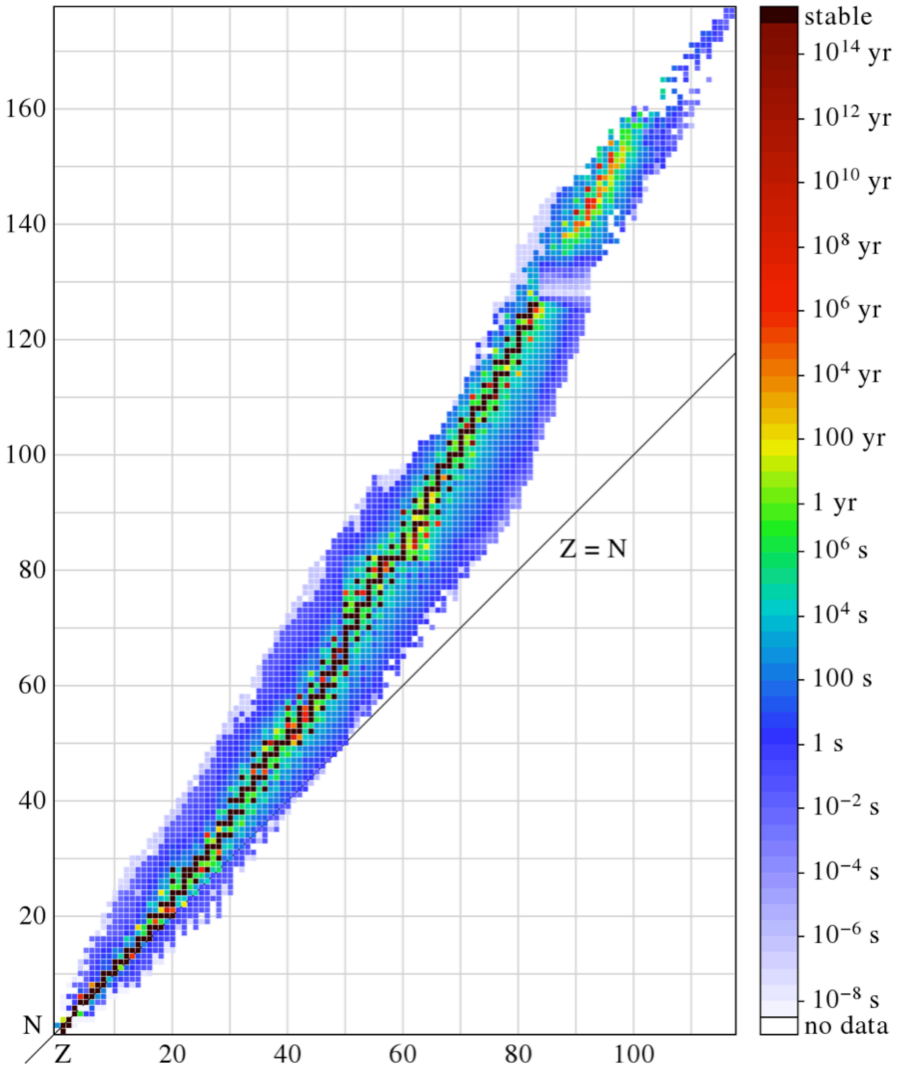
W rozpadach α liczba masowa A zmniejsza się o 4, a liczba atomowa Z zmniejsza się o 2. W konsekwencji w wyniku rozpadu powstaje jądro pierwiastka leżącego o dwa miejsca na lewo w tablicy Mendelejewa. Przykładem rozkładu α jest rozpad polonu $^{210}_{84}$Po:

$$^{210}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow ^{206}_{82}\mathrm{Pb} + ^{4}_{2}\mathrm{He} + 5.4\mathrm{MeV}. \tag{13.2}$$

W czasie reakcji wydziela się energia 5.4 MeV, która unoszona jest przez wyrzuconą cząstkę $^{4}_{2}$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 pochłonąć. Symulację rozpadu α można znaleźć na stronach phet.colorado.edu.

Rozpady β

Promieniowanie β to rozpad jądra, któremu towarzyszy emisja elektronów (nazwanych



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

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-tych XX wieku zauważono pewną trudność w wynikach doświadczeń nad rozpadami β. O ile cząstki α mają dobrze określony zasięg w różnych materiałach to cząstki β (czyli elektrony) zatrzymują się na rożnych głębokościach: od zera do pewnej głębokości maksymalnej. Enrico Fermi, włoski fizyk jądrowy, który w czasie XX wojny światowej był kierownikiem naukowym prac nad bomba 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^-):

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

gdzie $\bar{\nu}_e$ to antyneutrino, które różni się neutrina jedynie kierunkiem spinu. Powyższa przemiana zachodzi w sposób spontaniczny i rządzą nią 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 (patrz rozdział 14).

Sam proces rozpadu β jądra można przedstawić następująco:

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{X} + e^{-} + \bar{\nu}_e. \tag{13.4} $$

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 ${}^{40}_{19}\mathrm{K}$:

$$ {}^{40}_{19}\mathrm{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\mathrm{Ca} + e^{-} + \bar{\nu}_e. \tag{13.5} $$

Czas połowicznego zaniku ${}^{40}_{19}\mathrm{K}$ jest tylko czterokrotnie mniejszy niż wiek Ziemi, stąd ${}^{40}_{19}\mathrm{K}$ 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.edu.

Promieniowanie γ

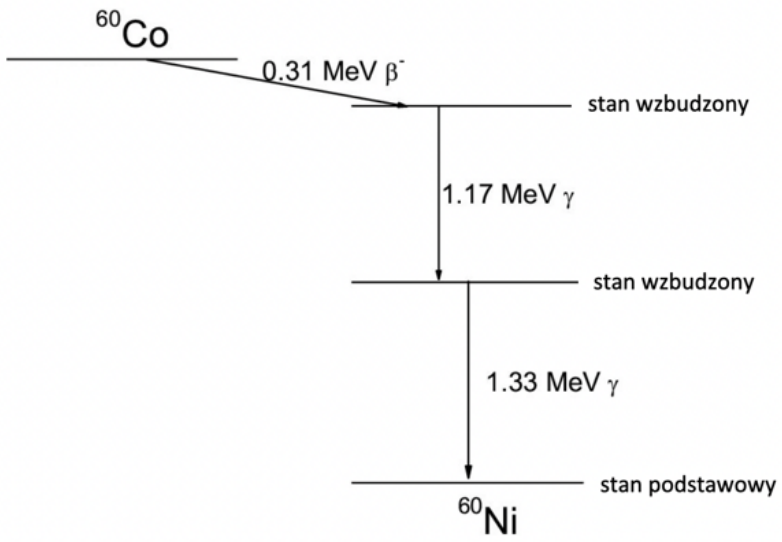
Promieniowanie γ wiąże się z przebudową struktury jądra, które zachodzi na skutek takich procesów jak wychwyt neutronów, rozszczepienie jądrowe lub fuzja jądrowa. Promieniowanie to często towarzyszy również wymienionym wcześniej rozpadom α i β. Podobnie jak w przypadku atomów, przebudowa struktury jądra 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 przeskoku elektronów między orbitami w atomie - emitowane lub absorbowane promieniowanie γ ma energię rzędu mega-elektronowoltów. Przykładem przemiany jądrowej, której towarzyszy produkcja promieni γ jest rozpad izotopu ${}^{60}\mathrm{Co}$, który przebiega dwustopniowo:

$$ {}^{60}_{27}\mathrm{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\mathrm{Ni}^{*} + e^{-} + \bar{\nu}_e + \gamma, \tag{13.6} $$

$$ {}^{60}_{28}\mathrm{Ni}^{*} \rightarrow {}^{60}_{28}\mathrm{Ni} + \gamma. \tag{13.7} $$

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 ${}^{60}_{28}\mathrm{Ni}$, 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



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

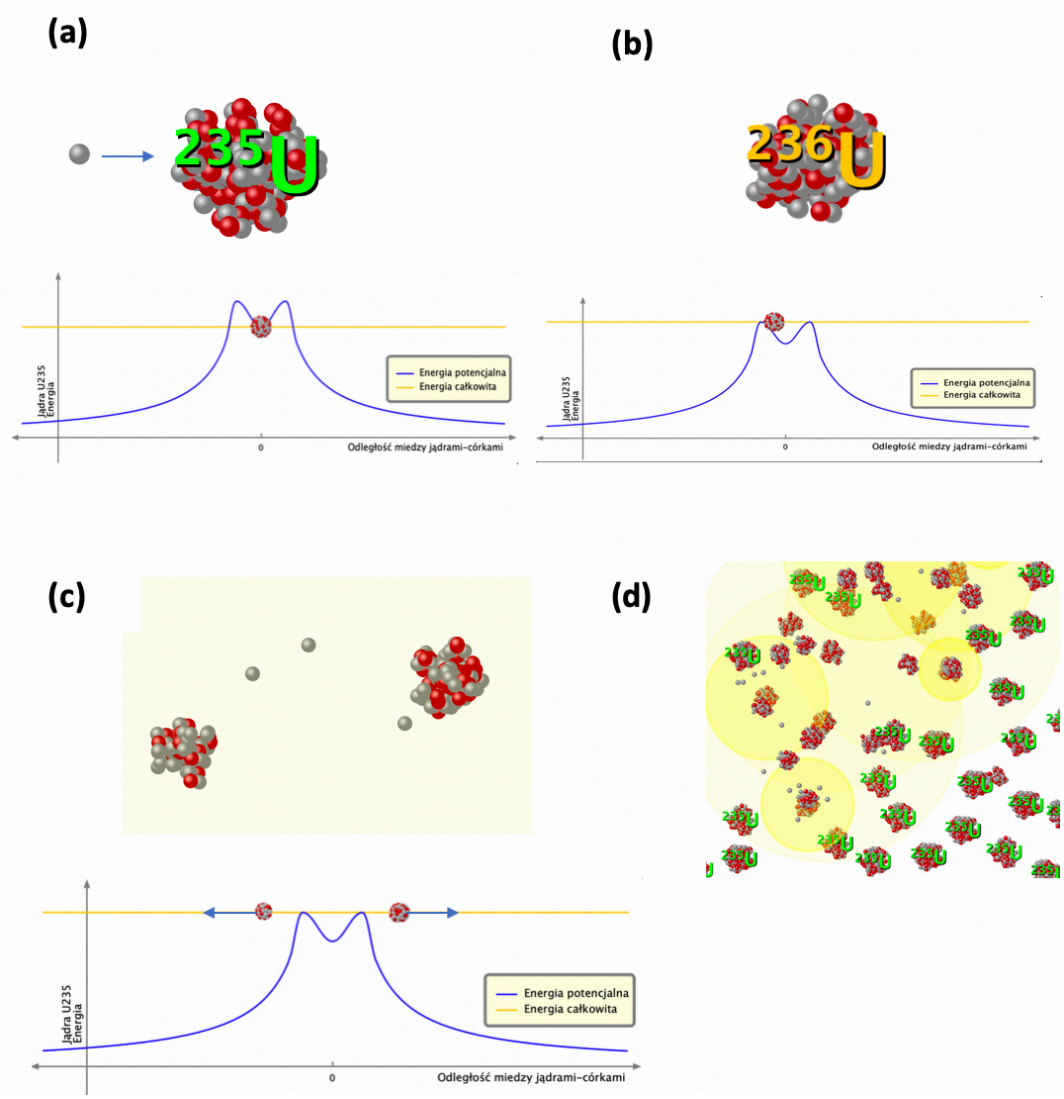
wymaga ołowianej cegły o grubości 5 cm! Promieniowanie γ jest jednocześnie bardzo energetyczne – to ono czyni główne spustoszenie w organizmie człowieka, powodując wiele przypadków nowotworów.

13.4 Rozszczepienie jądra atomowego

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

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 wyzwalana 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.edu. 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.



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 wyzwalana 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.

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 przewidzenia. 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 re-cyklingu produktów rozszczepienia uranu i in-

nych 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 3.2×10^{-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.

14

ROZDZIAŁ

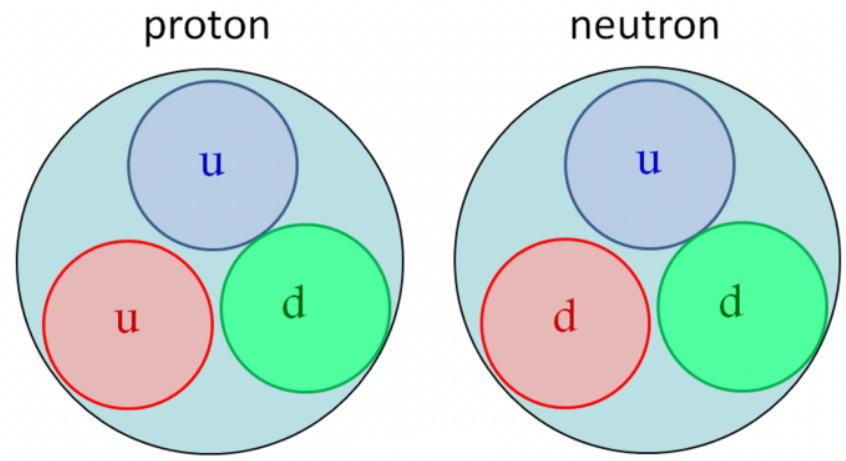
Kwarki i skwarki

14.1 Kwarki

Rozpad β^- opisany w rozdziale 13.3 polega na przeistoczeniu się neutronu w proton, któremu towarzyszy emisja elektronu oraz "egzotycznego" antyneutrina 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 neutrina elektronowego. Co wydaje się dziwne, masa protonu jest troszeczkę mniejsza niż masa neutronu, chociaż sumaryczna masa elektronu i antyneutrina jest taka sama jak suma mas pozytonu i neutrina. 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 począwszy od lat 40-tych XX wieku. Postępy w badaniu promieniowania 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"[114]. W sumie odkryto sześć kwarków pogrupowanych w trzy rodziny o rosnących masach: *up* - *down*, *strange* - *charm* oraz *top-bottom*. Tylko dwa najlżejsze z nich, kwark *up* i kwark *down*, wchodzą w skład protonów i neutronów. Proton złożony jest z dwóch kwarków *up* i jednego *down*, natomiast neutron składa się z jednego kwarku *up* i dwóch *down*. Ponieważ mamy po trzy kwarki w protonie i neutronie, więc ich ładunki elektryczne są ułamkowe. Kwark

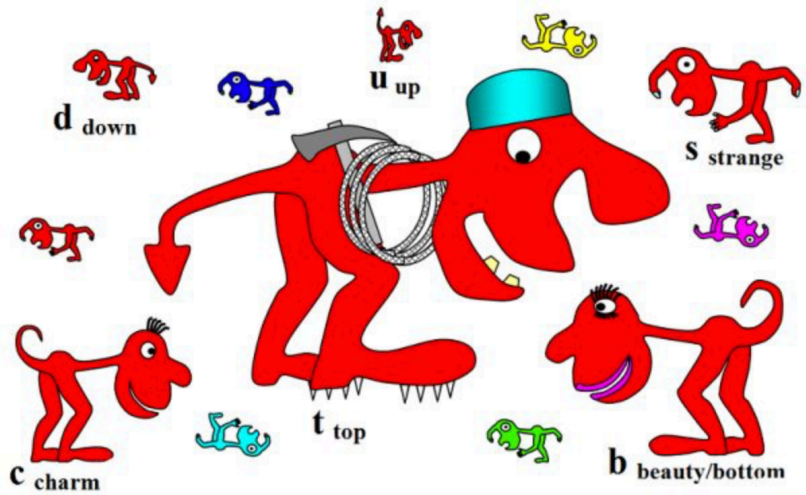
[114] Zob. też: dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/kwarki_w_protonie



Rysunek 14.1: Proton i neutron zbudowane są z kwarków z rodziny *up* - *down*.

up charakteryzuje się ładunkiem $+2/3e$ a kwark *down* $-1/3e$, gdzie e oznacza ładunek elektronu.

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 $1.5-5$ MeV/c^2 a kwarku *down* w przedziale $5-9$ MeV/c^2. Dla porównania masa elektronu to 0.511 MeV/c^2 a protonu 938 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 ob-



Rysunek 14.2: Kwarkowe „zoo", według dr T. Wróblewskiego (Akademia Pomorska w Słupsku); rozmiary kwarków są tak dobrane, że czwarta potęga ich rozmiarów liniowych jest proporcjonalne do ich masy; „morda" kwarka – prawo, lewo wskazuje na znak ładunku, kwarki występują w trzech kolorach. Za stroną: dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/21.

serwowana jest jako wzrost masy.

14.2 Cząstki niepodzielne

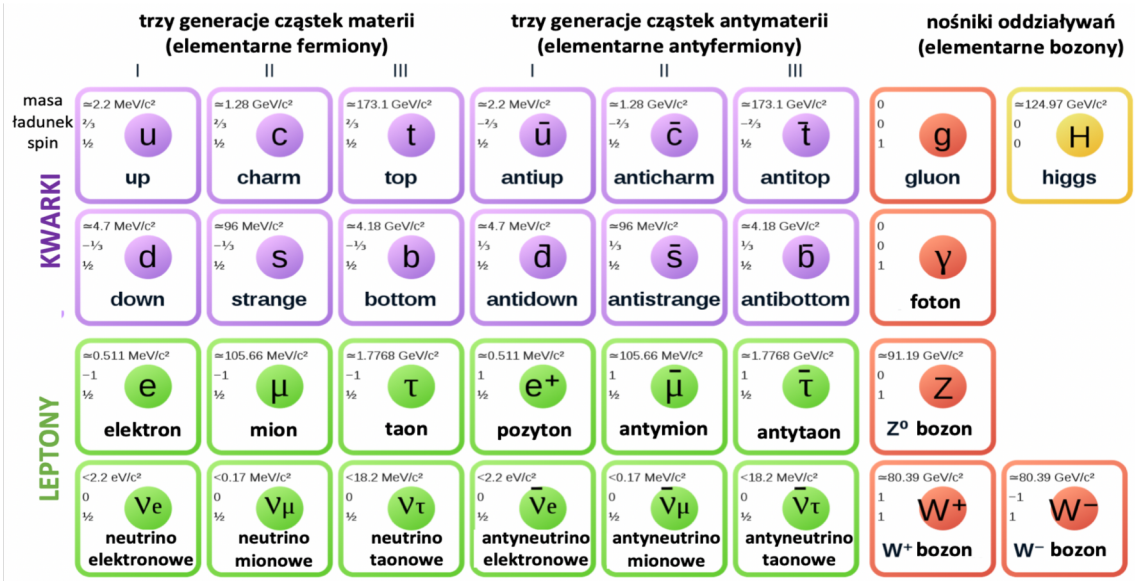
Z cząstek elementarnych zbudowane są wszystkie inne cząstki. Na przykład atomy zbudowane są z mniejszych cząstek takich jak elektrony, protony i neutrony. Protony i neutrony są również cząstkami złożonymi z innych, bardziej podstawowych cząstek – kwarków. Najważniejszym problemem w fizyce cząstek jest 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 standardowego, 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, taon, neutrina elektronowe, mionowe i taonowe. Z kolei antyfermiony to 6 antykwarków i 6 antyleptonów. Pojedyncza cząstka materii różni się od swojej antycząstki jedynie znakiem ładunku elektrycznego. 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 CERN. Dzięki oddziaływaniu z tym bozonem kwarki i leptony posiadają masę. Wiecej na temat tej fascynującej cząstki można poczytać w artykule prof. Grzegorza Karwasza *(Niezbyt krótka) historia o cząstkach elementarnych* [115].

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 kilkaset znanych cząstek materii (lub antymaterii), które zostały odkryte na przestrzeni ostatnich 80 lat, stanowią na ogół kombinację dwóch lub trzech kwarków. Istnieją również cząstki hybrydowe złożone jednocześnie z kwarków i antykwarków. Zestawy "kwark + antykwark" nazywamy mezonami, które są cząstkami o masie pośredniej między elektronem (0.511 MeV/c^2) a protonem (938 MeV/c^2). W szczególności mezony π pełnią istotną rolę, ponieważ od-

[115] G. P. Karwasz, *(Niezbyt krótka) historia o cząstkach elementarnych*, Fizyka w Szkole z Astronomią 5 (2015)



Rysunek 14.3: Cząstki niepodzielne według modelu standardowego.

powiedzialne są za oddziaływanie silne pomiędzy nukleonami w jądrze - wymiana mezonu π między protonem i neutronem utrzymuje jądro w całości.

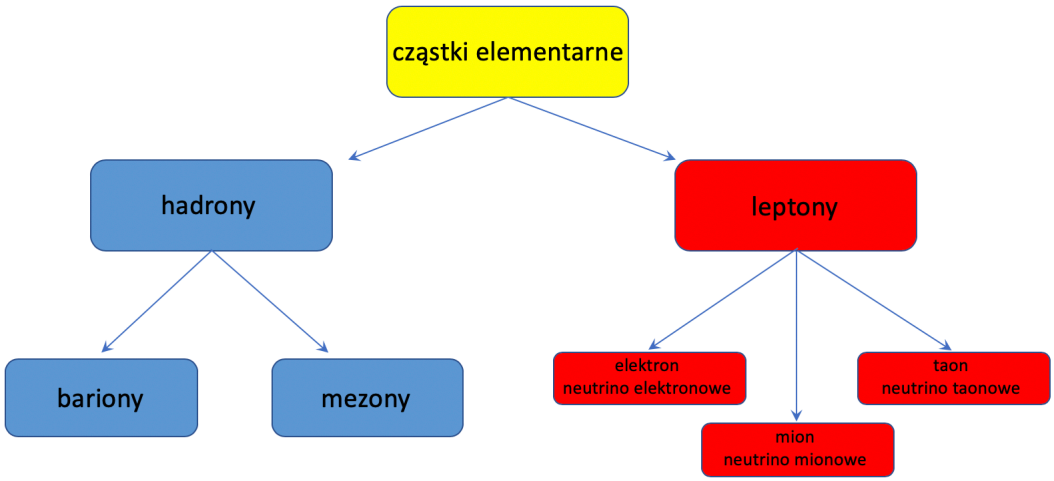
14.3 Klasyfikacja cząstek elementarnych

A) Leptony

Leptony to "niepodzielne" fermiony (cząstki o spinie połówkowym). Istnieją trzy dobrze zdefiniowane pary leptonów: elektron (e^-) i neutrino elektronowe (ν_e), mion (μ^-) i neutrino mionowe (ν_μ) oraz (znacznie cięższy) lepton taon (τ^-) i jego neutrino taonowe (ν_τ). Wszystkie te cząstki mają antycząstki (czyli antyleptony), zgodnie z przewidywaniami relatywistycznej mechaniki kwantowej. Leptony mogą być naładowane lub neutralne elektrycznie. Naładowane leptony (e^-, μ^-, τ^-) oddziałują elektromagnetyczne i słabo, z kolei neutralne (ν_e, ν_μ, ν_τ) tylko słabo.

B) Hadrony

Hadrony to cząstki złożone z kwarków. Cząstki te mają zarówno spiny połówkowe jak i całkowite, a ich masy mieszczą się w bardzo szerokim zakresie od 135 MeV/c^2 dla neutralnego pionu π^0 do 11 020 MeV/c^2 dla jednego ze stanów bottomonium. Istnieją setki różnych hadronów, niektóre prawie stabilne, a niektóre (znane jako *rezonanse*) niezwykle krótkotrwałe. Hadrony mogą oddziaływać silnie, słabo i elektromagnetycznie. Hadrony ze spinem połówkowym (czyli fermiony) nazywane są **barionami** i generalnie są bardzo stabilne. Bariony zbudowane są z trzech kwarków. Do barionów należy neutron i proton (czas połowicznego rozpadu protonu jest rzędu 10^{33} lat, czyli przekracza o wiele rzędów wielkości wiek Wszechświata - proton jest stabilny!). Z kolei hadrony o spinie całkowitym (czyli bozony) nazywane są **mezonami**, które złożone są na ogół z jednego kwarku i jednego antykwarku. Wszystkie mezony są niestabilne, a ich czasy życia są rzędu setnych części mikrosekundy.



Rysunek 14.4: Ogólna klasyfikacja cząstek elementarnych. Identyczna klasyfikację można zdefiniować dla cząstek antymaterii. Istnieją bardziej szczegółowe grupy wyodrębnione w ramach barionów i mezonów.



UNIWERSYTET MIKOŁAJA KOPERNIKA W TORUNIU

Fundusze Europejskie Wiedza Edukacja Rozwój

Rzeczpospolita Polska

Unia Europejska Europejski Fundusz Społeczny