

Toruński po-ręcznik do fizyki

Grzegorz Karwasz

Toruński po-ręcznik do fizyki

IV. Fizyka współczesna i astrofizyka

WYDAWNICTWO NAUKOWE
UNIwersytetu
MIKOŁAJA KOPERNIKA

Toruń 2020

Recenzent

????????????

Opracowanie redakcyjne

Magdalena Prokopowicz

Korekta

Projekt okładki

????????

Skład

Dariusz Żulewski

ISBN 978-83-???????

© Copyright by Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Toruń 2020

WYDAWNICTWO NAUKOWE UNIWERSYTETU MIKOŁAJA KOPERNIKA

Redakcja: ul. Gagarina 5, 87-100 Toruń

tel. 56 611 42 95, fax 56 611 47 05

e-mail: wydawnictwo@umk.pl

www.wydawnictwo.umk.pl

Dystrybucja: ul. Mickiewicza 2/4, 87-100 Toruń

tel./fax: 56 611 42 38

e-mail: books@umk.pl

Druk i oprawa: Drukarnia Wydawnictwa Naukowego UMK

Spis treści

Uwagi metodyczne	7
Rozdział 1. Ruch po okręgu i grawitacja	9
1.1. Od Mikołaja Kopernika	9
1.2. Siła grawitacji	11
1.3. Ruch po okręgu – przyspieszenie dośrodkowe	14
1.4. Ruch po okręgu – siła dośrodkowa	21
1.5. Ruch po okręgu – siła odśrodkowa	27
1.6. Ruch po okręgu – siły bezwładności	29
1.7. Ruch po okręgu i grawitacja	31
1.8. Grawitacja – loty kosmiczne	35
1.9. Energia w polu grawitacyjnym	37
Rozdział 2. Fizyka atomowa i cząsteczkowa	43
2.1. Dwie rewolucje: maszyny cieplne i elektryczność	43
2.2. Narodziny fizyki współczesnej	49
2.3. Efekt fotoelektryczny i dwoista natura światła	55
2.4. Spektroskopia, czyli nauka o duchach	62
2.5. Model Bohra struktury atomu	68
2.6. Wielkości atomowe	77
2.7. Dualizm falowo-korpuskularny	79
2.8. Równanie Schrödingera i zasada Heisenberga	87
2.9. Zakaz Pauliego i układ okresowy pierwiastków	92
2.10. Od orbitali atomowych do biochemii kwantowej	96
Rozdział 3. Fizyka jądrowa i cząstki elementarne	101
3.1. W poszukiwaniu elementarnego składnika	101
3.2. Pracowita doktorantka	102

3.3. Einstein i równoważność energii i masy.	105
3.4. Rozpady promieniotwórcze.	108
3.5. Protony i neutrony.	109
3.6. Rozpady beta i alfa.	113
3.7. Energia i czas rozpadu; neutrino.	118
3.8. Reakcje jądrowe.	124
3.9. Proton i neutron: kwarki.	130
3.10. Cząstki elementarne.	133
Rozdział 4. Budowa i powstanie Układu Słonecznego.	137
4.1. Mieszkając na wirującej planecie.	137
4.2. Niebieski zwierzyniec.	141
4.3. Nierozłączna para: Ziemia – Księżyc.	143
4.4. Zaćmiewania i tranzyty.	146
4.5. Cztery pory roku.	149
4.6. Błądzące gwiazdy.	151
4.7. Nasze najbliższe kosmiczne sąsiedztwo – Układ Słoneczny. ...	153
4.8. Budowa i powstanie Układu Słonecznego.	156
Rozdział 5. Budowa i powstanie Wszechświata.	163
5.1. Gwiazdne odległości.	163
5.2. Narodziny i śmierć gwiazdy.	165
5.3. Mieszkańcy Drogi Mlecznej.	169
5.4. „Na początku...”	171
5.5. Czy już wszystko wiemy?	177
Rozdział 6. Zastosowania fizyki.	183
6.1. Czy grozi nam efekt cieplarniany?	183
6.2. Problemy energetyki jądrowej.	187
6.3. Fizyka w medycynie.	190
6.4. Fizyka w naukach o Ziemi.	196
6.5. Polacy w fizyce współczesnej.	203
Podsumowanie.	213
Źródła ilustracji.	217

Uwagi metodyczne

Oddajemy w Państwa ręce IV tom „Toruńskiego po-ręcznika do fizyki”.

Trzy pierwsze tomy dotyczą fizyki „klasycznej”: mechaniki, elektromagnetyzmu, termodynamiki. Ten tom jest poświęcony fizyce współczesnej – wiedzy, która pozostaje nadal w ciągłym rozwoju.

Nauczyciel z trudem nadąza za pojawiającymi się informacjami – choćby przy okazji przyznawania Nagród Nobla – w zakresie cząstek elementarnych, nowych materiałów czy odkryć w kosmologii. Nie jest łatwo z poszczególnych elementów odtworzyć spójny obraz fizyki współczesnej, tym bardziej że uczniowie (i ludzie dorośli) są codziennie „bombardowani” wiadomościami o zmianach klimatycznych, energii jądrowej, wielkich akceleratorach itd.

Dorosły obywatel ma dużą szansę spotkać się z medyczną tomografią komputerową i na pewno usłyszy w telewizji o wszechświatach równoległych czy innych tego rodzaju dziennikarskich pomysłach. Część z nich – przez najbliższe 50 lat – może okazać się rzeczywistością. Stąd otwarty, narracyjny styl opowieści, z wieloma odwołaniami do historii, innych nauk humanistycznych i przyrodniczych. Koncepcję dydaktyczną, według której zbudowany jest po-ręcznik, nazywamy konstruktywizmem.

Nasz po-ręcznik zawiera sporo informacji wykraczających poza programy szkolne. Nie jest to więc *podręcznik* dla ucznia, a raczej poradnik metodyczny dla nauczyciela. Ale nie zawiera on porad w rodzaju „warto byłoby nauczać o cząstkach elementarnych”, ale dostarcza „gotowych” informacji o ich własnościach i miejscu w strukturze materii.

Jednocześnie jest to zapewne pierwszy na polskim rynku podręcznik pełnej ery internetowej, z licznymi odnośnikami do witryn. Wiadomości w encyklopediach internetowych są powszechnie dostępne i w większości przypadków redagowane z zachowaniem najwyższych rygorów poprawności naukowej. Z drugiej strony uczeń napotka nieprzebraną ilość tych informacji, trudną do uporządkowania. Z tego powodu wybrano z ogromnych zasobów książkowych, uniwersyteckich i internetowych te wiadomości, które pozwolą uczniowi zainteresowanemu na skonstruowanie własnej ścieżki wiedzy i poglądu na świat. „Minimum programowe” zawarłem natomiast na ostatniej stronie.

Sukces pierwszego tomu „Poręcznika”, udokumentowany badaniami dydaktycznymi (a dokładniej niespodziewanie wysokim *wyrównaniem szans edukacyjnych*), był decydującym argumentem przemawiającym za kontynuowaniem zaczętej serii. Podobnie jak inne tomy, „Toruński poręcznik do fizyki”, tym razem współczesnej, jest materiałem dla ucznia, nauczyciela i ambitnego studenta.

Autor

Toruń, 20.02.2020 r.

Ruch po okręgu i grawitacja

1.1. Od Mikołaja Kopernika

Dzieło Mikołaja Kopernika „O ruchach ciał niebieskich”¹ rozpoczyna się od rozważań pozornie nie na temat – o kształcie Ziemi. O tym, że Ziemia jest kulą, wiadomo było od czasów starożytnych. Erastotenes w I w. p.n.e. zmierzył nawet jej promień z zadziwiającą dokładnością. Kopernik postawił jednak trudne pytanie: jak to się dzieje, że woda z kuli ziemskiej nie spływa? W odpowiedzi sam stwierdził, że woda wypełnia zagłębienia terenu.

Ocean [...], który oblewa ląd stały, wlewa się tu i ówdzie w jego głąb w postaci mórz i wypełnia jego bardziej zapadłe wgłębienia. Wypadało tedy, aby mniej było wód niż lądu, by woda nie pochłonęła całej ziemi, skoro oba te elementy na skutek swej *ciężkości* dążą do tego samego środka, lecz żeby pewne części lądu pozostały na wierzchu dla utrzymania bytu istot lądowych, a także liczne tu i ówdzie rozciągające się wyspy. Bo i sam kontynent wszystkich ziem czymże jest innym, jeśli nie wyspą, większą tylko od innych?

¹ Wydrukowane dzieło Mikołaja Kopernika nosi tytuł „De revolutionibus orbium coelestium”, co tłumaczymy jako „O obrotach sfer niebieskich”. Nie jest jednak wykluczone, że mogło mieć ono pierwotnie inny tytuł. Praca jego ucznia Jana Retyka, zapowiadająca dzieło Kopernika, ma tytuł „De revelationibus ... moto”, czyli o rewelacjach ruchu ciał niebieskich. Z pewnością wydawca opatrzył dzieło Kopernika nieuzgodnioną z nim przedmową, pomniejszającą znaczenie rewolucji kopernikańskiej.

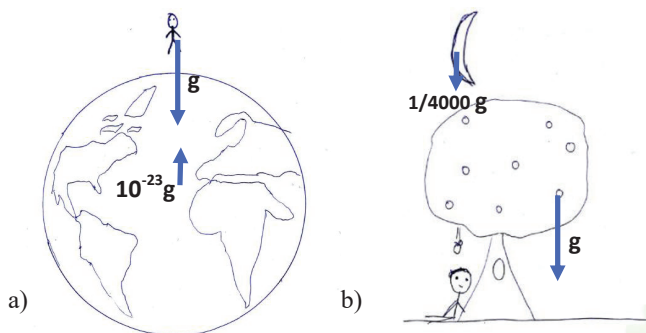
Kopernik wyraźnie mówi o *ciężkości* ciał. Dziś wiemy, że nie tylko woda ciąży w kierunku środka Ziemi, ale że wszystkie ciała posiadające *masę* przyciągają się siłami grawitacji. Oddziaływanie to ma zgodnie z III prawem Newtona charakter wzajemny: z taką samą siłą Ziemia przyciąga Kubę, jak Kuba Ziemię. Gdy Kuba podskoczy nad ziemię, to Kuba spada na kulę ziemską, ale i Ziemia przyspiesza w kierunku Kuby. Przyspieszenie, z jakim spada Kuba, jest jednak znacznie większe niż przyspieszenie Ziemi w kierunku Kuby.

Decyduje o tym II prawo Newtona – przyspieszenie ciała jest wprost proporcjonalne do działającej siły, a odwrotnie do jego masy

$$a = F/m,$$

gdzie a jest przyspieszeniem ciała, m jego masą, a F działającą siłą.

Siła grawitacji jest taka sama dla dwóch ciał, ale masa Ziemi jest znacznie, znacznie większa niż Kuby. Masa Ziemi wynosi $59 \cdot 10^{23}$ kg. Jeżeli masa Kuby wynosi 59 kg, to przyspieszenie kuli ziemskiej w kierunku Kuby jest 10^{-23} razy mniejsze niż Kuby w kierunku Ziemi. Z jakim przyspieszeniem spada Kuba, policzymy w następnym paragrafie.



Ryc. 1.1. a) Kuba (59 kg) podskoczył nad Ziemię i spada na nią. Kuba spada na Ziemię z przyspieszeniem, które oznaczamy jako g ; kula ziemska przyspiesza w kierunku Kuby z przyspieszeniem $10^{-23} g$. **b)** Anegdota mówi, że Newton zrozumiał prawo grawitacji, gdy zauważył, że jabłko spada na ziemię tak samo, jak Księżyc dookoła Ziemi (ustawicznie) zakrzywia tor swojego ruchu w kierunku Ziemi. Rysunek: Kuba Garbacz, lat 10, za zezwoleniem

1.2. Siła grawitacji

Wzór na siłę wzajemnego przyciągania grawitacyjnego między dwoma ciałami o określonych masach podał Izaak Newton dopiero prawie 200 lat po Koperniku. Wzór ten jest jednym z najprostszych w fizyce i stanowi niejako pierwowzorem dwóch innych oddziaływań – elektrycznego i magnetycznego. Siła oddziaływania grawitacyjnego jest tym większa, im większa jest masa oddziałujących ciał, a maleje z *kwadratem* ich wzajemnej odległości. Opisujemy to wzorem:

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (1.1)$$

gdzie F jest siłą wzajemnego przyciągania ciał o masach M i m , a r jest ich wzajemną odległością.

Stała G nazywana jest stałą grawitacji i ma podstawowe znaczenie dla budowy naszego Wszechświata. To ona decyduje o szybkości obrotów planet dookoła Słońca, gwiazd dookoła środka Galaktyki, a także o rozmiarach całego Wszechświata. Jeżeli siłę wyrazimy w *niutonach* (N), a odległość w metrach, to wartość tej stałej wynosi $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Formalnie wzór (1.1) dotyczy mas, które przybliżamy jako masy punktowe. Jest to bez wątpienia zrozumiałe np. dla Ziemi i Słońca: odległość Ziemi od Słońca (ok. 150 mln km) jest znacznie większa niż promień słonecznej kuli (0,7 mln km). Ale w przypadku Kuby i Ziemi?

Już Newton pokazał, że kula oddziałuje grawitacyjnie tak, jakby cała masa była skupiona w jej geometrycznym środku. Pisał o tym, trochę intuicyjnie, nawet Kopernik: „Ziemia krąży dookoła środka Słońca albo punktu, który w pobliżu tego środka się znajduje”.

Znając masę Ziemi i jej promień (6370 km), możemy obliczyć, jaka siła grawitacji działa na Kubę stojącego na powierzchni Ziemi. Przyjmujemy $M = 59 \cdot 10^{23} \text{ kg}$ i $m = 59 \text{ kg}$.

$$F = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 59 \cdot 10^{23} \cdot 59 / (6370 \cdot 1000)^2 = 583 \text{ N}$$

Obliczmy ze wzoru (1.1) przyspieszenie g , jakie działa na Kube lub jakiegokolwiek inne ciało spadające na Ziemię w pobliżu jej powierzchni. Przypominamy, że przyspieszenie jest wprost proporcjonalne do siły, a odwrotnie proporcjonalne do masy ciała

$$g = F / m = G \frac{M}{r^2} \quad (1.2)$$

Podstawiając wartości liczbowe, otrzymujemy:

$$F = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 59 \cdot 10^{23} / (6370 \cdot 1000)^2 = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Jest to dobrze znana wartość przyspieszenia w spadku swobodnym. Dzięki teorii grawitacji Newtona potrafimy tę wielkość nie tylko zmierzyć, ale i wyliczyć².

Przyspieszenie g , z jakim spadają ciała na dowolnej planecie, nie zależy od masy tych ciał, ale jedynie od masy planety i jej promienia.

$$g = G \frac{M}{r^2}$$

 (1.3)

Sprawdzili to astronauta Apollo 15, spuszczając na Księżycu młotek i piórko: spadły razem (na Księżycu nie ma oporów powietrza), ale z przyspieszeniem mniejszym niż na Ziemi³.

Przykład 1.1

Oblicz przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni Marsa, przyjmując promień tej planety jako 3400 km i jej masę jako $6,42 \cdot 10^{23}$ kg.

Rozwiązanie

Korzystamy z równania (1.2). Podstawiając wartości liczbowe, otrzymujemy:

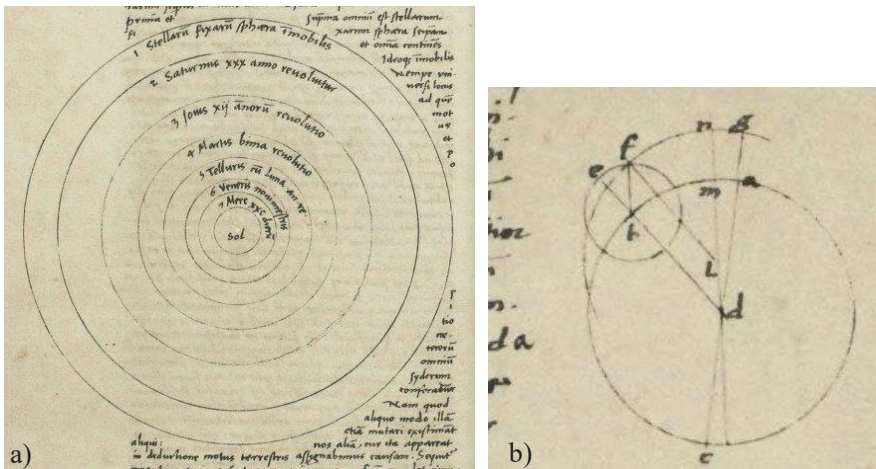
² A tak właściwie to pomiar przyspieszenia grawitacyjnego jest sposobem na wyznaczenie masy Ziemi.

³ Film z Księżyca pokazany jest m.in. na stronie: <https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=KDp1tiUsZw8>

$$F = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6,42 \cdot 10^{23} / (3400 \cdot 1000)^2 = 3,69 \text{ m/s}^2$$

Ciała na Marsie „ważą” mniej niż połowę swego ciężaru na Ziemi.

Prawo grawitacji wyjaśnia nie tylko spadanie jabłka na Ziemię, ale przede wszystkim ruch planet dookoła Słońca, Księżyca i sztucznych satelitów dookoła Ziemi itd. Już Kopernik wiedział (za starożytnymi uczonymi), że planety okrążają Słońce w różnym czasie: im bliżej Słońca, tym szybciej. Najbliższy Słońcu Merkury obiega je w 80 dni, następna planeta – Wenus – w 9 miesięcy, Ziemia przez rok, Mars – przez 2 lata, Jowisz – przez 12 lat⁴ itd. Zależność jest tak oczywista, że nie może być przypadkowa. Aby za Newtonem wyjaśnić relacje opisane przez Kopernika, musimy najpierw zrozumieć prawa ruchu po okręgu.



Ryc. 1.2. a) Rysunek z 18. strony rękopisu dzieła Kopernika; genialny uczony zaraz na wstępie, przed zagłębieniem się w szczegóły, wyjaśnia istotę swojego odkrycia: planety krążą dookoła Słońca i im ich orbity są bliższe Słońcu, tym okres obiegu jest krótszy; **b)** kolejny rysunek z rękopisu Kopernika; do orbit kolistych Kopernik dodał *epicykle*, tak jakby wiedział, że orbity nie są dokładnie koliste.

⁴ Dzisiejsze pomiary czasu obiegu planet dookoła Słońca nieco się różnią od tych podanych przez Kopernika. Powróćmy do tego zagadnienia w rozdziale IV.

Pytania kontrolne:

1. Oblicz przyspieszenie „księżycowe”, tj. przyspieszenie, z jakim spadają ciała na powierzchni Księżyca. Przyjmij masę Księżyca $M = 0,73 \cdot 10^{23}$ kg i jego promień $r = 1736$ km. Wynik podaj z dokładnością do trzech cyfr znaczących. Ile razy to przyspieszenie jest mniejsze od przyspieszenia ziemskiego ($g = 9,81$ m/s²)? Obejrzyj skoki astronautów na Księżycu (film NASA) na stronie: https://www.youtube.com/watch?v=Zl_VdN6rfrQ
2. Horoskopy powołują się na konfiguracje planet w momencie urodzenia się. Oblicz, z jaką siłą grawitacji działa na dziecko (o masie $m = 3,5$ kg) Saturn o masie $M = 57 \cdot 10^{25}$ kg i odległy od Ziemi w chwili narodzenia dziecka o 1,5 mld km, a z jaką lekarka o masie 57 kg, odległa od dziecka o 1,5 m.

1.3. Ruch po okręgu – przyspieszenie dośrodkowe

Znamy dwa szczególne, modelowe przypadki ruchu – ruch jednostajny, jak na przykład toczącej się po poziomym stole kulki, i ruch jednostajnie przyspieszony, na przykład kulki staczającej się po równi pochyłej. Jeszcze innym, specjalnym rodzajem ruchu jest kamień kręcący się na sznurku ze stałą prędkością.

Atrybutem ruchu jednostajnego *prostoliniowego* jest stałość prędkości. Wiemy, że prędkość oprócz wartości ma określony kierunek. W ruchu jednostajnym prostoliniowym i wartość, i *kierunek* wektora prędkości pozostają stałe. W ruchu przyspieszonym prędkość się zmienia. Zmiany prędkości w czasie nazywamy przyspieszeniem.

Przykład 1.2

Pociąg podmiejski rusza ze stacji i w ciągu 100 sekund osiąga prędkość 10 m/s (czyli 36 km/h). Jakie jest (średnie) przyspieszenie pociągu w ciągu tych 100 sekund?

Rozwiązanie

Zgodnie z definicją przyspieszenie a jest równe ilorazowi zmiany prędkości Δv do przedziału czasu Δt , w jakim ta zmiana nastąpiła.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1.4)$$

Podstawiając wartości liczbowe, uzyskujemy:

$$a = \frac{100 \text{ m/s}}{10 \text{ s}} = 10 \text{ m/s}^2$$

Średnie przyspieszenie pociągu, czyli zmiana jego prędkości odniesiona do jednej sekundy, wynosi 10 m/s w ciągu sekundy, w skrócie $a = 10 \text{ (m/s)/s}$.

Obydwa wyżej wspomniane przykłady dotyczą ruchu *prostoliniowego*. Jeżeli ruch nie jest prostoliniowy, to sprawy się nieco komplikują. Wynika to z faktu, że prędkość (i przyspieszenie) są **wektorami**, czyli w ich opisie musimy uwzględnić również *kierunek*. I tak w ruchu jednostajnym *prostoliniowym* nie tylko *wartość* prędkości jest stała, ale i jej *kierunek*. W ruchu jednostajnie *przyspieszonym* prostoliniowym nie tylko *wartość* przyspieszenia jest stała, ale i *kierunek* tego przyspieszenia. Ruch po okręgu jest inny.

Szczególnym przypadkiem ruchu po okręgu jest taki ruch, w którym *wartość* prędkości pozostaje stała. Przykładem takiego ruchu jest karuzela; również w ruchu Ziemi dookoła Słońca wartość prędkości pozostaje prawie stała⁵.



Ryc. 1.3. Kręcąca się karuzela lub skrzydła wiatraka przetwarzającego energię kinetyczną wiatru na energię elektryczną są dobrymi przykładami ruchu obrotowego ze stałą prędkością. Fot. M. Karwasz

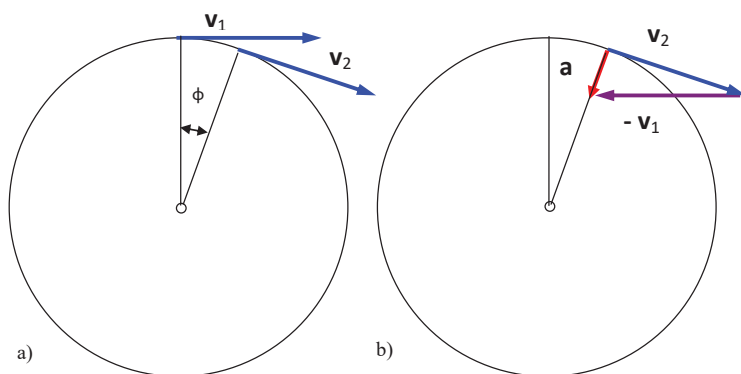
⁵ Ruch Marsa dookoła Słońca nie jest już tak dobrym przykładem ruchu jednostajnego po okręgu jak ruch Ziemi.

Stała wartość prędkości nie oznacza jednak, że w ruchu po okręgu nie występuje przyspieszenie. Aby się o tym przekonać, musimy odwołać się do dokładniejszej definicji przyspieszenia niż w równaniu (1.4). Definicja ta musi uwzględniać fakt, że prędkość jest wektorem. Formalnie dokładną definicję przyspieszenia możemy zapisać jako:

$$\mathbf{a} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1.5)$$

W powyższym równaniu pogrubiona czcionka liter $\mathbf{v}$ i $\mathbf{a}$ oznacza, że te dwie wielkości są wektorami (czas t – nie jest wektorem).

Formalny zapis jak w równaniu (1.5) nie daje prostej recepty na obliczenie przyspieszenia⁶. Spróbujmy zastanowić się, ile wynosi przyspieszenie w ruchu *jednostajnym*⁷ po okręgu. Skorzystamy w tym celu z rysunku 1.4.



Ryc. 1.4. a) Aby znaleźć przyspieszenie w ruchu jednostajnym po okręgu, badamy, jak wygląda wektor prędkości $\mathbf{v}_1$ w określonej chwili i jak wygląda ten sam wektor (teraz narysowany jako $\mathbf{v}_2$) po upływie czasu Δt ; b) przyspieszenie znajdujemy z różnicy wektorów $(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1)$; w tym celu do wektora $\mathbf{v}_2$ dodajemy wektor $(-\mathbf{v}_1)$; różnica wektorów jest skierowana ku środkowi okręgu: przyspieszenie ciała poruszającego się jednostajnie po okręgu jest przyspieszeniem *dośrodkowym*.

Źródło: G.K.

⁶ Nie martw się, nawet studenci mają z tym kłopot! Różniczkowanie wektorów wymaga wzorów Poissona.

⁷ Ruch po okręgu, w którym wartość prędkości pozostaje stała, będziemy nazywać ruchem „jednostajnym po okręgu”.

Jak widać na ryc. 1.4, prędkość ciała w ruchu po okręgu jest w każdym punkcie prostopadła do promienia tego okręgu: w poszczególnych momentach czasu kierunek tej prędkości się zmienia. Jeżeli w pewnej chwili prędkość ta wynosi $\mathbf{v}_1$, to po czasie Δt prędkość będzie miała kierunek wektora $\mathbf{v}_2$. Przyrost prędkości $\Delta \mathbf{v}$ jest równy $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_2 + (-\mathbf{v}_1)$. Wektor $\Delta \mathbf{v}$ jest skierowany do *środk*a okręgu, zob. ryc. 1.4. Jeżeli obliczymy przyspieszenie $\mathbf{a}$ jako stosunek $\mathbf{a} = \Delta \mathbf{v} / \Delta t$, to jest ono również skierowane ku środkowi okręgu. Dochodzimy do bardzo ważnego wniosku.

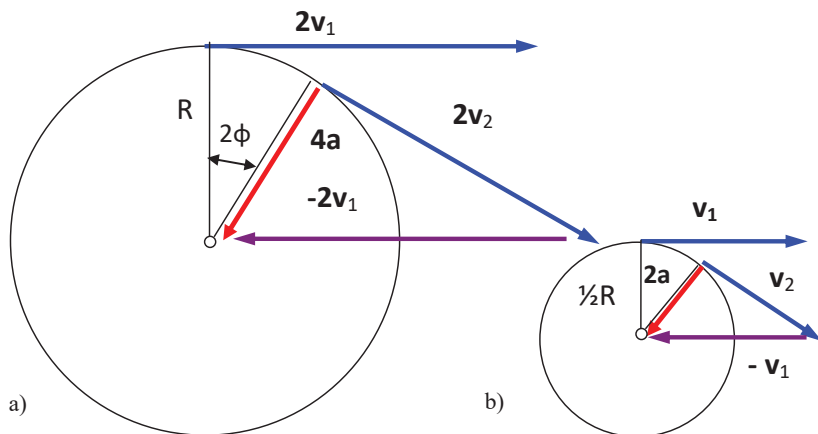
W ruchu jednostajnym po okręgu przyspieszenie ciała jest skierowane ku środkowi okręgu. Przyspieszenie to nazywamy przyspieszeniem dośrodkowym.

Od czego zależy przyspieszenie dośrodkowe? Na pewno od prędkości ruchu, ale nie tylko. Posłużymy się w tym celu kolejnym rysunkiem. Zbadamy, jak zmienia się przyspieszenie dośrodkowe, gdy zmienia się prędkość ruchu i gdy inny staje się promień okręgu, ryc. 1.5.

Podwojenie prędkości powoduje, że w tym samym czasie kąt zataczany przez będące w ruchu ciało się podwaja⁸. Jednocześnie długość wektora prędkości się podwaja. Przyspieszenie rośnie więc czterokrotnie.

Ogólnie, przyspieszenie dośrodkowe rośnie jak kwadrat prędkości. Pokonywanie zakrętów z większą prędkością, niż na to pozwalają znaki drogowe, jest zatem bardzo niebezpieczne. Przykładowo pokonanie zakrętu z prędkością 100 km/h zamiast zalecanej 70 km/h powoduje ponaddwukrotne zwiększenie przyspieszenia dośrodkowego (a przez to ryzyko „wypadnięcia” samochodu z drogi, szczególnie na mokrej szosie).

⁸ Rysunek 1.5 jest z konieczności niedokładny. Dla obliczenia przyspieszenia powinniśmy rozważać małe kąty, a kąty przedstawione na rysunku takie nie są. Siłą rzeczy boki trójkątów prędkości „się rozchodzą”.



Ryc. 1.5. Przyspieszenie dośrodkowe zależy od prędkości i promienia okręgu R ; **a)** podwojenie prędkości powoduje czterokrotny wzrost przyspieszenia – w tym samym czasie ciało zatacza dwu-krotnie większy kąt; **b)** zmniejszenie promienia okręgu do $\frac{1}{2}R$ powoduje podwojenie przyspieszenia. Rysunek ma charakter przybliżony.

Źródło: G.K.

Zmniejszenie o połowę promienia okręgu, przy tej samej wartości prędkości, powoduje podwojenie zatoczonego kąta w jednostce czasu. Przyspieszenie, zob. czerwony wektor na ryc. 1.5b, rośnie więc dwukrotnie. Im mniejszy promień okręgu, tym większe przyspieszenie dośrodkowe poruszającego się ciała. Z tego powodu kierowcy Formuły 1 „ścinają” zakręty – pokonują je nie po okręgu o wyznaczonym, małym promieniu, ale o promieniu tak dużym, jak na to pozwala szerokość toru, zob. ryc. 1.6b. Na zwykłej szosie byłoby to śmiertelnie niebezpieczne!

Bardzo ważna zależność na przyspieszenie dośrodkowe a w ruchu jednostajnym po okręgu wyraża się więc wzorem:

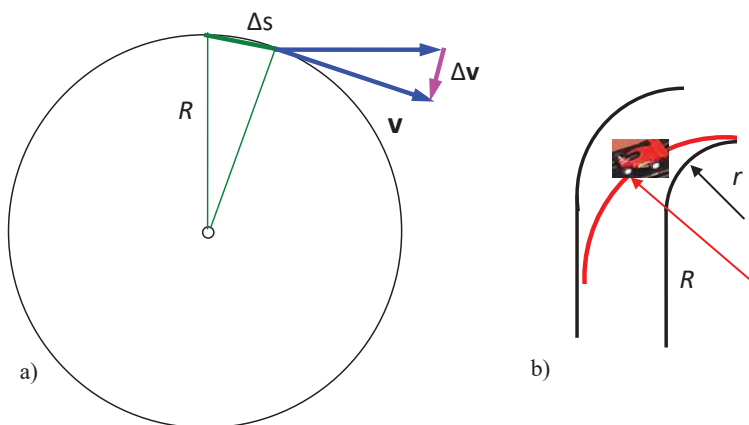
$$a = \frac{v^2}{R}, \quad (1.6)$$

gdzie v jest prędkością (liniową) ruchu po okręgu, a R promieniem okręgu.

Przyspieszenie dośrodkowe nie zależy w szczególności od masy ciała. Podobnie jak to jest ze spadkiem swobodnym i tarciem, *ryzyko* wypadnięcia z drogi samochodu osobowego i ciężarowego jest takie samo, o ile pokonują one zakręt z tą samą prędkością.

Wyprowadzenie wzoru (1.6) – fakultatywne

Dokładne wyprowadzenie wzoru (1.6) wymaga (prostych) rozważań geometrycznych i zostało przedstawione na rysunku 1.6. Droga Δs przebyta w jednostce czasu Δt wynosi $\Delta s = v\Delta t$ i jest wycinkiem okręgu. Dla małych Δt możemy ją przybliżyć za pomocą odcinka linii prostej.



Ryc. 1.6. Przyspieszenie dośrodkowe w ruchu jednostajnym po okręgu. **a)** Wyprowadzenie wzoru $a = v^2/R$: trójkąt utworzony przez dwa promienie R i odcinek drogi Δs (zielony) jest podobny do trójkąta prędkości (wektory niebieskie) – stąd $\Delta s/R = \Delta v/v$; podstawiając $\Delta s = v\Delta t$, przekształcamy $\Delta v/\Delta t = v^2/R = a$. **b)** Kierowca Formuły 1 „ścina” zakręt – w ten sposób promień R , po którym się porusza, jest większy niż promień zakrętu r i przy pokonywaniu zakrętu występuje mniejsze przyspieszenie dośrodkowe; innymi słowy, można pokonać zakręt z większą prędkością.

Źródło: G.K.

Trójkąt utworzony przez dwa promienie R i odcinek Δs (zaznaczony kolorem zielonym na ryc. 1.6a) i trójkąt utworzony przez wektory prędkości są podobne, więc stosunki długości odpowiednich boków są takie same.

Wynika stąd związek:

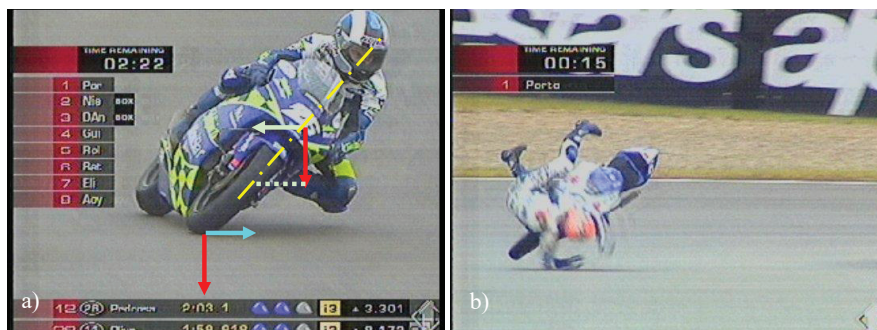
$$\frac{v\Delta t}{R} = \frac{\Delta v}{v} \quad (1.7)$$

Przekształcając ten wzór, otrzymujemy:

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{R}, \quad (1.8)$$

czyli poszukiwany wzór na przyspieszenie $a = \frac{v^2}{R}$. Nie zapisujemy w tym wzorze przyspieszenia jako wektora, mimo że nim jest, ponieważ pamiętamy, iż wektor a jest prostopadły w każdym momencie do wektora v (i do trajektorii ruchu).

Jest to niezwykle ważna właściwość ruchu jednostajnego po okręgu. Z tej prostopadłości wynika, że planety nie spadają na Słońce, a poruszają się, teoretycznie, ruchem wiecznym.



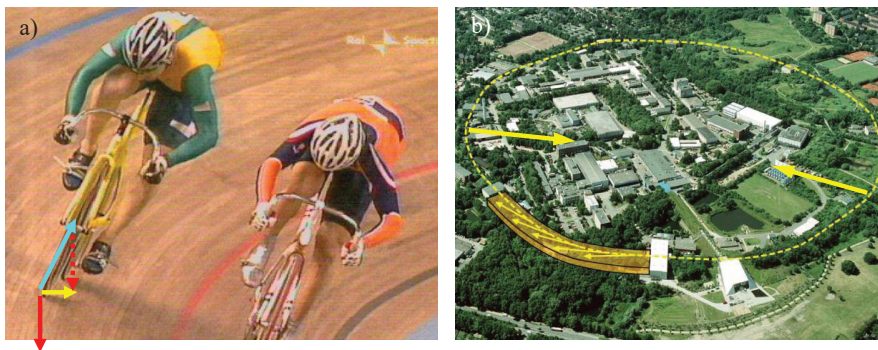
Ryc. 1.7. Pokonywanie zakrętów jest szczególnie niebezpieczne na motocyklach – duża masa kół powoduje, że efekt żyroskopowy jest duży i dla skrętu trzeba pochylić motocykl. **a)** Źródłem siły dośrodkowej jest siła tarcia szosy o oponę (strzałka niebieska), jest ona *nie większa* niż siła *nacisku* opon na szosę (a ta równa ciężarowi motocyklisty i motocykla, strzałka czerwona); na motocyklistę działa też siła odśrodkowa bezwładności (jasnozielona) – suma tych dwóch sił wyznacza kierunek pochylenia motocykla; **b)** jeśli z powodu nadmiernej szybkości siła dośrodkowa przekroczy *możliwą* największą wartość siły tarcia, motocykl (żyroskopowo) utrzymuje swój kierunek ruchu, ale dla motocyklisty skutki są bolesne!

Źródło: TV włoska, kanał „Italia 1”, 17/07/2005, rejestracja G.K.

Dlaczego? Wiemy z definicji pracy, że jest ona równa iloczynowi przesunięcia i siły, która to przesunięcie powoduje, ale tylko wzdłuż przesunięcia⁹. Jeżeli siła działa prostopadłe do przesunięcia, a tak jest w ruchu po okręgu, to siła *nie wykonuje* pracy. Siła grawitacji, pełniąca w ruchu planet rolę siły dośrodkowej, jest prostopadła do kołowej trajektorii, więc nie wykonuje pracy. Jeżeli nad planetami nie jest wykonywana praca, to z prawa zachowania energii wynika, że *energia* ruchu planet się nie zmienia. Ruch jest wieczny!

1.4. Ruch po okręgu – siła dośrodkowa

W poprzednim paragrafie pokazaliśmy, że z ruchem po okręgu wiąże się *przyspieszenie* dośrodkowe. Jeżeli takie przyspieszenie występuje, musi ono mieć swoją przyczynę, czyli *siłę*. Siłę powodującą ruch po okręgu nazywamy *siłą dośrodkową*. Co jest jej przyczyną?



Ryc. 1.8. Siła dośrodkowa jako przyczyna ruchu po okręgu. **a)** Na pochylonym torze rowerowym jest nią nie tyle siła tarcia opon o tor (jak w wyścigach motocyklowych), co siła wypadkowa (żółta), będąca sumą siły ciężkości (czerwonej) i siły reakcji toru (niebieskiej); **b)** w przyspieszaczu elektronów (tzw. synchrotronie) źródłem siły dośrodkowej zakrzywiającej tor elektronów jest odpowiednio ukształtowane pole magnetyczne; nie cały tor elektronów jest zakrzywiony – tylko tam, gdzie są magnesy.

Źródło: TV włoska RAI 1, 13/08/2005, rejestracja własna; DESY Hamburg, 2005.

⁹ Zob. G. Karwasz, M. Sadowska, K. Rochowicz, *Toruński poręcznik do fizyki. Gimnazjum klasa I*, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2010, s. 85.

Przyczyn siły dośrodkowej może być tyle, ile przyczyn sił „zwykłych”. Dla kuli na końcu sportowego „młota” jest to siła, z którą miotacz ciągnie tę kulę (ryc. 1.10a), dla planet jest to siła grawitacji ze strony Słońca, dla motocykla i samochodu na zakręcie jest to siła tarcia (ryc. 1.7a), dla roweru na pochyłonym torze jest to również składowa siły reakcji toru (ryc. 1.8a), dla cząstek elementarnych w centrum badań jądrowych CERN jest to pole magnetyczne (ryc. 1.8b), dla elektronów w atomie jest to siła elektrostatyczna (ryc. 1.10b). Ile wynosi siła dośrodkowa? Jest to bardzo proste, biorąc pod uwagę II zasadę dynamiki Newtona: siła $\mathbf{F}$ jest proporcjonalna do przyspieszenia $\mathbf{a}$ i do masy m przyspieszanego ciała

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1.9)$$

Podkreślamy, zgodnie z zapisem (1.9), że i siła, i przyspieszenie są wektorami, więc kierunek siły jest taki sam jak przyspieszenia. Siła dośrodkowa, powodująca ruch ciała po okręgu, ma kierunek taki jak przyspieszenie poruszającego się ciała, czyli do środka okręgu.

Powodem ruchu po okręgu jest występowanie siły dośrodkowej.

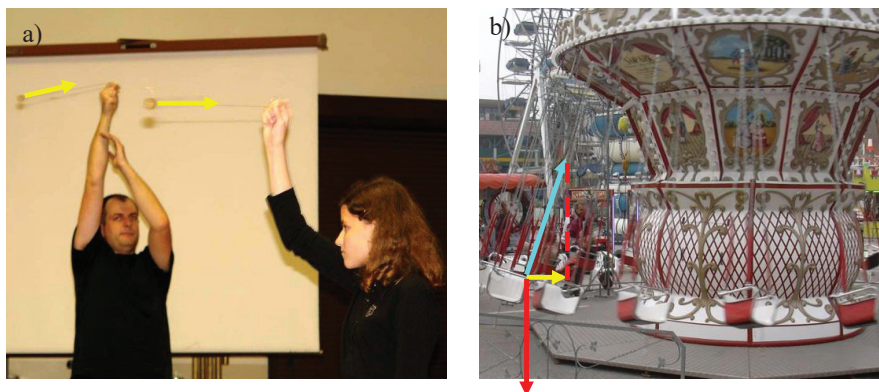
Jeżeli ruch ten jest *jednostajny*, siła dośrodkowa jest *jedyną* siłą działającą na poruszające się (po okręgu) ciało.

Biorąc pod uwagę równanie (1.6) na przyspieszenie dośrodkowe, z łańcuchem znajdujemy wyrażenie na wartość *siły* dośrodkowej:

$$\boxed{F = m \frac{v^2}{R}}, \quad (1.10)$$

Siła dośrodkowa jest proporcjonalna do masy ciała i do przyspieszenia dośrodkowego. Poprzez przyspieszenie dośrodkowe również *siła* dośrodkowa zależy od *prędkości* ciała i *promienia* okręgu.

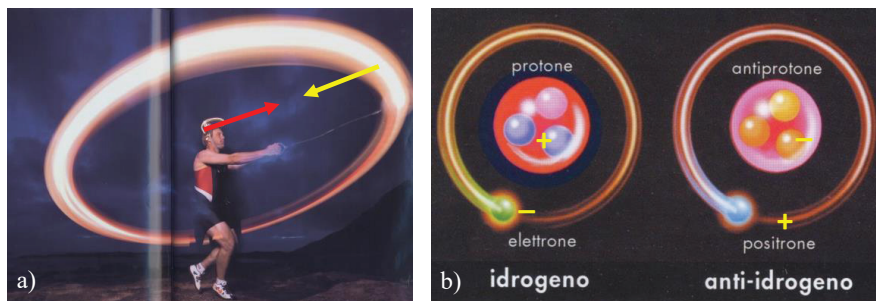
Podkreślamy, że siła dośrodkowa musi być zawsze „odpowiednia” do wymaganej trajektorii, tj. dla prędkości ruchu i promienia okręgu, zgodnie z równaniem (1.10). W odróżnieniu od *przyspieszenia* dośrodkowego, *siła* dośrodkowa *zależy* też od masy. Wyjaśnimy to dokładniej na kolejnych rysunkach.



Ryc. 1.9. a) Wartość siły dośrodkowej (żółta strzałka) zależy od przyspieszenia dośrodkowego, ale również od masy poruszającego się ciała – do kręcenia piłką tenisową nie potrzeba zawodowego atleta; **b)** dla siodełka karuzeli źródłem siły dośrodkowej (żółta strzałka) jest wypadkowa siły ciężkości (czerwona strzałka) i naciągu liny (strzałka niebieska).

Fot. Maria Karwasz.

Jak widać z porównania ryc. 1.9a i 1.10a, o ile do zakręcenia ciężką, żelazną kulą potrzebny jest zawodowy atleta, o tyle do zakręcenia piłką tenisową wystarczy uczennica gimnazjum: przy tej samej prędkości (liniowej) kuli i tym samym promieniu okręgu większej siły trzeba użyć do kręcenia większą masą. Ryc. 1.10a pokazuje jeszcze jedną zależność: miotacz działa siłą na kulę, ale i kula działa na miotacz siłą reakcji o tej samej wartości, ale przeciwnym zwrocie. Kula zatacza okręgi, ale i miotacz również – mniejsze, bo ma większą masę. W atomie wodoru środkowe jądro jest 1837 razy cięższe niż elektron, więc możemy założyć, że to elektron krąży, a jądro jest prawie nieruchome, zob. ryc. 1.10b.



Ryc. 1.10. Siła dośrodkowa jako przyczyna ruchu po okręgu. **a)** Dla miotanej kuli w rzucie „młotem” źródłem siły dośrodkowej (żółta strzałka) jest miotacz; na miotacza działa siła reakcji (czerwona) o tej samej wartości a przeciwnym zwrocie; masa miotacza jest większa niż kuli, więc jego przyspieszenie dośrodkowe jest mniejsze – miotacz zatacza mniejszy okrąg niż kula (aureola nad głową) (źródło: National Geographic¹⁰); **b)** dla (ujemnego) elektronu w atomie wodoru i (dodatniego) antyelektronu w antywodorze siłą dośrodkową jest przyciąganie elektrostatyczne od jądra: od dodatniego protonu w wodorze, a od ujemnego antyprotonu w antywodorze.

Źródło: Il Nuovo Saggiatore, 19, 3–4, 2003.

Przykład 1.3

Zakręt ma promień 50 m. Oblicz, jaka siła dośrodkowa działa na samochód, jeśli pokonuje on ten zakręt z prędkością $v = 20$ m/s (czyli 72 km/h), a jego masa wynosi $m = 1000$ kg. Jaka siła działa na samochód ciężarowy o masie $M = 20$ ton, poruszający się z prędkością $V = 36$ km/h?

Dane:

$$R = 50 \text{ m} \qquad v = 20 \text{ m/s}$$

$$m = 1000 \text{ kg} \qquad V = 10 \text{ m/s}$$

$$M = 20\,000 \text{ kg}$$

$$\text{Siłę dośrodkową obliczamy ze wzoru (1.10) } F = \frac{mv^2}{R}.$$

¹⁰ T. Appenzeller, *Search for Other Earths*, www.nationalgeographic.com/science/space/universe/new-planets

Podstawiając wartości liczbowe, otrzymujemy dla samochodu osobowego

$$F = 1000 \cdot (20)^2 / 50 = 8000 \text{ N}$$

Jest to bardzo duża siła w porównaniu z siłą ciężkości (ciężarem) samochodu, który wynosi 9810 N – samochód ryzykuje wypadnięcie z szosy.

Dla samochodu ciężarowego

$$F = 20\,000 \cdot (10)^2 / 50 = 40\,000 \text{ N}$$

Jest to więcej niż siła dośrodkowa dla wspomnianego samochodu osobowego, ale w porównaniu z ciężarem samochodu ciężarowego (196 200 N) *stosunkowo* mniej.

Przykład 1.4

Jaka jest największa prędkość, przy której na śliskiej szosie nie wypadnie z niej samochód o masie 1000 kg, jeśli współczynnik tarcia wynosi $f = 0,3$, a promień zakrętu 60 m? Ile wynosi siła tarcia statycznego działająca na samochód?

Dane:

$$R = 60 \text{ m} \qquad f = 0,3$$

$$m = 1000 \text{ kg}$$

Szukane: v

Samochód nie wypadnie z szosy, o ile siła tarcia będzie dostatecznie duża, aby powodować ruch po torze kolistym (tzn. o ile będzie odgrywała rolę siły dośrodkowej).

Maksymalna siła T tarcia kół o szosę¹¹ jest równa sile nacisku mg , gdzie g jest przyspieszeniem ziemskim, pomnożonej przez współczynnik tarcia statycznego f .

¹¹ Rozważamy działanie siły tarcia w kierunku poprzecznym do kierunku toczenia się kół. W tym kierunku tarcie ma charakter statyczny – koło ani nie ślizga się, ani nie toczy.

$$T = fmg = 0,3 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 2980 \text{ N}$$

Siłę dośrodkową obliczamy ze wzoru $F = mv^2/R$.

Dla znalezienia maksymalnej prędkości przyrównujemy siłę tarcia i siłę dośrodkową:

$$fmg = \frac{mv^2}{R}$$

Masa m , występująca po obu stronach równania, upraszcza się i po przekształceniach otrzymujemy:

$$v = \sqrt{(fRg)}$$

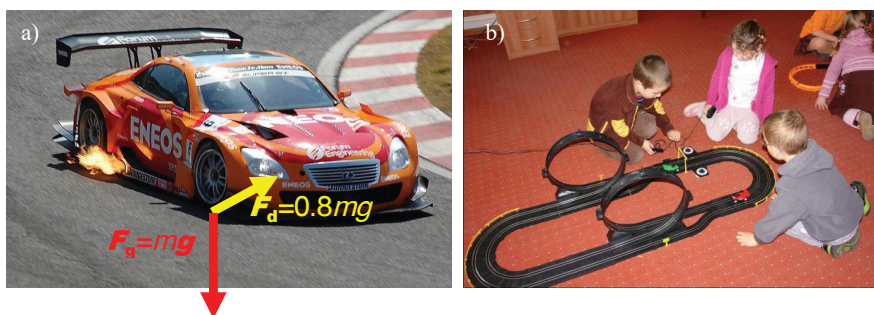
Podstawiając wartości liczbowe, otrzymujemy:

$$v = \sqrt{(0,3 \cdot 60 \cdot 9,81)} = 13 \text{ m/s}$$

Przeliczając tę prędkość na kilometry na godzinę, otrzymujemy:

$$v = 13 \cdot 3600 / 1000 = 47,8 \text{ km/h}$$

W warunkach mokrej szosy samochód *na pewno* wypadnie z tego zakrętu, jeśli będzie jechał z prędkością 48 km/h lub większą. Prędkość ta nie zależy od masy samochodu, a jedynie od współczynnika tarcia opon o szosę (czyli stanu opon i nawierzchni szosy).



Ryc. 1.11. a) Na samochód na zakręcie działa siła dośrodkowa (strzałka żółta), spowodowana tarciem kół o nawierzchnię – źródłem tej siły jest szosa. Siła tarcia statycznego zależy od ciężaru samochodu (strzałka czerwona)

oraz współczynnika tarcia f i „dostosowuje się” do roli siły dośrodkowej, przyjmując w zależności od przyspieszenia dośrodkowego wartości od 0 do fmg ; tu założyliśmy $f=0,8$; samochód wpada w poślizg, gdy siła tarcia staje się zbyt mała dla zadanej trajektorii i prędkości ruchu; **b)** zależność siły dośrodkowej od masy nie powinna wprowadzać w błąd kierowców: i dla ciężarówki, i dla zabawkowego samochodu próba zbyt szybkiego pokonaniu zakrętu powoduje **wypadnięcie** z szosy; stabilność na zakręcie zależy od tego, czy siła tarcia (większa dla cięższego samochodu) jest wystarczająco duża w porównaniu z siłą dośrodkową; siła tarcia jest zawsze **mniejsza** od ciężaru mg .

Źródło: <https://travel.gaijinpot.com/top-5-racetracks-to-see-japanese-cars-in-japan>; fot. K. Służewski

Nawet w warunkach idealnej szosy i najlepszych opon, jak w Formule 1, tzn. zakładając współczynnik tarcia $f=1$, samochód wypadnie z szosy, jeśli na tym zakręcie będzie poruszał się z prędkością 24,3 m/s, czyli 87 km/h. Rozumiesz teraz, dlaczego nawet w Formule 1 kierowcy bardzo zwalniają przed ostrymi zakrętami! Sprawdź obliczenia, jeśli nie wierzysz.

1.5. Ruch po okręgu – siła odśrodkowa

Na ryc. 1.10a zaznaczyliśmy, oprócz siły dośrodkowej działającej na kulę, również siłę działającą na miotacza. Wynika ona z III zasady dynamiki Newtona: jeśli ciało A działa na ciało B siłą F , to ciało B działa na ciało A siłą o tej samej wartości, ale przeciwnie skierowaną. Na miotacza działa siła o tej samej wartości, z jaką miotacz utrzymuje kręcącą się kulę. Siłę taką nazywamy siłą *odśrodkową*.

Siłą odśrodkową nazywamy siłę działającą na punkt centralny obrotu. Siła ta jest siłą reakcji ze strony poruszającego się ciała na siłę dośrodkową.

Siła odśrodkowa działa np. na rękę uczennicy kręcącej piłką na ryc. 1.9a i na Ziemię, dookoła której krąży Księżyc. Z tego też powodu Księżyc krąży dookoła Ziemi, ale i Ziemia, mimo że 80 razy cięższa od Księżyca, też wokół niego nieco „tańczy”.

Zadanie 1.4 (trudne)

Spróbujmy obliczyć, po jakim okręgu porusza się głowa miotacza na ryc. 1.10a, jeżeli kula porusza się na okręgu o promieniu 2 m ¹².

Wzór $F = m \frac{v^2}{R}$ nie jest wystarczający do rozwiązania tego zagadnienia: prędkość liniowa kuli i lampy na głowie miotacza są różne. Identyczne pozostają ich prędkości *kątowe*, tzn. kąt, jaki zataczają w danej jednostce czasu. Związek między prędkością kątową ω a prędkością liniową jest następujący¹³:

$$v = \omega R \quad (1.11)$$

Zastępując we wzorze (1.10) prędkość liniową prędkością kątową, otrzymujemy alternatywny wzór na siłę dośrodkową:

$$F = m\omega^2 R \quad (1.12)$$

Z równości sił i prędkości kątowych możemy wywnioskować, że promienie orbit krążących wokół siebie dwóch ciał mają się do siebie jak odwrotności ich mas. Masa miotacza jest zapewne dziesięć razy większa niż masa kuli (7,2 kg), więc ich orbity mają się do siebie jak 1:10, co widać na ryc. 1.10a. Obserwacje cyklicznych, choć niewielkich zmian położenia gwiazd są jednym ze sposobów na poszukiwania planet krążących dookoła odległych słońc.

Z powodu znacznej różnicy mas protonu i elektronu na ryc. 1.10b nie zaznaczamy, że proton również krąży, bo jego orbita ma promień 1/1837 razy mniejszy niż orbita elektronu. W przypadku Ziemi i Księżyca punkt, dookoła którego oba ciała niebieskie krążą, znajduje się 1700 km pod powierzchnią Ziemi.

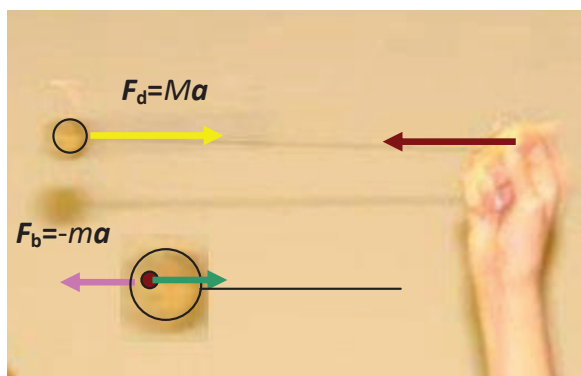
¹² Dokładniej rzecz biorąc, należy i dla kuli, i dla miotacza znaleźć wspólny punkt, dookoła którego obaj wirują – kula na dłuższym promieniu, a miotacz na krótszym. Tym punktem jest środek masy miotacza i kuli razem wziętych.

¹³ Zob. np. G. Karwasz, M. Sadowska, K. Rochowicz, op. cit., s. 56.

1.6. Ruch po okręgu – siły bezwładności

Przyczyną ruchu po okręgu jest siła *do-środkowa*. Jak to się więc dzieje, że pasażerowie w samochodzie pokonującym „na gazie” ostry zakręt czują siłę wypychającą ich na zewnątrz zakrętu? Odpowiedź otrzymamy ponownie z III prawa dynamiki Newtona.

Rozważamy ruch po okręgu nie z punktu widzenia obserwatora zewnętrznego, ale z punktu widzenia obserwatora poruszającego się po okręgu, np. mrówki, która przez pomyłkę weszła do piłki kręczonej przez Katarzynę (ryc. 1.9a).



Ryc. 1.12. Siła dośrodkowa (F_d , żółta), działająca na wirującą piłkę, jest równa co do wartości sile odśrodkowej (czerwonej), działającej na rękę Kasi. Ziarnko piasku w piłce naciska od wewnątrz na ściankę piłki (F_b , strzałka różowa) – jest to siła *odśrodkowa bezwładności*. Jest to siła reakcji wynikająca z III zasady dynamiki Newtona – to ścianka piłki naciska na ziarnko (strzałka zielona) tak, aby i ono podlegało przyspieszeniu dośrodkowemu, razem z piłką. Siła odśrodkowa bezwładności jest siłą pozorną, związaną z tym, że cała piłka podlega przyspieszeniu. Fot. M.K.

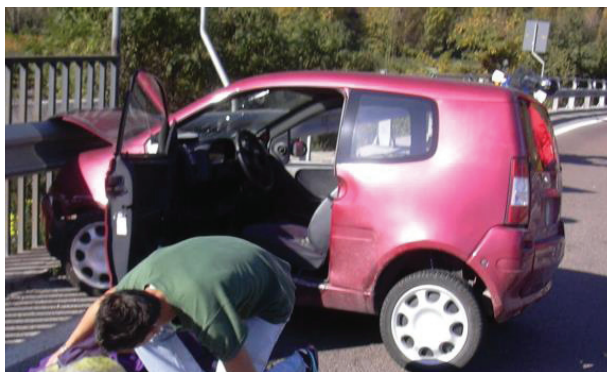
Na mrówkę (lub ziarnko piasku) wewnątrz piłki działa siła dośrodkowa powodująca, że i mrówka porusza się po okręgu razem z piłką. Źródłem tej siły jest wewnętrzna ścianka piłki, zob. powiększenie na ryc. 1.12. Z III zasady dynamiki Newtona wynika, że mrówka też działa siłą na piłkę – siłą skierowaną od środka osi obrotu. Jest to siła bezwładności i nazywamy ją

siłą *odśrodkową* bezwładności. Jest to siła pozorna, związana z tym, że cała piłka w swym ruchu po okręgu ustawicznie przyspiesza ku środkowi okręgu.

Siła dośrodkowa działająca na piłkę ze strony ręki Katarzyny, F_d na ryc. 1.12, zależy od przyspieszenia dośrodkowego a i masy piłki M , zgodnie ze wzorem $F_d = Ma$. Siła odśrodkowa bezwładności, która wciska mrówkę w ściankę piłki, zależy od przyspieszenia i od masy *mrówki* m , $F_d = -ma$. Znak minus w tym ostatnim wzorze ma przypominać, że mrówka ciśnie w kierunku *od*-środkowym.

Siła odśrodkowa bezwładności jest siłą pozorną.

To siła odśrodkowa bezwładności wciska w fotel pasażerów samochodu pokonującego zakręt z dużą prędkością.



Ryc. 1.13. Zakręty pozornie łagodne, ale z ograniczeniem prędkości do 70 km/h, okazują się dla kierowców bardzo niebezpieczne. Przekroczenie szybkości do 100 km/h *podwaja* ryzyko wypadnięcia z zakrętu. Doświadczony kierowca w warunkach deszczu zwolni do 50 km/h, co *obniża* dwukrotnie ryzyko wypadku; na tym zdjęciu mały samochód został wypchnięty z drogi przez pirata. Fot. M.K.

Na zakończenie jeszcze raz o niebezpiecznych zakrętach drogowych. Pirat, który przeżył wypadnięcie z zakrętu, gotów jest przysiąc, że to „nie-widzialna” siła wypchnęła go z zakrętu. Ale to nie jest tak. Zabrakło, po prostu, siły dośrodkowej. Innymi słowy, samochód pirata drogowego nie

„wypada” z zakrętu – on zwyczajnie **jedzie na wprost**, zgodnie z I prawem dynamiki Newtona. Na samochód nie działają siły ze strony drogi, bo koła straciły „przyczepność”; samochód porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, a to tylko droga uciekła w bok! Warto uczyć się praw fizyki.

1.7. Ruch po okręgu i grawitacja

Uzbrojeni w znajomość sił działających w ruchu po okręgu możemy wrócić do modelu Kopernika z ryc. 1.2. Jak to się dzieje, że planety na dalszych orbitach poruszają się wolniej? Wynika to z równowagi sił: rolę siły *dośrodkowej* w ruchu planet pełni siła *grawitacji*. To było chyba najważniejsze spostrzeżenie Izaaka Newtona dla całej fizyki. Powtórzmy jego rozumowanie.

Szukamy, jaki jest okres obiegu planety znajdującej się w określonej odległości od Słońca (np. Ziemia, $R = 150$ mln km). Załóżmy, że znamy masę Słońca ($M = 2 \cdot 10^{30}$ kg).

Przyrównajmy wzór na siłę dośrodkową (1.10) ze wzorem na siłę oddziaływania grawitacyjnego Słońce – Ziemia:

$$F = m \frac{v^2}{R} = G \frac{Mm}{R^2}, \quad (1.13)$$

gdzie przez m oznaczyliśmy masę planety.

Przekształcając powyższe równanie (upraszczając przez m/R), otrzymujemy:

$$v^2 = G \frac{M}{R} \quad (1.14)$$

Wynik ten jest bardzo ciekawy. Po pierwsze, im planeta dalej położona od Słońca (większe R), tym porusza się wolniej (jej prędkość liniowa jest mniejsza). Po drugie, prędkość ruchu planet nie zależy od ich masy, a jedynie od masy Słońca.

Prędkość poruszania się planety w kosmosie jest trudna do zmierzenia; znacznie łatwiej, za Kopernikiem, zmierzyć *okres* jej obiegu. Zależność między okresem obiegu T a prędkością liniową znajdziemy, wiedząc, że w ciągu jednego okresu planeta zatacza pełny okrąg, czyli przebywa drogę $2\pi R$. Mamy więc zależność:

$$2\pi R = vT, \quad (1.15)$$

skąd otrzymujemy:

$$v = \frac{2\pi R}{T} \quad (1.16)$$

Podstawiając tę zależność do równania (1.14), dostajemy:

$$\left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2 = G \frac{M}{R}, \quad (1.17)$$

skąd po przekształceniach mamy:

$$R^3 = G \frac{M}{4\pi^2} T^2 \quad (1.18)$$

lub krócej $\frac{R^3}{T^2} = \text{const}$ (1.19)

Zapisaaliśmy powyższe prawo w specjalnej ramce, aby podkreślić, że było to jedno z najważniejszych odkryć w historii astronomii. Równanie (1.19) mówi rzecz następującą.

Kwadraty okresów obiegu planet dookoła Słońca mają się do siebie jak sześciiany ich odległości od Słońca.

Tę zależność nazywamy trzecim prawem Keplera.

Johannes Kepler (1571–1630) odkrył to prawo doświadczalnie; dzięki Newtonowi potrafimy je uzasadnić teoretycznie.

Przykład 1.5

Obliczmy, jak się mają do siebie okresy obiegu Ziemi i Saturna dookoła Słońca. Saturn (T_h) znajduje się od Słońca w odległości R_h (w przybliżeniu) dziesięć razy większej niż Ziemia¹⁴. Okres obiegu dookoła Słońca T_h w jednostkach lat ziemskich obliczymy, zapisując prawo (1.19) w postaci:

$$\frac{R_h^3}{T_h^2} = \frac{R_{\oplus}^3}{T_{\oplus}^2}, \quad (1.20)$$

gdzie przyjmiemy odległość Ziemia – Słońce $R_{\oplus}=1$ i okres obiegu (w latach) dla Ziemi $T_{\oplus}=1$.

Stąd mamy, podstawiając dokładną wartość liczbową $R_h=9,54$:

$$R_h^3 = T_h^2 = 868, \text{ czyli } T_h = \sqrt{868} = 29,5 \text{ lata.}$$

Jest to wynik bardzo podobny do danych Kopernika, który podawał okres obiegu Saturna na 30 lat, zob. ryc. 1.2. i odpowiadający dokładnej wartości, z roku 2000.

Przykład 1.6

Obliczmy z dokładnością do 3 cyfr znaczących, ile wynosi obieg Ziemi dookoła Słońca. Masa Słońca wynosi w przybliżeniu $2 \cdot 10^{30}$ kg, a odległość Ziemia – Słońce $150 \cdot 10^9$ m.

Skorzystamy z przekształconego wzoru (1.18),

$$T^2 = \frac{4\pi^2 R^3}{GM} = \frac{4 \cdot (3,14)^2 \cdot (150 \cdot 10^9)^3}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30}} = 997,8 \cdot 10^{10}$$

stąd T w sekundach wynosi $316 \cdot 10^6$ s, co zamienione na dni (przyjmując bardzo niedokładnie, że dzień ma 24 godziny) daje 365,5 dnia. Wynik

¹⁴ Zob. dane w jakiegokolwiek encyklopedii astronomicznej (podajemy tzw. półos wielką).

całkiem dobry, biorąc pod uwagę przyjęte przybliżenia stałej grawitacji, masy Słońca i odległości Ziemia – Słońce.

Trzecie prawo Keplera stosuje się nie tylko do układu Słońce – planety, ale także do Ziemi i Księżyca lub satelitów Jowisza¹⁵. W szczególności stosuje się do sztucznych satelitów Ziemi. Masą w równaniu (1.18) jest w tym przypadku masa Ziemi. Poszukajmy, w jakiej odległości od środka Ziemi należy umieścić na orbicie satelitę, aby jego okres obiegu Ziemi wynosił 24 godziny. Innymi słowy, na jakiej wysokości latają satelity *geostacjonarne*¹⁶?

Przykład 1.7

Na jakiej wysokości od środka Ziemi znajdują się satelity geostacjonarne? Przyjąć masę Ziemi $M = 59 \cdot 10^{23}$ kg, a dobę jako 24 godziny¹⁷.

Dane: $M = 59 \cdot 10^{23}$ kg

$T = 24\text{h} = 24 \cdot 3600\text{ s} = 86400\text{ s}$

Skorzystamy z równania (1.18).

$$R^3 = G \frac{M}{4\pi^2} T^2 = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{59 \cdot 10^{23}}{4 \cdot (3,14)^2} (86400)^2 = 74,5 \cdot 10^{21}$$

Stąd za pomocą kalkulatora otrzymujemy $R = 4,2 \cdot 10^7$ km.

Satelity geostacjonarne (np. telewizyjne) latają w odległości 42 tys. km od środka Ziemi. Przyjmując, że promień Ziemi to 6,3 tys. km, satelity geostacjonarne latają około 36 tys. km nad powierzchnią Ziemi. Dla porównania satelita do pomiarów pola grawitacyjnego Ziemi (GOCE) latał na wysokości zaledwie 150 km nad jej powierzchnią.

¹⁵ Więcej o satelitach Jowisza w rozdziale IV.

¹⁶ Satelity geostacjonarne, tzn. takie, które widać z Ziemi zawsze w tym samym położeniu niezależnie od tego, że Ziemia się kręci, to np. satelity telewizyjne. Krążą one dookoła Ziemi w płaszczyźnie równika.

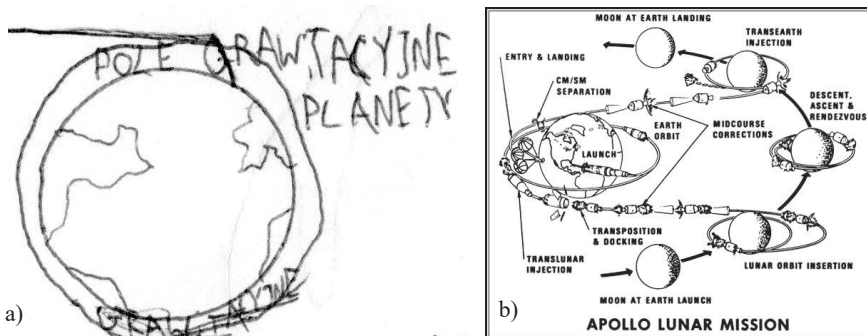
¹⁷ Jak wyjaśnimy w rozdziale IV, okres obrotu Ziemi wokół własnej osi jest o 4 minuty krótszy niż 24 godzin.

Zadanie 1.7

Oblicz okres obiegu trzeciego z dużych satelitów Jowisza (Ganimedesa). Masa Jowisza wynosi $1900 \cdot 10^{23}$ kg, a odległość Ganimedesa od środka Jowisza 1 mln km. Stałą grawitacji przyjmij $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$. Porównaj wynik z wartością obserwowaną $T = 7,1$ dnia.

1.8. Grawitacja – loty kosmiczne

W 1865 roku francuski pisarz powieści fantastycznonaukowych, Juliusz Verne, wyobrażał sobie lot ludzi na Księżyc w pocisku wystrzelonym z gigantycznej armaty¹⁸. Mimo że w locie na Księżyc (100 lat później) użyto rakiety, fizycy rozważają hipotetyczną prędkość, jaką należałoby nadać pociskowi, aby mógł okrążyć Ziemię, zob. rysunek Kuby na ryc.1.14.



Ryc. 1.14. (a) Wyjaśnienie I i II prędkości kosmicznej: wyrzut pocisku z armaty okrąża Ziemię – I prędkość kosmiczna lub odlatuje z Ziemi, oddalając się w nieskończoność – II prędkość kosmiczna (rys. Kuba Garbacza); (b) schemat „prawdziwego” lotu na Księżyc, misji Apollo.

Źródło: NASA

Problem 1.8

Jaką prędkość należy nadać pociskowi wystrzelonemu poziomo, aby okrążył Ziemię?

¹⁸ W podobny sposób miał podróżować bohater powieści z XVIII wieku, Baron Münchhausen.

Pocisk ma krążyć po orbicie kołowej dookoła Ziemi, niewiele nad jej powierzchnią. Jako promień jego orbity przyjmujemy promień Ziemi, $R = 6370$ km. Rolę siły dośrodkowej odgrywać ma siła grawitacji, obliczona ze wzoru (1.1) dla odległości R :

$$F = G \frac{Mm}{R^2},$$

gdzie tym razem M oznacza masę Ziemi, a m masę pocisku. Siła grawitacji ma być równa sile dośrodkowej (równanie 1.10)

$$G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{v^2}{R}$$

Masa pocisku m upraszcza się i otrzymujemy następującą równość:

$$v^2 = G \frac{M}{R}, \quad (1.21)$$

a stąd następujące wyrażenie na szukaną prędkość:

$$v = \sqrt{G \frac{M}{R}} \quad (1.22)$$

Podstawiając wartości liczbowe, $M = 59,7 \cdot 10^{23}$ kg, $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Nm²/kg² i promień Ziemi $6,37 \cdot 10^6$ m, otrzymujemy:

$$v_1 = 7,91 \cdot 10^3 \text{ m/s} \quad (1.23)$$

Tę prędkość nazywamy pierwszą prędkością kosmiczną.

Pierwsza prędkość kosmiczna określa, jaką prędkość należy nadać wyrzucenemu poziomo pociskowi, aby okrążył on Ziemię.

I prędkość kosmiczna (na Ziemi) wynosi $v_1 = 7,91$ km/s.

Obliczenie (1.22) jest ważne, sprawdzimy więc poprawność przeliczenia jednostek.

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \frac{\text{kg}}{\text{m}}} = \sqrt{\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \frac{\text{m}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Pierwsza prędkość kosmiczna charakteryzuje pole grawitacyjne planety na jej powierzchni, nieco podobnie jak przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni – wzór (1.3).

Jak na warunki ziemskie prędkość prawie 8 km/s wydaje się ogromna. Jak na warunki kosmiczne nie jest ona taka zawrotna. Ziemia krąży dookoła Słońca z prędkością 30 km/s, a cała nasza Galaktyka podąża w kierunku gwiazdozbioru Panny z prędkością około 400 km/s.

Czy I prędkość kosmiczna wystarczy, aby dolecieć na Księżyc? Nie! Ale policzenie prędkości, jaką należy nadać pociskowi, aby poleciał na Księżyc, nie jest takie łatwe. Wyprowadzenie to wymaga pewnych dodatkowych wzorów. Dotyczą one pola grawitacyjnego, ale samo wyrażenie (1.1) na siłę oddziaływania grawitacyjnego już nam nie wystarczy. Wyprowadzenie prędkości niezbędnej, aby wysłać pocisk z Ziemi w daleki kosmos, przedstawiamy w następnym paragrafie.

Zadanie 1.9

Oblicz pierwszą prędkość kosmiczną dla Księżyca. Przyjmij jako masę Księżyca $M = 0,74 \cdot 10^{23}$ kg i promień Księżyca $R = 1,74 \cdot 10^6$ m. Porównaj tę prędkość z I prędkością kosmiczną dla Ziemi. _

1.9. Energia w polu grawitacyjnym

Pierwsza prędkość kosmiczna jest wystarczająca do okrążenia Ziemi, natomiast jest za mała, aby z Ziemi dolecieć na Księżyc lub Marsa. Prędkość niezbędna do *ucieczki* z pola grawitacyjnego Ziemi nazywamy „drugą prędkością kosmiczną”. Dla jej obliczenia musimy wprowadzić nowe pojęcie – energii w polu grawitacyjnym.

Pojęcie energii potencjalnej w polu grawitacyjnym jest dobrze znane. *Energia nazywamy zdolność ciała do wykonania pracy.* Ciało podniesione na pewną wysokość i spuszczone swobodnie może wykonać pracę.

Przykładowo młotek spuszczoney z pewnej wysokości wbija gwóźdź, kafar wbija pał, spadający wazon rozbija się na kawałki itd.

Również dobrze znany jest wzór na energię potencjalną E w polu grawitacyjnym Ziemi:

$$E = mgh, \quad (1.24)$$

gdzie m jest masą ciała, g – przyspieszeniem grawitacyjnym na powierzchni Ziemi (por. wzór 1.3), a h – wysokością, na jaką zostało podniesione ciało.

Niestety, wzoru tego nie możemy stosować, kiedy rozważamy zmiany energii na dużych odległościach. Wówczas odległość od środka Ziemi R we wzorze (1.3) zmienia się znacznie i wzór (1.24) dawałby wartości błędne.

W celu wydedukowania alternatywnych wyrażen na energię potencjalną – ważnych również dla dużych zmian odległości od Ziemi – przypomnijmy, że zmiana energii ΔE ciała jest z definicji równa pracy W wykonanej nad ciałem. Wzrost energii kinetycznej wystrzelonego pocisku jest równy pracy wykonanej nad pociskiem przez rozprężające się gazy w lufie armaty.

$$\Delta E = W \quad (1.25)$$

Poprawny – dla każdej odległości – wzór na energię potencjalną w polu grawitacyjnym wyprowadzimy na podstawie rozważań o wykonanej pracy. Jaką pracę należy wykonać, aby przenieść pocisk z punktu na powierzchni Ziemi, tj. z odległości od środka Ziemi $R_1 = 6370$ km, na odległość nieskończoną, $R_2 = \infty$?

Przypominamy definicję pracy:

$$W = F \cdot \Delta s, \quad (1.26)$$

gdzie F jest działającą siłą, a Δs przesunięciem, na jakim ona działała.

Siła w polu grawitacyjnym wyraża się dobrze już nam znanym wzorem:

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

Mnożąc tę siłę przez przesunięcie $\Delta R = R_2 - R_1$, uzyskalibyśmy jakieś wyrażenie, które miałyby wymiar GMm/R . Jeszcze jedna trudność koncepcyjna wynika z faktu, że przesuając ciała z R_1 do nieskończoności, siła grawitacji zmienia się od pewnej skończonej wartości dla R_1 do zera dla $R_2 = \infty$. Nie możemy więc uważać tej siły za stałą¹⁹.

Prawidłowe wyrażenie na pracę w polu grawitacyjnym niezbędną do przeniesienia ciała o masie m w polu grawitacyjnym ciała o masie M (i na odwrót) z początkowej odległości między ciałami R_1 do końcowej odległości R_2 przedstawia wzór:

$$W_{1 \rightarrow 2} = GMm \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.27)$$

Wzór (1.27) jest kluczem do znalezienia II prędkości kosmicznej. Wysłanie pocisku w daleki kosmos oznacza wykonanie pracy na dystansie od $R_1 = 6370$ km do $R_2 = \infty$. Praca ta wynosi:

$$W_{1 \rightarrow \infty} = \frac{GMm}{R_1} \quad (1.28)$$

Praca ta dostarcza pociskowi energii kinetycznej. Zachodzi więc równość:

$$\frac{GMm}{R_1} = \frac{mv^2}{2}, \quad (1.29)$$

skąd otrzymujemy poszukiwaną wartość II prędkości kosmicznej:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (1.30)$$

¹⁹ Rozważania tu przedstawione mają charakter jedynie jakościowy. Prawidłowe wyprowadzenie wzoru na energię potencjalną w polu grawitacyjnym nie jest trudne, ale wymaga rachunku całkowego.

Wstawiając wartości liczbowe na masę Ziemi i promień Ziemi, otrzymujemy wartość:

$$v_{II} = 11,2 \cdot 10^3 \text{ m/s} \quad (1.31)$$

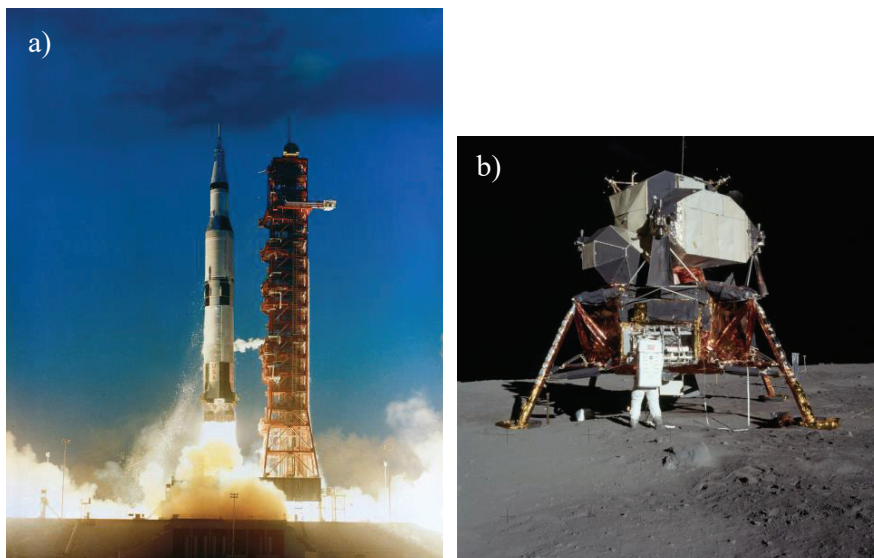
Zauważmy, że mimo zupełnie innego rozumowania przy wyprowadzaniu pierwszej i drugiej prędkości kosmicznej uzyskane wartości różnią się tylko o czynnik $\sqrt{2}$. Związek ten jest, oczywiście, ważny dla wszystkich planet i innych ciał. Dla Księżyca prędkość ucieczki statku kosmicznego wynosi $v_{II} = 2,38 \text{ km/s}$.

Dруга прędkość kosmiczna określa, z jaką prędkość należy wystrzelić pocisk, aby opuścił on Ziemię na zawsze.

II prędkość kosmiczna (na Ziemi) wynosi $v_I = 11,2 \text{ km/s}$.

Praktyczne realizacje lotów kosmicznych muszą pokonać wiele problemów: nikt nie strzela kulą armatnią w Księżyc. Rakieta Saturn 5 startująca z Ziemi była ogromna, o wysokości 110 m i o łącznej masie (z paliwem) 3 tys. ton. Musiała ona wynieść na orbitę dookoła Księżyca lądownik i moduł powrotny, który „parkował” na orbicie dookoła Księżyca. Z samego Księżyca startował już niewielki lądownik o masie 4,7 t, z czego 2,5 t stanowiło paliwo niezbędne, aby dotrzeć do modułu krążącego na orbicie parkingowej.

Dziś więc I i II prędkość kosmiczna mają bardziej znaczenie poznawcze niż praktyczne: pierwszą z nich obliczamy z równości siły grawitacji i siły dośrodkowej na orbicie o promieniu równym promieniowi Ziemi, drugą – z pracy niezbędnej do wyniesienia określonego ciała z odległości równej promieniowi Ziemi do nieskończoności.



Ryc. 1.15. II prędkość kosmiczna dla Ziemi wynosi 11,2 km/s, natomiast dla Księżyca tylko 2,38 km/s. Wystartowanie w kosmos z Księżyca jest więc o wiele łatwiejsze niż z Ziemi; **a)** startująca z Ziemi rakietą Saturn 5 miała wysokość 110 m i masę na starcie 3 tys. ton; **b)** lądownik księżycowy miał wysokość niecałe 10 m (łącznie z łapami) i masę startową 4,7 t²⁰.

Źródło: NASA

Wyrażenie (1.28) jest niezwykle ważne: wskazuje ono, jak obliczyć energię potencjalną E ciała w polu grawitacyjnym Ziemi, w odległości R od jej środka, a niekoniecznie przy jej powierzchni. Energia ta wynosi:

$$E(R) = -\frac{GMm}{R} \quad (1.32)$$

Energia potencjalna ciała znajdującego się w polu grawitacyjnym jest *ujemna*. Wynosi ona *zero* w nieskończoności, ale aby wynieść ciało do

²⁰ Zob. materiały NASA ze startu Apollo 17 z Księżyca: <https://www.youtube.com/watch?v=ItgJp2P9poc>. Porównaj ze startem Apollo 11 z Ziemi: <https://www.youtube.com/watch?v=IEcMI4Pp7LU>

nieskończonej odległości, trzeba nad nim wykonać pracę. Jeśli nad ciałem wykonaliśmy pracę, to jego energia wzrosła.

W życiu codziennym ujemny znak energii potencjalnej w polu grawitacyjnym nie ma dla nas większego znaczenia. I tak interesują nas *względne* zmiany energii. Zresztą wzór (1.32) nie jest sprzeczny ze wzorem stosowanym na co dzień do obliczeń energii potencjalnej, tj. (1.24). We wzorze $E = mgh$ energia rośnie wraz ze wzrostem wysokości h , we wzorze (1.32) energia również rośnie, jeśli $R_2 > R_1$. Rzeczywiście, różnica $E(R_2) - E(R_1)$ obliczona według wzoru (1.32) jest dodatnia, czyli $E(R_2) > E(R_1)$.

$$E(R_2) - E(R_1) = -GMm \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) > 0 \quad (1.33)$$

Wzór (1.32) na energię w (przyciągającym) polu grawitacyjnym będzie nam bardzo, bardzo przydatny przy modelowaniu atomu wodoru w następnym rozdziale.

Pytania kontrolne:

1. Jaka jest interpretacja I prędkości kosmicznej? Oblicz ją.
2. Oblicz okres obiegu Wenus dookoła Słońca. Odległość Wenus od Słońca i masę Słońca znajdziesz w tabeli 4.1. w rozdziale 4.
3. Oblicz, z jaką prędkością musiał latać satelita do pomiarów kształtu kuli ziemskiej („GOCE”), jeśli jego orbita była zaledwie 150 km na powierzchni Ziemi.
4. (Rozszerzone) Jaka jest interpretacja II prędkości kosmicznej? Oblicz ją.
5. Oblicz drugą prędkość kosmiczną dla Marsa. Dane Marsa znajdziesz w tabeli 4.1.
6. (Trudne) Oblicz w jednostkach przyspieszenia ziemskiego g , jakie jest przyspieszenie dośrodkowe (tzn. w kierunku Ziemi) Księżyca, ryc. 1.1. Przyjmij odległość Kuby od środka Ziemi 6 tys. km, przyspieszenie Kuby równe g , a odległość środka Księżyca od środka Ziemi jako 380 tys. km. Wynik podaj w przybliżeniu ułamka prostego. (Skorzystaj umiejętnie ze wzoru 1.3).

Fizyka atomowa i cząsteczkowa

2.1. Dwie rewolucje: maszyny cieplne i elektryczność

Dzięki fizyce dokonały się co najmniej dwie rewolucje w historii ludzkości. Pierwsza z nich, nazwiemy ją lokomocyjną, zaszła w połowie XIX wieku. Jeszcze w 1825 roku Adam Mickiewicz podróżował przez stepy Ukrainy powozem, aby następnie wsiąść w Odessie na statek żaglowy.

„Wpłynąłem na suchego przestwór oceanu, wóz się nurza w zieloność i jak łódka brodzi”.

Czterdzieści lat później rosyjski poeta Nikołaj A. Niekrasow pisał¹:

„Lecąc pośpiesznie po torze żelaznym,
Obmyślam pieśni pochwalne”.

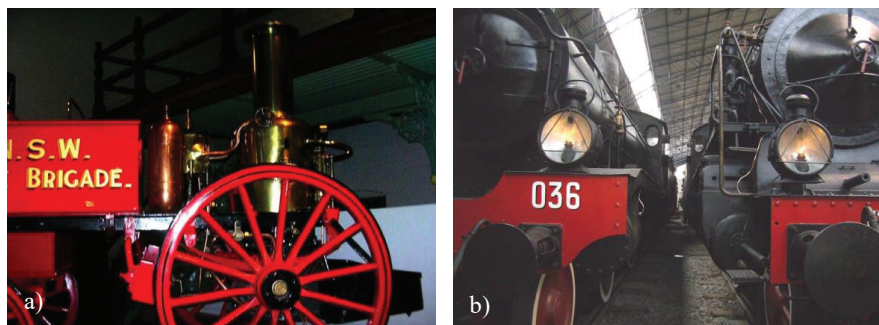
Dziś między Sankt Petersburgiem a Moskwą pociągi mkną z prędkością 220 km/h.

Podstaw rewolucji transportowej można się dopatrywać w połowie XVIII wieku. Wtedy to, w 1763 roku, James Watt² zbudował pierwszą maszynę zamieniającą energię gorącej pary wodnej w energię mechaniczną.

¹ Bystro leczu ja po relsom, czugunnym, dumaju dumu swój (wolne tłumaczenie – GK).

² Od jego nazwiska mamy jednostkę fizyczną *mocy*. W watach mierzymy moc czajnika (500 W), grzejnika pralki (3 kW), moc silnika samochodu (setki kilowatów), statku żeglugi przybrzeżnej i tramwaju (ryc. 2.4), a także moc nadawczą komórki (według norm technicznych do 10 mW).

ną, napędzającą maszyny przemysłowe. Minęło ponad pół wieku, zanim maszyny parowe stały się na tyle „zgrabne”, aby móc napędzać lokomotywę kolejową³. W 1829 roku G. Stephenson nazwał swoją lokomotywę „Rakieta”; osiągała ona „zawrotną” prędkość 50 km/h. Nie byłoby potęgi Stanów Zjednoczonych, gdyby nie budowana z wielkim trudem linia kolejowa między wschodnim a zachodnim wybrzeżem.



Ryc. 2.1. Wykorzystanie maszyny parowej: **a)** samochód strażacki na parę z 1879 roku, Powerhouse Museum w Sydney; **b)** lokomotywy parowe z początku XX wieku, Muzeum Nauki i Techniki w Mediolanie. Fot. M.K.

Wiek XIX zakończył się zbudowaniem pierwszych silników samochodowych – benzynowego przez Augusta Otto w 1863 roku i na olej napędowy przez Rudolfa Diesla w 1897 roku. Silnik benzynowy pozwolił braciom Orville’owi i Wilburgowi Wrightom, konstruktorom rowerów, na wzniesienie się w powietrze za pomocą samolotu (17 grudnia 1903 r.).

Swego rodzaju silnikiem cieplnym jest ciało człowieka zamieniające energię chemiczną pożywiania na ciepło i na energię mechaniczną.

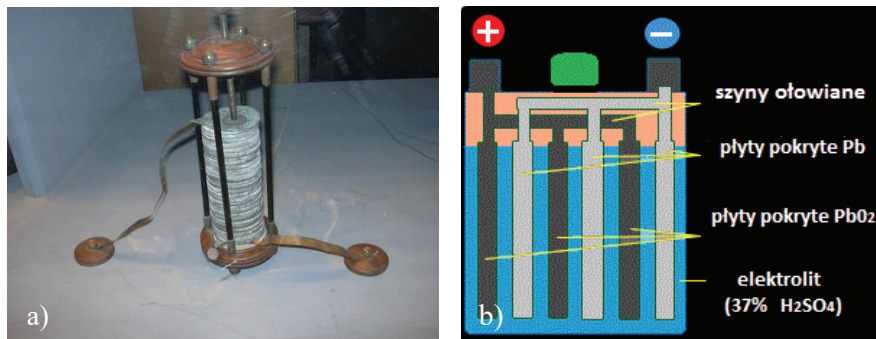
³ 29 września 1825 roku nastąpiło otwarcie pierwszej kolei ze Stockton do Darlington (40 km). Warszawa uzyskała połączenie kolejowe z Wiedniem w 1848 roku.



Ryc. 2.2. a) Nagrobek Jamesa Joule'a w Opactwie Westminster w Londynie. Joule jako pierwszy zmierzył, jakiej ilości pracy odpowiada jednostka ciepła. Na jego cześć jednostkę pracy (lub energii) nazywamy dżulem; **b)** opakowanie napoju czy jakiegokolwiek innego pożywienia podaje „wartość energetyczną” jednej porcji – najczęściej w kilodżulach (kJ) i kilokaloriach (kcal). Fot. M.K.

Druga rewolucja przemysłowa, związana z użyciem energii elektrycznej, dokonała się w XX wieku (1881 rok – pierwszy tramwaj elektryczny w Berlinie). Podobnie jak pierwsza, korzeniami sięgała sto lat wcześniej. W końcu XVIII wieku Alessandro Volta, z zawodu inspektor szkolny, polemizując z Luigim Galvanim, lekarzem, położył na własnym języku dwa kawałki różnych metali (cyny i srebra) i poczuł „kwaśny smak”⁴. Powstało w ten sposób ogniwo *galwaniczne*. Poprzez ułożenie większej liczby monet (zob. ryc. 2.3) lub umieszczenie par metali (cynk-miedź) w serii szklanek – powstał stos, czyli bateria Volty. Dziś nadal wszystkie komputery i telefony komórkowe korzystają ze źródeł prądu (stałego) w postaci ogniw chemicznych, czyli ogniw Volty.

⁴ Doświadczenie to opisujemy w artykule A. Karbowski, G. Karwasz, *Na końcu języka (Volty)*, „Foton 96”, wiosna 2007.



Ryc. 2.3. a) Ogniwko Volty: ogniwo zbudowane z monet cynowych i srebrnych przekładanych kartonem nasączonym wodą, Muzeum w Como (fot. G.K.); **b)** schemat samochodowego akumulatora ołowiowego (<http://chemia.wpt.kpswjg.pl/semestr2/temat2/grafika/elektroda7.gif>)

Już w 1803 roku Gian Domenico Romagnosi, adwokat z Trydentu, zauważył wpływ prądu elektrycznego na igłę magnetyczną⁵. Minęło prawie 30 lat, zanim Michael Faraday, angielski samouk, znalazł sposób na wytworzenie prądu elektrycznego z pola magnetycznego. Rozwiązanie było proste: należy poruszać przewodnikiem w polu magnetycznym. Zjawisko to nazywamy indukcją elektromagnetyczną i stanowi ono dziś podstawę całej energetyki światowej. Ilość energii elektrycznej (10 TW) wytwarzanej przez elektrownie świata⁶ to aż połowa energii, jaka powstaje w całej skorupie i płaszczu Ziemi wskutek wszystkich zachodzących tam rozpadów promieniotwórczych.

Obie rewolucje z XIX wieku miały za słowa kluczowe „energię” i „pracę”. Mówimy o energii elektrycznej, cieplnej, jądrowej itd. Zaznaczmy jednak bardzo ważne stwierdzenie. Określenie „energia elektryczna” nie oznacza, że jest to jakiś specjalny typ energii – to jedynie jej „forma”. Tak jak formą wody (stanem skupienia) jest lód, ciecz i para wodna. Podobnie energia – zmienia jedynie formę. Nie powinniśmy więc mówić „produkcja” energii elektrycznej, ale przetwarzanie energii na jej formę elektryczną.

⁵ Doświadczenie zostało powtórzone w 1817 roku przez Hansa Christiana Ørstedą.

⁶ TW – terawatt, czyli milion milionów watów (10^{12} W).

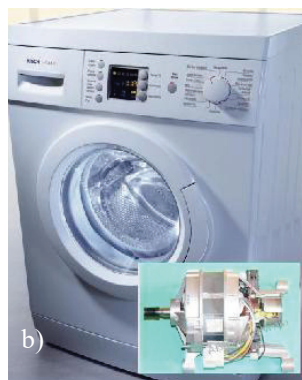
I z tym zastrzeżeniem dopuścimy określenia „wytwarzanie” energii, „zużycie” energii itd., mając na myśli różne *formy* energii.

James Prescott Joule w połowie XIX wieku, obserwując, jak grzeją się lufy armatnie podczas wiercenia, stwierdził, że praca zamienia się w ciepło. Zmierzył to, przeprowadzając stosowne doświadczenie. Czy ciepło również może zamienić się w pracę? Ależ oczywiście! Tak właśnie działają silniki parowe, benzynowe, wysokoprężne. Niestety, o ile cała praca może zamienić się w ciepło, nie całe ciepło może zostać zużyte na wykonanie pracy. Część z tego ciepła musi trafić do chłodnicy. Istnieje więc teoretyczna granica górnej wydajności silników cieplnych. Zależy ona od temperatury (w skali bezwzględnej, czyli w kelwinach K) źródła ciepła i chłodnicy. Odpowiednia zależność została przewidziana przez Nicolasa Léonarda Sadi Carnota w 1824 roku, młodego francuskiego naukowca⁷. Podobna teoretyczna granica istnieje dla ogniw fotowoltaicznych, nie tyle zależna od temperatury co od własności materiałów konstrukcyjnych dla tych ogniw: półprzewodników.

Dziś – w przededniu zastąpienia energetyki opartej na spalaniu ropy, węgla i gazu⁸ energetyką opartą na ogniwach fotowoltaicznych – kończy się siła napędowa pierwszej rewolucji naukowo-przemysłowej. Druga rewolucja, elektryczna, razem ze zdobyczami fizyki współczesnej jeszcze nam trochę posłuży. W trzeciej rewolucji, informatycznej – właśnie żyjemy. Zawdzięczmy ją fizyce XX wieku. O narodzinach fizyki współczesnej opowiemy w następnym paragrafie.

⁷ Zob. plakat dydaktyczny G. Karwasz *Chaud ou froid?* (Ciepło czy zimno?) na wirtualnej wystawie “On the track of the Modern Physics”, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/130.

⁸ Według prestiżowego czasopisma „Nature” z 2003 roku ludzkość skonsumowała już 50% istniejących zasobów ropy naftowej. Rosną z dnia na dzień odkrywane zasoby, ale ubywa tych łatwo dostępnych.



Ryc. 2.4. Zastosowania energii elektrycznej: **a)** toruński tramwaj z 1911 roku, obecnie turystyczny; **b)** silnik elektryczny pralki; pralka „zużywa” sporo energii elektrycznej – 2 kJ na sekundę, czyli ma moc 2 kW. Fot. Wikipedia (Mateuszgdynia); A. Kozłowska.

Pytania do samodzielnego studiowania:

1. Odnajdź w literaturze polskiej lub światowej, od Homera do Stanisława Lema, relacje z podróży. Co było środkiem podróży (statek, pociąg itd.)? Opisz, co było źródłem energii napędzającej ten środek i ile czasu, w przybliżeniu, zajmowało przejechanie/przeplnięcie określonej odległości.
2. Nanieś na skalę czasu punkty przełomowe zastosowaniach silników cieplnych: wynalazek Watta, pierwszą lokomotywę parową, pierwszy silnik benzynowy, pierwszy samolot, wodowanie „Titanica”.
3. Nanieś na skalę czasu punkty przełomowe w zastosowaniach prądu elektrycznego: wynalazek ogniwa Volty, odkrycie indukcji elektromagnetycznej, pierwszy tramwaj elektryczny, pierwsze oświetlenie elektryczne miasta w USA i Europie.
4. Podaj przykłady urządzeń korzystających z energii elektrycznej o mocy: setek miliwatów, pojedynczych watów, setek watów, pojedynczych kilowatów, setek kilowatów.
5. Znajdź w Internecie różne rodzaje ogniw elektrochemicznych (takich jak ogniwo Volty). Zidentyfikuj w każdym z nich, co jest katodą (czyli elektrodą ujemną), co jest anodą (czyli elektrodą dodatnią), w czym są umieszczone elektrody (czyli co jest elektrolitem).

Pytania na sprawdzian:

1. Opisz, na czym polegały dwie rewolucje przemysłowe oparte na odkryciach fizyki.
2. Podaj jednostki pomiaru energii, mocy, natężenia prądu i napięcia. Podaj przykładowe wartości mocy wybranych urządzeń korzystających z energii elektrycznej.

2.2. Narodziny fizyki współczesnej

Trudno określić dokładny moment narodzin fizyki współczesnej. Często podaje się wykład Maxa Plancka, profesora Uniwersytetu w Berlinie, na posiedzeniu niemieckiego Towarzystwa Fizycznego 5 grudnia 1900 roku. Na wykładzie tym Planck starał się wyjaśnić widmo⁹ tzw. ciała doskonale czarnego¹⁰. Widmo takiego „czarnego” ciała ma specyficzny rozkład – ciągły, jak kolory w tęczy przechodzące jeden w drugi. Światło słoneczne ma właśnie widmo ciągłe, przypominające świecące, rozgrzane czarne ciało: 45% jego energii przypada na zakres widzialny, 50% na dłuższe fale, tzw. promieniowanie podczerwone, a 5% na nadfiolet, zob. ryc. 2.5. Jak dowiemy się za chwilę, z kolorem światła związane są jego możliwe skutki fizyczne. Promieniowanie podczerwone wyczuwamy jako ciepło, widzialne powoduje chwilową zmianę konfiguracji chemicznej barwników w oku, a nadfioletowe może uszkodzić oko (i skórę) na trwałe.

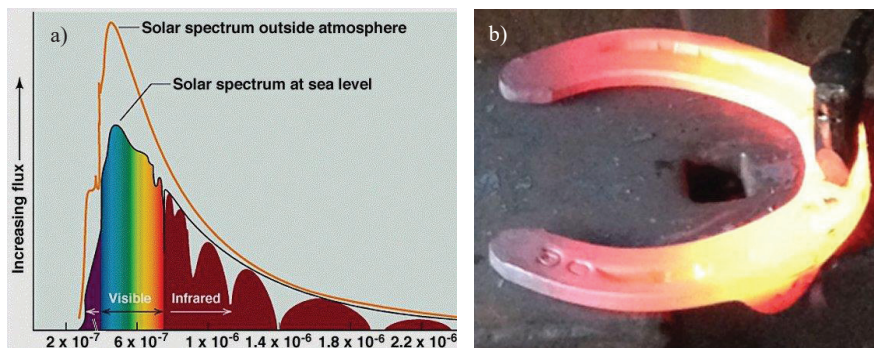
Wiadomo od „zawsze”, że im bardziej rozgrzane ciało, tym świeci bardziej na białło. Kowale od niepamiętnych czasów tak właśnie oceniają temperaturę kutego żelaza: wiśniowy kolor to około 700°C, jasnoczerwony to ponad 800°C, pomarańczowy to około 1000°C¹¹. Planck starał się tym obserwacjom nadać opis matematyczny, wychodząc z dwóch przesłanek:

⁹ Widmo, czyli zależność natężenia światła od długości fali, czyli koloru światła.

¹⁰ Ciało doskonale czarne to taka konstrukcja wymyślona dużego pudła z małym otworem. Otwór dla obserwatora na zewnątrz wydaje się całkowicie czarny. Źrenica oka jest bliską analogią.

¹¹ Zobaczymy w rozdziale 3, że astronomowie w analogiczny sposób oceniają temperaturę powierzchniowych warstw odległych gwiazd.

nauki o cieple (termodynamiki) i równań opisujących prawa elektromagnetyzmu, czyli praw Maxwella. Tym ostatnim wypada poświęcić dwa zdania.



Ryc. 2.5. Obserwacje leżące u podstaw rewolucji Plancka: **a)** widmo Słońca po przejściu przez atmosferę Ziemi; 10% energii światła Słońca przypada na nadfiolet, a 40% – na podczerwień, 50% to światło widzialne; **b)** kolory rozgrzanej podkowy.

Źródło: Ivan Pankov; Nure Aglio, za pozwoleniem

Na naszą wiedzę o elektryczności i magnetyzmie złożyły się stulecia obserwacji. Od starożytności wiadomo, że potarty bursztyn¹² przyciąga kurz, skrawki włosów itd. Oddziaływaniem magnesów zajmował się m.in. na początku XVII wieku Kartezjusz. Włoski adwokat Gian Domenico Romagnosi w 1803 roku, a za nim Hans Ørsted w 1817 roku stwierdzili, że prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne. Michael Faraday odkrył prawo indukcji, czyli wytwarzania prądu elektrycznego z pola magnetycznego. Fakty te, pozornie oddzielne, znalazły opis w prawach Maxwella. Ich prostota i ukryta symetria są tak piękne, że cytujemy je na ryc. 2.6.

Rozwiązanie równań Maxwella w taki sposób, jak to robimy w matematyce, tzn. poprzez wyznaczenie jednej niewiadomej i podstawienie do drugiego równania, dało wynik zaskakujący: pole magnetyczne i pole elektryczne mogą się cyklicznie zmieniać jedno w drugie i wędrować w przestrzeni. Na podstawie znanych stałych oddziaływań elektrycznych i magnetycznych wyliczono prędkość rozchodzenia się takich pól: wynikiem

¹² Bursztyn, po słowiańsku *jantar*, po grecku nosi nazwę *elektron*.

była znana prędkość światła, $c = 299\,792\,458$ m/s (czyli około **trzysta tysięcy kilometrów na sekundę**).



James Clerk Maxwell

Pan Bóg powiedział:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{I} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

I stało się światło!

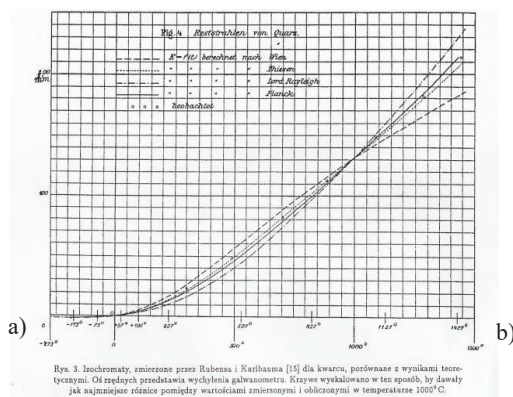
Ryc. 2.6. Prawa Maxwella w postaci tzw. różniczkowej. Odwrotność iloczynu stałych $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [SI] i $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ [SI] jest równa kwadratowi prędkości światła w próżni, $1/\mu_0 \epsilon_0 = c^2$. Nie musisz tych równań rozumieć, ale dzięki nim mamy telefony komórkowe, radio i TV, jak również światło.

Natychmiast podjęto poszukiwania fal elektromagnetycznych. W 1887 roku w Getyndze młody asystent Heinrich Hertz zauważył mikroskopijny przeskok iskierek między dwoma metalowymi kulkami, gdy w pobliżu wywołał przeskok iskry między innymi kulami. Fale elektromagnetyczne, a przez to poprawność równań Maxwella, zostały potwierdzone! Nie było wiadomo, czy do ich rozchodzenia się jest potrzebny jakiś ośrodek (zwany eterem), ale to już inna historia, do której wrócimy przy okazji astrofizyki.

Max Planck starał się „pogodzić” równania Maxwella z zasadami emisji energii przez rozgrzane ciała. Już w październiku 1900 roku uzyskał niezłą zgodność z doświadczeniem, zob. ryc. 2.7. Niestety, w zakresie światła podczerwonego zależność nie była zadowalająca. W referacie w grudniu 1900 roku Planck przyjął następującą hipotezę¹³: założył, że energia jest

¹³ Przez *hipotezę* rozumiemy stwierdzenie założone, ale nie dość dobrze udowodnione. Wyższym szczeblem pewności jest *teoria*, która daje również przepis

emitowana w ściśle określonych porcjach (kwantach) przez elementarne drgające minianteny wewnątrz czarnego pudła. Wielkość tych porcji, niesionych przez fale elektro-magnetyczne tak wyemitowane, byłyby zależna jedynie od częstotliwości fali ν (czytaj: ni) lub równoważnie – od długości fali λ , czyli od koloru światła.



6. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwell'schen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwell'schen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Rauffunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwell'schen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Ryc. 2.7. Dwie prace, które leżą u podstaw fizyki kwantowej: **a)** publikacja Plancka nt. widma ciała doskonale czarnego („Annalen der Physik” 1901, vol. 4, s. 553) – wykres przedstawia różne teorie porównane z danymi doświadczalnymi¹⁴; **b)** fragment artykułu Alberta Einsteina („Annalen der Physik” 1905, vol. 17, s. 132) nt. efektu fotoelektrycznego – niemożliwe było wyjaśnienie tego zjawiska bez założenia, że atomy pochłaniają energię światła w postaci ściśle określonych porcji, zależnych jedynie od koloru światła; porcje te nazywane fotonami.

Opisujemy to prostym wzorem:

$$E = h \cdot \nu \quad (2.8)$$

gdzie E jest energią fotonu, a ν jego częstotliwością. Im wyższa częstotliwość (czyli mniejsza długość fali), tym większą energię niesie jeden

doświadczalny na jej sprawdzenie. Znamienne jest rozgraniczenie między hipotezą a teorią, jaką uczynił św. Jan Paweł II, gdy pisał: „ewolucja, do niedawna mająca charakter jedynie hipotezy, w ostatnich latach przyjęła znamiona teorii”, *Message to the Pontifical Academy of Sciences: On evolution*, 22 października 1996.

¹⁴ A. Kiejna, *Stulecie wzoru i stałej Plancka*, „Postępy Fizyki” 2000, vol. 51 (6), s. 294.

„kwant” światła. Zależność Plancka wyjaśnia m.in., dlaczego światło nadfioletowe jest niebezpieczne dla skóry człowieka, a światło widzialne, nawet intensywne – nie: kwanty nadfioletowe niosą dość energii do „pocięcia” DNA na kawałki.

Stała Plancka h , przypuszczalnie taka sama w całym Wszechświecie, jest bardzo ważna; jest pokazana przy wejściu do Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, zob. ryc. 2.8a.

Energię fotonów obliczamy ze wzoru:

$$E = h \cdot \nu,$$

gdzie ν jest częstotliwością światła, obliczaną z okresu drgań fali za pomocą wzoru:

$$\nu = \frac{1}{T} \tag{2.9}.$$

Związek między częstotliwością światła a długością fali światła jest bardzo prosty:

$$\lambda = c \cdot T \tag{2.10}$$

Gdzie $T = \frac{1}{\nu}$ jest okresem drgań fali świetlnej, a c – prędkością fali.

Związek (2.10) przypomina wzór na drogę w ruchu jednostajnym $s = vt$, jest więc łatwy do zapamiętania.

Dla światła fioletowego na granicy widzialności dla oka ludzkiego (długość fali 380 nm) energia kwantów wynosi 3,26 eV, a dla światła czerwonego na granicy widzialności (760 nm) energia równa się 1,61 eV. Dla porównania jednostek energia odłączenia jednej grupy OH w cząsteczce glukozy wynosi (w próżni, poprzez przyłączenie elektronu) 2,0 eV. Energia ta jest niższa w środowisku wodnym (około) 1,2 eV.

Hipoteza kwantów energii światła, czyli fotonów, była tak rewolucyjna, że sam Planck jeszcze w 1916 roku nie chciał używać słowa „foton”. Podejrzewaliśmy od czasów Demokryta, że materia może składać się

z niepodzielnych części zwanych atomami¹⁵. Nie spodziewaliśmy się, że światło również jest wymieniane (wysyłane i absorbowane) w postaci minimalnych porcji. Któryś z fizyków przyrównał ideę kwantów światła do zakupów cukru sprzedawanego nie w małych torebkach, a jedynie w 10-kilogramowych blokach¹⁶.



Ryc. 2.8. a) Stała Plancka w symbolu Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu; dokładna znajomość stałej Plancka ma zasadnicze znaczenie dla całej fizyki; **b)** kwanty w życiu codziennym: cukier można kupić w postaci kwantu 1 kg lub, w barze, 5 g. Fot. M.K.; A.Kozłowska.

Z obserwacji, że światło jest wyświecane (emitowane) lub absorbowane w ściśle określonych porcjach, wynikają niezwykle ważne konsekwencje nie tylko dla fizyki, ale nawet dla tak prostych rzeczy, jak kolory otaczających nas przedmiotów i zjawisk. Na ryc. 2.9 przedstawiamy wagę z berlińskiego straganu ze starociami. Oglądana w świetle przechodzącym jest ona czerwona, ale niebieskawa po bokach. Te dziwne kombinacje kolorów wynikają z obecności bardzo małych (rzędu kilkuset atomów) skupisk

¹⁵ Z kolei sam A. Einstein nie wierzył w możliwość obserwacji *atomów*, rzecz elementarną dzięki nowym osiągnięciom fizyki (np. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/high_performance_stm_1_300.jpg)

¹⁶ Rzeczywiście, jeszcze pod koniec XIX wieku cukier był rozprowadzany nie w kilogramowych torebkach, ale w postaci wielkich bloków, tzw. głów cukru. Ważyły one nawet 5 kilogramów.

złota w szkłe. Te skupiska atomów absorbują światło w szerokim zakresie kolorów, ale odsyłają (emitują) światło o ściśle określonej energii – światło niebieskie. Przez cały nasz podręcznik zagadnienia porcji (kwantów) energii będą się przewijały.



Ryc. 2.9. Waza według tajnej recepty z Berlina z XVIII wieku na produkcję szkła rubinowego; waza jest czerwona w świetle przechodzącym, ale z niebieskimi odcieniami po bokach; jest to przykład zjawisk kwantowych w absorpcji i emisji światła (eksponat i fot. G.K.)

Pytania kontrolne:

1. Wyjaśnij, na czym polegała hipoteza Plancka i w jakim celu ją poczynił?
2. Podaj zależność długości fali od jej częstotliwości.
3. Podaj wzór na energię kwantów światła.
4. Ile wynosi prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych (Maxwella) w próżni.

2.3. Efekt fotoelektryczny i dwoista natura światła

Albert Einstein odkrył teorię względności (słynne równanie $E = m \cdot c^2$), ale Nagrodę Nobla otrzymał za wspomniany w poprzednim paragrafie efekt fotoelektryczny. Na czym on polega i jakie ma znaczenie?

Ogólnie efekt ten polega na wybiciu elektronu z atomu przez padający kwant światła. Efekt ten został zaobserwowany na samym początku XX wieku¹⁷: światło padające na płytkę z cynku wybijało z niej elektrony i powodowało przepływ prądu¹⁸. Trudne do zrozumienia było to, że energia wybitych elektronów nie zależała od natężenia światła, a jedynie od jego *koloru*. Na ryc. 2.10. przedstawiono współczesną wersję tego doświadczenia z Muzeum Nauki w Monachium¹⁹. W tej wersji światło podczerwone nie powoduje przepływu prądu, a czerwone, nawet słabe – tak! „To jakby w porcie kołysał się delikatnie na łagodnej fali rząd statków. Nagle, niespodziewanie jeden ze statków jest wyrzucany na kilkanaście metrów w górę, a pozostałe kołyszą się, jak gdyby nigdy nic” – określił to jeden z fizyków.

Analogia z jachtami nie jest zbyt dokładna – elektrony zostają wybite z atomu, jeżeli długość fali jest *mniejsza* niż ściśle określona wartość (czyli energia fotonów jest dostatecznie duża, zgodnie ze wzorem 2.8). Zaskakujące pozostaje jednak, że zwiększanie *natężenia* światła, ale o energii kwantów zbyt niskiej, nie spowoduje wybicia ani jednego elektronu, mimo że sumaryczna energia wszystkich fotonów jest duża. Efekt fotoelektryczny to taki bilard z dwoma kulami: padający foton „uderza” w elektron, sam znika (= zostaje pochłonięty), a jego energię przejmuje wybity elektron.

W powyższym zdaniu zawarta jest istota odkrycia Einsteina. Należy jedynie zauważyć, że aby wybić elektron, należy mu dostarczyć energię, z jaką jest on związany w atomach metalu²⁰. Nadmiar tej energii zamienia się w energię kinetyczną E_{kin} elektronu. Zapisujemy to w postaci:

$$E_{kin} = h \cdot \nu - W \quad (2.11)$$

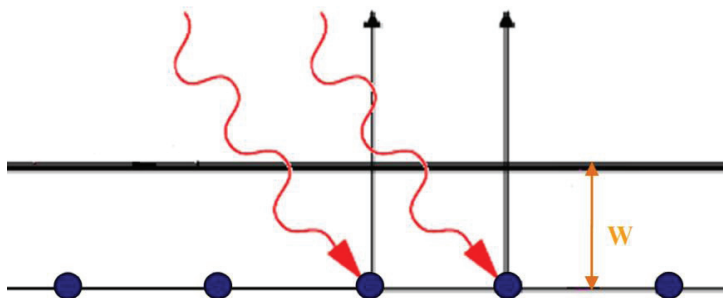
W nazywamy tradycyjnie „pracą wyjścia” – jest to właśnie ta minimalna energia potrzebna, aby elektron wyrwać z powierzchni metalu.

¹⁷ Odkrywcą efektu fotoelektrycznego w 1902 roku był niemiecki fizyk Philipp Lenard.

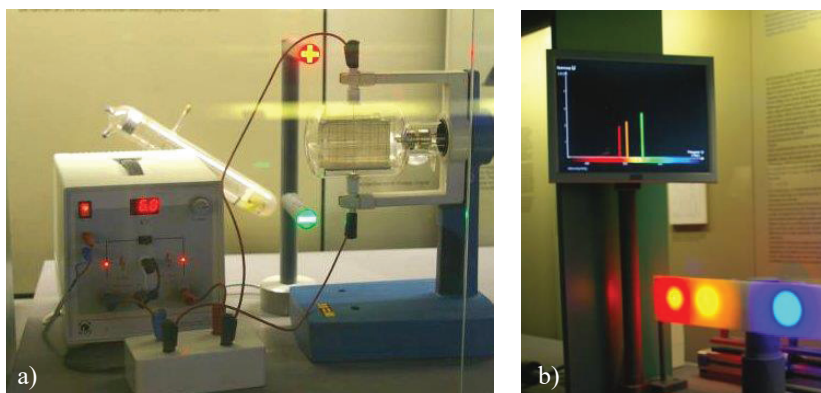
¹⁸ Płytkę cynkową znajdowała się w szklanej bańce, w której wytworzono próżnię.

¹⁹ Muzeum Nauki w Monachium, <http://www.deutsches-museum.de/>

²⁰ Do zagadnienia energii wiązania wrócimy wielokrotnie, choćby przy omawianiu ruchu elektronów w atomie wodoru i planet w Układzie Słonecznym.



Ryc. 2.10. Schemat zjawiska fotoelektrycznego. Źródło: G.K.



Ryc. 2.11. Współczesna wersja doświadczenia fotoelektrycznego Philippa Lenarda (Muzeum Nauki w Monachium): **a)** światło o różnych długościach fali (czyli różnych kolorach) wyrzuca elektrony z płytki metalowej, zamkniętej w opróżnionej z powietrza szklanej bańki, woltomierz zaś mierzy energię wyrzucanych elektronów; **b)** komputer wykreśla energię elektronów w zależności od częstotliwości fali światła (czyli od odwrotności długości fali) – wykres jest liniowy, zgodnie ze wzorem Einsteina, równanie (2.11). Fot. G.K.

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.

Doświadczenie:

Nawet w klasie możesz wykonać natychmiast proste doświadczenie. Weź jakiegokolwiek „pilota” – od telewizora, projektora, radia. Skieruj go na własne oko. Widzisz sygnał?

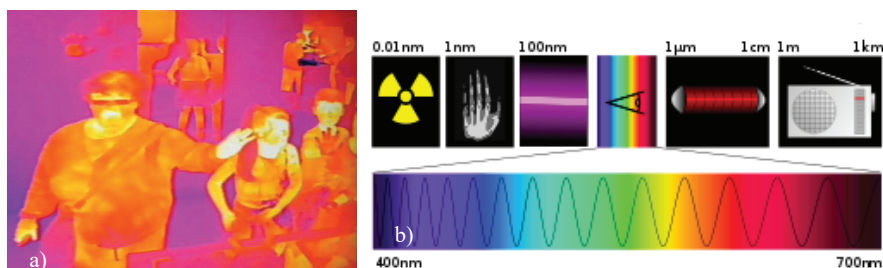
Skieruj go teraz na kamerę twojego telefonu komórkowego. Prawda, że kamera ta widzi światło pilota? Jak to się dzieje? Dlaczego wszystkie kamery widzą sygnały wysyłane przez pilota, i to całkiem wyraźnie, a oko ludzkie, nawet w zupełnej ciemności – nie?

Bez teorii kwantów mielibyśmy spore kłopoty z wyjaśnieniem tego zjawiska. W teorii kwantów jest to elementarnie proste: otóż pilot emituje światło podczerwone, o energii poniżej 1,5 eV. Energia kwantów jest zbyt niska, aby wybić elektrony z siatkówki oka ludzkiego. Jest ona natomiast wystarczająca, aby wybić elektrony z krzemowej²¹ płytki w kamerze telefonu komórkowego.

Okazuje się, że światło podczerwone, czyli o długości fali większej niż 760 nm, „widzą” żmije. Korzystają one ze swej pozornej niedoskonałości w stosunku np. do ssaków. Gady, czyli również żmije, są zmiennocieplne, tzn. ich ciało przyjmuje temperaturę otoczenia. Ssaki, czyli np. myszy, mają stałą temperaturę ciała, zazwyczaj znacznie (o 10–15°C) wyższą niż temperatura otoczenia. W świetle podczerwonym myszy „świecą”, na ryc. 2.12a zobacz, jak w podczerwieni „świecą” widzowie zwiedzający Centrum Nauki „Hewelium” w Gdańsku. Żmije mają na pysku, pod oczyma, specjalne plamki-czujniki podczerwieni – precyzyjnie potrafią „namierzyć” źródło ciepła. Mysz więc zimnej żmii nie widzi, żmija mysz – tak!

Światło widzialne przez człowieka to zakres **380–760 nm**. Jak widzisz z wykresu, nie jest to dużo w stosunku do szerokiego zakresu fal elektromagnetycznych, ale w tym zakresie przypada aż 50% natężenia światła słonecznego.

²¹ W rzeczywistości półprzewodniki użyte w kamerze mogą być znacznie bardziej skomplikowane niż krzem, ale nie zmienia to natury procesu.

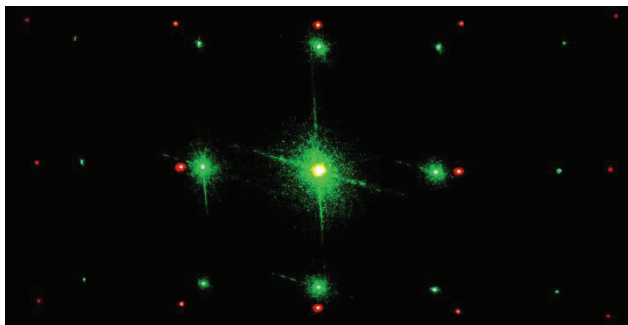


Ryc. 2.12. a) Kamera na podczerwień w Muzeum Nauki w Londynie (fot. M.K.); **b)** długości fal odpowiadające różnym zakresom (i zastosowaniom) promieniowania elektromagnetycznego (Wiki)

Z kolei światło o długości fali poniżej 380 nm (albo, co jest równoważne, o energii większej niż 3,2 eV) jest widziane np. przez pszczoły. Ten zakres fal nazywamy promieniowaniem nadfioletowym. Kwanty promieniowania nadfioletowego niosą wyższą energię niż światło widzialne. Energia ta jest dostatecznie duża, aby np. pociąć spiralę DNA ludzkiego. Światło nadfioletowe powodować może więc raka. Statystyki medyczne mówią, że aż 50% Polaków powyżej 60. roku życia ma zmiany przedrakowe na skórze, związane z nadmiernym opalaniem się.

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. O ile powstawanie kolorów w pryzmacie da się wyjaśnić za pomocą teorii Newtona, powstawanie kolorów w bańce mydlanej czy w „tęczowych” okularach²², wymaga teorii falowej światła. Nie będziemy wchodzić w szczegóły wyjaśnienia, ale ogólnie okulary dyfrakcyjne, podobnie jak płyta CD, to szereg regularnych nacięć położonych blisko siebie (kilkaset na milimetr). Światło na tych nacięciach ugina się jak fala na jeziorze, gdy spotka przeszkodę.

²² G.K. *Okulary chromatyczne*, „Fizyka zabawek”, dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/optyka/okulary.html

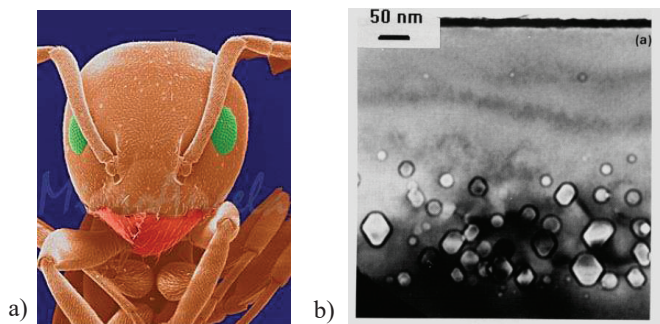


Ryc. 2.13. Światło lasera czerwonego i zielonego po przejściu przez siatkę dyfrakcyjną ulega ugięciu pod ściśle określonymi kątami (tu tworzy krzyże, bo siatka miała nacięcia w formie krzyży). Kąt ugięcia światła na siatce zależy od długości fali – plamki zielonego lasera ($\lambda=500$ nm) położone są bliżej plamki centralnej (światła nieugiętego) niż światło lasera czerwonego ($\lambda=700$ nm). Fot. K.S.

W zjawiskach ugięcia (dyfrakcji) na płycie CD lub w okularach dyfrakcyjnych światło uwidacznia swoją falową naturę. Nie ma możliwości wyjaśnienia ugięcia światła za pomocą teorii korpuskularnej, chyba że ją bardzo skomplikujemy (np. nie cząstki, ale jakieś wirujące hantle). Z kolei nie ma sposobu na wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego (i paru innych z udziałem światła i atomów, np. rozpraszania fotonów gamma na elektronach – tzw. zjawiska Comptona) bez założenia, że światło to kwanty energii.

Czym jest więc światło? Cząstką czy falą? Zagadnienie to przypomina nieco pytanie, jak wygląda polska moneta 1 zł. Zależy, z której strony patrzeć: orzeł lub reszka!

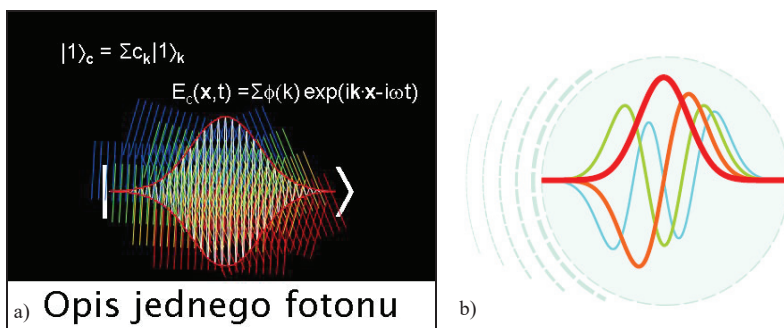
W fizyce jest podobnie: w niektórych doświadczeniach światło ujawnia naturę falową, w innych – korpuskularną. Co więcej, nawet elektrony kreślące obraz w kineskopie telewizyjnym w pewnych doświadczeniach też zachowują się jak fale. Tak działa np. mikroskop elektronowy, pozwalający na oglądanie pojedynczych atomów, zob. ryc. 2.14.



Ryc. 2.14. a) Głowa mrówki; obraz uzyskany za pomocą skannigowego mikroskopu elektronowego SEM. Mikroskop elektronowy pozwala na obserwację dziur wielkości kilkudziesięciu atomów (zdjęcia SEM są monochromatyczne). Prezentowane zdjęcie zostało pokolorowane w programie graficznym. Źródło: © Micro Angela, Hawaii University, za zezwoleniem; **b)** obraz nanoskupisk helu w kryształach krzemu (źródło: V. Raineri, i in., J. Appl. Phys. 1995, vol. 78, s. 3727). Powyższe obrazy powstały, ponieważ elektrony w elektronowych mikroskopach zachowują się jak fale.

Dla ciekawych

Ale jak pogodzić dwoistą naturę światła w sposób fizyczny? Pokazali to młodzi doktoranci w Instytucie Fizyki UMK w 2007 roku. Fala (Maxwella) opisująca jeden kwant światła to taki pojedynczy impuls, zob. ryc. 2.15.



Ryc. 2.15. a) Pomiar kształtu pojedynczego fotonu metodą „rzutu na kota”, wykład ZDF UMK, 2008 **b)** obwiednia pojedynczego fotonu („Źródła fotonów w łączności kwantowej”, W. Wasilewski²³).

Pytania kontrolne:

1. Jaki jest zakres (w jednostkach długości fali) światła widzialnego (przez człowieka)?
2. Wyjaśnij, co to jest światło podczerwone.
3. Wyjaśnij, dlaczego nadmierne opalanie się jest szkodliwe dla zdrowia. Ile wynosi (w jednostkach eV) granica między światłem widzialnym a nadfioletowym?
4. Czy potrafisz wyjaśnić, co to jest foton?
5. Co to jest efekt fotoelektryczny? Jeśli praca wyjścia wynosi 2 eV, a światło nadfioletowe o określonej długości fali ma energię 3,8 eV, to z jaką energią kinetyczną są emitowane elektrony w zjawisku fotoelektrycznym?

2.4. Spektroskopia, czyli nauka o duchach

Zależność natężenia światła od długości fali światła nazywamy widmem, po angielsku *spektrum*²⁴. Słowo to pojawiło się w 1704 roku w traktacie Newtona „Opticks”²⁵, kiedy opisywał kolory powstające z rozdzielenia światła białego na poszczególne kolory za pomocą pryzmatu. Widmo to nie światło, ale rodzaj jego obrazu. Spektroskopia to badanie widm. Stąd żart w tytule tego rozdziału – widmo to nie światło, ale jego obraz, tak jak widmo w języku potocznym, to nie osoba, ale jej „pozostałość”.

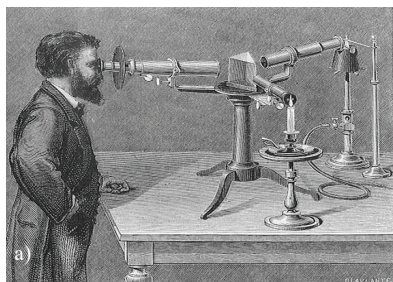
W połowie XIX wieku udoskonalono urządzenia do analizy widm światła, wyposażając je oprócz pryzmatu w dwie lunetki pozwalające na ogniskowanie światła, ryc. 2.16. Poprzez obserwacje świecenia gazów

²³ Zob. też W. Wasilewski i in., *Spectral density matrix of a single proton measured*, „Physical Review Letters” 2007, vol. 99, s. 123601.

²⁴ Słowo *spektrum* nie pochodzi z greki, podobnie jak większość słów naukowych. *Spektrum* pochodzi z łaciny i oznacza obraz, wyobrażenie, rzeźbę itp.

²⁵ I. Newton, <http://www.gutenberg.org/ebooks/33504>

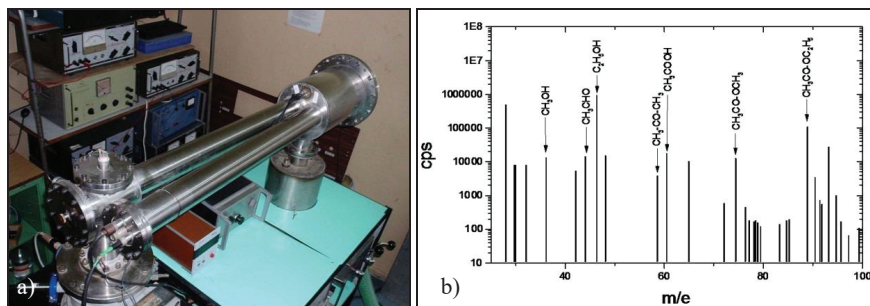
(przez które przepływał prąd elektryczny) odkryto nowe substancje (gazy szlachetne). Zauważono, że nawet w widmie Słońca występują wąskie linie. Tak odkryto nowy gaz szlachetny – hel. Dopiero później stwierdzono jego obecność np. w gazie ziemnym.



Ryc. 2.16. a) Spektroskop Kirchhoffa (źródło: Krüss Optronics); **b)** spektroskop służy do otrzymywania i analizowania widm promieniowania świetlnego (od podczerwieni do nadfioletu); składa się z poziomej tarczy z podziałką kątową, w środku której umieszczony jest pryzmat, lunety obracanej wokół tarczy oraz kolimatora wyposażonego w źródło światła (UMK, fot. A.K.)

Mówiąc ogólniej, widmem możemy nazwać wiele innych zależności fizycznych. W analizie chemicznej złożonych mieszanin badamy obfitość poszczególnych związków chemicznych w zależności np. od ich masy. Zależność taką nazwiemy „widmem masowym”. Związki chemiczne to układy atomów, a masa atomu jest ściśle określona. Mierzmy ją często w tzw. jednostkach atomowych, czyli w jednostce przybliżonej do masy atomu wodoru²⁶. Widmo masowe nie jest więc widmem ciągłym jak widmo światła słonecznego, ale widmem składającym się z pojedynczych „prążków”, zob. ryc. 2.17. Mówimy, że takie widmo jest dyskretne. Widmo masowe drobin w fazie gazowej składających się na zapach truskawek jest widmem dyskretnym.

²⁶ Dokładniej jednostką masy atomowej jest masa $1/12$ masy atomu węgla, który zawiera w jądrze 6 protonów i 6 neutronów, czyli tzw. węgla ^{12}C .

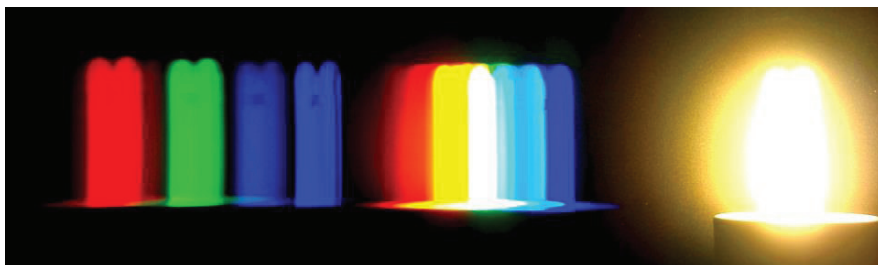


Ryc. 2.17. a) Spektrometr masowy, pozwalający mierzyć ilość określonych związków chemicznych w zależności od ich masy (PAP Słupsk, G.K.); **b)** widmo masowe „zapachu truskawek” – ilość zliczeń jonów w zależności od stosunku ich masy do ładunku; najwięcej w tej woni jest „zapachu” alkoholu etylowego i kwasu octowego, ale sporo jest też różnego rodzaju estrów, czyli aromatycznych związków powstających z kwasów organicznych i alkoholi (courtesy: P. Tosi, Uniwersytet Trento)

Okazuje się, że widmo ciągłe, jak to słoneczne, jest szczególnym przypadkiem widma. Źródłem światła słonecznego są powierzchniowe rozgrzane warstwy Słońca, stanowiące dobre przybliżenie ciała „doskonale czarnego” w modelu Plancka. Co więcej, z modelu tego możemy dokładnie określić, jakiej temperaturze odpowiada wspomniane widmo – Planck podał ścisłą zależność matematyczną natężenia światła od długości fali dla danej temperatury promieniującego ciała. Stąd wiemy, jaka jest temperatura powierzchni Słońca bez wysyłania tam sond kosmicznych.

We wzorze Plancka (znajdziesz go w Internecie) występują tylko stałe matematyczne i fizyczne. Natężenie światła we wzorze Plancka zależy wyłącznie od temperatury ciała (wyrażonej w skali bezwzględnej, czyli w kelwinach, $0^\circ\text{C} \approx 273\text{K}$). Im wyższa temperatura ciała, tym maksimum widma przesuwają się bardziej w kierunku światła niebieskiego, jak to pokazaliśmy na ryc. 2.5. Temperatura powierzchniowych warstw Słońca (tzw. fotosfery) to 5750 K, a światło ma maksimum w okolicach długości fali 500 nm, czyli jest koloru zielonego (450–560 nm). Światło żarówki z włóknem wolframowym wydaje się nieco czerwone w porównaniu ze światłem słonecznym. Rzeczywiście, temperatura włókna wolframowego w żarówce nie przekracza 3000 K.

Widmo „żarówki” energooszczędnej jest już zupełnie inne: nie ma charakteru ciągłego. Brakuje w nim niektórych kolorów, zob. ryc. 2.18.



Ryc. 2.18. Widmo żarówki energooszczędnej, uzyskane za pomocą siatki dyfrakcyjnej; ma ono charakter dyskretny – oddzielnych linii, brakuje w nim np. koloru żółtego, pomarańczowego i fioletowego. Na zdjęciu obraz żarówki rozdziela się wyraźnie na poszczególne kolory składowe dopiero w drugim rzędzie dyfrakcji. Fot. K. Służewski.

Dlaczego atomy na powierzchni Słońca (lub we włóknie żarówki) emitują światło o widmie ciągłym, a podobne atomy w bańce żarówki energooszczędnej emitują pojedyncze kolory? Otóż w metalu (lub na powierzchni Słońca) atomy są ułożone gęsto i wzajemnie ze sobą oddziałują; w gazie atomy są swobodne. Odkrywamy w ten sposób bardzo ważne prawo: **pojedyncze atomy emitują widma dyskretna**²⁷.

Doświadczenie

Obejrzyj przez siatkę dyfrakcyjną zwykłą żarówkę, żarówkę energooszczędną, lampkę LED w jakimkolwiek wyświetlaczu. Zauważ, czy pojawiają się dodatkowe kolory składowe. Dokonujesz w ten sposób analizy widma.

Widmo światła emitowanego zależy od rodzaju atomu. Widmo jest swego rodzaju odciskiem linii papilarnych atomu. Badania widm poczyniły rewolucję najpierw w chemii, później w fizyce. W widmie Słońca odkryto

²⁷ Dokładniej należałoby powiedzieć, że to nie atomy, ale poruszające się w nich *elektrony* emitują światło. Do tego zagadnienia wrócimy nieco dalej.

linie nieznanego pierwiastka, który to nazwano helem²⁸. W widmie powietrza odkryto nowy gaz, argon, którego jest całkiem sporo (1%). W widmie argonu wydzielonego z powietrza odkryto z kolei dwa nowe pierwiastki: krypton (= ukryty) i ksenon (= obcy). Jest ich znacznie mniej niż argonu, też należą do grupy gazów szlachetnych, ale są od argonu cięższe. Pięknym czerwonym światłem świeci kolejny, lekki gaz szlachetny – neon²⁹, zob. ryc. 2.19. Nawet w sztucznych ogniach (lub płomieniu gazowego palnika) możemy zidentyfikować poszczególne pierwiastki chemiczne – na karminoowo świeci rubid, na zielono – miedź, na żółto – sód.

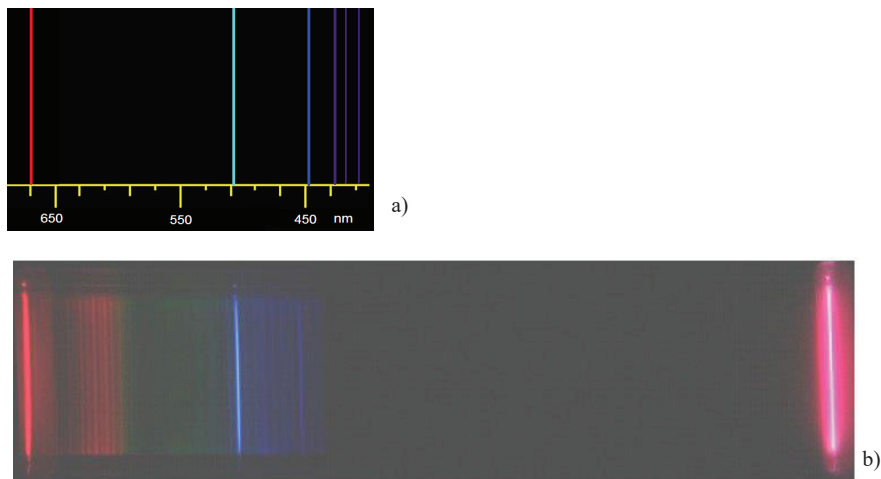


Ryc. 2.19. „Neon” – artystyczna aranżacja na Potsdamer Platz w Berlinie. Czerwone koła roweru zawierają (zapewne) gaz szlachetny, neon. Fot. M.K.

Najprostsze możliwe widmo ma najlżejszy pierwiastek chemiczny, wodór. Widmo atomowego wodoru (H) w zakresie widzialnym składa się jedynie z 4 wąskich linii, zob. ryc. 2.20.

²⁸ Dopiero później odkryto hel również na Ziemi. Całkiem sporo jest go w gazie ziemnym – tworzy się w skorupie ziemskiej wskutek rozpadów radioaktywnych. Do zagadnienia helu wrócimy jeszcze wielokrotnie.

²⁹ Tak zwana lampa neonowa, a dokładniej „światłówka” nad twoją głową w klasie, zazwyczaj nie zawiera neonu, a jedynie argon i pary rtęci.



Ryc. 2.20. Widmo wodoru: **a)** obliczone – na zakres widzialny przypadają 4 linie, piąta jest na granicy nadfioletu; na skali poziomej – długość fali w nm; przedstawiamy tę skalę według malejącej długości fali, co odpowiada rosnącej energii kwantów; **b)** rzeczywiste widmo doświadczalne uzyskane z pomocą sitaki dyfrakcyjnej – linie fioletowe są trudne do uchwycenia nie tylko z uwagi na małe natężenie, ale również z uwagi na trudności kamery i druku w *poprawnym oddaniu kolorów*; skala pozioma w obu rysunkach jest inna; w widmie doświadczalnym ostatni prążek z prawej strony to obraz lampy „w zerowym rzędzie dyfrakcji”, czyli bez podziału na kolory; w widmie doświadczalnym widoczne są dodatkowe pasma spowodowane obecnością, obok wodoru atomowego H, również wodoru cząsteczkowego H₂. Fot. K. Służewski.

Widmo wodoru uderza regularnością położenia prążków: aż dziwne, że do 1878 roku nikt nie odgadł właściwej zależności matematycznej między położeniami prążków. Udało się to dopiero Johannowi Balmerowi, nauczycielowi geometrii w liceum w Bazylei (Szwajcaria). Miał on zamiłowanie do łamigłówek matematycznych. Na jego cześć serię prążków w wodorze (atomowym) w zakresie widzialnym nazywamy serią Balmera. Kolejne serie widmowe wodoru, poza zakresem widzialnym, nazwano na cześć fizyków, którzy je odkryli.

Wzór Balmera jest prosty do odgadnięcia – prążki są położone coraz bliżej siebie, w miarę wzrostu częstotliwości fali ν (czyli malejącej długości fali λ), gdyż przypominamy:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (2.12)$$

Dysponując już wzorem Plancka na energię fotonów, możemy wydedukować wzór (ważny!) na położenie poszczególnych prążków w widmie wodoru, poczynając od prążka czerwonego.

$$E = h\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (2.13)$$

gdzie R jest pewną stałą, a $n = 3, 4, 5$ itd.

Prążkowi czerwonemu przypisujemy liczbę $n = 3$, niebieskiemu $n = 4$ itd.

Ile wynosi stała R i dlaczego tak numerujemy linie w serii Balmera, opowiemy w następnym paragrafie.

Pytania kontrolne:

1. Podaj wzór na energię fotonów światła w serii Balmera (czyli dla atomowego wodoru w zakresie widzialnym).
2. Wymień gazy szlachetne odkryte dzięki analizie widmowej.
3. Podaj jednostkę miary masy cząsteczek wygodną do użycia w chemii.
4. Ile wynosi, wydedukowana z analizy widma, temperatura fotosfery Słońca?

2.5. Model Bohra struktury atomu

Model Bohra, obok hipotezy Plancka i prac Einsteina, jest przykładem niezwykle odważnego pomysłu w historii fizyki. Pozwolił on na poznanie natury fizycznej (a nie tylko zależności matematycznej) zagadkowego nieco wzoru (2.13) na serie widmowe wodoru, jak np. seria Balmera. Model Bohra jest drugim, obok pracy Plancka z 1900 roku, filarem fizyki kwantowej – wyjaśnił on budowę atomu wodoru.

W okresie między 1900 a 1913 rokiem w widmie wodoru dokonano kolejnych odkryć – w 1906 roku Theodore Lyman badał linie w nadfiolecie, a w 1908 roku Friedrich Paschen zaobserwował serię linii w podczerwieni. Badano również widma gwiazd i stwierdzono nowe linie widmowe.

Niels Bohr – Duńczyk, w 1913 roku młody doktorant w Manchesterze, w Anglii – próbował wyjaśnić wzór na energię fotonów w widmie wodoru. Model atomu wodoru wzorował na modelu Kopernika. Jak w Układzie Słonecznym lżejsze planety krążą wokół masywnego Słońca, tak w atomie – lżejsze, ujemnie naładowane elektrony krążą dookoła ciężkiego, dodatnio naładowanego jądra³⁰. W przypadku Ziemi przyciągającą siłą jest siła grawitacji Słońca; to ona pełni rolę siły dośrodkowej. W modelu Bohra rolę tę odgrywa przyciągająca siła oddziaływania *elektrycznego* między jądrem a elektronem. Model tak uderza prostotą, że wydaje się niezrozumiałe, dla czego nikt go wcześniej nie zaproponował.

Model Bohra miał jedną niespójność: w rozumieniu równań Maxwella taki atom nie byłby stabilny. Dlaczego? Otóż, jak wynikało to z doświadczenia Hertza, ładunek elektryczny poruszający się ruchem przyspieszonym emituje fale elektromagnetyczne. W 1896 roku stwierdzenie to zostało potwierdzone również pierwszą transmisją radiową, czyli wykorzystującą fale elektromagnetyczne. Jeżeli poruszający się ładunek emituje fale elektromagnetyczne, traci energię; jeśli traci energię, to spowalnia, maleje siła odśrodkowa i elektron spadnie na jądro.

Przypomnijmy wzór na siłę odśrodkową:

$$F = \frac{mv^2}{r}, \quad (2.14)$$

gdzie m jest masą elektronu, v – jego prędkością na orbicie, a r – promieniem tej orbity.

³⁰ Jak to powiemy jeszcze w dalszej części *Poręcznika*, masa elektronu to tylko 1/1837 część masy jądra wodoru, czyli protonu. Istnienie ciężkiego jądra w atomie zostało odkryte w 1914 roku przez Ernesta Rutherforda, pracującego wówczas w Manchesterze.

Siła ta w stabilnym atomie musi być równoważona przez siłę Coulomba przyciągania elektrycznego między elektronem a protonem:

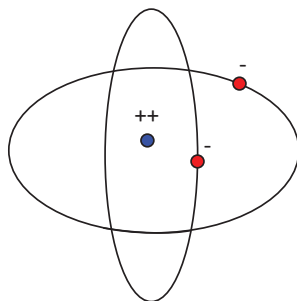
$$F = \frac{ke^2}{r^2} \quad (2.15)$$

gdzie e jest ładunkiem elektronu $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$, r – promieniem orbity (nadal nam nieznanym), a stała $k = 9 \cdot 10^9$ w jednostkach SI $[\frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}]$.

Niels Bohr³¹ sformułował – nieco podobnie jak Newton i Kepler swoje prawa – trzy postulaty dotyczące atomu wodoru:

1. Elektrony krążą po orbitach (eliptycznych) wokół jądra.
2. W określonych warunkach orbity są stabilne.
3. Światło (fala elektromagnetyczna) jest emitowane w trakcie przeskoku z orbity dalszej (energetycznie wyższej) na orbitę bliższą jądra (energetycznie niższej).

W trzecim postulatcie Bohr założył do swoich obliczeń, że częstotliwość emitowanego światła jest równa połowie częstotliwości ruchu orbitalnego elektronu na orbicie niższej. Ten trzeci postulat podawany jest również w innych sformułowaniach – opiszemy je później.



Ryc. 2.21. Dwie przykładowe orbity elektronów w atomie; tak je mógł sobie wyobrażać Niels Bohr. W oryginalnym modelu Bohra elektrony krążą po orbitach eliptycznych; na tym rysunku orbity pokazane są jedynie orientacyjnie, dopóki ich dokładnie nie wyliczymy.

³¹ N. Bohr, *On the Constitution of Atoms and Molecules*, “Philosophical Magazine” 1913, vol. 26, s. 1, <http://web.ihep.su/dbserv/compas/src/bohr13/eng.pdf>

Źródło: G.K.

Jakie wnioski wynikają z postulatów Bohra? Przede wszystkim jesteśmy w stanie wyliczyć tak energie elektronów na poszczególnych orbitach, jak i promienie tych orbit. Nie jest to specjalnie trudne. Musimy jedynie przypomnieć wzory na energię: kinetyczną (czyli ruchu) i potencjalną (zarówno w polu grawitacyjnym, jak i w polu elektrycznym) związaną z odległością od jądra (lub środka Ziemi).

(Fakultatywne)

Wzór na energię kinetyczną to:

$$E = \frac{mv^2}{2}, \quad (2.16),$$

a na energię potencjalną:

$$E = -\frac{ke^2}{r}, \quad (2.17)$$

gdzie symbole po prawej stronie wzoru są identyczne jak we wzorze 2.15.

We wzorze na energię kinetyczną przyjmujemy znak +. Zgodnie z definicją³² energia to zdolność ciała do wykonania pracy. Rozpędzony samochód jest zdolny do wykonania pracy – choćby przeciw sile tarcia na pewnym odcinku. Jeżeli natomiast elektron jest związany z jądrem, to nie jest on w stanie wykonać (użytecznej dla nas) pracy; co więcej, aby elektron mógł się swobodnie przemieszczać, należy nad nim wykonać pracę. Stąd znak minus we wzorze na energię potencjalną, podobnie jak dla pola grawitacyjnego, zob. wzór (1.32).

Całkowitą energię elektronu możemy zapisać jako:

$$E_c = \frac{mv^2}{2} - \frac{ke^2}{r} \quad (2.18)$$

³² Zob. G. Karwasz, M. Sadowska, K. Rochowicz, *Toruński poręcznik do fizyki. Gimnazjum klasa I*, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2010, s. 87.

Z przyrównania siły Coulomba i odśrodkowej otrzymujemy:

$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (2.19)$$

Ze wzoru (2.19) znajdujemy:

$$\frac{ke^2}{r} = mv^2, \quad (2.20)$$

czyli energia elektronu wynosi po prostu

$$E_{calk} = -\frac{1}{2}mv^2 \quad (2.21)$$

gdzie v jest prędkością elektronu na orbicie, lub alternatywnie

$$E_{cala} = -\frac{1}{2} \frac{ke^2}{r} \quad (2.22)$$

Jest to ważny wynik: w ruchu po orbicie kołowej energia kinetyczna jest równa połowie energii potencjalnej (a właściwie połowie wartości bezwzględnej energii potencjalnej, jako że ta przyjmuje wartości ujemne).

Energia elektronu na orbicie jest równa, zgodnie z modelem Bohra, energii wypromieniowanego światła, co z postulatu Plancka możemy zapisać jako

$$E = nh\nu, \quad (2.23)$$

gdzie ν jest częstotliwością emitowanego kwantu światła, a n ilością wyemitowanych kwantów. Liczba n tak rozumiana jest liczbą naturalną $n = 1, 2, 3$ itd.

Potrzebujemy teraz wyznaczyć częstotliwość ν_1 ruchu elektronu na orbicie. ν_1 mówi, ile razy w ciągu sekundy elektron wykona pełne okrążenia jądra. W tym celu musimy podzielić drogę przebytą przez elektron w ciągu sekundy przez długość jego orbity $2\pi r$. Droga przebyta w ciągu sekundy to po prostu prędkość elektronu v , jeśli wyrazimy ją w m/s. Wyprowadzając nieco wynik, wyliczymy, ile razy w ciągu sekundy elektron o prędkości 2180

km/s, znajdujący się na najniższej orbicie, o promieniu około $0,5 \cdot 10^{-10}$ m, obiega jądro: $694 \cdot 10^{13}$ razy (czyli ok. 10^{16} razy – to są częstotliwości typowe dla fal elektromagnetycznych w zakresie widzialnym).

Zapiszmy powyższe rozważania na częstotliwość obiegu wzorem:

$$\nu_1 = \frac{v}{2\pi r} \quad (2.24)$$

Jak pisał Bohr³³, częstotliwość ν emitowanego światła jest równa połowie częstotliwości ν_1 obiegu elektronu dookoła jądra. Równanie (2.24) możemy więc przekształcić jako $E = nh\nu = nh(\frac{v}{4\pi r})$, a przyrównując to do wyliczonej energii elektronu w równaniu (2.21), otrzymujemy równość:

$$\frac{mv^2}{2} = nh(\frac{v}{4\pi r}) \quad (2.25)$$

Po uproszczeniu otrzymujemy bardzo ważny wzór:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (2.26)$$

Przypomnijmy, że iloczyn masy i prędkości nazywamy pędem³⁴, a iloczyn pędu w ruchu po okręgu przez promień okręgu nazywamy momentem pędu. Z kolei iloraz stałej Plancka h przez 2π zaznaczamy umownie jako „ h kreślone”, tzn. $\hbar$, tak jak polskie $\hbar$, jest w innych językach „ l kreślonym”.

Postulat Bohra możemy więc zapisać w lakoniczny sposób:

Moment pędu elektronu w atomie wodoru jest skwantowany i przyjmuje wartości $n\hbar$, gdzie n jest liczbą naturalną.

Korzystając z tak sformułowanego postulatu, możemy wrócić do wzoru (2.21) na energię:

$$E_{\text{calc}} = -\frac{1}{2}mv^2 \quad (2.27)$$

³³ Praca cytowana <http://web.ihep.su/dbserve/compas/src/bohr13/eng.pdf>

³⁴ Zob. G. Karwasz, M. Sadowska, K. Rochowicz, op. cit., s. 80.

Aby znaleźć dopuszczalne wartości energii, musimy prędkość v zastąpić przez stałe fizyczne, takie jak $\hbar$, k , oraz przez wartości charakterystyczne elektronu – jego masę m i ładunek e .

Z równania (2.19) dostajemy:

$$mv^2 r = ke^2 \quad (2.28)$$

Podstawiając w tym równaniu w miejsce r wartość otrzymaną z postulatu Bohra (2.26)

$$r = \frac{n\hbar}{mv} \quad (2.29)$$

otrzymujemy:

$$mv^2 r = mv^2 \left(\frac{n\hbar}{mv} \right) = ke^2 \quad (2.30)$$

dostajemy:

$$v = \frac{ke^2}{n\hbar} \quad (2.31)$$

Wreszcie wstawiając tę wartość do wzoru (2.21), otrzymujemy kolejną, niezwykle ważną zależność:

$$E = -\frac{1}{n^2} \frac{mk^2 e^4}{2\hbar^2} \quad (2.32)$$

Innymi słowy, energia elektronu w atomie wodoru może przyjmować wartości:

$$E = -\frac{1}{n^2} R \quad (2.33)$$

gdzie przez R oznaczyliśmy wielkość:

$$R = \frac{mk^2 e^4}{2\hbar^2} \quad (2.34)$$

zależną tylko od stałych fizycznych.

Obliczając wielkość R w jednostkach już przez nas używanych, elektronowoltach [eV], dostajemy $R = 13,6$ eV.

Stała R , nazwana na cześć jednego z twórców spektroskopii optycznej stałą Rydberga, wyznacza nam skalę wielkości atomowych i chemicznych. Energie związane z procesami atomowymi i chemicznymi to pojedyncze elektronowolty.

Teraz możemy wyjaśnić jednostkę „elektronowolt”: jest to energia, jaką uzyskuje elektron, jeżeli zostanie przyspieszony napięciem elektrycznym jednego wolta.

Symbolicznie „ $1 \text{ eV} = 1e \cdot 1\text{V}$ ”. Ponieważ wartość ładunku elektronu to $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, możemy zapisać ściśle równoważność $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Przypominamy, że 1 J to np. podniesienie w polu grawitacyjnym Ziemi masy około $0,1 \text{ kg}$ na wysokość 1 m . 1 eV wydaje się jednostką małą, ale w świecie atomów jest jednostką jak najbardziej właściwą.

Wróćmy do atomu wodoru. Wartość energii elektronu w atomie wodoru jest skwantowana i wynosi:

$$E = -\frac{R}{n^2}, \quad (2.35)$$

gdzie n , jak wspomnieliśmy, jest liczbą naturalną.

Podstawiając $n = 1$, otrzymujemy wartość energii elektronu na pierwszej, najniższej orbicie $E_1 = -13,6$ eV. Nadaliśmy w ten sposób interpretację fizyczną stałej Rydberga: jest to energia elektronu na pierwszej orbicie w atomie wodoru.

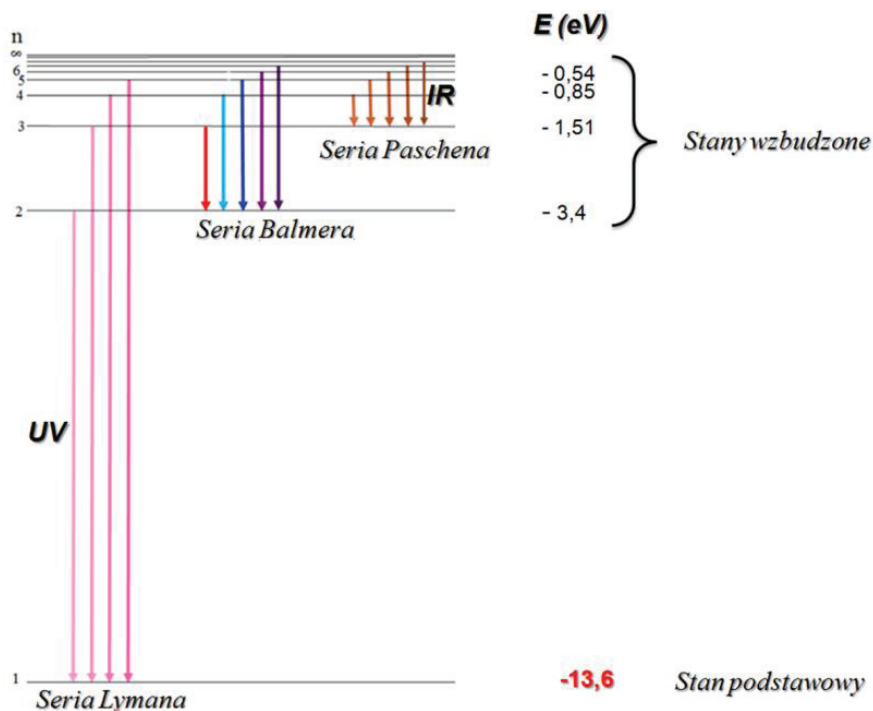
Podstawiając $n = 2$, otrzymujemy $E_2 = -3,4$ eV, dla $n = 3$ $E_3 = -1,51$ eV.

Elektrony w modelu Bohra poruszają się po ściśle określonych orbitach i emitują (lub pochłaniają) światło jedynie w trakcie przeskoku z jednej orbity na drugą. Z modelu Bohra możemy obliczyć energię emitowanego światła. Przykładowo w trakcie przeskoku z orbity o $n = 2$ na orbitę $n = 1$ emitowane jest światło o energii

$$\Delta E_{2 \rightarrow 1} = E_1 - E_2 = 13,6 \text{ eV} \cdot (0,25 - 1) = 10,2 \text{ eV}$$

Jest to energia kwantu światła w zakresie nadfioletu; odpowiada ona długości fali $\lambda = 121,6 \text{ nm}$. Zakres ten badał Theodore Lyman, stąd serię widmową odpowiadającą przeskokom elektronu z orbit wyższych ($n = 2, 3, 4$ itd.) na orbitę o $n = 1$ nazywamy serią Lymana, zob. ryc. 2.22.

Seria Balmera, którą możemy oglądać za pomocą siatki dyfrakcyjnej, odpowiada przeskokom elektronu z orbit wyższych ($n = 3, 4, 5$ itd.) na orbitę $n = 2$.



Ryc. 2.22. Układ poziomów energetycznych w atomie wodoru, w modelu Bohra; leżąca w zakresie widzialnym czerwona linia serii Balmera odpowiada przeskokom elektronów z orbity o $n = 3$ na orbitę o $n = 2$. Rys. Magdalena Sadowska

2.6. Wielkości atomowe

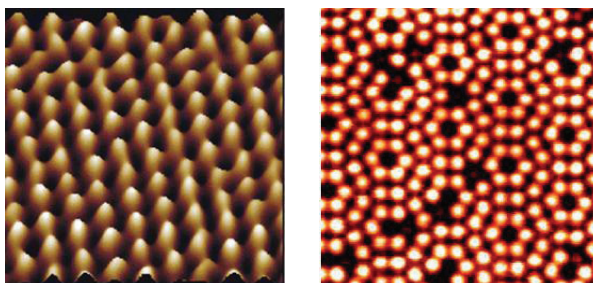
Model Bohra i stała Rydberga wprowadzają nas w świat wielkości atomowych. Jednostką do porównań odległości jest w nim promień pierwszej ($n = 1$) orbity Bohra.

Promień ten możemy obliczyć, przyrównując wzór na energię (2.22) ze wzorem (2.35) i przyjmując $n = 1$

$$E = -\frac{1}{2} \frac{ke^2}{r} = -R, \quad (2.36)$$

stąd promień pierwszej orbity wynosi $r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Stałą R wyznaczamy w jednostkach SI z równania 2.35.

Warto zapamiętać tę wielkość. Oznacza ona, że atom wodoru ma w przybliżeniu³⁵ średnicę około $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$; czasem jednostkę 10^{-10} m nazywamy Angstromem ($1 \text{ \AA}$). Również atomy cięższych pierwiastków mają „rozmiary” między $1 \text{ \AA}$ a $2 \text{ \AA}$. Na szerokość ścieżki płyty CD (około $1 \mu\text{m}$) składa się dziesięć tysięcy atomów. Atomy, mimo że chemicznie stanowią podstawowe składniki materii, wcale nie są takie małe. Możemy je obserwować np. za pomocą tzw. mikroskopu sił atomowych (zob. ryc. 2.23).



Ryc. 2.23. Powierzchnie grafitu i krzemu obserwowane za pomocą mikroskopu sił atomowych. Odległości między atomami są rzędu pojedynczych Angstromów (tj. 10^{-10} m).

Źródło: omikron.com

³⁵ Do zagadnienia rozmiarów atomów wrócimy jeszcze przy omawianiu współczesnej interpretacji mechaniki kwantowej.

Korzystając jeszcze raz ze wzorów 2.35 i 2.36, otrzymujemy:

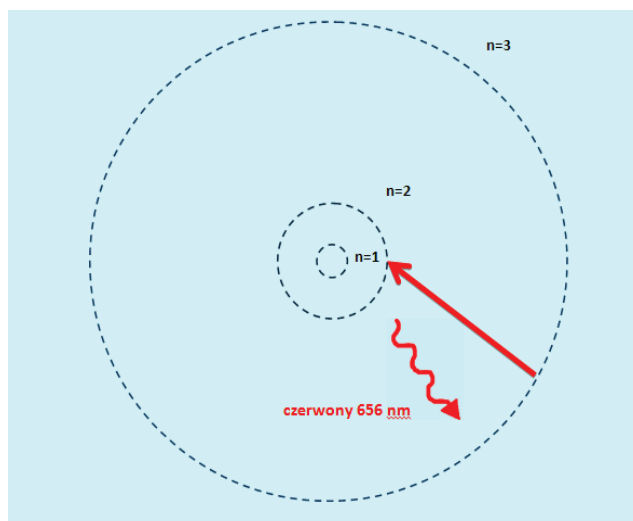
$$E = -\frac{1}{2} \frac{ke^2}{r} = -\frac{R}{n^2} \quad (2.37)$$

Stąd, pomijając stałe (a raczej zastępując je promieniem Bohra r_1), wnioskujemy, że promienie kolejnych orbit rosną z liczbą n jak jej kwadrat:

$$r_n = r_1 \cdot n^2 \quad (2.38)$$

I tak dla $n = 100$ (potrafimy wzbudzić elektrony na tak wysokie orbity w niektórych atomach) promień Bohra wyniósłby aż $0,5 \mu\text{m}$. Należy jednak pamiętać, że pojęcie „rozmiarów” atomów jest bardzo umowne – elektrony są w ciągłym ruchu i nie można utożsamiać „rozmiarów” atomu z chwilowym położeniem elektronów; do tego zagadnienia wrócimy.

Teraz jesteśmy gotowi, aby narysować schemat orbit w atomie Bohra we właściwej skali.



Ryc. 2.24. Układ (w skali $1:10^8$) pierwszych trzech orbit w atomie wodoru w modelu Bohra. Rys. G.K.

Oceńmy jeszcze prędkość elektronu na pierwszej orbicie Bohra. Skorzystamy ze wzoru (2.37):

$$E = -\frac{mv^2}{2} = -\frac{R^2}{n^2}, \quad (2.39)$$

stąd

$$v = \frac{1}{n} \left(\frac{ke^2}{\hbar} \right), \quad (2.39)$$

gdzie stałą Rydberga zastąpiliśmy zgodnie ze wzorem (2.34). Prędkość elektronu na pierwszej orbicie Bohra wynosi około 2180 km/s, czyli 200 razy więcej niż prędkość rakiety w locie na Księżyc i w przybliżeniu 1/137 prędkości światła.

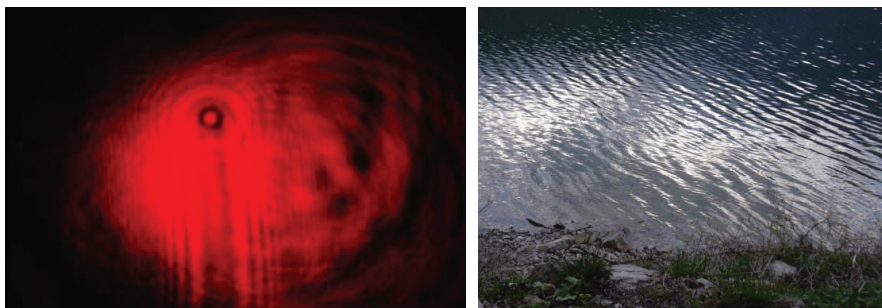
Pytania kontrolne:

1. Jak zmienia się energia z numerem orbity w modelu Bohra?
2. Jak zmienia się promień orbity w modelu Bohra dla różnych n ?
3. Ile wynosi (w eV) stała Rydberga?
4. Jakim przeskokom elektronów odpowiada seria Balmera?
5. Ile wynosi promień pierwszej orbity Bohra?

2.7. Dualizm falowo-korpuskularny

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, ponieważ natężenie fal pochodzących od dwóch lub więcej źródeł sumuje się lub odejmuje w zależności od tego, 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 kółek w jeziorze, fala ugina się i zmienia kierunek rozchodzenia się. Mówimy o zjawisku dyfrakcji³⁶. Zjawisko ugięcia światła na miniętku szpilki pokazujemy na ryc. 2.25.

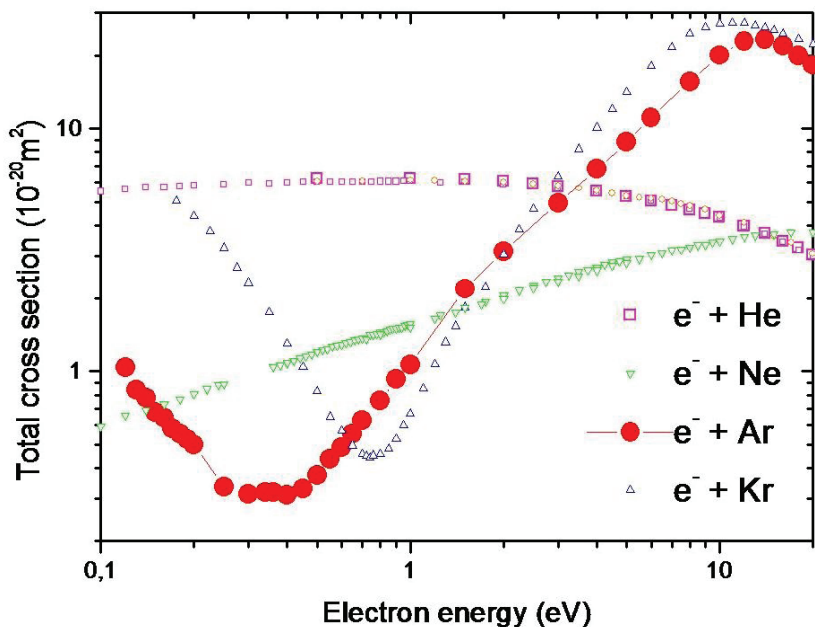


Ryc. 2.25. Ugięcie wiązki światła lasera na łepku szpilki (fot. K.S.) i fal na wodzie (fot. M.K.)

Lasery pozwalają nam bez trudu zaobserwować naturę falową światła. Ba! w laserowej rurze (lub ministrukturze w półprzewodniku) światło propagujące w lewo i w prawo również nakłada się i tworzy falę stojącą. Wskaźnik laserowy oświetla białą ścianę „w cętki” – światło będące falą nakłada się, czasem wzmacniając się, czasem wygaszając.

Hipoteza Plancka, odkrycie efektu fotoelektrycznego i jego wyjaśnienie przez Einsteina za pomocą pojęcia fotonów zwróciły uwagę, że światło może być również traktowane jako cząstki, tak jak to uważał Newton. A może więc i elektron jest (a raczej zachowuje się) jak fala? Przypuszczalnie pierwszym doświadczeniem pokazującym, że elektron zachowuje się jak fala, były pomiary przeprowadzone w 1920 roku przez Carla Ramsauera na Politechnice w Gdańsku. Badając przechodzenie elektronów o niskich energiach (do kilku eV) przez gazy szlachetne, takie jak hel, neon, argon, zauważył on, że „przezroczystość” argonu maleje wraz ze zmniejszaniem się energii elektronów poniżej 1 eV, zob. ryc. 2.26.

³⁶ Tak właśnie działa siatka dyfrakcyjna: każda z rys ugina falę, a określony kolor tworzy jasną plamkę tylko tam, gdzie poszczególne fale ugięte się sumują. W podobny sposób, wygaszając się lub sumując, powstają kolory w bańce mydlanej.



Ryc. 2.26. Całkowite przekroje czynne („total cross sections” na rozpraszanie elektronów w gazach szlachetnych: prawdopodobieństwo przejścia elektronów o określonej energii („electron energy”) przez zbiornik z gazem (analiza³⁷ i pomiary autora na Politechnice Gdańskiej). W helu przekrój czynny maleje wraz ze wzrostem energii elektronów, tak jak się tego można spodziewać z fizyki klasycznej; w argonie w zakresie około energii 0,3–0,5 eV (i kryptonie około 0,7–0,8 eV) przekrój czynny ma głębokie minimum – gaz staje się dla elektronów przezroczysty; efekt ten, odkryty na Politechnice w Gdańsku przez Carla Ramsauera, ma zasadnicze znaczenie dla kwantowego obrazu świata. Wykres: G.K.

Był to wynik zaskakujący. Jeżeli traktować elektrony jako cząstki, to prawdopodobieństwo ich transmisji przez określoną grubość warstwy gazu powinna rosnąć wraz ze wzrostem energii, tak jak kula karabinowa przechodzi przez grubszą warstwę materiału, jeżeli jej energia rośnie. Tymczasem argon stawał się prawie zupełnie przezroczysty dla elektronów o energii około 0,3 eV. To tak jakby czarownica przeszła przez twardą ścianę.

³⁷ G. Karwasz, *Pomiary całkowitych przekrojów czynnych na rozpraszanie elektronów w gazach*. Rozprawa habilitacyjna, UMK, 1997.

To, że ośrodki materialne stają się przezroczyste, jest domeną fal. Szkło (czyli tlenek krzemu) jest przezroczyste dla fal elektromagnetycznych w zakresie widzialnym, ale staje się nieprzezroczyste dla światła podczerwonego³⁸. Zupełnie inaczej zachowuje się krzem. Jest on nieprzezroczysty dla światła widzialnego (szary, metaliczny, zob. ryc. 2.27), a przezroczysty dla podczerwieni. Dzięki temu nie grzeją się układy półprzewodnikowe w komputerze lub telefonie komórkowym – część ciepła ucieka w postaci promieniowania podczerwonego.



Ryc. 2.27. Krzem – szary i połyskujący metalicznie – jest nieprzezroczysty w świetle widzialnym. Fot. K. Służewski

Jeżeli argon staje się przezroczysty dla elektronów o niskich energiach, to muszą się one zachowywać jak fala. Nie wiadomo, czy Luis de Broglie – z wykształcenia historyk, piszący w 1921 roku pracę doktorską z fizyki – znał wynik Ramsauera. Faktem jest, że ten młody wówczas arystokrata sformułował śmiałą hipotezę: poruszającym się elektronom można przypisać określoną długość fali. Oto zarys jego rozumowania.

Ze szczególnej teorii względności Einsteina znamy związek między masą a energią dowolnego obiektu:

$$E = mc^2, \quad (2.40)$$

gdzie m jest masą ciała, a c prędkością światła.

³⁸ Stąd efekt szklarni: energia światła widzialnego trafia do szklarni, natomiast światło podczerwone ze szklarni nie może wyjść; temperatura w szklarni w dzień nawet przy braku słońca jest wyższa niż na zewnątrz.

Z drugiej strony wiemy, że energię fotonów możemy wyznaczyć z hipotezy Plancka:

$$E = h\nu \quad (2.41)$$

Fotony formalnie nie mają masy w spoczynku, ale można im przypisać pęd. Pęd fotonu to:

$$p = mc \quad (2.42)$$

Możemy więc zapisać:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} \quad (2.43)$$

Z kolei między częstotliwością a długością fali zachodzi związek $\lambda = \frac{c}{\nu}$. Skąd równanie 2.42 przyjmuje postać:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Jest to bardzo ważny wzór, nie tylko dla światła.

Elektron o masie m , poruszający się z prędkością v , niesie pęd:

$$p = mv \quad (2.45)$$

Jeżeli przyrównamy wyrażenie 2.43 i 2.44, otrzymujemy:

$$mv = \frac{h}{\lambda}, \quad (2.46)$$

stąd

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (2.47)$$

Przypomnijmy postulat Bohra dla momentu pędu, równanie (2.26)

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (2.48)$$

i przekształcając, zapiszmy go jako:

$$2\pi r = n \frac{h}{mv} \quad (2.49)$$

a korzystając z 2.47 dostajemy kolejny bardzo ważny wzór, równoważny postulatowi Bohra:

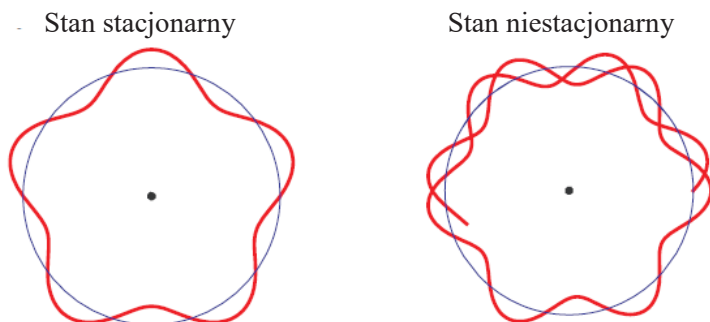
$$2\pi r = n \lambda$$

Lewa strona równania jest obwodem n -tej orbity, a λ jest długością fali elektronu na tej orbicie.

Zapamiętajmy ten wynik:

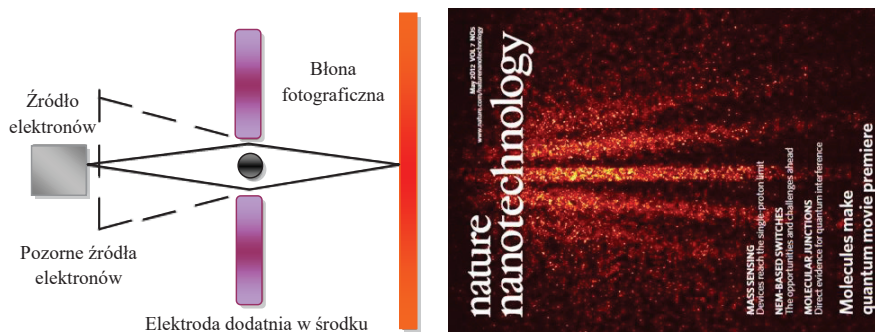
W atomie Bohra tylko takie orbity są dozwolone, na których mieści się (całkowita) wielokrotność fali de Broglie’a elektronu.

Potraktowanie elektronu jako fali de Broglie’a pozwoliło nam wyjaśnić nie do końca zrozumiały II postulat Bohra. Falę elektronu na orbicie stacjonarnej (i nieistniejącej niestacjonarnej) przedstawiamy na ryc. 2.28.



Ryc. 2.28. Fala de Broglie’a na stacjonarnej i niestacjonarnej (a przez to nieistniejącej) orbicie Bohra w atomie wodoru. Rys. G.K.

Jeżeli elektron jest falą, to powinniśmy obserwować efekty falowe w jego ruchu, czyli np. interferencję. W doświadczeniu elektrony emitowane z żarzonej katody rozdzielają się na dwie wiązki, przechodzą przez ograniczające je szczeliny i ponownie spotykają się na ekranie. Doświadczenie dla elektronów nie jest trudne; można je z odpowiednim wyposażeniem przeprowadzić w szkole. Im większa masa cząstki, tym trudniej zobaczyć obraz interferencyjny. Przeprowadzono takie doświadczenie z jonami helu, a dopiero zupełnie niedawno (w maju 2012 roku na Uniwersytecie w Wiedniu) z dużymi cząsteczkami organicznymi barwnika, ftalocyjaniny.



Ryc. 2.29. a) Schemat układu do obserwacji interferencji elektronów (lub atomów) pochodzących z dwóch pozornych źródeł elektronów. Rys. K.S.; **b)** prążki obserwowane w interferencji drobin ftalocyjaniny (Uniwersytet w Wiedniu, na zdjęciu okładka czasopisma „Nature”, May 2012)

Jak widać z ryc. 2.29, na ekranie pojawiają się jasne i ciemne prążki, jak w doświadczeniu z interferencją światła (historycznie w doświadczeniu Younga z 1805 roku). Dziwne pozostaje, że nawet gdy elektrony (lub jony) przechodzą przez jedną lub drugą szczelinę nie w postaci wiązki, ale pojedynczych cząstek, obraz na ekranie jest obrazem interferencyjnym. To tak, jakby kolejny elektron (atom) „wiedział”, przez którą szczelinę przeszedł poprzedni, tak aby powstał obraz interferencyjny. Powrócimy do tego zagadnienia.

Zadanie 2.1

Znajdź długość fali de Broglie'a piłki pingpongowej (masa $m = 10$ g), lecącej z prędkością $v = 108$ km/h.

Dane

$$m = 0,01 \text{ kg}$$

$$v = 30 \text{ m/s}$$

$$h = 6,67 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Szukane: λ

Korzystamy ze wzoru

$$\lambda = h/mv$$

$$\text{Podstawiając dane liczbowe, dostajemy } \lambda = \frac{6,67 \cdot 10^{-34}}{0,01 \cdot 30} \approx 20 \cdot 10^{-34} \text{ m}$$

Ponieważ piłeczka pingpongowa ma rozmiary kilku centymetrów, fala de Broglie'a różni się o kilkadziesiąt rzędów wielkości od tych rozmiarów. Piłkę pingpongową też można opisać za pomocą fali de Broglie'a, ale ma ona tak krótką długość, że ztraca sens fizyczny. Dopiero w świecie obiektów bardzo lekkich (jak elektron o masie $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg) i małych (tzw. klasyczny promień elektronu wynosi 10^{-15} m) fala de Broglie'a staje się porównywalna z rozmiarami obiektów.

Zadanie 2.2

Oblicz, ile wynosi długość fali de Broglie'a elektronu o energii $0,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ J (czyli 0,3 eV).

Masa elektronu wynosi $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg.

Dane:

$$E = 0,48 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Obliczyć: λ

Rozwiązanie:

Obliczmy pęd elektronu, korzystając z energii.

Energia kinetyczna wyraża się wzorem: $E = \frac{1}{2}mv^2$

Jeżeli pomnożymy obie strony tego równania przez $2m$, to uzyskamy:

$$2mE = m^2v^2 = p^2$$

Pęd elektronu wynosi więc $p = \sqrt{2mE}$

Korzystając z jednostek SI, otrzymujemy $p = 2,96 \cdot 10^{-25} \text{ [kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{]}$

Długość fali de Broglie'a wynosi $\lambda = h/mv = 2,24 \cdot 10^{-9} \text{ [m]}$

Jak widać, długość fali jest tego samego rzędu co „rozmiary” atomu argonu. Efekt Ramsauera możemy więc uznać, w przybliżeniu, za skutek interferencji elektronu samego ze sobą, wewnątrz atomu argonu.

2.8. Równanie Schrödingera i zasada Heisenberga

W 1926 roku fizyka znalazła się w dość dziwnej sytuacji – okazało się, że elektron jest falą, ale nieznane było równanie ją opisujące. Dokładnie na odwrót niż to było z falami Maxwella – gdzie najpierw pojawiło się równanie, a dopiero później wywnioskowano o istnieniu fal.

Odmienność równania opisującego ruch elektronu od równania opisującego falę elektromagnetyczną polega na tym, że prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w próżni nie zależy od ich długości³⁹, a elektrony mogą się rozchodzić z dowolnymi prędkościami.

Równanie takie w 1926 roku zaproponował austriacki fizyk, Erwin Schrödinger. Podajemy je poniżej, ale nie będziemy zagłębiać się w jego szczegółowy opis.

$$\hat{H} \Psi(r,t) = i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(r,t) \quad (2.51)$$

³⁹ Przypominamy, że w innych ośrodkach niż próżnia, np. w wodzie, prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej zależy od długości fali, czyli koloru światła. Bez tej zależności nie byłoby tęczy.

Interpretacja równania Schrödingera jest podobna do 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 określa prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w określonym miejscu i w określonym czasie.

Zwracamy uwagę, że powyższa interpretacja jest dokładnie taka, jak stwierdziliśmy powyżej⁴⁰. Błędem byłoby stwierdzenie, że „równanie Schrödingera opisuje elektron” lub „równanie Schrödingera opisuje ruch elektronu” – są to tzw. skróty myślowe.

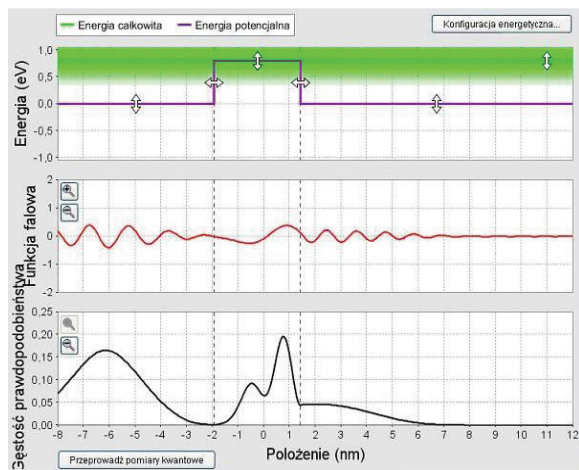
Właściwa interpretacja powinna być następująca: jeżeli przeprowadzimy pomiar położenia elektronu, to równanie Schrödingera opisuje, jakie jest prawdopodobieństwo, że ten pomiar wykaże obecność elektronu w określonym punkcie przestrzeni w danym momencie czasu.

Aby zilustrować „działanie” równania Schrödingera, na ryc. 2.30 pokazujemy przemieszczanie się w przestrzeni tzw. paczki falowej. Paczka ta w momencie startu jest dość dobrze określona w przestrzeni; w miarę upływu czasu, niezależnie czy paczka ta wędruje czy stoi, rozmywa się w przestrzeni. Podkreślimy, że to nie elektron jako cząstka rozmywa się w przestrzeni, ale nasza wiedza o jego położeniu staje się coraz mniej pewna.

Z faktu, że elektron (lub inna cząstka z mikroświata) jest falą, wynikają ciekawe własności. Oprócz wspomnianych zjawisk falowych, takich jak interferencja i dyfrakcja, zadziwiające jest zachowanie cząstek przy napotkaniu przeszkody w ich ruchu. Może to być bariera jak na ryc. 2.30 lub nawet studnia jak na ryc. 2.31. Elektron przechodzi przez barierę, nawet jeśli jego energia nie jest wystarczająca z punktu widzenia klasycznego. Innymi słowy, piłka tenisowa lecąca na wysokości 60 cm nie przejdzie nad siatką tenisową zawieszoną na wysokości 80 cm, a elektron analogiczną barierę jest w stanie pokonać. Należy jednak dodać: istnieje pewne prawdopodobieństwo, że elektron tę barierę pokona. Jakie prawdopodobieństwo?

⁴⁰ Zaznaczmy jednak, że zagadnieniom interpretacji mechaniki kwantowej poświęconych jest tysiące artykułów naukowych każdego roku.

Zależy to od wysokości bariery w stosunku do energii elektronu, ale też od jej szerokości⁴¹.



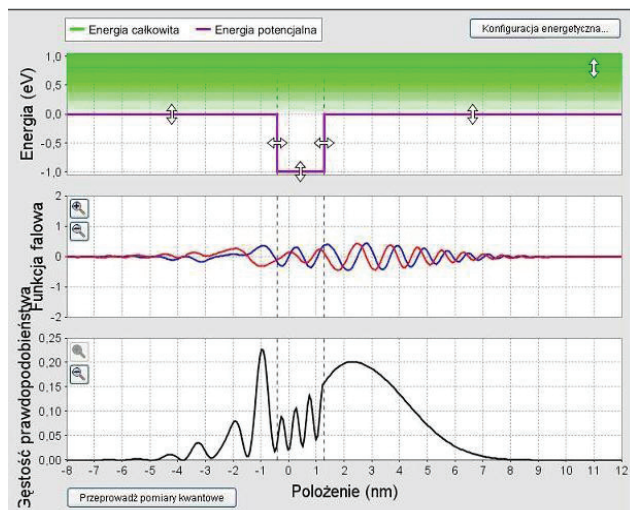
Ryc. 2.30. Fala pada na dość szeroką barierę potencjału. Amplitudę fali opisuje czarna krzywa. Część fali „grzęźnie” w barierze, ale większa część się odbija. Część uwieczniona w barierze powoli wypływa na drugą stronę: to nie kawałek elektronu, ale prawdopodobieństwo wyniku naszego pomiaru⁴².

Jeszcze ciekawsze jest przechodzenie cząstki nad dołkiem, tzw. studnią potencjału. Klasycznie, jeżeli energia cząstki jest większa niż górna krawędź dołka, cząstka nie powinna do dołka wpaść – podobnie jak piłka tenisowa przelatuje na golfowym dołkiem. W świecie mechaniki kwantowej tak nie jest: cząstka „częściowo”, a właściwiej „z pewnym prawdopodobieństwem” może w dołku ugrząźć, zob. ryc. 2.31.

Jeżeli odpowiednio dobierzemy szerokość i głębokość dołka, fala przejdzie na drugą stronę jakby niezaburzona. Na tym właśnie polega efekt Ramsauera: potencjał atomu argonu jest taki, że nie zauważamy, jakoby elektron zderzył się z atomem – gaz jest dla tej energii „przezroczysty”.

⁴¹ Proponuję Czytelnikowi samodzielne próby wizualizacji kwantowych w jakimkolwiek programie internetowym symulującym równanie Schrödingera.

⁴² Program: <http://phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-tunneling>; parametry modelu: G.K.



Ryc. 2.31. Fala pada na dość szeroką studnię potencjału. Amplitudę fali opisuje czarna krzywa. Część fali „grzęźnie” w studni, ale większa część przechodzi dalej. Część uwięziona w studni interferuje z falą padającą. Przedstawiony rysunek to zdjęcie dynamicznego obrazu.

Źródło: PhET Interactive Simulations, University Colorado, Boulder, <http://phet.colorado.edu/en/simulation/quantum-tunneling>.

Zasada nieoznaczoności Heisenberga

Widzimy już z interpretacji równania Schrödingera, że wielkości kwantowe możemy przewidzieć jedynie z pewnym prawdopodobieństwem. Rozmywanie się paczki falowej w czasie, a nawet sam fakt, że elektron opisujemy właśnie za pomocą „paczki” o określonej szerokości, oznacza więcej: wielkości kwantowych nie możemy nawet zmierzyć z dowolną dokładnością.

Pierwsze przybliżenie do tzw. zasady nieoznaczoności Heisenberga daje nam już zależność de Broglie’a:

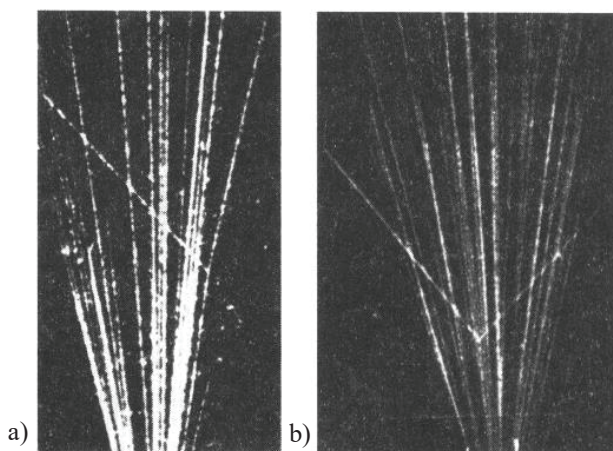
$$p\lambda = h \quad (2.52)$$

– istnieje jakaś zależność między pędem cząstki a długością fali de Broglie’a poprzez stałą Plancka h . Dokładniej, zasada **nieoznaczoności**

Heisenberga mówi, że niedokładność Δx określenia położenia cząstki i niedokładność Δp określenia pędu cząstki związane są zależnością:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2.53)$$

Innymi słowy, im dokładniej zmierzymy położenie cząstki, tym mniej dokładnie znamy jej prędkość i na odwrót. Wydaje się, że Werner Heisenberg odkrył tę zasadę, obserwując ślady elektronów w komorze Wilsona. Jak pisał⁴³, albo widzimy ślad elektronu, czyli wiemy że w określonym momencie elektron był w tym miejscu, albo przerwę w śladzie, czyli wiemy, że elektron przebył tę odległość w określonym czasie, czyli znamy prędkość elektronu.



Ryc. 2.32. Zdjęcie z komory pęcherzykowej: **a)** wypełnionej H_2 ; **b)** wypełnionej He. Ślady cząstek alfa (czyli jąder helu); w zależności od masy jądra uderzanego, trajektorie tworzą różne kąty – wynosi on 90° dla równych mas (jak na fot. **b**, gdyż cząstka alfa to jądro helu!).

Źródło: H. Haken i H.C. Wolf, *Atomy i kwanty*, PWN, Warszawa 2002

⁴³ „Mówiliśmy przecież zawsze po prostu: tor elektronu w komorze mgłowej można obserwować. Ale może rzeczywiście obserwuje się mniej. Może można spostrzec tylko dyskretny ciąg niedokładnie określonych położenia elektronu. W rzeczywistości widzi się przecież w komorze tylko pojedyncze kropelki wody, które na pewno muszą mieć znacznie większe rozmiary niż elektron”. W. Heisenberg, *Część i całość*, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1987, s. 106.

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

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2.54)$$

2.9. Zakaz Pauliego i układ okresowy pierwiastków

Mniej więcej od połowy XIX wieku było wiadomo, że niektóre pierwiastki chemiczne wykazują analogiczne własności. Tak jest np. z metalami alkalicznymi jak sód i potas, które są na tyle aktywne chemicznie, że samoczynnie zapalają się w powietrzu. Wiadomo też było, że pierwiastki chemiczne wchodzą we wzajemne reakcje w ściśle określonych proporcjach – pewne pierwiastki wykazują ściśle określoną „wartościowość”. I tak, w trzecim wierszu układu okresowego kolejne atomy – sód Na, magnez Mg, glin Al, krzem Si – wykazują, odpowiednio, wartościowości I, II, III, IV.

Następny w tym wierszu jest fosfor, który występując w różnych postaciach (fosfor biały, czerwony, czarny), wykazuje kilka wartościowości. Leżący nad nim azot ma tych wartościowości naprawdę dużo. W amoniaku NH_3 azot „przejmuje” trzy elektrony z atomów wodoru; w podtlenku azotu N_2O (tzw. gaz rozweselający, według obecnej nomenklatury tlenek diazotu) i w tlenku azotu (II) NO azot „oddaje” dwa elektrony. W innym jeszcze związku dwa atomy azotu łączą się z trzema atomami (trinitlenek diazotu N_2O_3). Ditlenek azotu (NO_2) to silnie trujący, brunatny gaz, w którym azot „oddaje” cztery elektrony; w nietrwałym pięciotlenku diazotu (N_2O_5) azot formalnie oddaje pięć elektronów.

Bardzo trudno byłoby wyjaśnić własności chemiczne atomów z modelu atomowego Bohra, nie do końca sprawdza się również równanie Schrödingera. Decydującym pojęciem dla wyjaśnienia własności chemicznych atomów jest pojęcie *spinu*, czyli krętu własnego elektronów. Coś w rodzaju analogii z Ziemią krążącą dookoła Słońca, ale przy tym wirującą wokół własnej osi.

Wiemy już z postulatów Bohra, że moment pędu elektronu (równanie 2.26) wokół jądra jest skwantowany i przyjmuje całkowite wartości stałej Plancka podzielonej przez 2π (czyli $\hbar$). Spin elektronu przyjmuje

wartości równe połowie tej wielkości, zarówno dodatnie, jak i ujemne, czyli $\pm\hbar/2$. Spin połów-kowy jest niezwykle ważną własnością elektronu – z niego wynika cała chemia! Ale o tym za chwilę.

UKŁAD OKRESOWY PIERWIASTKÓW

I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	IX	X	IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	0
1 H 1,008	2 He 4,003																
3 Li 6,941	4 Be 9,012									5 B 10,811	6 C 12,011	7 N 14,007	8 O 15,999	9 F 18,998	10 Ne 20,180		
11 Na 22,990	12 Mg 24,305									13 Al 26,981	14 Si 28,085	15 P 30,974	16 S 32,066	17 Cl 35,453	18 Ar 39,948		
19 K 39,098	20 Ca 40,078	21 Sc 44,956	22 Ti 47,867	23 V 50,941	24 Cr 51,996	25 Mn 54,938	26 Fe 55,845	27 Co 58,933	28 Ni 58,693	29 Cu 63,546	30 Zn 65,390	31 Ga 69,723	32 Ge 72,610	33 As 74,922	34 Se 78,960	35 Br 79,904	36 Kr 83,800
37 Rb 85,468	38 Sr 87,620	39 Y 88,906	40 Zr 91,224	41 Nb 92,906	42 Mo 95,940	43 Tc 97,905	44 Ru 101,070	45 Rh 102,905	46 Pd 106,420	47 Ag 107,868	48 Cd 112,411	49 In 114,818	50 Sn 118,710	51 Sb 121,760	52 Te 127,603	53 I 126,904	54 Xe 131,290
55 Cs 132,905	56 Ba 137,327	57-71 La-Lu	72 Hf 178,490	73 Ta 180,948	74 W 183,840	75 Re 186,207	76 Os 190,230	77 Ir 192,217	78 Pt 195,080	79 Au 196,966	80 Hg 200,590	81 Tl 204,383	82 Pb 207,200	83 Bi 208,980	84 Po 209	85 At 210	86 Rn 222
87 Fr 223	88 Ra 226	89-103 Ac-Lr	104 Unq (261,1)	105 Unp (263,1)	106 Unh (263,1)	107 Uns (262,1)	108 Uno (265,1)	109 Une (269,1)	110 Uun (269,1)	112 Cn (261)							
Lantanowce		57 La 138,905	58 Ce 140,115	59 Pr 140,908	60 Nd 144,240	61 Pm (144,913)	62 Sm 150,360	63 Eu 151,965	64 Gd 157,250	65 Tb 158,925	66 Dy 162,500	67 Ho 164,930	68 Er 167,260	69 Tm 168,934	70 Yb 173,040	71 Lu 174,967	
Aktynowce		89 Ac 227,028	90 Th 232,038	91 Pa 231,036	92 U 238,029	93 Np 237,048	94 Pu 244,064	95 Am 243,061	96 Cm 247,070	97 Bk 247,070	98 Cf 251,080	99 Es 252,083	100 Fm 257,093	101 Md 258,099	102 No 259,108	103 Lr 260,100	

Ryc. 2.33. Układ okresowy pierwiastków w głównej sali wykładowej Instytutu Fizyki UMK; nowy pierwiastek o liczbie atomowej $Z = 112$, copernicium, został osobiście wpisany przez jednego z jego odkrywców, profesora Sigurda Hofmana. Fot. G.K.

Czy inne cząstki również posiadają spin? Tak, np. fotony, cząstki światła wykazują spin całkowity $\pm\hbar$. Jak pokazał w 1941 roku w krótkim artykule naukowym niemiecki fizyk Wolfgang Pauli⁴⁴, spin połówkowy lub całkowity decyduje o zupełnie różnych właściwościach cząstek. Cząstki o spinie połówkowym unikają się nawzajem, natomiast cząstki o spinie całkowitym mają tendencję do kondensacji – „tłoczenia się” w tym samym stanie, jak pingwiny zimą na lodzie Antarktydy.

⁴⁴ W. Pauli, *The Connection Between Spin and Statistics*, „Physical Review” 1940, vol. 58, s. 716, <http://web.ihep.su/dbserv/compas/src/pauli40b/eng.pdf>

Cząstki o spinie połówkowym nazywamy fermionami na cześć włoskiego fizyka Enrica Fermiego; cząstki o spinie całkowitym – bozonami na cześć hinduskiego fizyka Satyendra Bosego. Bozony tłoczące się, aby zająć ten sam stan kwantowy, to np. fotony w laserze, wszystkie dokładnie o tej samej energii i propagujące w tym samym kierunku.

Czy dwa fermiony, unikające się nawzajem, mogą stworzyć parę o spinie całkowitym, czyli bozon? Tak, np. w zjawisku nadprzewodnictwa. W bardzo niskich temperaturach niektóre metale – i to wcale nie najlepsze przewodniki jak ołów i rtęć – zaczynają przewodzić prąd bez żadnych strat. Materiał staje się nadprzewodnikiem. Ku zaskoczeniu fizyków teoretyków w końcu XX wieku odkryto, że również niektóre materiały nieprzewodzące, ceramiczne, stają się nadprzewodnikami, i to w temperaturach stosunkowo wysokich, aż do -100°C . Także tam elektrony łączą się w pary, ale szczegółów zjawiska nadal nie znamy.

Reasumując, dwa elektrony w atomie nie mogą znajdować się w tym samym stanie kwantowym. Wynika to z ich spinu. W terminologii chemicznej mówimy, że na jednym orbitalu mogą znajdować się tylko dwa elektrony różniące się spinem. Reguła ta została odkryta przez Wolfganga Pauliego już w 1925 roku:

W tym samym stanie kwantowym może znajdować się najwyżej jeden elektron.

Przez „taki sam stan kwantowy” rozumiemy w atomie (nie tylko Bohra) stan opisany przez cztery sformułowane w tym i poprzednim paragrafie liczby kwantowe:

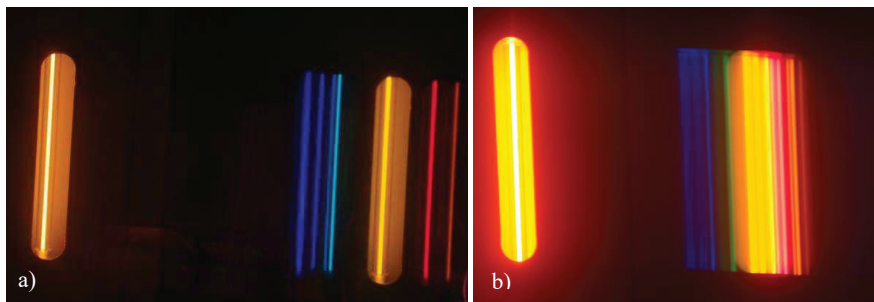
- n – czyli **główną** liczbę kwantową (numer orbity w modelu Bohra), ogólnie numer powłoki; liczba n przyjmuje wartości $n = 1, 2, 3 \dots 7$ (nie znamy obecnie atomów o większej liczbie elektronów niż 114, zob. ryc. 2.32),
- l – tzw. **poboczną** liczbę kwantową, opisującą moment pędu (kształt orbity w prymitywnym modelu Sommerfelda); liczba l przyjmuje wartości od 0 do $(n - 1)$, np. dla $n = 3$ możliwe są następujące wartości $l = 0, 1, 2$.
- m – tzw. **magnetyczną** liczbę kwantową, zmieniającą się od $-l$ do $+l$.

Stany opisane przez różne kombinacje liczb n , l i m nazywamy w chemii orbitalami. Zgodnie z historyczną nomenklaturą, wywodzącą się z formy linii emisyjnych, orbitale oznaczamy literami s (= sharp), p (= principle), d (= diffuse), f (= fundamental). Nazwy te, niezupełnie uzasadnione, zostały do dziś.

I tak na pierwszej powłoce mamy tylko jeden orbital: $1s$. Na powłoce drugiej mamy cztery możliwe orbitale: jeden $2s$ i trzy $2p$ (ustawione w trzech kierunkach: x , y , z). Na trzeciej powłoce mamy dodatkowo pięć orbitali d . Jak one wyglądają, pokażemy w następnym paragrafie. Na każdym z orbitali, zgodnie z zakazem Pauliego, mogą znaleźć się maksymalnie dwa elektrony.

Dodawanie więc kolejnych elektronów w procesie „konstruowania” coraz cięższych atomów wymaga coraz to innych stanów kwantowych. Stąd atomy o różnych ilościach elektronów mają coraz to inne własności chemiczne. Bez połówkowego spinu elektronów nie byłoby chemii, a bez chemii – materii, z której jest zbudowana Ziemia i organizmy żywe! Gdyby elektrony miały spin całkowity, w atomie wszystkie zajmowałyby ten sam stan kwantowy ($1s$) i wszystkie pierwiastki chemiczne byłyby (prawie) identyczne.

Z obecności spinu wynika szereg ciekawych własności chemicznych i fizycznych naszego zewnętrznego świata. Nawet niebieski kolor nieba jest spowodowany (po części) specyficznym ustawieniem spinów w dwóch atomach tlenu tworzących drobinę O_2 .



Ryc. 2.34. Widmo uzyskane za pomocą prostej siatki dyfrakcyjnej; **a)** hel; **b)** neon.
Fot. K.S.

2.10. Od orbitali atomowych do biochemii kwantowej

W widmie atomu helu, mimo że posiada on jedynie dwa elektrony, znajdziemy „gołym okiem”⁴⁵ kilkanaście linii w zakresie widzialnym; ich położenia i natężenia wydają się nie podlegać żadnym prostym regułom, jak to miało miejsce w wodorze. Bez wątpienia potrzebne były nowe instrumenty, znacznie bardziej skomplikowane niż model Bohra, aby wyjaśnić obserwowane widma. W neonie, atomie zawierającym 10 elektronów, liczba linii widocznych „gołym okiem” jest naprawdę imponująca, zob. ryc. 2.33. Instrumentem pozwalającym na zrozumienie struktury atomów z wieloma elektronami jest równanie Schrödingera, rozwiązane z uwzględnieniem zakazu Pauliego. Ale zacznijmy jeszcze raz od epokowego artykułu Nielsa Bohra.

Kiedy w paragrafie 2.5. omawialiśmy model Bohra, rozważaliśmy ruch elektronu po orbitach kołowych i takie orbity przedstawiamy na ryc. 2.21. W rzeczywistości Bohr pisał o „stacjonarnych orbitach eliptycznych”. Orbity eliptyczne zataczają planety wokół Słońca, jak to omówimy w rozdziale 4. Myśl Bohra o orbitach eliptycznych podjął w 1916 roku Arnold Sommerfeld, który założył, że dla określonej liczby n istnieje n kształtów orbit coraz to bardziej spłaszczonych⁴⁶. Czym różnią się te orbity w języku wielkości fizycznych?

W ten sposób wprowadził on orbity niekołowe z różnymi wartościami momentu pędu. Dziś inaczej wyobrażamy sobie kształt orbitali atomowych, ale myśl Sommerfelda o kwantowaniu momentu pędu była cenna.

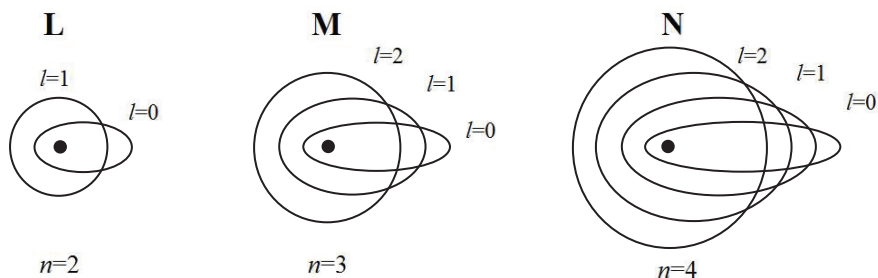
Otóż elektrony na orbitach o różnych kształtach z tych samych „powłok” K, L, M, N na ryc. 2.35 mogą mieć tę samą energię sumaryczną⁴⁷, ale różne wartości momentu pędu (wzór 2.26). Innymi słowy, na orbicie kołowej elektron znajduje się w stałej odległości od jądra i porusza się ze

⁴⁵ Linie helu są skatalogowane np. przez National Institute of Standards and Technology w USA, zob. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/heliumtable2.htm>

⁴⁶ Liczby n nie będziemy od tej pory nazywać „numerem orbity”, ale *główną* liczbą kwantową.

⁴⁷ Przez energię sumaryczną rozumiemy sumę energii kinetycznej $E = mv^2/2$ i energii potencjalnej w polu elektrycznym $E = -kQq/r$.

stałą prędkością, a na orbicie eliptycznej przyspiesza, kiedy jest bliżej jądra. Sommerfeld przeprowadzał swoje rozumowania za pomocą mechaniki klasycznej. Sukcesem okazało się dopiero zastosowanie równania *Schrödingera* do zagadnienia kształtu orbit.



Ryc. 2.35. Orbita elektronów w atomie wodoru według A. Sommerfelda (1916 r).

Źródło: G.N. Lewis, *The Atom and the Molecule*, „Journal of the American Chemical Society” 1916, 38.

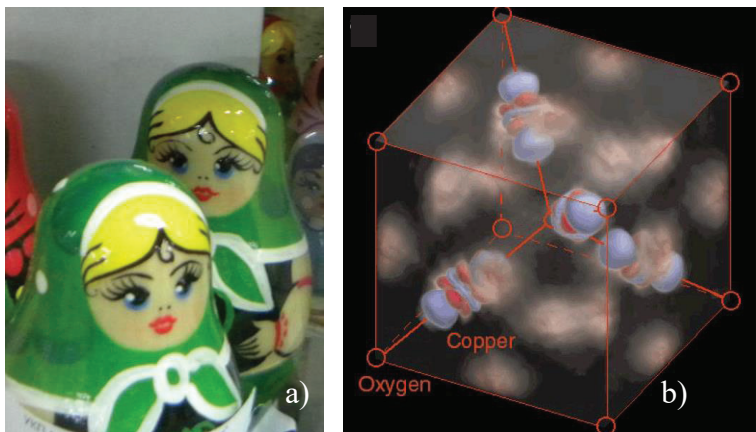
Punktem wyjścia do rozwiązania zagadnienia atomu wodoru za pomocą równania Schrödingera jest kwantowanie momentu pędu. Zakładamy, że moment ten wynosi nie $n\hbar$ jak u Bohra, ale $\sqrt{l(l+1)}\hbar$, gdzie orbitalna liczba kwantowa może przyjmować wspomniane już wartości, od 0 do $(n-1)$. Warunek kwantowania momentu pędu narzuca ograniczenia na możliwe „kształty” orbit.

Zależność momentu pędu od pewnej dodatkowej, „pobocznej” (= orbitalnej) liczby kwantowej stała się kluczem do określenia kształtu „orbit”. Piszemy „orbit” w cudzysłowie, ponieważ nie są to „tory”, jak pisał Bohr czy Sommerfeld, ale rozmyte chmury, w których z pewnym prawdopodobieństwem można znaleźć elektron. Te różne, rozmyte chmury prawdopodobieństwa nazwiemy orbitalami.

Kolista orbita Bohra staje się więc orbitalem w kształcie rozmytej kuli. Moment pędu elektronu na takim orbitalu wynosi zero, stąd orbitalowi przypisujemy liczbę kwantową $l = 0$.

Dla głównej liczby kwantowej $n = 2$ możliwe są dwie orbitalne liczby kwantowe: $l = 0$ i $l = 1$. Orbital o $n = 2$ i $l = 0$ przypomina kształtem orbital o $n = 1$ i $l = 0$ tylko jest większy. Jego „promień”, czyli odległość od jądra,

gdzie z największym prawdopodobieństwem można znaleźć elektron, różnie zgodnie z modelem Bohra. Nie jest one jednak prostym powiększeniem orbitalu $n = 1$ i $l = 0$, jako że składa się dwóch koncentrycznych sfer, coś w rodzaju rosyjskiej ludowej matrioszki, zob. ryc. 2.36.

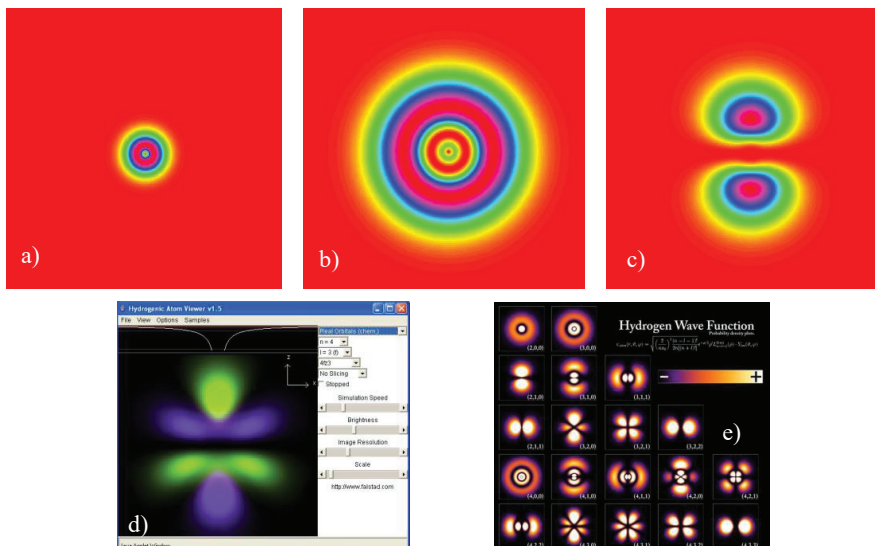


Ryc. 2.36. **a)** Rosyjska matrioszka – jedna w drugiej jak rozkład gęstości elektronów na orbitalu 2s w atomie wodoru (fot. M.K.); **b)** rzeczywisty (zmierzony za pomocą promieni Röntgena) rozkład gęstości elektronów w kryształach tlenku miedziawym Cu_2O – orbitale d .

Źródło: J. M. Zuo i in. *Direct observation of d-orbitals and Cu-Cu bonding in Cu_2O* „Nature” 1999, vol. 401, s. 49.

Dla uproszczenia dalszej dyskusji przywołamy wspomnianą w poprzednim paragrafie metodę nazywania orbitali. Główna liczba kwantowa n podaje numer orbitalu, liczba orbitalna l określa jego „kształt”. I tak $l = 0$ to orbital s , $l = 1$ to orbital p itd.

Orbitale o liczbie $l = 1$ są bardziej skomplikowane. Orbitale $2p$ mają kształt „ósemek” ustawionych w trzech prostych kierunkach, zob. ryc. 2.37. Orbitale $3d$ to takie trójwymiarowe „obwarzanki”. Mechanika kwantowa w wydaniu Schrödingera stała się potężnym, mimo że teoretycznym, mikroskopem do zagłębienia w świat atomów. Czy możemy „obejrzeć” orbitale w sposób doświadczalny? Od niedawna tak! Rozkład gęstości elektronów w kryształach tlenku miedziawym Cu_2O , uzyskany za pomocą bardzo wysokiej jakości promieniowania Röntgena, pokazuje ryc. 2.36b.



Ryc. 2.37. „Kształty” orbitali, tj. rozkład przestrzenny prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w atomie wodoru; kolor niebieski – największa gęstość, czerwony – zero; krawędź rysunku odpowiada długości $8 \cdot 10^{-10}$ m (obliczenia K. Fedus); **a)** orbital 1s, **b)** orbital 2s, **c)** orbital 2p. Inne wizualizacje: **d)** orbital $5f_{z^2}$ (D. A. McQuarrie, J. D. Simon, *Physical Chemistry: A Molecular Approach*. University Science Books, 1997, s. 325), <http://cronodon.com/Atomic/AtomTech4.html>; **e)** porównanie różnych orbitali nie w skali (https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_orbital)

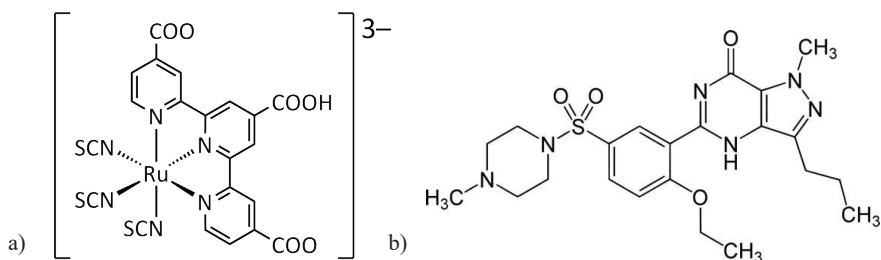
Wróćmy do widma helu: skąd się bierze bogactwo linii widmowych? Dokładne rozwiązanie równania Schrödingera pokazuje, że energie elektronów w atomie helu (i wszystkich cięższych atomach) zależą również od kształtu orbit.

Elektrony są przyciągane przez dodatnie jądro, ale odpychają się nawzajem. To wzajemne oddziaływanie modyfikuje zasadniczo ich energie. Gdyby nie uwzględnić tego oddziaływania, do oderwania jednego elektronu w atomie helu potrzebna byłaby energia aż 54 eV; wzajemne oddziaływanie obniża ją do 24 eV. Dodatkowo inaczej oddziałują dwa elektrony na orbitalach 1s, a inaczej na orbitalach 2p, jeszcze inaczej elektron na orbitalu 1s z elektronem na orbitalu 2p itd.

Czy to już koniec opowieści o fizyce atomowej? Na szczęście dla młodych ludzi to tylko początek. Własności atomów znalazły liczne zastosowania praktyczne. Fakt „zbijania się” fotonów w stany o tej samej energii jest podstawą działania lasera. Połówkowy spin protonu stanowi podstawę działania potężnego instrumentu diagnostyki medycznej, jakim jest spektroskopia magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR).

Dokładne pomiary widma wodoru w połowie XX wieku pokazały, że próżnia nie jest pusta: wypełniają ją fotony, które rodzą się i giną, zanim zdążymy je zaobserwować. W ten sposób powstała *elektrodynamika kwantowa*, jedna z najdokładniejszych teorii fizycznych, pozwalająca obliczać wielkości fizyczne z dokładnością do milionowej części z milionowej części (tj. 10^{-12}).

Nowe metody teoretyczne, zastępujące równanie Schrödingera dla dużych cząsteczek, pozwalają na projektowanie nowych leków, a także np. barwników do ogniw fotowoltaicznych, jak ten przedstawiony na ryc. 2.38.



Ryc. 2.38. a) Brunatny barwnik organiczny z atomem rutenu, wykorzystywany w nowej generacji ogniw fotowoltaicznych, tzw. ogniwach Grätzela, został zaprojektowany metodami chemii kwantowej; **b)** współczesny lek zaprojektowany metodami biochemii kwantowej: związek ten uwalnia rodnik tlenku azotu (NO) w określonych warunkach metabolizmu człowieka. Źródło: Wikipedia.

Możemy spodziewać się jeszcze wielu wspaniałych wynalazków dzięki pracom Plancka, Bohra, Schrödingera z początków minionego wieku.

Fizyka jądrowa i cząstki elementarne

3.1. W poszukiwaniu elementarnego składnika

Koniec XIX wieku obfitował w odkrycia fizyczne. W listopadzie 1895 roku Wilhelm Röntgen odkrył „niewidzialne” promienie, które okazały się falami elektromagnetycznymi, tylko że o małej długości (rzędu $\text{\AA}$), tj. o energii fotonów rzędu keV. Promienie Röntgena mają wszechstronne zastosowania – od medycyny i stomatologii do badania materiałów, sprawdzania bagaży na lotniskach i prześwietlania egipskich mumii. W szczególności, jak to pokazaliśmy na ryc. 2.35, promienie Röntgena mogą służyć do obrazowania pojedynczych atomów, a nawet znajdujących się w nich orbitali elektronów.

W 1897 roku „oficjalnie” przez Josepha J. Thompsona został odkryty elektron, a dokładniej został zmierzony stosunek e/m jego ładunku e do masy m . Zastosowana przez Thompsona metoda odchyłania wiązki elektronów przez pole elektryczne i magnetyczne jest stosowana w kineskopach telewizyjnych (tj. odbiornikach TV starszego typu). Metoda Thompsona stosowana jest nadal w spektrometrach masowych, zob. ryc. 2.17, elektron zaś pozostaje jedną z niewielu cząstek naprawdę niepodzielnych. Nie

są nimi atomy¹, z których potrafimy odłączyć elektrony, nawet w zwykłej lampie „neonowej”².

W tym samym mniej więcej czasie, gdy odkrywano elektron i promienie Röntgena, w lutym 1896 roku Henri Becquerel zauważył, że papier fotograficzny leżący w pobliżu soli uranu uległ częściowemu zaczernieniu. Zaczernienie to nie było spowodowane światłem, jako że papier fotograficzny był od światła osłonięty. Zainteresowania naukowe Becquerela były bardzo szerokie; po kilku latach prace nad nowymi promieniami, jako mało obiecujące, zlecił swojej doktorantce, Marii Skłodowskiej.

3.2. Pracowita doktorantka

Maria Skłodowska (1867–1934) w wieku 10 lat straciła matkę, co nie przeszkodziło jej skończyć szkołę średnią ze złotym medalem. Do wieku 24 lat pracowała jako prywatna nauczycielka u bogatych rodzin (w Warszawie, Lublinie, Sopocie). W tamtych czasach kobiety nie mogły studiować na Uniwersytecie Warszawskim (pod zaborem rosyjskim), wyjechała więc do siostry Broni do Paryża i tam podjęła studia na Sorbonie. W ciągu dwóch lat ukończyła, jako pierwsza ze swego rocznika, licencjat z fizyki, rok później z matematyki. Wróciła do Warszawy, ale latem 1895 roku przyjęła oświadczyzny Pierre’a Curie i wyszła za niego za mąż, zob. ryc. 3.1. Pierre, profesor w Szkole Miejskiej Fizyki i Chemii Przemysłowej w Paryżu, był już w tym czasie uznanym naukowcem³.

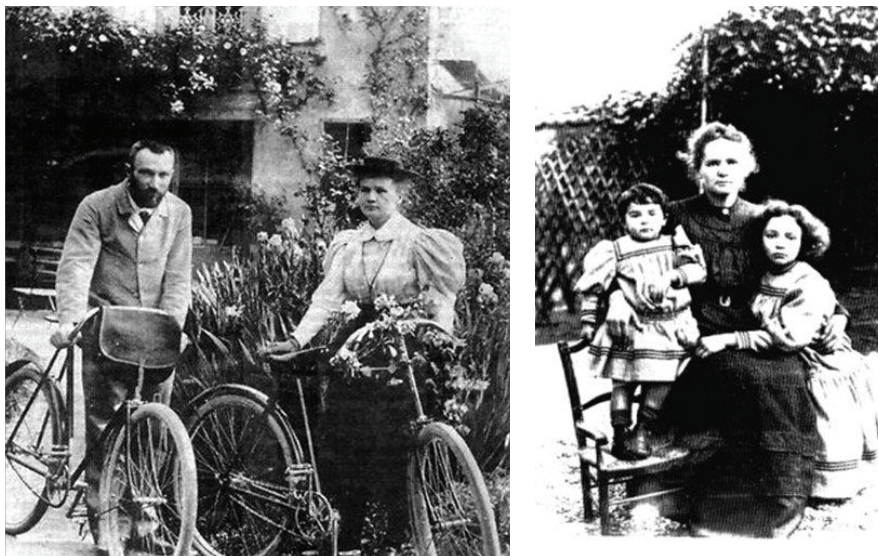
Maria w 1897 roku urodziła córkę i podjęła studia doktoranckie. W odróżnieniu od innych badaczy zajmujących się promieniami Becquerela podjęła prace *ilościowe*, nie tylko jakościowe nad tym zjawiskiem. Aby ocenić „intensywność” promieniowania, mierzyła bardzo małe prądy elektryczne,

¹ Grecki *a-tomos*, czyli nie-podzielny.

² Zob. G. Karwasz, A. Karbowski, K. Wejer, *O kuli plazmowej i wyladowaniach w gazach*, „Fizyka w Szkole” 4/2020, s. 12.

³ Pierre Curie odkrył m.in., że ściskany kwarc elektryzuje się i że substancje magnetyczne (tzw. ferromagnetyki), takie jak nikiel i żelazo, tracą swe własności w temperaturach kilkuset stopni Celsjusza. Pierwsze zjawisko, tzw. efekt piezoelektryczny, zapewnia stabilizację częstości pracy komputerów, telefonów komórkowych itd.

przepływające w gazie w obecności związków uranu; korzystała z elektrometru skonstruowanego przez męża. Już w marcu 1898 roku zauważyła⁴, że rudy uranu są bardziej aktywne niż czysty uran, zob. ryc. 3.2. Pracując dalej z mężem i wykorzystując tak metody fizyki jak chemii, jeszcze w lipcu tego samego roku stwierdziła, że w rudach uranu musi znajdować się nowy, nieznany metal, przypominający chemicznie bizmut, ale 400 razy bardziej „radioaktywny” niż uran. „Jeżeli istnienie tego nowego metalu zostanie potwierdzone, proponujemy nazwać go *polonium*, od imienia kraju pochodzenia jednej z nas”, ryc. 3.2. Kolejny odkryty przez państwa Curie pierwiastek radioaktywny przypomina chemicznie bar i został przez nich nazwany *radem*.



Ryc. 3.1. Dwa zdjęcia wystawione w 2005 roku w Instytucie Curie w Paryżu: **a)** podróż poślubna rowerami po Normandii, 1895 rok; **b)** Maria z córkami po śmierci męża w 1906 roku. Fot. G.K.

⁴ M. Curie, *Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium*, Académie des sciences, Comptes Rendus 1898, t. 126, s. 1101; http://www.academie-sciences.fr/activite/archive/dossiers/Curie/Curie_publi.htm

Za odkrycie „radioaktywności”, jak promieniowanie Becquerela nazywała M^{me} S. Curie (ryc. 3.2), ona z mężem ($\frac{1}{2}$) i Becquerel otrzymali Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 1903 roku. W 1911 roku, już jako wdowa, Maria Skłodowska-Curie odebrała Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii, za odkrycie polonu i radu oraz „właściwości tych niezwykłych pierwiastków”.

PHYSICO-CHIMIE. — *Sur une substance nouvelle radio-active, contenue dans la pechblende* (¹). Note de M. P. CURIE et de M^{me} S. CURIE, présentée par M. Becquerel.

« Certains minéraux contenant de l'uranium et du thorium (pechblende, chalcopite, uranite) sont très actifs au point de vue de l'émission des rayons de Becquerel. Dans un travail antérieur, l'un de nous a montré que

(¹) Ce travail a été fait à l'École municipale de Physique et Chimie industrielles. Nous remercions tout particulièrement M. Bémont, chef des travaux de Chimie, pour les conseils et l'aide qu'il a bien voulu nous donner.

C. R., 1898, 2^e Semestre. (T. CXXVII, N° 3.)

24

» Nous croyons donc que la substance que nous avons retirée de la pechblende contient un métal non encore signalé, voisin du bismuth par ses propriétés analytiques. Si l'existence de ce nouveau métal se confirme, nous proposons de l'appeler *polonium*, du nom du pays d'origine de l'un de nous.

Ryc. 3.2. Fragmenty artykułu, w którym ogłoszono odkrycie polonu, Académie des sciences (France), *Comptes Rendus* 1898, t. 127, s. 175–178.

Jeszcze w 1902 roku państwo Curie poddawali krytyce myśl, że energia wydzielana przez rad może pochodzić ze zmian w strukturze atomu; żadnych zmian nie obserwowali. Nikt wówczas nie wiedział, że zmiany zachodzą nie w całym atomie, ale w jego centralnym jądrze i że źródłem energii jest znikająca *masa*. Potrzebny był nowy pomysł (1905 r.) niejakiego Alberta Einsteina.

3.3. Einstein i równoważność energii i masy

Kolejna romantyczna historia z przełomu XIX i XX wieku to małżeństwo Alberta i Milevy. Młodość Alberta Einstein obfitowała w zmiany: urodzony w Ulm, chodził do liceum w Monachium, ale za rodzicami przeniósł się do Pawii we Włoszech. W konsekwencji nie miał matury, którą kończył dopiero w Szwajcarii. Jego narzeczoną, studentką matematyki w Zurychu, Mileva Marić, była Serbką, obywatelką Cesarstwa Austriacko-Węgierskiego, a w Szwajcarii emigrantką. Po zakończeniu studiów z fizyki, a nie inżynierii elektrycznej jak chciał ojciec, Albert nie otrzymał obiecanej pracy na uniwersytecie i został urzędnikiem biura patentowego w Bernie. Dopiero w 1903 roku ożenił się z Milewą, a w 1905 urodził mu się syn. W tym samym roku napisał cztery artykuły, które zrewolucjonizowały całą fizykę⁵. Jest wśród nich słynne równanie równoważności masy m i energii E :

$$E = mc^2 \tag{3.1}$$

Równanie to mówi np., że jeżeli w atomie elektron przechodzi na wyższy poziom energetyczny (tzn. rośnie energia atomu), to rośnie również jego masa. Obliczmy, o ile rośnie masa atomu wodoru przy przejściu elektronu na wyższy poziom energetyczny.

Zadanie 3.1:

Atom wodoru pochłoniął kwant światła o energii 10,2 eV i pozostaje w stanie wzbudzonym. O ile wzrosła jego masa?

Dane: $\Delta E = 10,2 \text{ eV}$

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Szukane: $\Delta m = ?$

⁵ Zob. też artykuły G. Karwasz, *Albert i Milewa i Cztery rękopisy, co zmieniły świat*, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/annalen.html, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/posters/einst5.ppt

Rozwiązanie:

Po pierwsze, przeliczmy jednostki energii eV na dżule według zależności
 $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

$$\Delta E = 10,2 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = 16,3 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Ta zmiana energii objawia się jako zmiana masy o

$$\Delta m = \Delta E / c^2 = 16,3 \cdot 10^{-19} / (3 \cdot 10^8)^2 = 5,4 \cdot 10^{-35} \text{ kg}.$$

Masa atomu wodoru to $m_{\text{H}} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, więc nastąpiła zmiana masy mniej więcej o 0,000003%, absolutnie nie do zmierzenia.

Zadanie 3.2.

Elektron w spotkaniu z antyelektronem (zob. ryc. 1.10b) *anihiluje*, to znaczy masa tych dwóch cząstek zamienia się w energię pola elektromagnetycznego (w dwa kwanty „światła”). Jaką energię ma każdy z tych kwantów (w eV)? Masa elektronu (i antyelektronu) wynosi $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Dane: $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Szukane: $E = ?$

Rozwiązanie:

Zauważmy, że jeżeli w anihilacji z dwóch cząstek o masie elektronu powstają dwa identyczne kwanty światła, to obliczenie możemy przeprowadzić dla jednego elektronu.

W trakcie anihilacji masa elektronu m zamienia się w energię kwantu światła E . Energia ta wynosi $E = mc^2 = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 81,9 \cdot 10^{-15} \text{ J}$

Przeliczmy jednostki energii z dżuli na eV, dzieląc powyższy wynik przez przelicznik $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}$

$$E = 81,9 \cdot 10^{-15} \text{ J} / (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}) = 51,1 \cdot 10^4 \text{ eV} = 511 \text{ keV}$$

Uzyskana energia wynosi 1022 keV. Sumaryczna energia dwóch kwantów światła (w tym przypadku nazywamy je kwantami „gamma”)

powstających w wyniku anihilacji elektronu i pozytonu jest ogromna: ponad milion eV.

Zadanie 3.3.

Gdybyśmy potrafili wytworzyć (i zmagazynować) antymaterię, byłoby to znakomite paliwo. Zakładając, że cała energia uzyskana z anihilacji może przyjąć formę energii elektrycznej, oblicz, na jak długo starczyłaby szklanka (250 gramów) antywody dla Torunia (200 tys. mieszkańców). Przyjmij, że miesięcznie jedna osoba „zużywa” 50 kWh energii elektrycznej.

Dane: $m = 250 \text{ g} = 0,25 \text{ kg}$.

Szukane: $E = ?$

Rozwiązanie:

W tym przypadku musimy uwzględnić podwójną masę m (250 gramów antywody anihiluje z 250 gramami wody)

$$E = mc^2 = 0,5 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 4,5 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

Obliczmy teraz miesięczne zapotrzebowanie Torunia na energię elektryczną, zamieniając najpierw jednostkę kWh na dżule

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Miesięczne zapotrzebowanie Torunia wynosi więc

$$E_1 = 200\,000 \cdot 50 \cdot 3,6 \cdot 10^6 = 36 \cdot 10^{12} \text{ J}.$$

Jest to ogromna ilość, ale z jednej szklanki antywody uzyskalibyśmy energię dla Torunia na $E/E_1 = 4,5 \cdot 10^{16} / 36 \cdot 10^{12} \approx 1,2 \cdot 10^3$ miesięcy, czyli 100 lat!

Planuje się wykorzystać antymaterię jako paliwo do lotów międzygwiazdnych. Oczywiście, dla uzyskania 250 g antywody wszystkie elektrownie Torunia też musiałyby pracować co najmniej przez 100 lat.

Zasada Einsteina równoważności masy i energii mówi, że masa i energia są dwoma formami tej samej wielkości. Energia może zamieniać się w masę, a masa w energię. Przelicznikiem jednostek jest c^2 , zgodnie ze wzorem:

$$E = mc^2$$

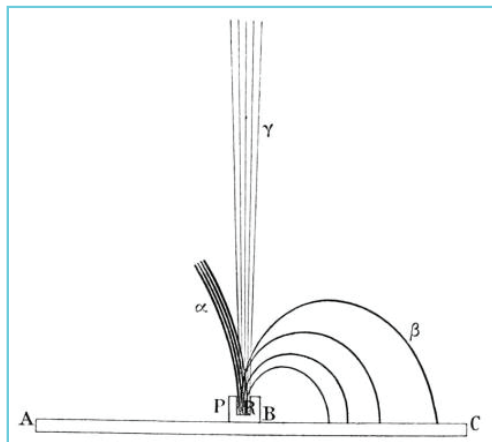
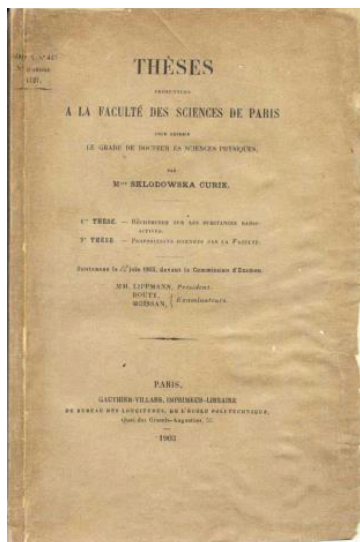
Okazuje się, że źródłem energii promieniowania radu są tego rodzaju przemiany: masy w energię. Aby to zrozumieć, wróćmy do badań Marii Skłodowskiej-Curie.

3.4. Rozpady promieniotwórcze

Po odkryciu promieni Becquerela kilku badaczy niezależnie sprawdzało, czy odchylają się one w polu magnetycznym. Promienie katodowe (czyli elektrony) badane w 1987 roku przez J. J. Thompsona odchylają się pod wpływem magnesu; promienie Röntgena – nie odchylają się. Maria i Pierre Curie stwierdzili, że „promieniowanie” wysyłane przez polon ma dwoistą naturę: „promieniowanie” mało przenikliwe, zanikające w powietrzu po paru centymetrach, odchyla się w polu magnetycznym (tak jakby były to cząstki o ładunku dodatnim), natomiast promieniowanie przenikliwe nie odchyla się. W rozpadach z udziałem radu „promieniowanie” nieprzenikliwe, według państwa Curie, niesie ładunek *ujemny*.

Prace państwa Curie stały się punktem wyjścia do dalszych badań, przeprowadzonych m.in. przez Ernesta Rutherforda: cząstki odchylające się pod wpływem pola magnetycznego zostały nazwane *alfa* i *beta*, a promieniowanie nieodchylające się – *gamma*.

W myśl dzisiejszej wiedzy tylko to ostatnie (*gamma*) powinno nosić nazwę *promieniowanie*. Dwa pozostałe procesy to *rozpady* – odpowiednio *alfa* i *beta*. W rozpadach emitowane są *cząstki* nazwane *alfa* i *beta*. Cząstki *beta* to dobrze już nam znane elektrony. Aby wyjaśnić, co to są cząstki *alfa* i skąd się biorą, musimy zdefiniować składniki atomu: elektrony, protony i neutrony.



Ryc. 3.3. a) Okładka pracy doktorskiej Marii Skłodowskiej-Curie (1903), **b)** schemat rozpadów promieniotwórczych: cząstki naładowane (α i β) są odchylane przez pole magnetyczne, kwanty promieniowania gamma nie są odchylane. M.^{me} Skłodowska Curie, *Recherche sur les substances radioactives*, Thèse. II édition, Paris, Gautier-Villars, 1904

3.5. Protony i neutrony

Kolejne pierwiastki w tablicy Mendelejewa różnią się ilością elektronów: atom wodoru ma jeden elektron, hel – dwa, lit – trzy. Okazuje się jednak, że masy tych atomów nie rosną jak kolejne liczby naturalne. W porównywalnych jednostkach masa wodoru wynosi jeden, a helu już cztery. Za pomocą spektroskopii masowej stwierdzono, że dla atomów neonu obok masy 20 może występować, w znacznie mniejszej koncentracji, masa 22.

Wiadomo, że aby atom pozostawał elektrycznie obojętny, liczba elektronów musi być równa ilości cząstek dodatnich. Jak wspomnieliśmy przy omawianiu modelu atomu Bohra, cząstki dodatnie są skoncentrowane w małym obszarze (10^{-15} m) w środku atomu – w tzw. jądrze. Cząstki o ładunku dodatnim w jądrze nazywamy *protonami*. Masa protonu jest

1837 razy większa niż masa elektronu. To masę jednego protonu uznaliśmy (w przybliżeniu) za miarę masy atomów.

Neon ma 10 elektronów, w jego jądrze jest więc 10 protonów. Brakującą masę wnoszą cząstki podobne do protonu, ale nieposiadające ładunku. Cząstki te nazywamy *neutronami*. O ich istnieniu wiedzano od początku XX wieku, ale zostały odkryte doświadczalnie dopiero w 1931 roku.

Składnikami atomu są:

- ujemne elektrony, krążące dookoła jądra
- dodatnie protony i neutralne neutrony, skupione w jądrze.

Atomy o tej samej liczbie protonów, a różnej liczbie neutronów nazywamy izotopami.

Liczba atomowa Z określa ilość protonów w jądrze, liczba masowa A – łączną liczbę protonów i neutronów.

Atomy neonu mogą więc mieć w jądrze – oprócz 10 protonów – 10, 11 lub 12 neutronów⁶. Atomy o różnej liczbie neutronów w jądrze, a tej samej liczbie protonów, nazywamy *izotopami*. Atom neonu ma 3 izotopy stabilne: o masie 20, 21 i 22.

Istotne w budowie atomu X są więc: ilość protonów w jądrze, czyli liczba *atomowa* (oznaczana przez Z), i sumaryczna ilość protonów i neutronów, czyli liczba masowa (oznaczana przez A). Liczbę masową zapisujemy na górze, liczbę atomową na dole – przy symbolu pierwiastka:

$$\begin{array}{c} A - \text{liczba masowa} \\ Z - \text{liczba atomowa} \end{array} X \quad (3.2)$$

Przykładowo stabilne izotopy neonu to: ${}^{20}_{10}\text{Ne}$, ${}^{21}_{10}\text{Ne}$, ${}^{22}_{10}\text{Ne}$.

Występowanie izotopów sprawia, że masy atomowe pierwiastków nie są liczbami całkowitymi. Jednym z ciekawszych przykładów jest chlor, którego masa atomowa, uśredniona po izotopach, wynosi 35,5.

⁶ Ogólnie jądro atomu neonu może zawierać od 6 do 24 neutronów, ale tylko izotopy zawierające 10, 11 lub 12 neutronów są stabilne. Najczęściej spotykany jest izotop z 10 neutronami (rozpowszechnienie 90%) i z 12 neutronami (9%).

		2 He 4,003
8 O 15,999	9 F 18,998	10 Ne 20,180
16 S 32,066	17 Cl 35,453	18 Ar 39,948

Ryc. 3.4. Fragment tablicy Mendelejewa z ryc. 2.33: masy pierwiastków uśrednione po względnym rozpowszechnieniu *izotopów* nie są liczbami całkowitymi. W neonie obok izotopu ^{20}Ne znajdujemy w naturze 9% izotopu ^{22}Ne , stąd średnia masa 20,18. Średnia masa pierwiastka chemicznego chloru wynosi 35,45. Foto G.K.

W cięższych pierwiastkach przeważają neutrony nad protonami. I tak np. najbardziej rozpowszechniony izotop baru ($Z = 56$), o liczbie masowej $A = 138$, ma w jądrze 56 protonów i aż 82 neutrony ($^{56+82=138}_{56}\text{Ba}$).

Okazuje się, że neutrony są niezbędne, aby „wiązać” jądro w całość. Już w jądrze helu ^4_2He obok dwóch protonów znajdujemy dwa neutrony. Neutrony „dostarczają” wiązań, aby z wielu protonów stworzyć stabilne jądro atomu.

Zadanie 3.4.

Z jaką siłą odpychają się elektrycznie dwa protony w jądrze helu? Załóżmy wzajemną odległość protonów od siebie $r = 1 \cdot 10^{-15}$ m; masa protonu jest 1837 razy większa od masy elektronu, a masa elektronu to $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg. Ładunek protonu jest równy ładunkowi elektronu ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C). Gdyby protony nie były związane siłami jądrowymi, z jakim przyspieszeniem rozleciałyby się dla tej odległości r ?

Dane: $m = 1837 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg = $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C

Szukane: $F = ?$; $a = ?$

Rozwiązanie:

Skorzystamy ze wzoru na siłę Coulomba (2.17)

$$F = \frac{ke^2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 / (1 \cdot 10^{-15})^2 = 144 \text{ N}$$

Obliczmy przyspieszenie, z jakim rozbiegłyby się protony, gdyby nie były związane innymi siłami.

$$a = F/m = 144 / 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 86 \cdot 10^{27} \text{ m/s}^2.$$

Trudno sobie nawet takie przyspieszenie wyobrazić!

Możemy również obliczyć energię, jaka wyzwoliłaby się, gdyby dwa protony odleciały od siebie na nieskończoną odległość. Skorzystamy ze wzoru (2.17)⁷

$$E = \frac{ke^2}{r} = 9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 / (1 \cdot 10^{-15}) = 14,4 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

Przeliczmy tę energię na elektronowolty

$$E = 14,4 \cdot 10^{-14} \text{ J} / (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}) = 9 \cdot 10^5 \text{ eV} = 0,9 \text{ MeV}$$

Energia odpychania się dwóch protonów w jądrze, nawet w tym prostym oszacowaniu, jest ogromna. Jest ona imponująca również w rzeczywistości i musi być zrównoważona przez siły wzajemnego *przyciągania* między protonami i neutronami, aby jądro się nie rozpadło. O tym za chwilę. Sprecyzujmy najpierw jednostkę masy atomowej.

⁷ Pomijamy znak minus we wzorze (2.17), jako że dwa protony się odpychają, więc energia *układu* jest dodatnia.

Jednostka masy atomowej

Liczba masowa to łączna liczba protonów i neutronów. Można by więc przyjąć za jednostkę masy atomowej masę protonu (czyli jądra wodoru ${}^1\text{H}$), ale jest ona nieco różna od masy neutronu⁸. Dodatkowo, obok izotopu ${}^1\text{H}$ w naturze występuje 0,01% cięższego izotopu, zwanego *deuterem* ${}^2_1\text{H}$, którego jądro zawiera jeden proton i jeden neutron. Trudno jest zważyć z zadowalającą dokładnością pojedyncze protony lub neutrony. Z tych względów za jednostkę masy atomowej przyjęto 1/12 masy *atomu* węgla, izotopu ${}^{12}\text{C}$.

Jednostka masy atomowej to 1/12 masy atomu węgla, izotopu ${}^{12}\text{C}$.

3.6. Rozpady beta i alfa

Protony, podobnie jak elektrony, są cząstkami *trwałymi* – żadne dane doświadczalne (ani teoria) nie wskazują, aby mogły się rozpadać. Neutrony natomiast są nietrwałe – swobodne, tzn. poza jądrem atomowym rozpadają się średnio po 15 minutach.

Neutron, w dużym uproszczeniu, rozpada się na proton i elektron. Tu mamy pierwszy klucz do rozpadów promieniotwórczych: w rozpadach beta jeden neutron w jądrze zamienia się w proton i elektron. Elektron jest emitowany z jądra i obserwowany w doświadczeniach, takich jak przeprowadzane przez Marię Skłodowską-Curie, jako cząstka „ β ”.

⁸ Zauważmy, że przemiana neutronu w proton w rozpadzie β^- to nie jest „uwolnienie” elektronu, jako składnika neutronu. Różnica mas neutronu i protonu to $939,57 - 938,28 = 1,29 \text{ MeV}$ a masa elektronu to tylko $0,51 \text{ MeV}$.

Rozpady beta

Rozpady beta zachodzą w jądrach, w których jest (względny) nadmiar neutronów w stosunku do protonów. W sztucznie wytworzonym jądrze neonu o nadmiarze neutronów, jak izotop ${}_{10}^{23}\text{Ne}$, jeden neutron rozpada się dość szybko (w ciągu 37 sekund⁹) na proton, a emitowany jest elektron. Rośnie liczba protonów w jądrze, czyli liczba atomowa. Z uwagi na to, że masy protonu i neutronu są w przybliżeniu takie same, liczba masowa się *nie zmienia*.

Przemiana ta ma więc postać¹⁰:



Po rozpadzie β zmienia się liczba atomowa (rośnie o 1), a liczba masowa pozostaje niezmienna. Rozpad β można zapisać symbolicznie w postaci:



Rozpady promieniotwórcze są więc pewnego rodzaju „alchemią” – możemy zamieniać jeden pierwiastek chemiczny na inny. W przykładzie (3.3) neon zamienia się w sód.

W rozpadach beta liczba masowa **się nie zmienia** – a powstaje jądro pierwiastka leżącego na **prawo** w tablicy Mendelejewa.

Bardzo ważne znaczenie dla badania historii Ziemi ma rozpad beta izotopu potasu o $A = 40$, czyli ${}_{19}^{40}\text{K}$. Izotop ten występuje naturalnie w znikomych ilościach (0,01%) i rozpada się z czasem, który możemy nazwać „geologicznym” – 1,2 mld lat; według reakcji:

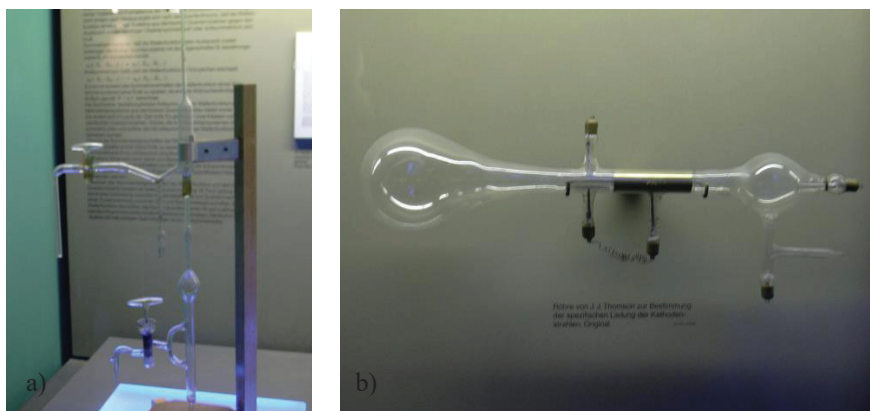
⁹ Czas rozpadu zdefiniujemy dokładniej za chwilę.

¹⁰ Równanie (3.3) nie jest jeszcze dokładne: brakuje po prawej stronie równania trzeciej cząstki – *antyneutrino*.

¹¹ Uwaga: równanie jest niekompletne; poprawną formę przytoczymy w (3.10).



Czas (połowicznego) rozpadu ${}^{40}\text{K}$ jest tylko czterokrotnie mniejszy niż wiek Ziemi, stąd izotop ${}^{40}\text{K}$ jest, obok uranu i ołowiu, jednym z najlepszych „zegarów” dla geologów. Również w naszym organizmie w ciągu sekundy zachodzą tysiące rozpadów beta potasu ${}^{40}\text{K}$.



Ryc. 3.5. Dwa epokowe doświadczenia z końca XIX wieku w Deutsches Museum w Monachium: **a)** doświadczenie Ernesta Rutherforda pokazujące, że w rozpadzie polonu powstaje hel (kopia); **b)** doświadczenie Josepha J. Thompsona odkrycia elektronu: odchyłanie promieni katodowych przez pole elektryczne i magnetyczne (oryginał). Fot. G.K.

Rozpady alfa

Rozpady alfa to najczęstszy typ „naturalnych” procesów promieniotwórczych. Dziś metodami fizyki jądrowej potrafimy wytworzyć wiele sztucznych izotopów, ale Maria Skłodowska-Curie obserwowała jedynie „naturalne” rozpady jądrowe w ciężkich pierwiastkach – uranie, torze itp.¹²

¹² Przez „itp.” rozumiemy nietrwale izotopy będące *produktami* rozpadu, jak rad i polon, które same rozpadają się dalej na lżejsze fragmenty.

Te ciężkie pierwiastki rozpadają się, emitując dodatnio naładowaną cząstkę, nazwaną przez Ernesta Rutherforda „alfa”.

Już sam Rutherford sprawdził, że cząstki alfa to jądra helu ${}^4_2\text{He}$, przeprowadzając bardzo pomysłowe doświadczenie, zobacz ryc. 3.5a. Badał rozpad polonu i w szklanej ampułce zbierał produkty rozpadu. Następnie zbadał widmo powstałego gazu – był to hel!



Przykładem rozpadu alfa jest rozpad polonu ${}^{210}_{84}\text{Po}$. Zachodzi on według schematu:



Powstający izotop ołowiu jest stabilny, a podczas reakcji wydzieli się 5,4 MeV energii (uno-szonej przez wyrzucaną cząstkę alfa, ${}^4_2\text{He}$). Czas (połowicznego) rozpadu polonu jest dość długi (138 dni), a moc wydzielona w jednym gramie wynosi 140 W; z tego powodu polon jest używany jako źródło energii w bateriach termoelektrycznych dla satelitów w kosmosie.

W rozpadach alfa liczba masowa zmniejsza się o 4, a liczba atomowa zmniejsza się o 2: powstaje jądro pierwiastka leżącego o dwa miejsca na lewo w tablicy Mendelegiewa.

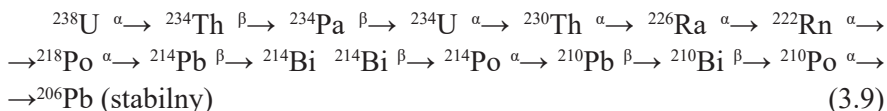
Procesy beta są rozpadami, w których emitowane są cząstki o ujemnym ładunku elektrycznym (elektrony), w rozpadach alfa – cząstki o ładunku dodatnim, ale nie pojedyncze protony i neutrony, jakby tego można oczekiwać, tylko „zlepki” tych cząstek w postaci „gotowego” jądra helu. Okazuje się, że takie gotowe jądro ${}^4_2\text{He}$ jest szczególnie stabilne, tzn. energia jego wiązania jest duża.

W zadaniu 3.4. ocenialiśmy energię elektrostatycznego „rozpychania” się dwóch protonów, rzędu MeV. Otóż – dzięki obecności dwóch neutronów – energia **wiązania** jądra helu ${}^4_2\text{He}$ wynosi aż 28,3 MeV!

Innym przykładem rozpadu alfa jest rozpad naturalnie występującego izotopu uranu o liczbie masowej $A = 238$, zachodzący według schematu:



Powstający izotop toru ${}^{234}\text{Th}$ jest nietrwały i rozpada się w czasie¹³ 24 dni; w kolejnych reakcjach powstaje pluton, inne izotopy uranu i toru, rad, radon (szlachetny gaz, radioaktywny) itd. Cały łańcuch rozpadu uranu ${}^{238}\text{U}$ jest skomplikowany i obejmuje zarówno przemiany α , jak i β . Cały cykl, prowadzący do powstania ołowiu ${}^{206}\text{Pb}$ w reakcji (3.7), przedstawia poniższy schemat, a w rozwiniętej wersji ryc. 3.6.

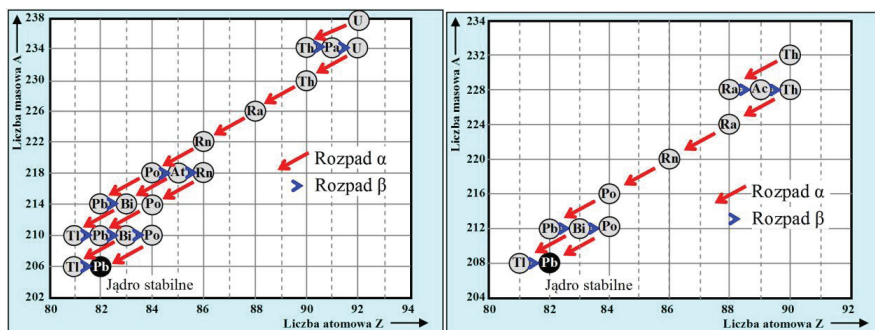


Czas (połowicznego) rozpadu uranu ${}^{238}\text{U}$ wynosi 4,468 mld lat – prawie tyle, co wiek Ziemi. Z proporcji między uranem ${}^{238}\text{U}$ a znajdującym się w tym samym kawałku skały ołowiem ${}^{206}\text{Pb}$ – będącym końcowym, stabilnym produktem rozpadu uranu – możemy wnioskować o wieku skały, a także całej naszej planety¹⁴.

Radon, znajdujący się w połowie cyklu uranowego przedstawionego powyżej, jest o tyle niebezpieczny, że jako gaz może znaleźć się w płucach człowieka. W ciągu kilku dni zachodzi kilka różnych rozpadów, większość z nich alfa, aż do polonu ${}^{210}\text{Po}$, w związku z tym „spustoszenie” radiacyjne w płucach jest spore. Gaz ten występuje na terenach ze skałami pochodzenia magmowego w podłożu (np. Val Rendena w Trentino, Włochy). Aby się ustrzec przed przedostawaniem się radonu do pomieszczeń mieszkalnych, w tradycyjnym budownictwie pozostawiano piwnice z oknami zapewniającymi przepływ powietrza.

¹³ Mówimy o czasie „połowicznego zaniku”, jak to wyjaśnimy nieco dalej.

¹⁴ Zob. np. M. Boyet, R.W. Carlson, ¹⁴⁷ *Nd Evidence for Early (>4.53 Ga) Global Differentiation of the Silicate Earth*, „Science” 2005, vol. 309, s. 576.



Ryc. 3.6. Łańcuch rozpadu uranu ^{238}U i toru ^{232}Th we współrzędnych A i Z ; przemiany z emisją cząstek alfa zmniejszają liczbę masową A o 4 i liczbę atomową Z o 2; przemiany beta nie zmieniają liczby masowej, natomiast zwiększają liczbę atomową o 1. Schemat: K. Służewski

Chcąc wyjaśnić, skąd w jądrze biorą się (gotowe) cząstki alfa, musimy powiedzieć nieco więcej o strukturze jądra, a w zasadzie również o strukturze protonu i neutronu.

3.7. Energia i czas rozpadu; neutrino

Kilkakrotnie wspominaliśmy „okres” rozpadu jąder promieniotwórczych, np. w porównaniu do wieku Ziemi. Sprecyzujemy teraz, jak go liczymy i od czego on zależy. Zaczniemy od tego, że rozpad promieniotwórczy to zjawiska świata atomowego, które rządzą się prawami tego świata, czyli zasadami *mechaniki kwantowej*.

Protony, cząstki alfa, neutrony są uwięzione w jądrach przez siły wzajemnego oddziaływania¹⁵, coś w rodzaju bariery, która ogranicza ich wydostanie się na zewnątrz. Mechanika kwantowa mówi jednak, że nawet jeśli cząstka nie ma energii dostatecznie dużej, aby przejść *ponad* taką ba-

¹⁵ Oddziaływania w jądrze między protonami i neutronami nazywamy oddziaływaniami *silnymi*. Są one krótko-zasięgowe i jak pokazaliśmy w zadaniu 3.4., muszą być one silniejsze niż oddziaływania elektryczne, aby wiązać dodatnie protony (plus neutrony) w stabilne jądro.

rierą, może ona przeniknąć *przez* tę barierę, zobacz ryc. 2.30. Efekt ten nazywamy efektem tunelowym, a *prawdopodobieństwo* przeniknięcia przez barierę zależy od jej szerokości, wysokości oraz energii cząstki padającej. Rozpady alfa to zjawisko kwantowego tunelowania tych cząstek przez barierę potencjału. Podając prawa świata kwantowego, wspomnieliśmy o równaniu Schrödingera: określa ono *prawdopodobieństwo* zdarzeń.

Innymi słowy, rozpadami promieniotwórczymi rządzą prawa *prawdopodobieństwa*. Dla każdego izotopu (i kanału rozpadu) definiujemy „czas połowicznego rozpadu”. Jest to czas, po którym *połowa* z początkowej ilości izotopu ulegnie rozpadowi. Jeżeli okres połowicznego rozpadu uranu ^{238}U wynosi 4,2 mld lat, to po 4,2 mld lat z kilograma uranu pozostanie jedynie pół kilograma wyjściowego materiału. Pozostałe pół rozpadło się w cyklu rozpadów promieniotwórczych. Jeżeli okres połowicznego rozpadu polonu ^{210}Po wynosi 138 dni, to z jednego grama polonu po 138 dniach zostanie pół grama, po kolejnych 138 dniach – $\frac{1}{4}$ grama, po kolejnych 138 dniach – $\frac{1}{8}$ grama itd. Proces rozpadu jest rządzony przez prawa *prawdopodobieństwa*.

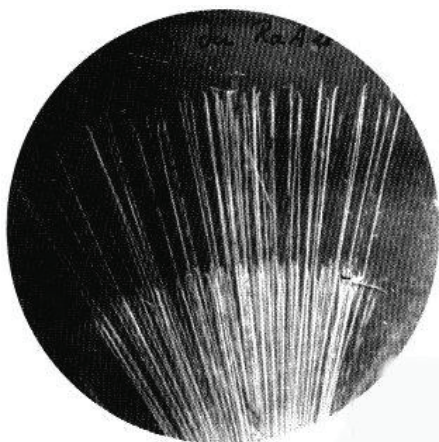
Okresem połowicznego rozpadu $T_{1/2}$ nazywamy czas, po jakim z początkowej ilości substancji promieniotwórczej zostanie jej połowa.

Czasy połowicznego rozpadu dla różnych izotopów mogą bardzo odbiegać od siebie: oprócz czasów „geologicznych”, jak wspomnianych ^{238}U i ^{40}K , izotopy nawet tego samego pierwiastka chemicznego mogą mieć bardzo różne czasy połowicznego rozpadu¹⁶. Wymienione w cyklu rozpadu uranu, ryc. 3.6, produkty przejściowe mają odmienne czasy połowicznego rozpadu: rad $^{226}_{88}\text{Ra}$ – 1600 lat, gaz radon $^{222}_{86}\text{Rn}$ – 3,8 dnia, polon $^{218}_{84}\text{Po}$ – 3 minuty, ołów $^{214}_{82}\text{Pb}$ – 27 minut (ten rozpada się przez proces β); bizmut $^{214}_{83}\text{Bi}$ – 20 minut; w kolejnym rozpadzie β powstaje ponownie polon, ale inny izotop, $^{214}_{84}\text{Po}$, żyjący zaledwie 0,16 milisekundy itd. Spośród różnych izotopów nowego sztucznego pierwiastka o liczbie atomowej $Z = 112$ (czy-

¹⁶ Zamiennie zamiast „czas połowicznego rozpadu” możemy używać pojęcia „czas życia” – nie są to pojęcia równoważne, ale zbliżone – czas połowicznego $T_{1/2}$ zaniku to $0,69 (= \ln 2)$ czasu życia τ ; $T_{1/2} = \tau \ln 2$.

li chemicznie przypominającego rtęć), nazwanego w 2006 roku Copernicium, najdłużej żyjący ma liczbę masową $A = 277$ i czas życia „aż” 1,1 ms.

Niezależnie od bardzo różnych czasów rozpadu w procesach alfa, używana energia (unoszona głównie przez cząstki α) jest podobna – od ułamków do kilku MeV. To też jest spowodowane mechanizmem rozpadu – kwantowym przejściem przez barierę potencjału. Od prędkości cząstek zależy ich zasięg. Cząstki alfa są, jak na świat cząstek elementarnych, dość ciężkie, więc tej samej energii odpowiada mniejszy zasięg. I tak zasięg cząstek alfa w powietrzu wynosi kilka centymetrów, a zatrzymuje je kartka papieru.



Ryc. 3.7. Emisja cząstek alfa ze źródła radowego – zasięg tych cząstek w emulsji fotograficznej wynosi kilka milimetrów; dwa różne zasięgi wskazują na współobecność dwóch różnych izotopów/pierwiastków; badania Ewy Joliot-Curie.

Źródło: P. Radvanyi, *I Curie. La premiata famiglia Nobel*, „Le Scienze. I grandi della scienza” 2002, no. 402.

Cząstki beta (czyli elektrony) – przy tej samej energii, co cząstki alfa – mają większą prędkość. Ich zasięg w powietrzu to kilkadziesiąt centymetrów, a prawie całkowicie zatrzymuje je aluminiowa blacha o grubości 1 mm. Najbardziej niebezpieczne, tzn. przenikliwe, jest promieniowanie gamma.

Z rozpadami *beta* wiąże się inny naukowy „kłopot”. O ile w rozpadach alfa wyrzucane cząstki istnieją wewnątrz jądra, elektrony muszą powstać z rozpadu neutronu. Rozpad ten nastrocza jednak pewien problem: jeśli zachodziłby on zgodnie ze schematem (3.4), to po lewej stronie tego równania mamy jeden neutron (o spinie $\frac{1}{2}$), a po prawej stronie jeden proton (też o spinie $\frac{1}{2}$) i jeden elektron (o spinie $\frac{1}{2}$). Niezachowany byłby sumaryczny spin!¹⁷

W latach 30. XX wieku zauważono jeszcze jedną trudność, jaką nastroczały wyniki doświadczeń na rozpadami beta: brakowało energii! O ile cząstki alfa mają dobrze określony zasięg w różnych materiałach (zob. ryc. 3.7), to cząstki beta zatrzymują się na różnych głębokościach: od zera do pewnej głębokości maksymalnej. Enrico Fermi, włoski fizyk jądrowy, a w czasie II wojny światowej kierownik naukowy prac nad bombą atomową w USA, wydedukował o istnieniu dodatkowej cząstki w produktach rozpadu (3.4). Nazwał ją „małym neutronem”, po włosku *neutrino*. Na co znany już nam Wolfgang Pauli odpowiedział sarkastycznie: „Ale jej nigdy nie znajdziecie”. Pauli miał trochę racji – istnienie neutrino potwierdzono doświadczalnie dopiero w 1956 roku.

Możemy więc zapisać w sposób kompletny reakcję rozpadu neutronu:



a w konsekwencji również rozpad beta:



gdzie przez $\bar{\nu}$ oznaczyliśmy neutrino (a dokładniej *antyneutrino*¹⁸).

¹⁷ Prawo zachowania spinu jest w fizyce tak samo ważne jak prawo zachowania energii!

¹⁸ Według wszelkich obecnych danych antyneutrino różni się od neutrino tylko spinem.

Neutrino jest cząstką, dzięki której w rozpadach beta zostaje zachowany spin i energia: energia rozpadu dzieli się między energię kinetyczną elektronu i antyneutrino. Neutrino oddziałują z materią bardzo słabo – aby zmniejszyć natężenie wiązki neutrin emitowanych ze Słońca o połowę, potrzebna byłaby warstwa ołowiu o grubości równej odległości Ziemi od Słońca¹⁹. W każdej sekundzie przez 1 cm² powierzchni naszego ciała przechodzi $65 \cdot 10^9$ neutrin, nie powodując żadnego efektu biologicznego.

Promieniowanie gamma

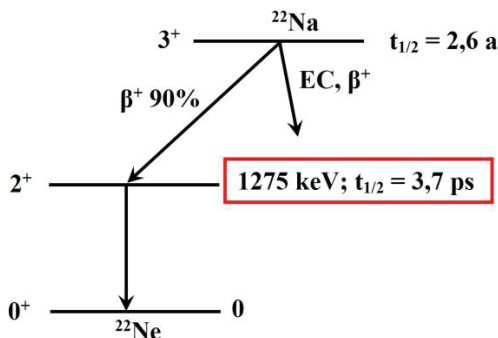
Dochodzimy wreszcie do wyjaśnienia, dlaczego w myśl dzisiejszej nomenklatury „rozpady gamma” są określeniem błędnym. Otóż przemiany jądrowe (nie tylko rozpady alfa i beta) powodują przebudowanie struktury jądra. Podobnie jak w przypadku atomów, przebudowa struktury związana jest z emisją (lub absorpcją) kwantu promieniowania elektromagnetycznego. W tym przypadku energie kwantów są znacznie wyższe niż w sytuacji przeskoków elektronów między orbitami w atomie wodoru – powstające promieniowanie nazywamy *gamma* i ma ono energię od dziesiątych części MeV (np. dla rozpadów plutonu) do kilku megaelektronowoltów.

Promieniowanie gamma może towarzyszyć zarówno rozpadom alfa, jak i beta. Na ryc. 3.8 pokazujemy schemat rozpadu β^+ , czyli z powstaniem antyelektronu, dla jądra sztucznego izotopu sodu, ^{22}Na . Kwant gamma, o energii 1,2 MeV, jest emitowany bardzo krótko po rozpadzie neutronu i jest to związane z przejściem powstałego jądra neonu ^{22}Ne ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego.

W odróżnieniu od cząstek alfa i elektronów, promieniowanie gamma jest bardzo przenikliwe. Dla zatrzymania cząstki alfa o energii 1 MeV wystarczy kartka papieru, dla zatrzymania elektronów o tej energii – blacha Al o grubości 1 mm. Osłabienie o *połowę* promieniowania gamma o tej energii wymaga ołowianej cegły o grubości 5 cm! Promienio-wanie gamma jest

¹⁹ To oszacowanie jest bardzo przybliżone; w wodzie zasięg neutrin to odległość 100 lat świetlnych, znacznie więcej niż rozmiary Układu Słonecznego. Zasięg neutrin zależy od ich energii.

jednocześnie bardzo „energetyczne”²⁰ – to ono czyni główne spustoszenie w organizmie człowieka, powodując wiele przypadków nowotworów.



Ryc. 3.8. Rozpad β^+ sztucznego izotopu sodu ^{22}Na o czasie połowicznego rozpadu 2,6 roku; powstaje jądro neonu ^{22}Ne , ale w stanie wzbudzonym; przechodzi ono do stanu podstawowego po 3,7 ps, emitując kwant gamma o energii 1,2 MeV.

Źródłem promieniowania gamma są wszelkie tzw. materiały radioaktywne. Uran jest dość rozpowszechniony w skorupie ziemskiej. Radioaktywne są więc np. popioły ze spalania węgla. Źródłem promieniowania jest też „kosmos” tak, że natężenie promieniowania gamma na wysokości 10 km jest 10–20 razy większe niż na poziomie morza. Zarówno promienie gamma, Röntgena, promieniowanie nadfioletowe (dla skóry) jak i liczne czynniki chemiczne (benzen w benzynie bezołowiowej, dym nikotynowy itd.) mają działanie *rakotwórcze*. Istotna jest zazwyczaj suma tych czynników – należy więc unikać *zbędnych* zagrożeń.

Fizycy, poczynawszy od prac córki Marii Skłodowskiej-Curie, Ewy i jej męża Fryderyka Joliot-Curie, nauczyli się wytwarzać wiele sztucznych izotopów bombardując inne za pomocą neutronów, protonów, cząstek alfa itd. Powstające sztucznie wytworzone izotopy w wielu przypadkach są nietrwałe, ale mają ważne zastosowania. Izotopy te rozpadają się na wiele sposobów – także poza omówionymi tutaj rozpadami α i β .

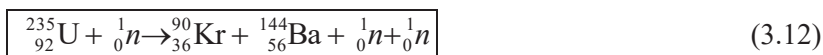
²⁰ Pisząc „energetyczne” mamy na myśli możliwość wywoływania wielu procesów, jak np. jonizacji atomów.

Możliwy jest na przykład wspomniany już rozpad β^+ – z emisją pozytonu, w izotopach ze względny nadmiarem protonów. Przykładem jest sód ^{22}Na rozpadający się²¹ z czasem połowicznego zaniku 2,6 roku na rzadki izotop neonu ^{22}Ne . Emitowane pozytony wykorzystywane są do wykrywania mikro-defektów, np. w materiałach półprzewodnikowych. Innym izotopem rozpadającym się w procesie β^+ jest fluor ^{18}F ($T_{1/2} = 110$ min) używany w tomografii anihilacji pozytonów (PET) do wykrywania nowotworów.

3.8. Reakcje jądrowe

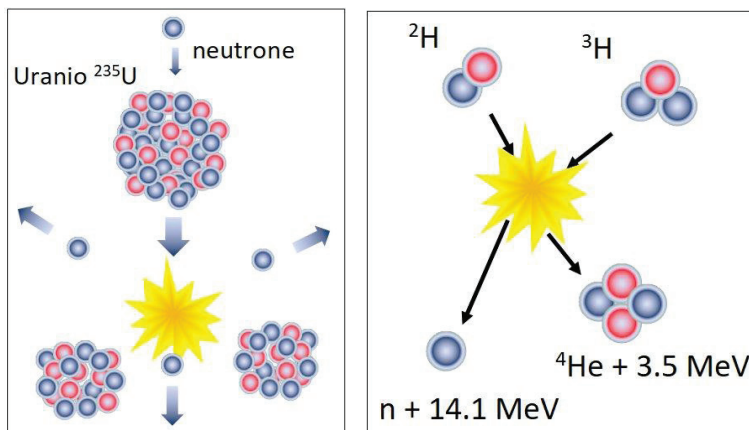
Krótko przed II wojną światową dwójka niemieckich uczonych, Lisa Meitner i Otto Hahn, zauważyli, że rzadziej występujący izotop uranu ^{235}U po pochłonięciu neutronu nie podlega żadnej ze znanych wówczas przemian jądrowych, ale – żartobliwie mówiąc – „rozpada się na dwie nierówne połowy”.

Reakcja, nazywana reakcją *rozszczenia*, może mieć np. przebieg:



W reakcji tej ciężkie jądro, obfite w neutrony, po wchłonięciu dodatkowego neutronu staje się niestabilne i rozpada się na dwa lżejsze fragmenty. W lżejszych jądrach proporcje między protonami i neutronami są bliższe 1:1, w związku z tym po rozpadzie uranu pozostają dwa lub trzy „nadmiarowe” neutrony. One mogą spowodować rozpady kolejnych jąder: rozwija się reakcja łańcuchowa. W każdej z nich wyzwala się energia kilkuset MeV – tak działa bomba „atomowa”, a właściwiej *jądrowa*; na tej zasadzie działają również elektrownie *jądrowe*.

²¹ Stabilny izotop sodu to ^{23}Na : 12 neutronów (i 11 protonów).



Ryc. 3.9. Dwie reakcje jądrowe dostarczające ogromnych ilości energii: **a)** rozszczepienie jądra, np. uranu ^{235}U po pochłonięciu neutronu; **b)** synteza (fuzja) dwóch jąder wodoru – deuteru ^2H i trytu ^3H w jądro helu ^4He ; z fuzji pozostaje jeden neutron – część z 17,6 MeV energii jest unoszona przez ^4He część przez neutron.

Źródło: G.P. Karwasz, *Scienza e Fede. Un breve manuale*, Aracne Editore, Roma 2019. Rys. T. Wróblewski

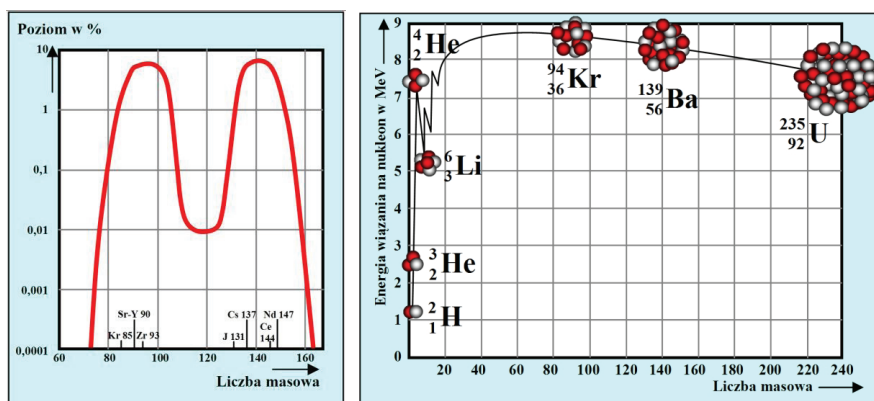
Produkty reakcji rozszczepienia jądra uranu ^{235}U mogą być różne, a zachowana jest jedynie sumaryczna liczba protonów (czyli liczba atomowa), zobacz ryc. 3.10. Jądro uranu to, modelowo, duża kropla, która rozpada się na dwie mniejsze, o rozmiarach trudnych do przewidzenia. Oznacza to, że w wypalonym 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/lub recyklingu produktów rozszczepienia uranu (także plutonu i innych pierwiastków). W produktach rozszczepienia znajdujemy też izotopy, które mogą zostać zaabsorbowane przez organizm człowieka, jak cez ^{137}Cs ($T_{1/2}=30$ lat), stront ^{90}Sr ($T_{1/2}=30$ lat), jod ^{131}I ($T_{1/2}=8$ dni). Z tego powodu technologie jądrowe wymagają szczególnych środków ostrożności.

W reakcji (3.12) rozszczepienia jąder uranu uzyskuje się duże (jak na potrzeby człowieka) ilości energii. Powodem tego jest specyficzna zależność

energii wiązania jąder. Wspomnieliśmy już, że protony się odpychają, w związku z tym konieczna jest obecność w jądrach neutronów. Okazuje się, że po przekroczeniu pewnej sumarycznej liczby protonów i neutronów, energia wiążąca jądro w całość nie rośnie, ale maleje. Energię tę odnosimy do jednego nukleonu (czyli protonu lub neutronu). Energia wiązania cząstek alfa ${}^4_2\text{He}$ wynosiła około 28 MeV, w przeliczeniu na jeden nukleon 7 MeV, znacznie więcej niż np. dla lżejszego izotopu helu ${}^3_2\text{He}$ lub litu ${}^6_3\text{Li}$, zobacz ryc. 3.10b. Z tego powodu cząstka alfa jest tak stabilna.

Z wykresu 3.10b wynika również inna, bardzo ważna konsekwencja praktyczna. Energię możemy uzyskiwać w reakcjach jądrowych *rozszczepienia* ciężkich jąder, ale także *syntezy*, czyli „sklejania” większych jąder z mniejszych fragmentów. Taką reakcję „sklejania” nazywamy, z angielskiego, *fuzją* termojądrową. To reakcje termojądrowe są źródłem energii gwiazd, a kontrolowana reakcja termojądrowa w laboratorium to przedmiot intensywnych badań naukowych. Pozwoliłaby ona zaspokoić zapotrzebowanie ludzkości na energię elektryczną na najbliższe 3000 lat.



Ryc. 3.10. a) Produkty rozszczepienia uranu ${}^{235}\text{U}$ (na dwa fragmenty) obejmują szeroki rozkład izotopów od $A = 70$ do $A = 170$; zwróć uwagę, że skala pionowa jest względna (0,1, 1, 10); **b)** energia wiązania na jeden nukleon w zależności od liczby masowej A ; cząstka alfa, czyli ${}^4\text{He}$, ma dużą energię wiązania; maksimum krzywa osiąga około żelaza ${}^{56}\text{Fe}$; dla jąder poniżej masy żelaza korzystna energetycznie jest synteza, powyżej żelaza – rozszczepienie.

Źródło: European Nuclear Society.

Zadanie 3.5.

Oblicz energię wiązania cząstek alfa ${}^4\text{He}$. Masa jądra helu wynosi $3727,38 \text{ MeV}/c^2$, masa neutronu $939,57 \text{ MeV}/c^2$, a masa protonu $938,28 \text{ MeV}/c^2$.

Dane: $m_{\text{He}} = 3727,38 \text{ MeV}/c^2$, $m_n = 939,57 \text{ MeV}/c^2$, $m_p = 938,28 \text{ MeV}/c^2$

Wskazane masy są w jednostkach bardzo *wygodnych* dla fizyków jądrowych. Zostały już przeliczone na energie, według wzoru Einsteina (3.1) $E = mc^2$, i w dodatku podane nie w dżulach, ale bezpośrednio w elektronowoltach.

Suma mas wynosi $(2 \cdot 939,57 + 2 \cdot 928,28) = 3755,70 \text{ MeV}/c^2$.

Defekt masy wynosi więc $3755,70 - 3727,38 = 28,32 \text{ MeV}/c^2$.

Uzyskany wynik jest zgodny z podaną wcześniej wartością energii wiązania (stąd ją doświadczalnie znamy). Defekt masy jest całkiem duży: 0,8% masy jądra helu. To wyjaśnia, dlaczego energie uzyskiwane z przemian jądrowych są tak duże.

Zadanie (na sprawdzian):

Znajdź w Internecie wartości masy protonu i neutronu wyrażone w kg i powtórz to obliczenie, korzystając z równania Einsteina. Wynik wyraż z dżulach.

Z powyższego przykładu jasno wynika, że w reakcji



uzyskać można aż 28 MeV energii. Taki typ syntezy, z udziałem aż czterech cząstek, nie jest możliwy do realizacji w warunkach ziemskich (jest on zapewne możliwy wewnątrz bardzo ciężkich gwiazd *neutronowych*). Tak w gwiazdach „zwykłych” w rodzaju Słońca, jak i do zastosowań energetycznych na Ziemi wykorzystywaną reakcją *syntezy termonuklearnej* jest synteza helu z dwóch ciężkich izotopów wodoru – deuteru ${}^2\text{H}$ i trytu ${}^3\text{T}$ według wzoru:



W reakcji tej wydziela się 17,6 MeV. Wydaje się to mniej niż w reakcji rozszczepienia uranu, ale w odniesieniu do masy paliwa w reakcji **termojądrowej** wydziela się około 4 razy więcej energii niż w reakcji „jądrowej”. Eksplozja bomby termojądrowej o „sile” równoważnej 15 mln ton trotylu na atolu Bikini na Pacyfiku w 1954 roku była jednym z elementów narastającej po II wojnie światowej wrogości między USA i Związkiem Radzieckim.

Reakcja (3.13) jest „motorem napędowym” Słońca. W warunkach ziemskich synteza termojądrowa byłaby źródłem ogromnych ilości stosunkowo „czystej” energii. Trudnością w jej praktycznym wykorzystaniu jest konieczność stosowania ogromnych temperatur dla zainicjowania reakcji (3.13). Temperatury te są niezbędne, aby zbliżyć odpychające się elektrostatycznie jądra na odległości, w których zaczynają działać przyciągające siły jądrowe. We wnętrzu Słońca panuje temperatura 15 mln K i ogromne ciśnienia wynikające z siły ciężenia; w warunkach laboratoryjnych niezbędne jest uzyskanie temperatury 150 mln K. Warunki takie udało się już uzyskać w próbnej instalacji termojądrowej JET w Anglii.

Znamy dwa sposoby uzyskania znacznych ilości energii z przemian jądrowych:

- w reakcji rozszczepiania, np. rzadkiego izotopu uranu ^{235}U na dwa fragmenty; reakcja jest powodowana pochłonięciem neutronu; jest to mechanizm działania elektrowni jądrowych;
- w reakcji syntezy (termojądrowej), gdy z lżejszych jąder powstają cięższe, aż do żelaza; jest to mechanizm wytwarzający energię w gwiazdach.

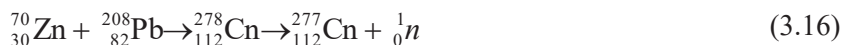
Podane reakcje (3.12) rozszczepienia jąder uranu ^{235}U i termojądrowej syntezy helu z deuteru i trytu (3.14) to tylko dwie z bardzo wielu możliwych *reakcji jądrowych*. Służą one np. do otrzymywania sztucznych, zazwyczaj nietrwałych izotopów, np. do zastosowań w medycynie (jak izotop ^{18}F stosowany w tomografii PET). Pierwsza sztuczna reakcja jądrowa została odkryta przez Ernesta Rutherforda w 1919 roku – w wyniku bombardowania jąder azotu za pomocą cząstek alfa powstaje niestabilny izotop tlenu i emitowany jest proton, według schematu:



Reakcje jądrowe, zachodzące w atmosferze pod wpływem wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego²², są źródłem izotopów wykorzystywanych np. do datowania osadów organicznych. Izotopem takim, niezwykle przydatnym do datowania np. drewnianych prehistorycznych palisad, jest izotop węgla ${}^{14}\text{C}$, o czasie połowicznego zaniku $T_{1/2} = 5370$ lat:



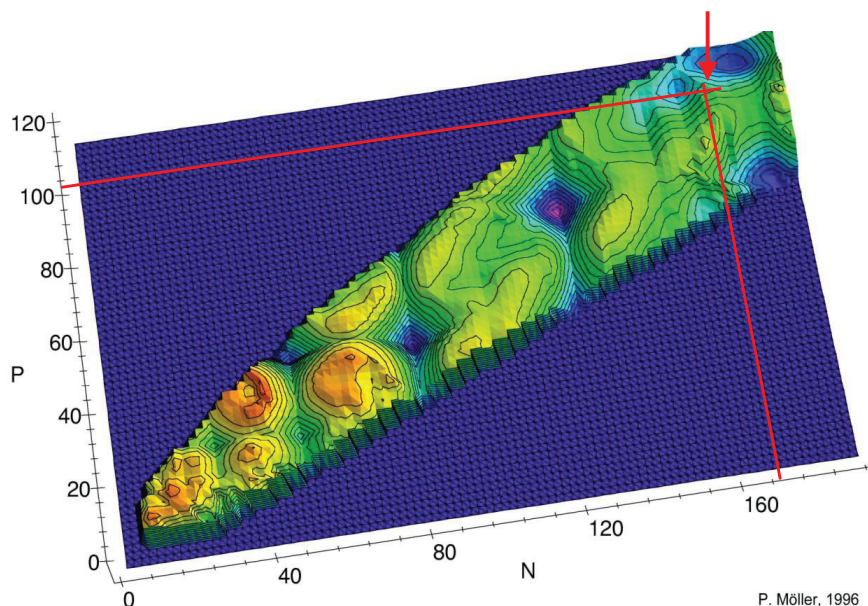
Metodą „sklejania” jąder atomowych rozpędzonych do wielkich energii fizycy potrafią również wytwarzać pierwiastki chemiczne nigdzie nie spotykane w naturze. Wspomniany już copernicium ${}^{277}_{112}\text{Cn}$ powstał w wyniku zderzenia jąder cynku ${}^{70}_{30}\text{Zn}$ i ołowiu ${}^{208}_{82}\text{Pb}$, a nadmiarowy neutron „odparował” po zderzeniu.



Nazwa copernicium została nadana w rocznicę urodzin Kopernika, 19 lutego 2010 roku. Pierwiastek ten przypomina chemicznie (zapewne) rtęć i przypuszczaalnie pierwszy z pierwiastków na hipotetycznej „wyspie stabilności”²³.

²² W promieniowaniu kosmicznym znajdujemy protony, neutrony, alfa, miony, mezony π , kwanty gamma itd.

²³ Stabilność jąder zależy zarówno od ilości protonów, jak i neutronów. Stwierdzono, że jądra o niektórych ilościach neutronów i protonów są silniej związane (stabilniejsze) niż inne. Tak zwane „liczby magiczne” dla protonów to: 2 (stąd, ${}^4_2\text{He}$), 8 (${}^{16}_8\text{O}$), 20 (${}^{40}_{20}\text{Ca}$), 28 (${}^{56}_{26}\text{Fe}$, choć niedokładnie), 50 (${}^{120}_{50}\text{Sn}$), 82 i 114 (a 126 dla neutronów, stąd stabilny izotop ${}^{208}_{82}\text{Pb}$). Rozpowszechnienie pierwiastków chemicznych na Ziemi (i w kosmosie) wynika m.in. z tych liczb magicznych.



Ryc. 3.11. Półwysep znanych izotopów (oś X – liczba neutronów, oś Y – liczba protonów) jest szeroki, ale tylko niektóre z jąder w jego centralnej części są stabilne; widoczne „doliny” większej energii wiązania dla protonowych i neutronowych liczb magicznych; duży niebieski „basen” to ołów; copernicium $_{112}\text{Cn}$ zaznaczony strzałką.

Źródło: prof. Sigurd Hofman, wykład w Instytucie Fizyki UMK 26 marca 2011 roku.

3.9. Proton i neutron: kwarki

W par. 3.6. poświęconym rozpadom promieniotwórczym omówiliśmy najpierw rozpad beta minus (tzn. z emisją elektronu), a później rozpad alfa. Okazało się jednak, że rozpad alfa jest stosunkowo prosty do wyjaśnienia: „skotłowane” w jądrze protony i neutrony mają sporą szansę na utworzenie dość stabilnej struktury w postaci cząstki alfa ^4_2He , a ta poprzez efekt tunelowy może z jądra uciec. Rozpad beta, czyli przeistoczenie się neutronu w proton, wydawał się reakcją prostą, ale w rzeczywistości wymaga istnienia „egzotycznej” cząstki – neutrina, praktycznie nieoddziałującego z materią.

Dodatkowo stwierdzono, że niektóre jądra (jak ^{22}Na , ^{19}F) rozpadają się w tzw. procesach „beta plus”, czyli z emisją dodatniego elektronu – pozytonu (antyelektronu). Zachodziłaby więc reakcja rozpadu protonu na neutron, pozyton i neutrino. Z kolei masa protonu jest mniejsza niż masa neutronu. Trudności w zrozumieniu rozpadów beta jest wiele. Widocznie i proton, i neutron nie są wcale cząstkami elementarnymi, ale się jeszcze z czegoś składają.

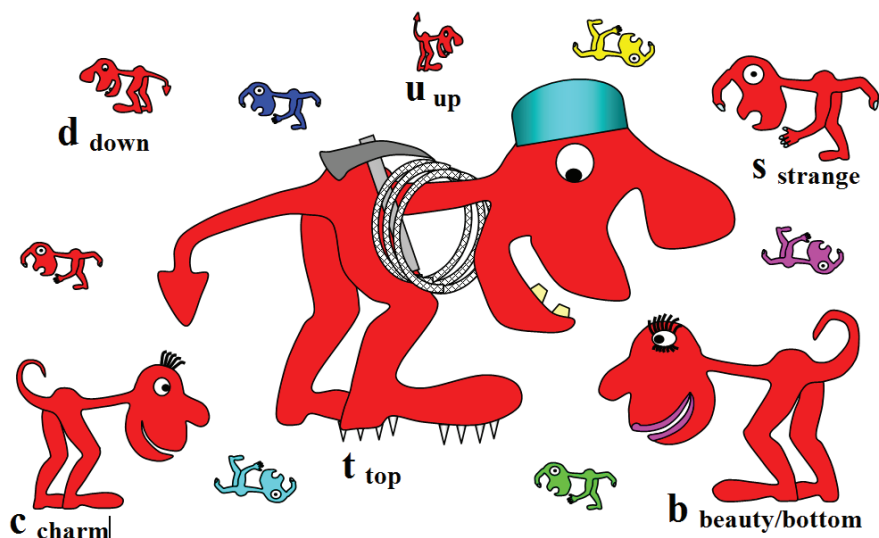
Kolejnym argumentem przemawiającym za złożoną strukturą protonu i neutronu były odkrycia innych „cząstek elementarnych”, poczynając od lat 40. ubiegłego wieku, zobacz par. 3.10. Jeżeli proton i neutron są w jądrze związane silnymi a krótkozasięgowymi oddziaływaniami, to musi istnieć cząstka je wiążąca. Postępy w badaniu *promieniowania kosmicznego* oraz budowa przyspieszaczy cząstek, czyli *akceleratorów*, otworzyły prawdziwy „róg obfitości” dla badaczy cząstek elementarnych.

Wszystkie te studia doprowadziły do wniosku, że proton i neutron muszą składać się z mniejszych cząstek, nazwanych²⁴ przez Muraya Gell-Manna „kwarkami”. Dane doświadczalne wskazywały, że są dwa rodzaje kwarków – nazwano je *up* i *down* (górny i dolny). Kwarki w protonie i neutronie są trzy, więc mają ułamkowe ładunki elektryczne: kwark *up* ma ładunek $+2/3e$, a kwark *down* $-1/3e$, gdzie e jest, jak zwykle, ładunkiem elektronu²⁵.

Na ryc. 1.10b przedstawiliśmy trzy kwarki w protonie i antyprotonie za włoskim rysownikiem, który wyobraża je sobie jako kolorowe kuleczki. Ziemia z dalekiego kosmosu też wygląda jak mała kuleczka, a ma mieszkańców i ich miasta. Może więc i kwarki mają jakąś postać? Na ryc. 3.12. przedstawiamy kwarkowe „zoo”, tak jak je sobie wyobraża dr Tomasz Wróblewski z Akademii Pedagogicznej w Słupsku.

²⁴ Terminu „quark”, po niemiecku „twaróg”, użył irlandzki pisarz James Joyce w „Trenie Finnegana”.

²⁵ Dokładniej przez e oznaczyliśmy tu wartość bezwzględną ładunku elektronu.

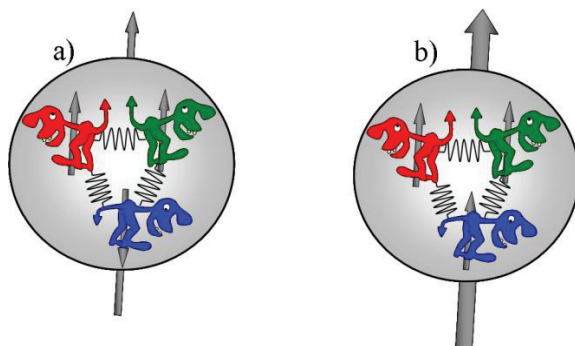


Ryc. 3.12. Kwarkowe „zoo” według T. Wróblewskiego; rozmiary kwarków są tak dobrane, że czwarta potęga ich rozmiarów liniowych jest proporcjonalna do ich masy; „morda” kwarka – prawo, lewo wskazuje na znak ładunku, kwarki występują w trzech kolorach. © TW i GK

Kwarków jest sześć, pogrupowanych w trzy rodziny. Tylko dwa najważniejsze z nich, kwark *up* i *down*, wchodzą w skład „zwykłej” materii. Proton składa się z dwóch kwarków *up* i jednego cięższego, *down*. Neutron składa się z dwóch kwarków *down* i jednego *up*. Rozpad β^- (beta minus) polega na przemianie jednego kwarka *down* w neutronie w kwark *up*, rozpad β^+ na przemianie jednego kwarka *up* w protonie na kwark *down*. Reakcję rozpadu β^- (3.10) możemy więc zapisać jeszcze raz, tym razem jako rozpad kwarku *down*.

$${}_{-1/3}d \rightarrow {}_{+2/3}u + {}_0^{-1}e + \bar{\nu} \quad (3.16)$$

Łatwo zauważyć, że ładunek sumaryczny jest zachowany. Kwarki są fermionami, mają spin połówkowy, więc i sumaryczny spin w równaniu (3.16) jest zachowany. Jak się sumują spiny kwarków wewnątrz protonu i „cięższego protonu”, tzw. hiperonu delta Δ^+ , przedstawiamy na ryc. 3.13.



Ryc. 3.13. Proton (a) i cząstka Δ^+ są zbudowane tak samo – z dwóch kwarków *up* i jednego kwarku *down*; różnią się jedynie spinem, co powoduje, że cząstka Δ^+ jest aż o 30% cięższa niż proton. Rys. T. Wróblewski © TW i GK

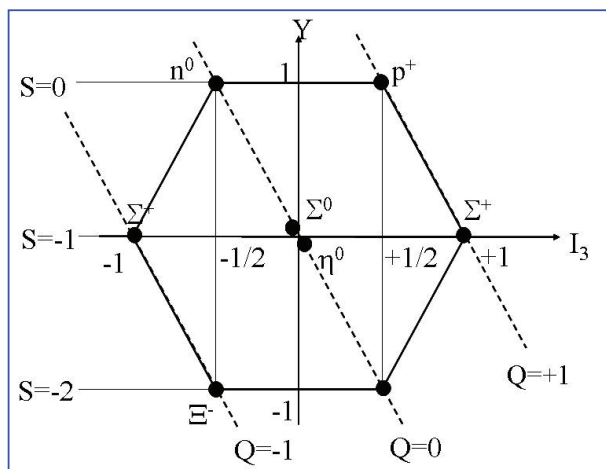
Pozostaje jeszcze kwestia masy kwarków – i to jest problem „delikatny”. Mimo że w każdym z nas są miliardy miliardów miliardów ($>10^{27}$) kwarków, ich masy znamy z bardzo kiepską dokładnością. Do niedawna (2014 r.) granice oszacowań – tak doświadczalnych, jak i teoretycznych – podawały masę kwarku *up* między $1,5 < m_{\text{up}} < 5$, a masę kwarku *down* między $5 < m_{\text{down}} < 9$, gdzie użytą jednostką jest stosowany już przez nas MeV/c^2 .

Zadziwiające jest, że tak lekkie (trzy) kwarki, nieco cięższe jedynie od elektronu $m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$, składają się na tak ciężkie *nukleony* (przypominamy, o masach około $938 \text{ MeV}/c^2$). Jest to oczywiście efekt relatywistyczny – kwarki w nukleonach są tak „rozpędzone”, że ich gigantyczną energię kinetyczną obserwujemy jako wzrost masy. Kto to wyjaśni dokładnie, uzyska bez wątpienia Nagrodę Nobla!

3.10. Cząstki elementarne

Hipoteza kwarków okazała się niezwykle cenna dla badań teoretycznych (również doświadczalnych) nad cząstkami elementarnymi. Podobnie jak Sommerfeld w 1916 roku, fizycy jądrowi w latach 60. XX wieku wyszukiwali nowe liczby kwantowe, zachowane w przemianach cząstek „elementarnych”. Tworzyli także schematy przypominające tablicę Mendelejewa.

Prezentujemy poniżej jedną z takich klasyfikacji dla cząstek „ciężkich”, tzw. barionów.



Ryc. 3.14. Próba klasyfikacji „ciężkich” cząstek elementarnych, tzw. barionów: oktet barionowy; obserwowane cząstki zostały uporządkowane według spinu S i ładunku elektrycznego Q ; neutron znajdujemy w lewym górnym rogu, a proton w prawym. Rys. G.K.

Wprowadzenie pojęcia kwarku bardzo uprościło klasyfikację cząstek. Według naszej obecnej wiedzy kwarki mogą łączyć się jedynie w grupy po dwa (kwark + antykwark) lub w grupy po trzy, jak $uud = \text{proton}$, $udd = \text{neutron}$.

Zestawy kwark + antykwark nazywamy *mezonami*, czyli cząstkami „pośrednimi”. Rzeczywiście, pierwszy (w 1949 r.) odkryty mezon, π^+ , ma masę $139 \text{ MeV}/c^2$. Składa się on z kwarku u i antykwarku $\bar{d}$. Jego antycząstka, mezon π^- , ma identyczną masę, ale ładunek przeciwny; składa się z antykwarku $\bar{u}$ i kwarku d : $\pi^- = (\bar{u}d)$. Mezon obojętny elektrycznie π^0 jest kwantową „mieszaniną” mezonów π^+ i π^- : $\pi^0 = 1/\sqrt{2}(u\bar{u} + d\bar{d})$.

Mezony są niezwykle ważne: to one „sklejają” składniki jądra – protony i neutrony. Tak jak pole elektromagnetyczne, czyli fotony są przyczyną oddziaływania między ładunkami elektrycznymi, tak piony wymieniane

bez przerwy między protonami i neutronami są przyczyną oddziaływań silnych (w jądrze). Rzuca to nowe światło na strukturę jądra: nie możemy w jądrze rozróżnić protonów od neutronów, bo bez przerwy wymieniają one między sobą własne składniki, czyli zespoły kwarków.

W ten sposób związane przez kwarki w mezonach protony są neutronami, a neutrony protonami. Od czasu do czasu w cięższych jądrach powstaje przejściowy twór, cząstka alfa, i może ona jądro opuścić. W reakcjach jądrowych, po przegrupowaniu kwarków, czasem zostaje nadmiarowy neutron, czasem proton. Reakcja przemiany dwóch kwarków, jak (3.16), również podlega zasadom prawdopodobieństwa – rozpad kwarków jest rządzony przez tzw. oddziaływania *słabe*.

Które z obserwowanych cząstek możemy zakwalifikować jako „elementarne”? Z pewnością *foton* i *elektron*. Mimo że w produktach zderzeń wysokoenergetycznych elektronów np. z pozytonami obserwujemy roje innych cząstek, to pochodzą one z Einsteińskiego $E = mc^2$, czyli zamiany energii kinetycznej cząstek na masę innych cząstek. Nie zaobserwowano nigdy rozpadu elektronu na mniejsze fragmenty – jest to cząstka elementarna.

Elektron ma dwóch cięższych „partnerów”, którzy żyją bardzo krótko i rozpadają się m.in. na elektron. Są to tzw. miony, μ (masa 207 razy większa niż elektron) i cząstka tau (τ) o masie 3477 razy większej niż masa elektronu. Rodzinę tych trzech cząstek nazywamy *leptonami*, czyli cząstkami lekkimi. Trzy leptony (i trzy antyleptony) to też cząstki elementarne.

Również kwarki tworzą trzy rodziny (generacje): *up – down*, *strange – charm*, *top – bottom*, o rosnących masach. Wyższe generacje kwarków nie są stabilne. Pierwszy kwark „egzotyczny”, *strange* – dziwny, odkryli w 1952 roku Polacy, Marian Danysz i Jerzy Pniewski. Kolejne kwarki były odkrywane za pomocą wielkich akceleratorów. Czy już wszystko wiemy?

Model teoretyczny, zakładający trzy generacje kwarków i leptonów, jak do tej pory się sprawdza. Nie bardzo potrafimy przewidzieć np. masę protonu, ale model ten, oparty na parametrach uzyskanych z wieloletnich doświadczeń, dobrze wyjaśnia obserwowane różne reakcje między cząstkami.

Podjęto wiele prób rozszerzenia/zmiany tego modelu. Wymienimy tu teorię strun, hipotezy o ukrytych wymiarach czasoprzestrzeni, grawitację

kwantową itd. Żadna z nich nie daje tak rewolucyjnych wniosków o świecie wokół nas, jak dały np. prawa Maxwella. Tymczasem wydaje się, że nadciąga burza, podobna do hipotezy Plancka.

W rozważaniach o Wszechświecie „nie zgadza” się bilans 96% masy i energii. Na razie, roboczo, nieobserwowalny (a z pewnością istniejący) Wszechświat nazywamy *ciemną masą* i *ciemną energią*. Czym one są dziś (20 lutego 2020 r.), tak naprawdę nie mamy nawet mglistego pojęcia.

Budowa i powstanie Układu Słonecznego

4.1. Mieszkając na wirującej planecie

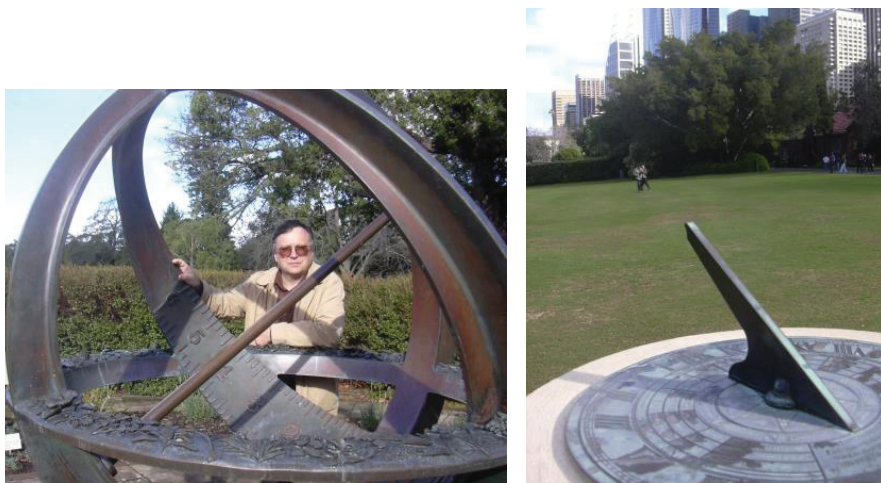
Pojęcia „wschód” i „zachód” oznaczają nie tylko punkty na horyzoncie, ale mają znaczenie kulturowe i geograficzne. Mówimy „Europa Zachodnia”, „Bliski Wschód”, „Dziki Zachód”. Jak się to ma do kierunków świata? Stojąc na półkuli północnej, jak w Polsce, twarzą zwróceniu na południe, mamy po lewej ręce „wschód”, a po prawej „zachód”. Słońce wschodzi na wschodzie, zachodzi na zachodzie, a w południe jest na południu. Mówimy, że „słońce wschodzi”, ale od czasów Kopernika wiemy, że to Ziemia się kręci.

Obrazy kręcącej się Ziemi stanowią czołówkę co drugiego dziennika telewizyjnego, nie tylko w Polsce. Kula ziemską na tych obrazach kręci się z lewa na prawo – patrząc z góry kręci się w kierunku „odwrotnym do kierunku ruchu wskazówek zegara”. Skąd takie porównanie? Otóż jeżeli Ziemia kręci się w kierunku odwrotnym do kierunku obrotu wskazówek zegara, to cień wskazówki *zegara słonecznego* na półkuli północnej będzie się poruszał się w kierunku *zgodnym* z kierunkiem zegara. Lub raczej: to wskazówki zegara kręcą się w kierunku cienia wskazówki zegara słonecznego.



Ryc. 4.1. Obraz kręcącej się Ziemi jest czołówką wielu dzienników TV – tu przykład włoski (Canale 5), niemiecki (ZDF)

Inaczej jest w Australii – tam też słońce wschodzi na wschodzie i zachodzi na zachodzie, ale w samo południe jest dokładnie na *północy*. Trudno się temu dziwić: Słońce świeci (20 marca i 22 września) pionowo nad równikiem, a dla Australii równik jest na północy. W konsekwencji zegary słoneczne w Australii mają rosnący porządek godzin w odwrotnym kierunku niż zegary w Europie.



Ryc. 4.2. Słońce widziane z półkuli południowej zatacza na niebie łuk w „odwrotnym” kierunku: ze wschodu na zachód, ale w samo południe wskazuje geograficzną północ; zegary słoneczne w parku w Sydney mają odwrotny niż w Europie porządek godzin – liczby rosną w kierunku przeciwnym niż na tarczy zwykłego zegara. Fot. M.K.

Widziany świat zależy więc od punktu patrzenia. Na Ziemi, wirującej na równiku z prędkością 40/24 tys. km na godzinę, trzeba mieć sporo wyobraźni, aby opisać Układ Słoneczny tak, jak by go widział przybysz z innej galaktyki.

Pytanie: Czy widziałeś zegar słoneczny? A może znajdziesz jakiś w Internecie?

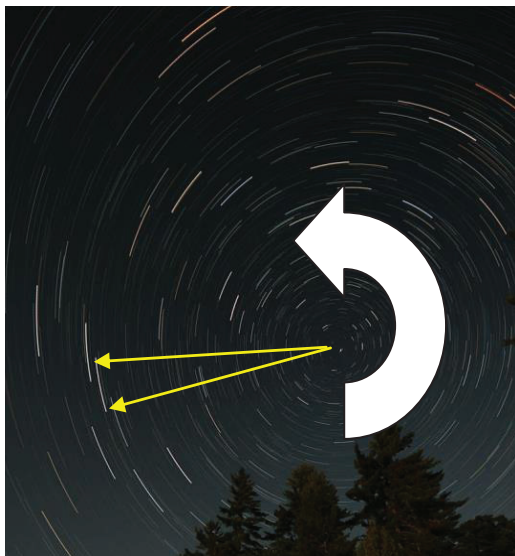
Jeżeli Ziemia się kręci, to gdy stoimy na niej nieruchomo, wydaje się nam, że to raczej cała „kopuła” niebieska kręci się nad naszą głową. Trudno to zauważyć „gołym okiem”, ale położony nieruchomo przez kilka minut aparat fotograficzny zarejestruje gwiazdy, które zataczają część okręgu. Tego rodzaju zdjęcie pokazujemy na ryc. 4.4: w ciągu 2 godzin gwiazdy zataczają wokół Gwiazdy Polarnej łuk okręgu o kącie $\varphi = \frac{2}{24} \cdot 360^\circ$.

W ciągu jednej godziny cały nieboskłon, tak w dzień jak i w nocy, zatacza kąt $\varphi = 15^\circ$ (czyli jeden stopień katowy w cztery minuty zegarowe)



**Ruszył Ziemię,
wstrzymał Słońce i niebo**

Ryc. 4.3. Na cokole pomnika Kopernika niemiecki rzeźbiarz F. A. Tieck w 1853 roku napisał po łacinie *Terrae motor, Solis Caelioque stator* – „Ruszył Ziemię, wstrzymał Słońce i **niebo**”. Sam Kopernik pisał: „Czyż możliwe jest, że to nie Ziemia się kręci, a całe ogromne niebo, którego granic nie znamy, ani znać zapewne nie możemy?” Fot. M.K.



Ryc. 4.4. W ciągu 1 godziny wszystkie gwiazdy na niebie, Słońce, Księżyc, planety zataczają łuk o kącie rozwarcia 15° . Na tym zdjęciu kąt wynosi około 13° , zdjęcie wykonywano przez około 50 minut. Dłuższe łuki (ale te same kąty) zataczają gwiazdy położone dalej od Gwiazdy Polarnej, <https://www.youtube.com/watch?v=ZdPmdac1iEc>

Rycinę 4.4 wykonano, celując aparatem fotograficznym w Gwiazdę Polarną – stojąc twarzą na południe, musimy (w Polsce) wychylić się do tyłu, aby mieć ją nad głową. Jest to jedyny nieruchomy punkt na nieboskłonie. Ale obrót dziennie-nocny nieba to nie jest jedyny ruch widoczny z Ziemi. Słońce i Księżyc w ciągu dni i miesięcy poruszają się również *na tle* gwiazd. Dokładniej: poruszają na tle wąskiego pasa gwiazdozbiorów, który już w starożytności nazwano zoo-diakiem, czyli zwierzyńcem niebieskim.

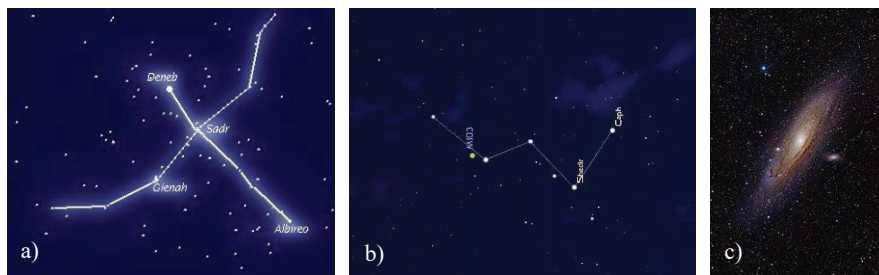
Aby o nim opowiedzieć, warto opuścić wirującą Ziemię i spojrzeć na Układ Słoneczny z perspektywy przybysza z dalekiego kosmosu, tak jak to narysował Kopernik na ryc. 1.2a.

Pytanie: Jaki kąt zataczają (pozornie) gwiazdy w ciągu jednej minuty? A pięciu minut? Wynik podaj w postaci ułamka zwykłego, np. $(\frac{1}{2})^\circ$.

Zauważ, że 15° to w przybliżeniu kąt, pod jakim widzisz rozwartą dłoń (tzw. span), jeśli wyciągniesz rękę na całą długość ramienia. Kąt $1,5^\circ$ (tarczy Księżyca) to grubość kciuka w podobny sposób obserwowana.

4.2. Niebieski zwierzyńiec

Starożytni Grecy (a przed nimi Egipcjanie, Babilończycy, Medowie i inni), wpatrując się (bezczyinnie, bez TV i Internetu) godzinami w niebo, wyobrażali sobie na nim postacie z mitologii – herosów i ratowane przez nie kobiety (Perseusza, Kasjopeję, Andromedę), zwierzęta (łabędzia, smoka) czy różne obiekty, np. strzałę.



Ryc. 4.5. Dwa charakterystyczne gwiazdozbiory letniego nieba na półkuli północnej: **a)** Łabędź (*Cygnus*) i **b)** Kasjopeja (*Cassiopeia*). Latem, przed północą, znajdziesz łabędzia nad głową, a Kasjopeję nieco na wschód. Pod Kasjopeją, na dwusiecznej kąta dwóch prawych ramion, o trzy długości ramion w dół znajdziesz **c)** mgławicę Andromedy – galaktykę widoczną nawet gołym okiem¹. Źródło: Wikipedia.

Szczególne 12 gwiazdozbiorów w pasie, po którym (pozornie) w ciągu roku porusza się Księżyc i Słońce, określono nazwami zwierząt (ale nie tylko): Baran, Byk, Bliźnięta, Panna, Lew itd. Na pewno wiesz, „pod jakim znakiem” zodiakalnym jesteś urodzony!

Warto wrócić do rysunku Kopernika (ryc. 1.2) i porównać go z modelem Bohra atomu wodoru (rys. 2.21), aby zrozumieć, dlaczego Słońce (a Księżyc i planety również) porusza się w wąskim pasie nieba. Elektrony w atomie przemieszczają się we wszystkich kierunkach, ba! orbitale są tak umieszczone, aby były jak najdalej od siebie (zob. np. orbitale *p* i *d* na ryc. 2.37). Jest to oczywiste: ujemne elektrony wzajemnie się odpychają. Inaczej jest w przypadku planet. Przez cztery i pół miliarda lat orbity planet

¹ http://www.margheritacampaniolo.it/la_costellazione_cigno.htm

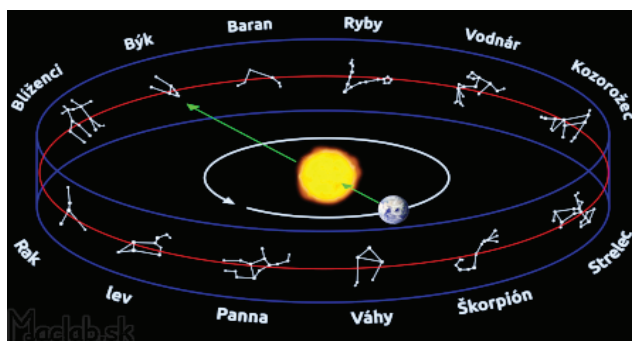
(powstałych z jednej, jedynej rozkręconej proto-mgławicy) ustawiły się w jednej *plaszczyźnie*. Plaszczyznę tę nazywamy *ekliptyką*.

Odmienne niż elektrony w atomie, wszystkie planety (i Księżyc) krążą w przybliżeniu w jednej płaszczyźnie. W płaszczyźnie tej leży również Słońce.

Płaszczyznę opisującą orbitę Ziemi dookoła Słońca nazywamy ekliptyką.

Z modelu Kopernika łatwo wywnioskować, że jeżeli Ziemia krąży dookoła Słońca (a czyni to na schemacie z ryc. 1.2 w kierunku odwrotnym do kierunku obiegu wskazówek zegara), to z Ziemi wydaje się, że to Słońce na tle gwiazd przesuwa się w *lewo*. Ruch ten nie jest łatwy do zaobserwowania – na tle jakiego gwiazdozbioru znajduje się aktualnie Słońce, wnioskujemy z tego, jaki gwiazdozbiór ekliptyki widzimy w kierunku południowym o naszej północy (tzn. o godzinie 24:00)².

O ile przesuwa się Słońce w lewo w ciągu miesiąca? To proste: o $\varphi = \frac{1}{12} \cdot 360^\circ$, czyli 15° . Jak widzisz, stopnie i minuty wymyślili Babilończycy, aby łatwiej liczyć położenie Słońca na niebie.



Ryc. 4.6. Słońce widziane z Ziemi przesuwa się w lewo i zatacza w ciągu roku pełne 360° na tle gwiazdozbiorów zodiaku. Ruch ten widziany z Ziemi nakłada się na obrót dobowy. Rys. Matej Pašák, <https://www.maclab.sk/clanky/zverokruh.php>

² Innymi słowy, o północy widzimy w kierunku południowym gwiazdozbiór zodiaku przeciwny do tego, w którym aktualnie znajduje się Słońce.

W pierwszym rozdziale przedstawiliśmy Układ Słoneczny tak, jak go znał Mikołaj Kopernik. W schemacie z ryc. 1.2a należałoby dodać jedynie kierunek obrotu „sfer” – okazuje się, że wszystkie planety widziane z perspektywy ryc. 1.2a poruszają się w kierunku odwrotnym do wskazówek zegara. Również Księżyc krąży wokół Ziemi w kierunku odwrotnym do ruchu wskazówek. Oznacza to, że także Księżyc obserwowany z Ziemi przesuwa się na nieboskłonie w lewo, mniej więcej o $\varphi = \frac{1}{30} \cdot 360^\circ$ co noc.

Słońce, widziane z Ziemi, przesuwa się na tle zodiaku w lewo o mniej więcej 15° na miesiąc.

Księżyc, widziany z Ziemi, przesuwa się na tle zodiaku w lewo mniej więcej o 12° na dobę.

Ale Słońce i Księżyc nie są jedynymi obiektami, które (pozornie) wędrują po zodiaku. Starożytni (a za nimi Kopernik) znali pięć takich „błądzących gwiazd”, czyli planet: Merkurego, Wenus, Marsa, Jowisza, Saturna.

Pytanie: Sprawdź, w jakich miesiącach jest widoczny na niebie „Twój” gwiazdozbiór zodiakalny. Jeśli chcesz go zobaczyć, szukaj go w pasie, po którym wędruje (pozornie) Słońce i Księżyc. Ekliptyka, czyli (pozorne) tory wszystkich planet i Księżyca, leżą w pasie zodiakalnym.

4.3. Nierozłączna para: Ziemia – Księżyc

Miesiącem Słowianie nazwali naturalnego satelitę Ziemi, gdyż co określony czas (około 30 dni) pojawiał się pełną tarczą na niebie. Początkową fazę (od nowiu do pierwszej kwadry) nazywano wówczas Księżcem (od słowa „książe”), czyli synem Miesiąca³. Jak „wschód” i „zachód” tak *księżyc* ma mnóstwo znaczeń, szczególnie dla poetów i zakochanych.

³ Nazwy niektórych pojęć związanych z Księżcem wywodzą się od słów *Selene* oraz *Luna* (odpowiednio greckiej i rzymskiej bogini Księżyca). *Selenographia: sive Lunae descriptio* (*Selenografia: lub opisanie Księżyca*) to dzieło napisane w 1647 roku przez Jana Heweliusza. Gdański astronom opisał w niej obserwacje Księżyca, jakie

Obserwując Księżyc z Ziemi, widzimy, że jego rozmiar zmienia się: raz jest nieco większy (rozmiar kątowy wynosi $33'$), innym razem wydaje się mniejszy ($29'$). Rozmiar tarczy Księżyca to średnio nieco więcej niż pół stopnia (mniej więcej grubość kciuka widzianego na wyciągniętej ręce⁴). Obserwowane rozmiary naszego satelity zależą od miejsca, w którym znajduje się na orbicie względem Ziemi, ponieważ odbiega ona od kształtu koła – jest eliptyczna. Najmniejsza odległość, na jaką satelita może zbliżyć się do Ziemi, wynosi 363 tys. km. Mówimy, że Księżyc jest wtedy w *perygium*⁵ swojej orbity; największa – 405 tys. km (*apogeum*). Światło pokonuje odległość Ziemia – Księżyc w czasie ok. 1 sekundy: Księżyc znajduje się w przybliżeniu w odległości 1 *sekundy świetlnej* od Ziemi.

Księżyc jest ciałem szarym jak popiół⁶. Ze względu na konfigurację, w jakiej znajdzie się satelita względem Słońca i Ziemi, obserwujemy **fazy Księżyca** (patrz ryc. 4.7). Księżyc przesuwa się (pozornie) po niebie w ciągu jednej doby o odległość kątową ok. 13° , z zachodu na wschód. Widziany z kosmosu Księżyc obiega Ziemię w ciągu 27,3 dnia (jest to tzw. **miesiąc sydereczny**). W tym czasie jednak Ziemia zmienia położenie na orbicie względem Słońca, dlatego aby zaobserwować kolejną tę samą fazę, Księżyc musi „dogonić” Ziemię – potrzebuje na to około 2 dni. Faktyczny okres pomiędzy kolejnymi identycznymi fazami wynosi zatem 29,5 dnia i nazywany jest **miesiącem synodycznym** (ryc. 4.7).

Księżyc, podobnie jak planety, obraca się również wokół własnej osi. Obserwując z Ziemi powierzchnię Księżyca, widzimy cały czas tę samą jego stronę, ponieważ okres obiegu wokół Ziemi jest równy okresowi obrotu satelity wokół własnej osi⁷. To „samouzgodnienie” okresu obrotu

wykonał w zbudowanym przez siebie obserwatorium, mieszczącym się na dachach trzech kamienic w centrum miasta (nota: Magda Więcek).

⁴ Nie martw się, jeżeli masz mały kciuk – przypuszczalnie i ramię masz odpowiednio krótsze!

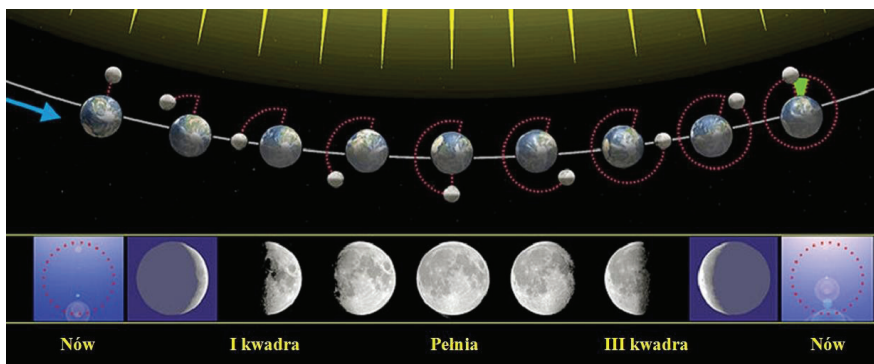
⁵ W podobnym nieco znaczeniu bliskości znajdziesz grecki przedrostek w słowie „pery-feria” i „pery-skop”.

⁶ Naukowo warstwę pyłu pokrywającego Księżyc (i inne planety skaliste, w tym Ziemię) nazywamy *regolitem*.

⁷ Jest to nieliczny w Układzie Słonecznym przykład takiej synchronizacji (1:1) ruchów dwóch ciał niebieskich. Obiegi trzech z czterech największych satelitów Jowisza, a mianowicie Io, Europy i Ganimedesa, mają się do siebie jak 1:2:4. Okres

i obiegu dookoła Ziemi jest zjawiskiem dość wyjątkowym w całym Układzie Słonecznym⁸. Jego przyczyną były opory ruchu spowalniające obrót Księżyca, gdy i Ziemia, i Księżyc były jeszcze półpłynne.

Z uwagi na niewielkie „drgania” orbity Księżyca (tzw. libracje) widzimy z Ziemi nieco więcej (59%) niż połowę powierzchni naszego satelity; pierwsze zdjęcia tzw. ciemnej strony Księżyca wykonała dopiero radziecka sonda *Łuna 3* w 1959 roku.



Ryc. 4.7. Schemat przedstawiający występowanie faz Księżyca oraz definicję miesiąca syderecznego (27,3 dnia) i miesiąca synodycznego (29,5 dnia); Księżyc obiega Ziemię w tym samym kierunku (przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, o ile oglądany jest znad ziemskiego bieguna północnego), w którym Ziemia obiega Słońce.

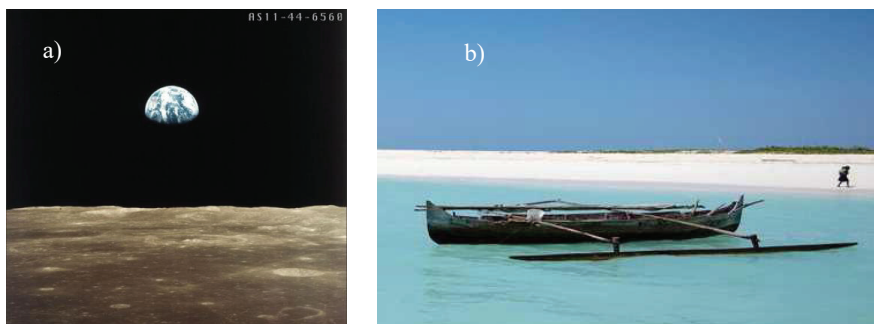
Źródło: https://en.wikipedia.org/wiki/Lunar_phase.

Trudno przecenić znaczenie Księżyca dla powstania życia na Ziemi. To jego sąsiedztwo powoduje przypływy i odpływy, które w niektórych miejscach spiętrzenia wody, jak np. w ujściu Tamizy, sięgają kilku metrów. Życie powstało w wodzie, ale rozwinęło się w całe bogactwo form dopiero na lądzie.

obrotu Merkurego wokół własnej osi ma się do okresu obiegu dookoła Słońca jak 3:2. Te tzw. rezonanse są wynikiem „samo-uzgodnienia” orbit pod wpływem wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego. Warunkiem koniecznym są jednak procesy strat energii, jak np. pływy oceanów magmy były przyczyną „samo-uzgodnienia” ruchu Księżyca.

⁸ Podobne „samo-uzgodnienie” wykazuje Pluton i jego satelita Charon.

Samo łacińskie określenie *satelita*⁹ oznacza nie tyle obiekt astronomiczny, co „nieodłącznego towarzysza”, coś w rodzaju straży przybocznej. Ziemia jest jedyną planetą Układu Słonecznego, która ma satelitę o porównywalnych rozmiarach (promień nieco więcej niż $\frac{1}{3}$ promienia Ziemi¹⁰). Ma to zasadnicze znaczenie dla stabilizacji nachylenia osi Ziemi. Przeprowadzone niedawno symulacje komputerowe pokazują, że bez Księżyca oś Ziemi „rozchwiałaby się” już po 10 mln lat.



Fot. 4.8. a) Z powierzchni Księżyca trudno stwierdzić, czy to Księżyc towarzyszy Ziemi, czy Ziemia Księżycowi (fot. NASA Apollo 11). Ta fotografia bywa opisywana jako „wschód Ziemi widziany z Księżyca”. W rzeczywistości Ziemia nie wschodzi ani nie zachodzi na Księżycu: świeci zawieszona na stałe jak latarnia, a jedynie kręci się szybko – raz na 25 godzin; **b)** układ Ziemia – Księżyc można przyrównać do pirogi z Polinezji: tubylcy żeglują na większej łodzi, ale mniejsza jest niezbędna dla zachowania równowagi.

Źródło: <http://www.charter-caraibi.it/public/Images/sitiSatellite/chartercaraibi/caraibi/caraibi%202.jpg>

4.4. Zaćmiewania i tranzyty

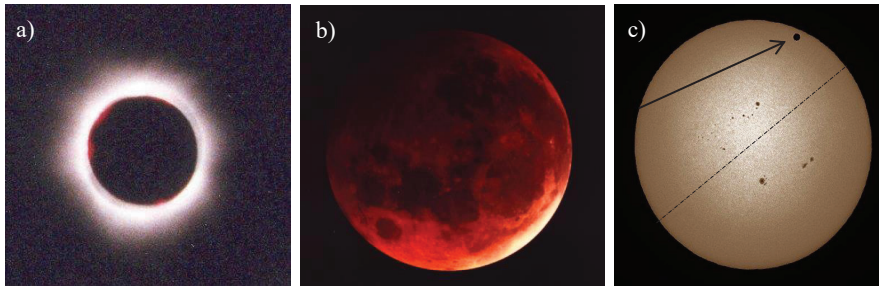
Pierwsze zapiski o zaćmieniu Słońca pochodzą z notatek chińskich astronomów już z roku 775 p.n.e. Przez długi czas przypisywano zaćmieniom

⁹ *Satelita* <łac. *satelles*, D. *~litis* = służa, strażnik, towarzysz podróży>, *Słownik wyrazów obcych PWN*, PWN Warszawa 1972, s. 668.

¹⁰ Dokładnie promień Księżyca wynosi 1740 km, w porównaniu z 6370 km promieniem Ziemi.

złowieszcze znaczenie: Słońce gaśnie, jakby je pożarł smok¹¹. To chęć przewidywania zaćmień napędzała rozwój astronomii.

Dziś wiemy, że obserwowane z Ziemi zaćmienie powodują trzy ciała niebieskie – Ziemia, Słońce i Księżyc ułożone dokładnie w linii prostej względem siebie. Gdy cień Księżyca padnie na Ziemię – obserwujemy z Ziemi zaćmienie Słońca; gdy cień Ziemi padnie na Księżyc – zaćmienie Księżyca (ryc. 4.9b).



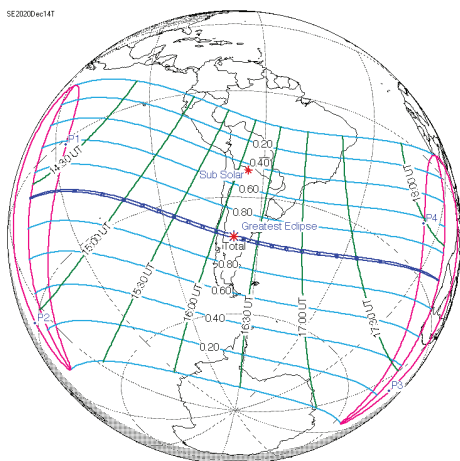
Ryc. 4.9a. Zaćmienie całkowite Słońca, Monachium 1998. Tylko w strefie zupełnego cienia obserwujemy zaćmienie *całkowite*. Kiedy Księżyc jest od Ziemi nieco „za daleko”, obserwujemy zaćmienie „obraczkowe”. Fotografia została wykonana zwykłym aparatem (na klisze), bez specjalnych filtrów – w czasie zaćmienia robi się ciemno jak w nocy (fot. G.K.); **b)** zaćmienia Księżyca zdarzają się o wiele częściej niż zaćmienia Słońca i trwają nawet godzinę. Tarcza Księżyca robi się ciemnobura: to półcień Ziemi z jej atmosferą (fot. G.K.); **c)** Tranzyt Wenus na tle tarczy słonecznej godz. 6:25, 6 czerwca 2012 r., Monte Bondone, Trento, szer. geogr. 46°N: Wenus to plamka w górnym prawym rogu, pozostałe ciemne punkty to plamy słoneczne. Linia przerywana to ekliptyka (widziana o wschodzie Słońca, więc nachylona). Fot. Cristian Lavarian

Zaćmienie Słońca występuje wtedy, gdy Księżyc znajdzie się pomiędzy Ziemią i Słońcem, a jego tarcza widziana z Ziemi (której rozmiary kątowe są porównywalne do rozmiarów tarczy Słońca) zasłoni całą (zaćmienie całkowite) lub część (zaćmienie częściowe) tarczy naszej gwiazdy. Zaćmienia

¹¹ Kto przeżył zaćmienie całkowite, znakomicie to rozumie. Z powodu różnicy temperatur między nagrzanym gruntem a wędrującą (z prędkością kilku tysięcy km/h) strefą cienia, zaczyna wiać gwałtowny, zimny wiatr, a ptaki zaskoczone nagłą nocą pośpiesznie szukają kryjówek.

Słońca zdarzają się średnio dwa razy w roku – kiedy orbita naszego satelity, nieco nachylona do ekliptyki, przecina ją, ryc. 4.10a. Problem w tym, że cień Księżyca na powierzchni Ziemi ma średnicę tylko kilkudziesięciu kilometrów, ryc. 4.10b. Na określonym obszarze *całkowite* zaćmienie zdarza się więc rzadko – raz na kilkanaście lub kilkadziesiąt lat. Oczywiście półcień Księżyca na Ziemi jest większy, więc zaćmienia częściowe są częstsze, bez konieczności podróży po Ziemi.

Zaćmienie Księżyca obserwowane jest wtedy, gdy Ziemia znajdzie się pomiędzy Słońcem i Księżycem, a jej cień padający na tarczę Księżyca zasłoni jego część lub całość. O ile zaćmienie Słońca, szczególnie to całkowite, zdarzające się bardzo rzadko w określonym miejscu, ma przebieg „dramatyczny”, o tyle zaćmienie Księżyca, zdarzające się nawet parę razy w roku, często bywa niezauważone. Z uwagi na proporcje odległości i rozmiarów cień Księżyca na Ziemi ma rozmiary najwyżej kilkudziesięciu kilometrów. W konsekwencji zaćmienie Słońca w określonym punkcie na Ziemi trwa nie więcej niż 8 minut. Zaćmienie Księżyca odbywa się bez szumu wiatru, Księżyc przygasa, staje się ciemnobrązowy¹², a całe zjawisko trwa nawet 100 minut.



Ryc. 4.10. Predykcja całkowitego zaćmienia Słońca, na dzień 14 grudnia 2020, które będzie/było widoczne z Ameryki Południowej. Obszar zaćmienia całkowitego (ślad) i częściowego (zakresowany). Eclipse Predictions by Fred Espenak, NASA's GSFC – <http://eclipse.gsfc.nasa.gov/>

¹² Kolor buroczzerwony zaćmionego Księżyca wynika z obecności atmosfery na Ziemi, która rozprasza nieco promienie Słońca, tak że Księżyc nie jest zupełnie czarny.

Tranzyt planet na tarczy Słońca

Już za czasów Ptolemeusza (tzn. w I wieku n.e.) astronomowie wiedzieli, że dwie planety: Merkury i Wenus mogą przechodzić na tle tarczy Słońca. Pierwsze matematyczne obliczenia tranzytu wykonał Kepler. W słynnych „Tablicach Rudolfańskich” (*Tabulae Rodolfinae*, 1627) przewidział przejście Merkurego z 7 listopada 1631 roku oraz przejście Wenus miesiąc później.

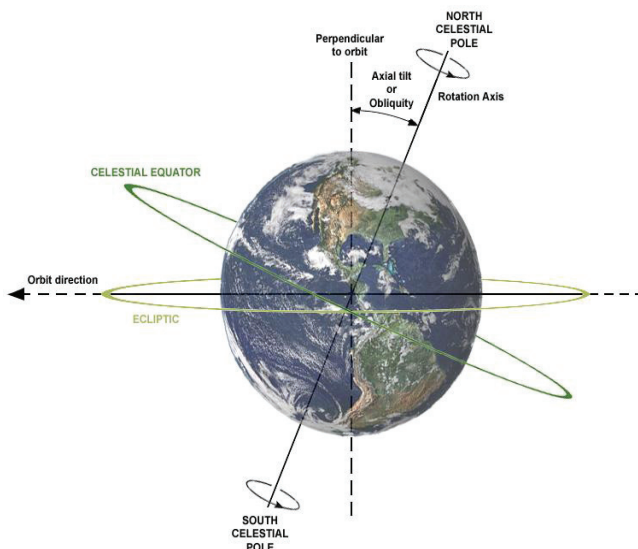
Do tranzytu dochodzi, gdy jedna z planet wewnętrznych (Merkury lub Wenus) znajdzie się pomiędzy Ziemią a Słońcem. Tranzyt Wenus zachodzi okresowo co: 8, 105, 8, 121 lat. Ostatni obserwowany był w 2004 roku, kolejny w 2012, następne będą w 2117 oraz 2125 roku. Tranzyty Merkurego, który jest położony blisko Słońca i obiega je raz na 88 dni, mogą być obserwowane znacznie częściej. Mają one miejsce w maju lub listopadzie. W XXI wieku było już ich cztery: w 2003, 2006, 2016 i 2019 roku. Następny, obserwowalny z Ziemi¹³, będzie dopiero w 2032 roku. Możliwe są również podwójne tranzyty, gdy obie planety przechodzą na tle tarczy Słońca, zdarzają się jednak raz na kilkadziesiąt tysięcy lat.

W przypadku planet zewnętrznych (znajdujących się w większej odległości od Słońca niż Ziemia) tranzyty są niemożliwe. Możemy zaobserwować natomiast **okultację**, czyli przesłonięcie planet zewnętrznych przez obiekty znajdujące się bliżej Słońca (Księżyc).

4.5. Cztery pory roku

Skąd się biorą pory roku i do czego „służą”? Fascynowały one nie tylko geografów i astronomów, ale też kompozytorów i poetów. Powodem występowania pór roku jest dość znaczne ($23^{\circ}27'$) nachylenie osi obrotu Ziemi do płaszczyzny obiegu dookoła Słońca (czyli ekliptyki), zobacz ryc. 4.11.

¹³ Łazik marsjański *Curiosity* obserwował tranzyt Merkurego na tle tarczy Słońca 4 czerwca 2014 roku. Źródło: https://en.wikipedia.org/wiki/Transit_of_Mercury (dostęp: 20 maja 2020).



Ryc. 4.11. Występowanie pór roku (lata w lipcu na półkuli północnej, a w styczniu na półkuli południowej) jest uwarunkowane nachyleniem osi obrotu Ziemi do płaszczyzny ekliptyki. Pokazany jest kierunek obrotu osi Ziemi oraz kąt nachylenia osi. Dodatkowo w bardzo długim okresie, 25 tys. lat, oś Ziemi zatacza na niebie okrąg: 3 tys. lat p.n.e (tj. w czasach budowy piramid) gwiazdą polarną był Thuban, w gwiazdozbiorze Smoka. Za 10 tys. lat oś Ziemi będzie wskazywała Deneb w gwiazdozbiorze Łabędzia. To powolne krążenie (w odwrotnym kierunku niż obrót kuli ziemskiej) było znane Kopernikowi: w ten sposób wyjaśnił on przesuwanie się dnia równonocy w kierunku stycznia. Zjawisko nazwano precesją: ta niedokładność kalendarza stała się przyczyną reformy dokonanej przez papieża Grzegorza XII w 1582 roku

Źródło: D. Nillson, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AxialTiltObliquity.png>

W ruchu dookoła Słońca Ziemia ustawia się „bokiem” w stosunku do Słońca w marcu (20.) i wrześniu (22.): w tych dniach promienie słoneczne padają (w południe) prostopadłe na równik. W czerwcu Ziemia nagrzewa swoją północną czapę polarną – dzień na szerokościach geograficznych powyżej $66^{\circ}33'N (=90^{\circ}-23^{\circ}27')$ trwa pół roku, a temperatury na Alasce dochodzą w lipcu do $30^{\circ}C$.

Moment, w którym Słońce osiąga (w południe) najwyższą możliwą pozycję na horyzoncie, nazywamy przesileniem letnim (łac. *solstitium*).

W tym stuleciu na półkuli północnej jest to 21 czerwca. W końcu czerwca w St. Petersburgu, w Norwegii i Islandii można przeżywać „białe noce”, a znaczne różnice w długości dnia obserwujemy nawet w Polsce. W Jastarni słońce wschodzi o 4:08 (polskiego czasu astronomicznego), a w Cieszyńnie o 4:37. Dzień nad morzem w lecie jest o godzinę dłuższy niż w Tatrach!

Dzień przesilenia letniego potrafiły, zapewne, wyznaczać nawet ludy prehistoryczne. Mogły do tego służyć megalityczne „menhiry” w Stonehenge w Anglii z III tysiąclecia p.n.e. A już Kopernik za astronomami starożytnymi wiedział, że moment równonocy systematycznie przesuwają się o kilkanaście minut na rok. Powodem jest *trzeci* ruch Ziemi: **precesja** osi obrotu, jak stożki zataczane przez oś bąka, wyprowadzonego z równowagi. Ruch ten jest powolny – oś Ziemi zakreśla pełny stożek raz na 25,8 tys. lat. W czasach faraonów gwiazdą polarną był *Thuban* w konstelacji Smoka.

Pory roku nie występują na wszystkich planetach. Obserwowane są na Marsie, który ma podobne nachylenie osi do płaszczyzny swego obiegu dookoła Słońca, $25^{\circ}32'$ (i podobną długość doby, 24,5 h). Pory roku nie występują na Wenus, dla której nachylenie osi wynosi tylko 3° . Wenus jest najgorętszą planetą Układu Słonecznego, ze średnią temperaturą około 460°C . Wynika to z gigantycznego efektu cieplarnianego, spowodowanego dużymi ilościami dwutlenku węgla, dwutlenku siarki i pary wodnej w atmosferze tej planety.

4.6. Błądzące gwiazdy

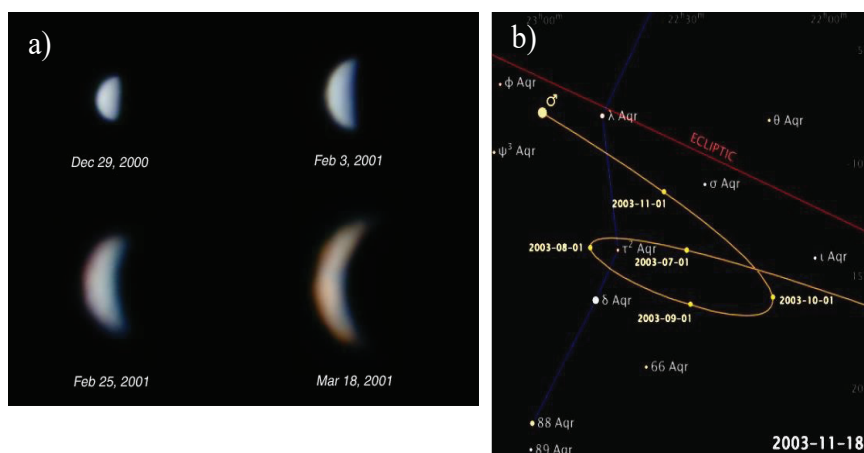
Mianem błądzących gwiazd (planet) astronomowie starożytni określili kilka obiektów, w pasie zodiaku (czyli w płaszczyźnie ekliptyki), które podobnie jak Słońce przesuwają się w ciągu roku w lewo, ale trzy z nich również „błądziły”, zataczając pętle „do tyłu”.

Planety łatwo zidentyfikować na nocnym niebie: są dość jasne (zależy to jednak od konkretnego okresu), poruszają się w płaszczyźnie ekliptyki i, w odróżnieniu od gwiazd, „nie migają”. Ta ostatnia cecha wynika z faktu, że gwiazdy są od nas bardzo daleko, więc wydają się punktami. Małe zaburzenia w ziemskiej atmosferze – gdzieś po drodze światła z kosmosu – powodują, że światło raz dociera do naszego oka, a raz nie: gwiazdy do nas

„mrugają”. Planety są znacznie bliżej, widzimy je jako małe plamki już przez zwykłą lornetkę, więc świecą, dla nas Ziemiaków, światłem ciągłym.

Planety mają swoje barwy – Mars czerwony, Saturn jasnożółty. Planety wewnętrzne, Wenus i Merkury (zob. schemat Kopernika na ryc. 1.2), wykazują fazy jak Księżyc. Przez pewne okresy są oświetlone przez Słońce z boku i wyglądają jak sierp Księżyca. Szczególnie dobrze widoczne jest to dla Wenus, parę godzin przed wschodem lub pół roku później parę godzin po zachodzie słońca, ryc. 4.12a.

Planety wewnętrzne „wędrują” w okolicach Słońca. Inaczej jest w przypadku planet zewnętrznych: Marsa, Jowisza, Saturna, Urana, Neptuna, których ruch, widziany z Ziemi, jest specyficzny: planety te zakreślają na zodiaku pętle. Mars zatacza największą pętlę, najdalszy od Ziemi Neptun – najmniejszą. Otóż Ziemia, zgodnie z III prawem Keplera (zob. par. 4.7), porusza się po orbicie z większą prędkością kątową (liniową również większą, równanie 1.14) i w pewnych okresach (tj. ich zbliżenia) Ziemia wyprzedza Marsa. Na tle gwiazd stałych wydaje się, jakby Mars zawrócił, ryc. 4.12b. Prawdziwie błędząca gwiazda!



Ryc. 4.12. Dwa dowody na rzecz teorii Kopernika: **a)** fazy Wenus, zauważone po raz pierwszy przez Ga-lileusza; **b)** zapętłona (jeśli widziana z Ziemi) trajektoria Marsa na niebie.

Źródło: T. Harrison, New Mexico State University; Wikipedia. <http://ganymede.nmsu.edu/tharriso/ast110/class08.html> (dostęp: 20/06/2012) http://en.wikipedia.org/wiki/File:Apparent_retrograde_motion_of_Mars_in_2003.gif

4.7. Nasze najbliższe kosmiczne sąsiedztwo – Układ Słoneczny

W skali całego Kosmosu układ planetarny jest najmniejszym dostrzegalnym tworem, pozostaje takim naszym „najbliższym podwórkiem”. Wszystkie obiekty wchodzące w skład Wszechświata, które nie należą do Układu Słonecznego, znajdują się w dużo większych odległościach od Ziemi.

Ruchami planet, komet, satelitów, asteroidów rządzi znane już Wam prawo grawitacji. Nie jest to ruch „idealny”, o jakim marzyli starożytni astronomowie czy nawet początkowo Kepler. Powiedzieliśmy już, że planety poruszają się w płaszczyźnie ekliptyki, czyli toru Ziemi dookoła Słońca. Teraz musimy dodać: *prawie* w płaszczyźnie ekliptyki. Rozważaliśmy poprzednio orbity kołowe. Teraz musimy poprawić: *prawie* kołowe. Ale astronomiczne prawa Keplera, oparte na fizycznym prawie grawitacji, pozostają *dokładnie* prawdziwe.

Poprawki do ruchu planet wynikają z wielu czynników. Oddziaływanie grawitacyjne dotyczy nie tylko par Ziemia – Księżyc i Słońce – Ziemia. Wszystkie ciała w kosmosie wzajemnie na siebie oddziałują grawitacyjnie. Poza tym planety w Układzie Słonecznym poruszają się od kilku miliardów lat, i ich obecne miejsce jest skutkiem wszystkich oddziaływań zachodzących przez ten okres. Stąd im dokładniejsze maszyny cyfrowe, tym dokładniej przewidywać możemy przyszłe zjawiska astronomiczne.

Heliocentryczna teoria usunęła Ziemię z centrum Wszechświata i nadała jej drugorzędną funkcję w Układzie Słonecznym. Kopernik pokazał, że w centrum Układu Słonecznego znajduje się Słońce, a wokół niego po eliptycznych orbitach krążą wszystkie planety. Poprawnie podał kolejność znanych wówczas planet oraz oszacował ich odległości. Kopernik wiele lat zwlekał z drukiem swojego dzieła. Przypuszczalnie po 40 latach własnych obserwacji astronomicznych wiedział, że planety nie krążą po dokładnych kołach, ale nie potrafił tego udowodnić. Dziś wiemy, że planety poruszają się po *elipsach*, dla których w jednym z *ognisk* znajduje się Słońce. Orbita Ziemi

jest niewiele spłaszczona – wzajemny stosunek dwóch osi elipsy wynosi 1,017, ale orbita Marsa już bardziej – stosunek osi wynosi 1,093¹⁴.

Szczegółowy obraz Układu Słonecznego zawdzięczamy Janowi Keplero-
rowi, który do teorii Kopernika dodał trzy bardzo ważne prawa. Kepler
oparł się na obserwacjach ruchu planet (głównie Marsa) wykonanych przez
Tychona Brahego. Ten ostatni swoje obserwacje zapisał Keplerowi w testa-
mencie. Kepler w 1609 roku w dziele „Astronomia Nova” zawarł pierwsze
dwa prawa, a następnie w 1619 r. w „Harmonices Mundi” treść kolejnego,
trzeciego prawa.

I prawo Keplera:

Każda planeta w Układzie Słonecznym porusza się wokół Słońca po elipsie,
a Słońce znajduje się w jednym z jej ognisk.

II prawo Keplera:

Linia łącząca Słońce z planetą (wektor wodzący) zakreśla w dowolnej jedno-
stce czasu jednakowe pola wycinków elipsy.

III prawo Keplera:

Stosunek kwadratu okresu obiegu planety wokół Słońca do sześciannu wielkiej
półosi jej orbity (czyli średniej odległości od Słońca) jest stały dla wszystkich
planet w Układzie Słonecznym.

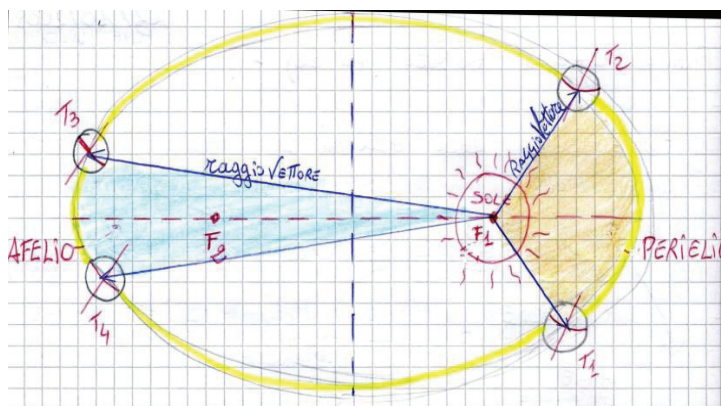
Dzięki znajomości fizyki trzy prawa Keplera nie powinny być dla Was
zaskoczeniem. Jedynie pierwsze z nich wymaga nieco trudniejszej mate-
matyki¹⁵. Trzecie sformułowaliśmy w rozdziale I. Drugie potwierdza wy-
prowadzone przez nas równanie (1.14) – im dalej od Słońca, tym wolniej-
szy ruch.

Kepler zauważył rzecz bardzo interesującą dla orbit eliptycznych –
w równych odcinkach czasu pole zakreślone przez promień wodzący pla-
nety pozostaje stałe. Innymi słowy, dla takiego samego czasu im promień
mniejszy, tym łuk zatoczony w tym samym czasie większy i odwrotnie,

¹⁴ W konsekwencji aphelium i perihelium dla Marsa różnią się też znacznie
(1,67 AU i 1,38 AU).

¹⁵ Ogniska nie należy mylić ze środkiem elipsy. Słońce nie znajduje się w środku
elipsy, ale w jej ognisku. Jest to konsekwencja prawa grawitacji. Wyprowadzenie orbit
eliptycznych wymaga znajomości wyższej matematyki, zob. np. nasza strona „Fizyka
zabawek”, <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/mech/kepler.htm>.

zobacz ryc. 4.13. W języku fizyki nazwalibyśmy tę zależność *zasadą zachowania pędu*. Wraz z innymi zasadami – zachowania energii, pędu (a także ładunku i spinu w przemianach cząstek elementarnych) – stanowi ona *credo* fizyków: nie ma dowodów, że zasady te mogą być lokalnie (albo w całym Wszechświecie) złamane.



Ryc. 4.13. Drugie prawo Keplera w ilustracji Martyny, uczennicy klasy 1A szkoły hotelarskiej w Porto Sant' Elpidio (Włochy): w równych odcinkach czasu pola zakreślone przez promień wodzący planety są równe. Punkt orbity najbliższy Słońca to perihelium, najdalszy – aphelium. Przez F_1 i F_2 są oznaczone dwa ogniska elipsy.

Źródło: <http://pierluigistoppa.altervista.org/SITO%20STOPPA+/SCIENZE%20DELLA%20TERRA.html>

Od tamtej pory Wszechświat stał się dużo prostszy. Kopernik wprowadził ład i porządek do ruchu planet, natomiast Kepler delikatnie przesunął tory, po których one się poruszają.

Kopernik oraz Kepler nie wiedzieli o istnieniu Urana i Neptuna. Uran, mimo że widoczny gołym okiem, porusza się po zodiaku tak wolno, że dopiero William Herschel w 1781 roku stwierdził, że to planeta. Neptun został znaleziony w 1846 po godzinie obserwacji przez astronoma Johanna G.J. Galle'a, przez wiele lat profesora Uniwersytetu we Wrocławiu. Jednak odkrycie Neptuna tak naprawdę zawdzięczamy *matematykom*, którzy podali jego położenie na podstawie zaburzeń w orbicie Urana. I Uran, i Neptun są planetami gazowymi, nieco mniejszymi od Saturna.

Z kolei na podstawie zaburzeń w orbicie Neptuna poszukiwano następnego obiektu. Pluton został odkryty w 1930 roku przez młodego adepta astronomii, Clyde'a Tombaugh, metodą cierpliwego porównywania klisz fotograficznych. Metoda matematyczna w przypadku Plutona zawiodła: jest on zbyt mały, aby wprowadzić istotne zaburzenia orbity masywnego Neptuna, a jego orbita jest nachylona do ekliptyki pod kątem aż 17° . Przez długi czas zaliczany był do grona planet. Dopiero odkrycie w 2005 roku Eris – obiektu o masie nieco większej od Plutona i okrążającego Słońce po wydłużonej orbicie raz na 650 lat – spowodowało zmianę, to znaczy wprowadzenie nowej definicji „planety”. W myśl tej definicji z 2006 roku ani Eris, ani Pluton nie należą do planet – są stosunkowo małe, ich orbity są znacznie nachylone do ekliptyki silnie wydłużone. Nie mamy dostatecznie jasnych danych, jak te „planety karłowate” powstały.

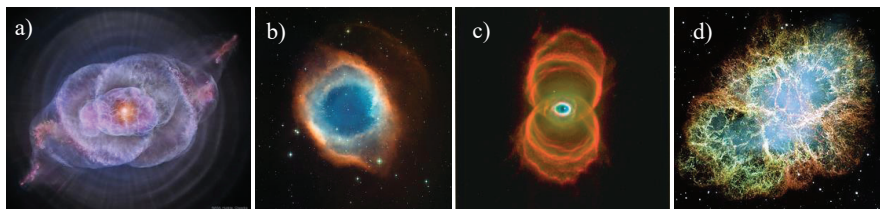
4.8. Budowa i powstanie Układu Słonecznego

Najbardziej wiarygodna do dziś hipoteza powstania Układu Słonecznego została sformułowana przez Immanuela Kanta i Pierre'a-Simona Laplace'a w połowie XVIII wieku. W myśl tej hipotezy Układ Słoneczny powstał przez grawitacyjną kondensację chmury gazowo-pyłowej. Dziś, dzięki postępom astrofizyki i fizyki jądrowej, potrafimy stwierdzić, że chmura taka utworzyła się w wyniku eksplozji gwiazdy, która wcześniej zajmowała miejsce Słońca. Gwiazda ta, masywniejsza od Słońca, wypaliła paliwo w swoim cyklu życiowym, zapadła się, ponownie rozgrzała i wybuchła, podobnie jak supernowe na ryc. 4.14.

W trakcie zapaści, we wnętrzu gwiazdy, pod ogromnymi ciśnieniami dokonała się synteza jąder pierwiastków chemicznych cięższych od żelaza, np. miedzi, selenu, uranu. W wyniku wybuchu pierwiastki te, jak i inne typowe dla gwiazd, zostały wyrzucone w kosmos.

W Układzie Słonecznym cztery wewnętrzne planety – Merkurego, Wenus, Ziemię i Marsa – nazywamy *tellurycznymi* od „Terra”, czyli Ziemia. Ich średnia gęstość przekracza 5 g/cm^3 . Gęstość planet zewnętrznych, Jowisza, Saturna, Urana i Neptuna, jest znacznie mniejsza, ok. $1,2 \text{ g/cm}^3$. Odzwierciedla to zasadnicze różnice w ich składzie. W skorupie Ziemi

(podobnie jak na Księżycu) dominującymi pierwiastkami są krzem i tlen, a w jądrze – żelazo. W atmosferze Jowisza odkryto metan, amoniak, wodę, dwutlenek siarki a głównym składnikiem całej planety pozostają wodór i hel.



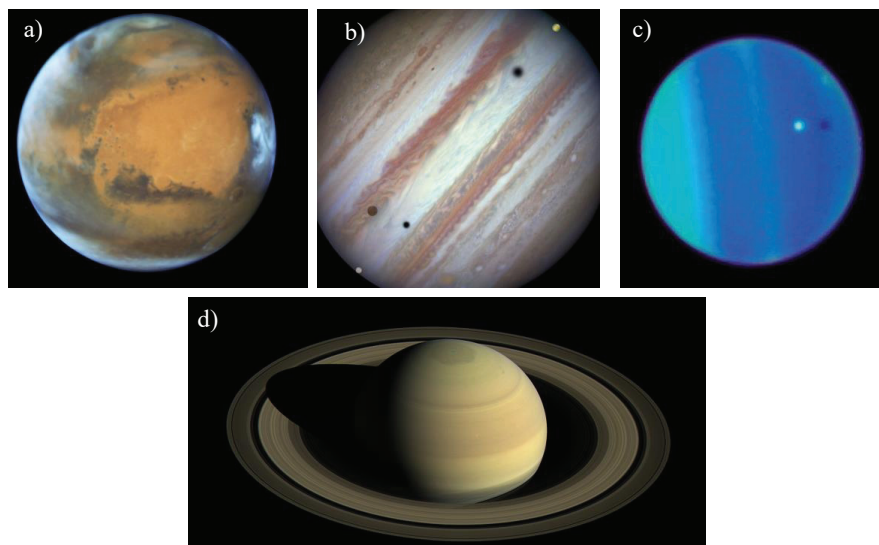
Ryc. 4.14. Układ Słoneczny powstał w wyniku wybuchu supernowej, podobnego do obserwowanych dziś w dalekim kosmosie: **a)** Kocie Oko, NGC 6543; **b)** Ślimak NGC 7293; **c)** Klepsydra; **d)** Krab NGC 1952 to supernowa z 1054 roku. Źródło: NASA, ESA.

Mimo zawartości lekkich pierwiastków, planety zewnętrzne są masywne; nawet najmniejsza z nich, Neptun, jest 200 razy masywniejsza od Ziemi. Oddziaływanie grawitacyjne ze strony Jowisza i Saturna w istotny sposób ukształtowało obecną strukturę Układu Słonecznego: wiele obiektów kosmicznych „szwędających” się po rubieżach zostało przechwyconych przez te planety giganty¹⁶. Sam Jowisz, który ma co najmniej 63 satelitów, przypuszczalnie 55 z nich wyłapał z przestrzeni kosmicznej. Pomiędzy Marsem i Jowiszem znajduje się tzw. *pas planetoid*, spośród których dwie największe to *Ceres* (o średnicy 960 km) i *Antares* (890 km).

Pas planetoid składa się, przypuszczalnie, z resztek innej planety *telurycznej*. Według drugiej hipotezy są to pozostałości z początków Układu Słonecznego – te które nie zdołały utworzyć oddzielnej planety: zbyt blisko były planety giganta – Jowisza. Za orbitą Neptuna wyodrębniony jest kolejny obszar, który składa się z lodowych i skalnych obiektów, tzw. *pas Kuipera*. W tym obszarze odkryto ostatnio nowe planety karłowate. Zewnętrzny obszar

¹⁶ W języku potocznym postawnego mężczyznę, pilnującego, aby do klubu młodzieżowego nie dostała się osoba niepożądana, nazywamy „bramkarzem”. Jowisz i Saturn dla życia na Ziemi pełnią funkcję „bramkarzy”, chronią naszą planetę przed zbyt częstymi mega-kolizjami kosmicznymi.

układu planetarnego zajmuje *dysk rozproszony*, którego częścią jest Eris oraz krótkookresowe komety. Dalszą jeszcze otoczką, rozciągającą się na odległość nawet 50 tys. AU¹⁷, jest obłok Oorta składający się, zapewne, z miliardów czy nawet bilionów lodowych obiektów. Granica Układu Słonecznego nie jest konkretnie ustalona. Uznaje się, że jest to obszar, gdzie wiatr słoneczny oraz grawitacja Słońca ustępują oddziaływaniom galaktycznym.



Ryc. 4.15. Cztery zewnętrzne planety Układu Słonecznego (źródło: NASA, ESA, Hubble): **a)** pustylny Mars z kanionami, wygasłymi wulkanami i czapami lodu na biegunach mógł kiedyś gościć pra-życie; **b)** Jowisz, ponad 10-krotnie większy niż Ziemia, obraca się w ciągu 10 godzin; powoduje to turbulentne wiatry, przypominające ziemskie pasaty, ale dużo gwałtowniejsze; na tle Jowisza widoczne są trzy jego księżyce i ich cienie; **c)** Uran kręci się wokół osi leżącej prawie w płaszczyźnie ekliptyki; niebieskawy kolor Uran zawdzięcza obecności metanu, widoczny jest też księżyc Ariel i jego cień; **d)** Saturn widziany z sondy NASA Cassini. Pierścienie, zbudowane z prawie czystego lodu (H_2O), mają zewnętrzną średnicę 280 tys. km, a grubość nie większą niż 1 km. Zostały odkryte przez Galileusza.

Źródło: NASA i ESA.

¹⁷ Jednostką astronomiczną odległości (AU) jest średnia odległość Ziemi od Słońca, czyli 149 597 870,691 km. Rok świetlny, czyli odległość, jaką przebywa światło w ciągu roku, to 63 241 AU.

Dokładne masy, okresy obiegu dookoła Słońca, okresy obrotu dookoła własnej osi i odległości od Słońca podana są w tabeli 4.1. Planety rozłożone są dość „regularnie” dookoła Słońca. Jeżeli odległość Ziemia – Słońce przyjmiemy za „1”, to Merkury jest położony od Słońca w odległości mniej więcej $\frac{3}{8}$, Wenus $\frac{3}{4}$, Mars $\frac{3}{2}$ AU. Kolejne planety – Jowisz, Saturn, Uran i Neptun – znajdują się w odległościach około 5, 10, 20 i 30 AU. Nie potrafimy dziś odtworzyć warunków powstania Układu Słonecznego tak, aby wynikiem były obserwowane rozkłady mas i odległości od Słońca.

Kilka liczb na temat budowy i historii Ziemi jest do zapamiętania:

- **promień Ziemi** wynosi około **6370 km**
- odległość **Ziemia – Księżyc** liczy około **380 tys. km**
- odległość **Słońce – Ziemia** szacuje się na około **150 mln km**

Wiek Ziemi: 4,567 mld lat

Pierwsze ślady stóp istot człiekopodobnych (Laetoli, dziś Tanzania): **3,6 mln lat temu**

Rysunki naskalne we Francji (i Indonezji): **28 tys. lat temu**

Dwie sondy wysłane przez człowieka w 1977 roku dotarły ostatnio (2013 r.) do granic Układu Słonecznego: Voyager 1 znajduje się w odległości ponad 148 AU od Słońca, a Voyager 2 – 123 AU¹⁸. W obszarach tych kończy się wpływ wiatru słonecznego (czyli strumienia zjonizowanych atomów, głównie protonów wysyłanych ze Słońca). Wiatr słoneczny wydawał się szkodliwy dla życia na Ziemi, a to on chroni nas przed strumieniem jeszcze bardziej energetycznych cząstek z dalekiego kosmosu: siedzimy jakby w słonecznym „jaju”, ryc. 4.16.

Czy to już granica Układu Słonecznego? Na razie nie potrafimy na to pytanie odpowiedzieć. Potrafimy natomiast, dzięki porównaniom zawartości na Ziemi (i w meteorytach) różnych pierwiastków o długim okresie rozpadu promieniotwórczego i produktów ich rozpadu, jak np. izotopy ołowiu, określić wiek Ziemi. Dzięki tym danym na dziś (20 czerwca 2012 r.)

¹⁸ Wg daty 20 maja 2020 r. Sprawdź stan na dziś pod adresem NASA, <http://voyager.jpl.nasa.gov/>

moment powstania Ziemi określamy na **4,567 mld lat** temu. Ziemia uformowała się bardzo szybko, przez 50–100 mln lat, ale w trakcie tego formowania uderzyło w nią jakieś ciało niebieskie rozmiarów Marsa. Z wybitej ziemskiej materii powstał w 24 godziny Księżyc. To były najstraszniejszy dzień w historii naszej planety. Ale zapewne niezbędny, aby na Ziemi mogło zagościć/powstać i trwać życie.

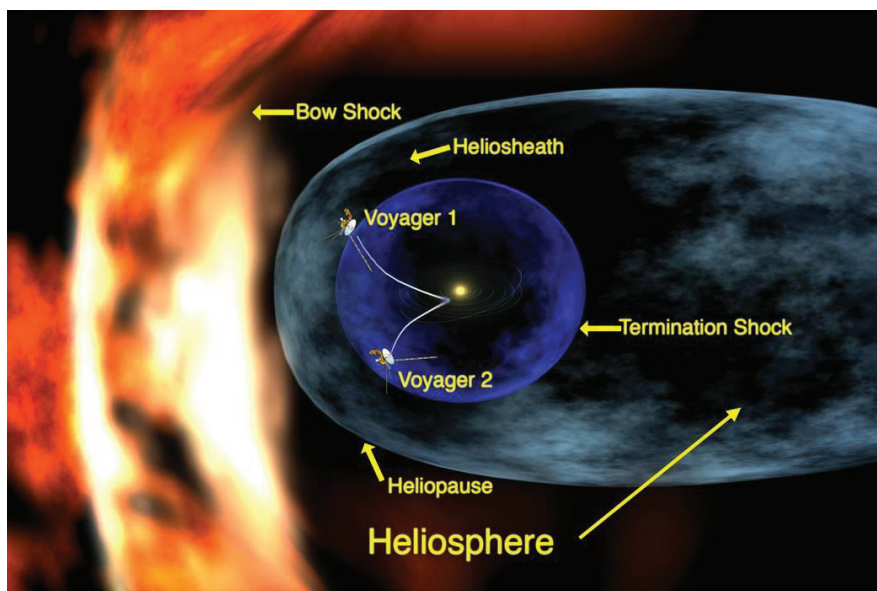
Tabela 4.1. Niektóre dane 8 planet Układu Słonecznego, planetoidy Ceres i 4 planet karłowatych. Opracowanie: Magdalen Więcek.

Nazwa	Średnica [km]	Odległość od Słońca [tys. km]*	Długość roku [doba ziemska/rok]	Długość doby [ziemska doba/h]
Słońce	1 392 000	–	–	25,38 d
Merkury	4880	57 910	87,97 dni	58,646 d
Wenus	12 100	108 200	224,7 dni	-243,02 d **
Ziemia	12 742	149 598	365,26 dni	23,93 h
Mars	6780	227 900	687,98 dni (1,88 r.)	24,62 h
Ceres***	950	413 700	4,6 lat	9,07 h
Jowisz	139 800	778 340	11,863 lat	9,93 h
Saturn	116 500	1 426 670	29,447 lat	10,64 h
Uran	50 700	2 870 700	84,017 lat	-17,24 h
Neptun	49 240	4 498 000	164,79 lat	16,11 h
Pluton	2350	5 906 000	247,92 lat	-6,387 d
Haumea	1150	6 432 000	282 lat	3,92 h
Makemake	1470	6 783 000	305 lat	22,5 h
Eris	2330	10 180 000	561 lat	25,9 h

* Dla orbit eliptycznych ekwiwalentna odległość orbity kołistej (wg III prawa Keplera) z dokładnością do 5 cyfr znaczących.

** Wenus obraca się w „odwrotnym” kierunku, czyli patrząc znad ziemskiego bieguna północnego, w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara; podobnie Uran, ale jego oś obrotu własnego jest prawie że w płaszczyźnie ekliptyki.

*** Ceres to największa z planetoid, odkryta przez włoskiego księdza, Giuseppe Piazzi, 1 stycznia 1801 roku.



Ryc. 4.16. Artystyczna wizja sond Voyager docierających do granic *heliosfery*; w środku „jaja” pokazane są orbity planet dookoła Słońca; Voyager 1 jest obecnie (maj 2020 r.) prawie cztery razy dalej od Słońca niż Pluton.

Źródło: NASA, https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/Heliosphere.html

Pytania kontrolne:

1. Ile razy (w dużym przybliżeniu) odległość Ziemia – Słońce jest większa od średnicy Słońca? Sto, tysiąc, milion, sto milionów?
2. W jakiej względnej odległości od Ziemi i od Księżyca latają satelity geostacjonarne? Bliżej Ziemi czy bliżej Księżyca?
3. Ile, w przybliżeniu, w mln km wynosi jednostka astronomiczna długości AU?
4. Wymień 8 planet Układu Słonecznego i podaj, w przybliżeniu, ich odległości od Słońca w jednostkach astronomicznych (w postaci ułamków zwykłych i liczb całkowitych).
5. Sprawdź, z jaką prędkością porusza się po Ziemi cień Księżyca w czasie zaćmienia Słońca. Obliczenie wykonaj dla równika, 20 marca, uwzględnij tylko ruch obrotowy Ziemi wokół własnej osi.

6. Znajdź w Internecie, jaką gwiazdę będzie wskazywała oś Ziemi (jej północny biegun) w roku 14 000.
7. (trudne) Ze znanych odległości Wenus i Ziemi od Słońca oraz średnicy Słońca oblicz, ile maksymalnie może trwać tranzyt Wenus na tarczy Słońca (wskazówka: oblicz szerokość kątową tarczy Słońca, po czym skorzystaj z III prawa Keplera i oblicz prędkościątowe Wenus i Słońca).
8. (dla wszystkich) Sprawdź krótko po zachodzie Słońca, czy nie ma na zachodnim niebie jasnej „gwiazdy” – to Wenus. Jeśli nie znajdziesz jej wieczorem, szukaj rano na wschodzie. Spójrz późnym wieczorem w kierunku południowym – Mars, Jowisz i Saturn są widoczne gołym okiem, ale od konkretnej daty zależy ich położenie: to planety, czyli gwiazdy błądzące.

Budowa i powstanie Wszechświata

5.1. Gwiazdne odległości

Sondy Voyager po 35 latach lotu dotarły do granic *heliosfery*; dotarcie do najbliższej gwiazdy o nazwie Proxima Centauri zajęłoby im ponad 70 tys. lat. To czerwony karzeł, który znajduje się w odległości (zaledwie) 4,2 lat świetlnych od Ziemi. Jego rozmiary to około $\frac{1}{7}$ rozmiarów Słońca, masa – $\frac{1}{8}$ masy Słońca, ale gęstość materii w tej gwiazdzie jest 40 razy większa niż w Słońcu. Proxima Centauri zakończyła swój cykl życiowy i powoli stygnie.

Mimo że Proxima Centauri jest najbliższej Ziemi, nie jest najjaśniejsza na niebie. Obserwowana jasność gwiazdy zależy bowiem od dwóch czynników: mocy promieniowania gwiazdy oraz jej odległości od obserwatora. Jasność gwiazdy od czasów starożytnych Greków zapisuje się w jednostkach zwanych **wielkościami gwiazdowymi** (*magnitudo*), choć w rzeczywistości nie ma to nic wspólnego z jej rozmiarami. Ptolemeusz podzielił gwiazdy widoczne na niebie na sześć grup – najjaśniejsze zaliczając do grupy pierwszej, najślabsze zaś do ostatniej. Dopiero w XIX wieku wprowadzono pojęcie uściślające definicję *magnitudo*. Zauważono, że jeżeli dwie gwiazdy różnią się od siebie o wartość 1 *magnitudo*, to stosunek natężeń (tzn. mocy) ich światła docierającego do Ziemi wynosi około 2,5.

Gwiazdą dobrze widoczną w Polsce latem, o *magnitudo* +1m, jest *Deneb*¹, łeb Łabędzia na ryc. 4.5, jedna z największych we Wszechświe-

¹ Dokładna jasność względna gwiazdy *Deneb* to +1,25.

cie². Jasność Gwiazdy Polarnej jest prawie dwa i pół razy mniejsza i wynosi $+2m$. Okiem „nieuzbrojonym”, w pogodną noc, bez lamp ulicznych jesteśmy w stanie dojrzeć gwiazdy aż do jasności $+6$.

Jeżeli względna jasność obiektu astronomicznego jest większa niż gwiazdy o *magnitudo* $+1m$, to przypisujemy jej liczby mniejsze od zera. I tak Syriusz, najjaśniejsza gwiazda na niebie, widoczna w Polsce jedynie latem i nisko nad horyzontem, ma jasność względną $-1,5m$, Jowisz i Mars w okresie największego zbliżenia do Ziemi mają jasność $-2,8m$, a Wenus aż $-4,4m$. Dokładniejsze przeliczenie³ pokazuje, że Wenus w swej najjaśniejszej konfiguracji⁴ jest ponad cztery razy jaśniejsza niż dużo większy od niej Jowisz.

Jak możemy wywnioskować, jasność względna gwiazdy nie musi odpowiadać jej jasności *absolutnej*. Jasność obserwowana zależy od tej *absolutnej* i od odległości gwiazdy od Ziemi. Syriusz, o średnicy jedynie 1,7 razy większej niż Słońce, wydaje się dużo jaśniejszy niż ogromny *Deneb*, gdyż jest dużo bliżej (8,6 lat świetlnych) niż ten drugi (1500 lat świetlnych). Dodatkowo powierzchnia *Deneb* jest dużo gorętsza (8500 K) niż Słońca (5800 K). Zgodnie więc z prawem Plancka, zobacz ryc. 2.5b, *Deneb* wydaje się dużo bielszy niż Słońce.

Z tych powodów astronomowie wprowadzili pojęcie jasności *absolutnej*, to jest jakby obserwowanej z tej samej odległości. *Deneb* w tej skali ma jasność -7 , a nasze Słońce jedynie $+4,5$. Oznacza to, że z porównywalnej odległości *Deneb* jest 40 tys. razy⁵ jaśniejszy. Najjaśniejsza gwiazda w skali absolutnej według encyklopedii internetowych, η *Carine* widoczna na niebie południowym, jest kilka milionów razy jaśniejsza od Słońca, ale może w każdej chwili wybuchnąć jako *supernowa*, zobacz ryc. 4.14.

Taką gwiazdę *supernową* obserwował Kepler w 1604 roku, inną, w konstelacji Kraba – astronomowie chińscy i Indianie w Meksyku w 1054 roku. Gwiazdy też nie są wieczne...

² Średnica *Deneba* to ponad 110 średnic Słońca.

³ Stosunek I jasności względnych wyliczamy jak $I = 2,512^{(4,4-2,8)} = 4,4$.

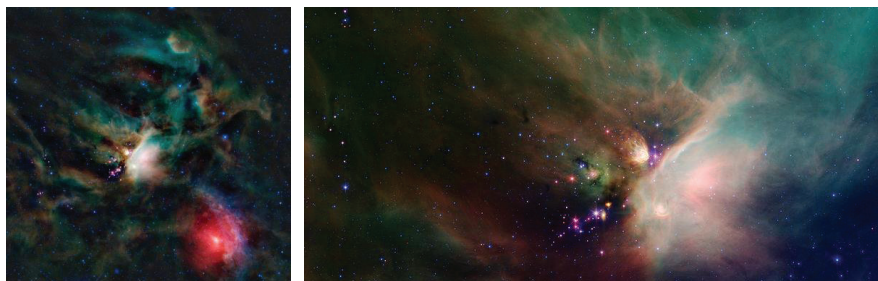
⁴ Najjaśniejsza „konfiguracja” dla Wenus nie oznacza największego zbliżenia do Ziemi; w trakcie zbliżenia jest ona w *nowiu*, zobacz ryc. 4.12a, czyli jest niewidoczna.

⁵ Zgodnie z obliczeniem $I = 2,512^{11,5} = 39800$.

5.2. Narodziny i śmierć gwiazdy

Dziś wiemy, że gwiazdy, podobnie jak ludzie, rodzą się, żyją i umierają. Skala czasowa jest jednak o wiele rzędów wielkości dłuższa. Pierwsze gwiazdy powstały dopiero po setkach milionów lat istnienia Wszechświata, wskutek grawitacyjnej kondensacji wodoru (z domieszką helu) powstałego w Wielkim Wybuchu. Również dziś gwiazdy rodzą się z obłoków międzygwiazdowych, które są pozostałością po innych, kończących swój żywot gwiazdach. Mamy tutaj do czynienia ze swego rodzaju „recyclingiem” – z materii pozostałej po „starej” gwiazdzie powstaje młoda.

Gwiazdy tworzą się z obłoków międzygwiazdowych, które są nierównomiernie rozłożone w Galaktyce. Aby gwiazda miała szansę się uformować, obłok z jakiegoś powodu, np. poprzez wybuch pobliskiej gwiazdy supernowej, musi zacząć się kurczyć. W miarę kurczenia się obłoku zostaje wyemitowane promieniowanie, które początkowo w całości opuszcza go w postaci promieniowania podczerwonego. Etap ten nazywany jest *protogwiazdą*. Gdy obłok jest na tyle gęsty, że promieniowanie nie jest w stanie całkowicie go opuścić, zaczyna sam świecić. Jeśli temperatura wewnątrz gwiazdy będzie na tyle wysoka, że rozpoczną się reakcje *termojądrowe*, gwiazda rozpocznie swój cykl życiowy.



Ryc. 5.1. Obłok materii międzygwiazdowej – obszar formowania się gwiazd w pobliżu ρ -Ophiuchi

Źródło: <http://it.wikipedia.org/wiki/File:RhoOph.jpg>; http://en.wikipedia.org/wiki/File:Rho_Ophiuchi.jpg

Mechanizmem napędowym gwiazd są reakcje termojądrowe. We wnętrzu każdej znajduje się najgorętszy fragment – jądro. W przypadku Słońca temperatura w jądrze wynosi około 15 mln K, co powoduje, że atomy wodoru na skutek reakcji termojądrowych przekształcają się w atomy helu według ciągu reakcji. Pierwsza z nich to synteza ciężkiego izotopu wodoru, deuteru, zawierającego w jądrze jeden proton i jeden neutron, według schematu:



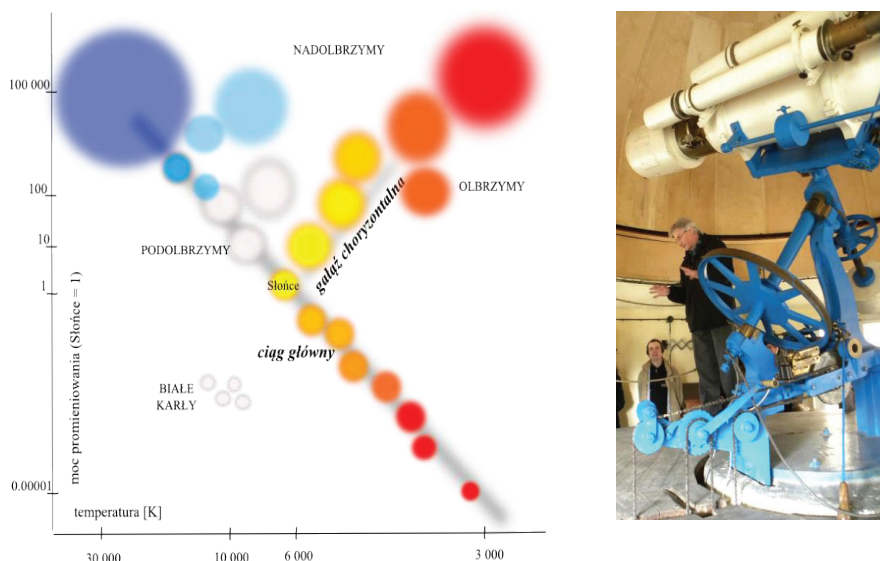
W reakcji tej powstają dodatnie elektrony (pozytony) e^+ i neutrina, które unoszą nadmiar energii. Pozytony anihilują z elektronami a ich masa zamienia się w energię kwantów gamma.

W kolejnym etapie jądro deuteru zderza się z jądrem zwykłego wodoru i powstaje lekki izotop helu ${}^3\text{He}$



Jądro helu „zwykłego” ${}^4\text{He}$ może powstać na kilka sposobów, ale we wszystkich reakcjach *wydziela się energia*. Słońce to mega-kocioł, w którym wodór spalany jest (termojądrowo) na hel – w ciągu sekundy spalane jest 600 mln ton wodoru. Słońce znajduje się mniej więcej w połowie swego cyklu życia – w jądrze Słońca wodór stanowi już tylko $\frac{1}{3}$ masy.

Systematykę gwiazd w dużej mierze zawdzięczamy wieloletnim obserwacjom, które na początku XX wieku prowadziły na Uniwersytecie w Harvardzie kobiety astronomowie. Annie Jump Cannon skatalogowała 400 tysięcy (!) gwiazd, badając za pomocą klisz fotograficznych ich widma. Okazało się, że między widmem (czyli kolorem gwiazdy) a jej jasnością można zauważyć ściśle zależności. Na podstawie tych obserwacji w 1912 roku Ejnar Hertzsprung i Henry N. Russell zaproponowali diagram klasyfikacji gwiazd, zob. ryc. 5.2a.



Ryc. 5.2. a) Diagram Hertzsprunga–Russella przedstawia zależność mocy promieniowania gwiazdy od jej temperatury; zwróć uwagę, że obie skale nie są liniowe – rosną w sposób względny, tak jak obserwowana jasność gwiazdy w skali Ptolemeusza; podobnie względna (i odwrócona) jest skala temperatury; w ten sposób najgorętsze i najjaśniejsze gwiazdy znajdują się w lewym górnym rogu diagramu (K.S.); **b)** historyczny teleskop z Harvardu, na którym dzięki pracowitości astronomek zostały zebrane dane leżące u podstaw diagramu H–R; znajduje się obecnie w obserwatorium UMK

Diagram H–R jest klasyfikacją gwiazd, a jednocześnie ich „linią życia” – gwiazdy ewoluują, poruszając się po liniach diagramu. Masa początkowa protogwiazdy ma bezpośredni wpływ na jej dalszy los. Najmasywniejsze gwiazdy, tzw. nadolbrzymy o masie przewyższającej 10 $M_{\odot}$ (czyt. 10 mas Słońca), żyją najkrócej, nie więcej niż 100 mln lat. Nasze Słońce należy do karłów – jest gwiazdą o stosunkowo niewielkiej masie, które starzeją się powoli. W tej chwili Słońce znajduje się prawie mniej więcej w połowie swojego życia – powinno dożyć wieku 10 mld lat, zobacz ryc. 5.2a.



Ryc. 5.3. Schemat przebiegu ewolucji w przypadku gwiazd o masie Słońca.
Opracowanie: K.S.

Aby w jądrze gwiazdy mogły zajść dalsze reakcje, musi zostać osiągnięta dużo wyższa temperatura. Helowe jądro, które nie jest w stanie „zapalić” kolejnych reakcji, zacznie się kurczyć. Wodorowa otoczka, znajdująca się wokół jądra, ogrzewa się na skutek tego kurczenia, a to powoduje oddalanie się otoczki od jądra i tworzenie tzw. *czernego olbrzyma*. W kolejnym etapie jądro gwiazdy zostanie odsłonięte, a wokół niego będzie widoczna tzw. *mgławica planetarna*. We wnętrzu mgławicy świeci tzw. biały karzeł – gwiazda o rozmiarach kilkunastu tysięcy km (przekształcone w procesie kurczenia jądro słoneczne, zobacz ryc. 4.16).

W przypadku gwiazd o masie nieco większej niż 1 $M_{\odot}$ po wypaleniu się helu następuje częściowa zapaść gwiazdy. W warunkach zwiększonej gęstości możliwe są dalsze reakcje termojądrowe, w szczególności synteza jąder węgla z trzech jąder helu. Proces jest dwustopniowy i możliwy jedynie dzięki nietypowemu układowi poziomów energii powstających jąder⁶:



W gwiazdach o masie przekraczającej 8 $M_{\odot}$ możliwa jest cała seria dalszych reakcji termojądrowych, prowadzących do syntezy jąder tlenu,

⁶ Gdyby nie ten specyficzny układ poziomów energii jąder ${}^8\text{Be}$ i ${}^{12}\text{C}$, synteza węgla byłaby niemożliwa, a przez to cała chemia organiczna – podstawa życia.

neonu, krzemu i siarki. Końcowym etapem nukleosyntezy jest żelazo ^{56}Fe . Gwiazda kończy życie wybuchem *supernowej*, a jej jądro przeistacza się w tzw. *gwiazdę neutronową* o rozmiarach kilkunastu kilometrów.

Gwiazda neutronowa umożliwia syntezę cięższych pierwiastków, do uranu włącznie. Pięć miliardów lat temu lub więcej w miejscu Słońca świeciła gwiazda o masie 8–10 $M_{\odot}$. Zakończyła swój żywot wybuchami, a z pozostałej materii powstał Układ Słoneczny. Słońce to gwiazda z recyklingu!

Najbardziej masywne gwiazdy – około 10 $M_{\odot}$ – ewoluują podobnie, tylko że szybciej, natomiast w końcowym etapie ewolucji powstaje *czarna dziura*.

5.3. Mieszkańcy Drogi Mlecznej

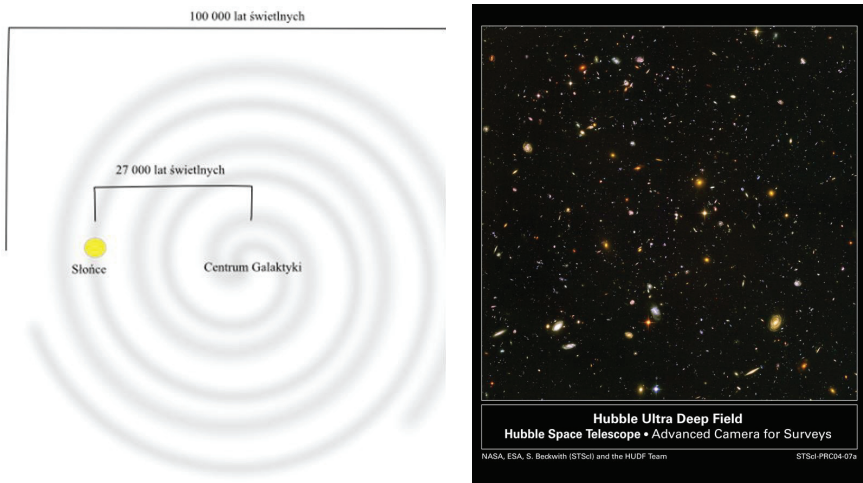
Galileusz za pomocą swojej lunety zauważył, że widoczna na niebie w pogodną noc smuga, jasna droga, zbudowana jest z pojedynczych gwiazd. Układ Słoneczny jest jednym z elementów tego układu gwiazdowego nazwanego Galaktyką, czyli Mleczną Drogą⁷. Galaktyka jest czymś w rodzaju wyspy w kosmosie, składającej się z setek miliardów gwiazd.

Rozmiar Galaktyki jest tak duży, że nawet światło, przy założeniu przejścia bez przeszkód z jednego krańca na drugi, potrzebuje około 130 tys. lat. Słońce znajduje się na peryferiach Drogi Mlecznej, 27 tys. lat świetlnych od centrum. Galaktyka składa się ze zgrubienia centralnego (centrum Galaktyki) oraz ramion spiralnych (patrz schemat ryc. 5.4) i poprzeczki. W środku Galaktyki „żeruje” zapewne czarna dziura, która pochłania okoliczną materię. Mieszkanie na peryferiach ma swoje zalety – nie dociera do nas zabójcze, wysokoenergetyczne promieniowanie gamma, które powstaje w centrum Galaktyki.

Droga Mleczna razem z około 35 innymi galaktykami tworzy tzw. *Grupę Lokalną*, czyli zbiór galaktyk położonych stosunkowo blisko siebie i grawitacyjnie ze sobą związanych. Od najbliższej z nich, galaktyki Andromedy, ryc. 4.5c, dzieli nas 2,5 mln lat świetlnych. A ile galaktyk mamy we Wszechświecie?

⁷ Pisana wielką literą dla odróżnienia jej od innych galaktyk.

Kosmiczny teleskop Hubble’a krążący od 1990 roku po orbicie okołoziemskiej wykonał zdjęcie najdalszych zakątków Wszechświata⁸. W 2003 roku przez kilka miesięcy teleskop obserwował niewielki fragment nieba w gwiazdozborze Pieca (niebo południowe), gdzie nie ma jasnych gwiazd. Obserwowany obszar obejmował kąt 3’, w porównaniu do całego nieba jest 12,7 mln razy mniejszy! Ku wielkiemu zdziwieniu oszacowano, że na ostatecznym zdjęciu na tym małym fragmencie nieba zaobserwowano około 10 tys. galaktyk! Niektóre z nich świecą na czerwono, co świadczy, że się od nas oddalają z zawrotnymi prędkościami. Wszechświat się rozszerza!



Ryc. 5.4. Schemat przedstawiający Drogę Mleczną oraz miejsce, w którym znajduje się w niej Słońce. Obok: odległe galaktyki na zdjęciu z teleskopu Hubble’a.

Źródło: K.S., Hubble.

⁸ (Ang.) Hubble Ultra Deep Field.

Teleskop Hubble’a nie jest wcale największym z używanych przez astronomów. Jego unikalną zaletą jest natomiast praca w warunkach braku atmosfery – gwiazdy w nim nie „migoczą” jak na Ziemi. Teleskop ten nazwano na cześć Edwina P. Hubble’a, który kontynuując prace kobiet astronomów z Harvardu, obserwował odległe gwiazdy zmienne typu *cefeid*. Z tych obserwacji wynioskował, że Wszechświat się rozszerza: im galaktyki są położone dalej od nas, tym szybciej uciekają. Wszechświat puchnie we wszystkich kierunkach, jak drożdżowe ciasto przed wypiekiem.

Pomiar obserwowanej jasności *cefeid* pozwala na określenie ich odległości (cefeidy mają podobną jasność *absolutną*). Z kolei szybkość ucieczki gwiazd możemy wyliczyć z efektu *Dopplera* – przesunięcia ich widma ku czerwieni.

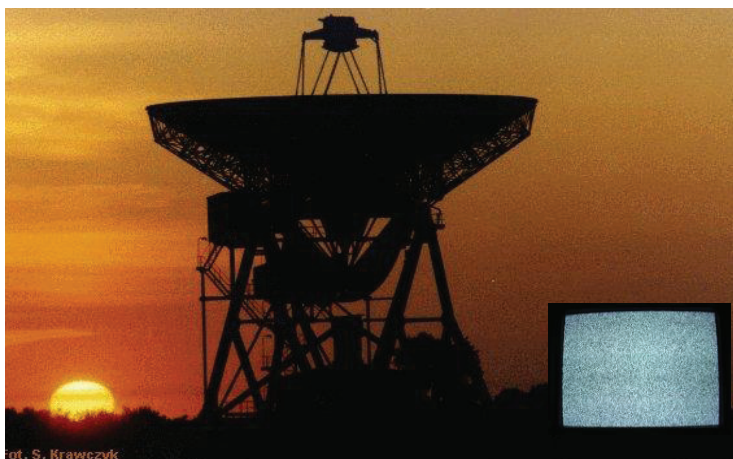
Effekt Dopplera obserwujemy, gdy nadjeżdża (i oddala się) karetka pogotowia na sygnale. Gdy się zbliża, dźwięk jej syreny wydaje się wyższy (tzn. o wyższej częstotliwości), niż gdy się oddala. Dla uciekających gwiazd oznacza to przesunięcie ich linii widmowych (wodoru, helu itd.) w kierunku większych długości fali. Bardzo odległe galaktyki, ledwie widoczne na zdjęciach teleskopem Hubble’a, są ciemnoczerwone.

5.4. „Na początku...”

W odróżnieniu od Galileusza ze staczającymi się po równi kulkami, albo nawet Newtona z planetami krążącymi dookoła Słońca, nie wszystkie hipotezy można sprawdzić za pomocą *powtarzalnych* doświadczeń. Jednym z takich problemów jest ewolucja biologiczna (nie potrafimy odtworzyć w laboratorium ewolucji, np. od prapłaza do szympansa). Innym problemem jest początek Wszechświata. Nie potrafimy ponownie „puścić” go od początku i patrzeć, jak się rozwija. Jednakże nagromadzenie dowodów doświadczalnych – zarówno astronomicznych, jak i w zakresie cząstek elementarnych, fizyki jądrowej i atomowej – jest tak duże, że parafrazując słowa św. Jana Pawła II o ewolucji biologicznej, możemy stwierdzić: „początek Wszechświata nie jest już jedynie hipotezą, ale zasługuje na miano *teorii naukowej*”.

Danymi doświadczalnymi, którymi dysponujemy, są przede wszystkim stwierdzenia z 1929 roku astronoma amerykańskiego Edwina Hubble'a o rozszerzaniu się Wszechświata. Na podstawie obserwacji gwiazd zmiennych (cefeid) w innych galaktykach stwierdził on, że widmo światła tych gwiazd wykazuje przesunięcie ku czerwieni (ang. *redshift*), które jest wprost proporcjonalne do odległości tej galaktyki od Ziemi. Innymi słowy, im galaktyka dalsza, tym szybciej się od nas oddala, niezależnie, z której strony Wszechświata się znajduje.

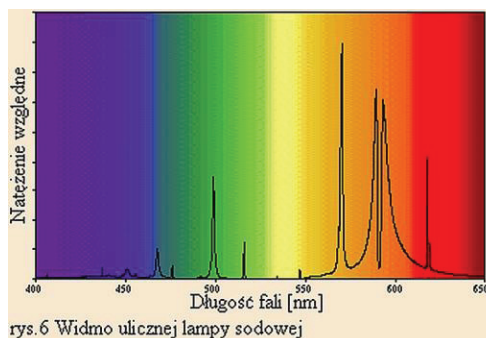
Według obecnych oszacowań (2015 r.) wiek Wszechświata wynosi $13,799 \pm 0,021$ mld lat. Wiek Wszechświata oceniany jest na podstawie licznych obserwacji – odległości najdalszych galaktyk, stygnięcia najstarszych gwiazd czy wreszcie „promieniowania tła”. Istnienie Układu Słonecznego, przypominamy, to ostatnie $\frac{1}{3}$ wieku Wszechświata. Wiek Wszechświata to nadal „oszacowanie” – brak nam „skamieniałości” z samego jego początku. Pierwszym „odciskiem”, do dziś obecnym, jest *mikrofalowe promieniowanie tła*.



Ryc. 5.5. Fale radiowe (i mikrofae) są ważnym źródłem informacji o Wszechświecie; Słońce jest silnym źródłem fal radiowych, podobnie Jowisz; w dalekim kosmosie dzięki falom radiowym potrafimy zidentyfikować cząsteczki H_2 , a także skomplikowane związki organiczne, jak C_2H_5OH ; na zdjęciu teleskop radiowy o średnicy 32 m w Centrum Astronomii UMK w Piwnicach koło Torunia (fot. S. Krawczyk). Radiowy szum, jak w pokazanym odbiorniku TV, pochodzi, częściowo, z początku Wszechświata (fot. G.K.)

Odkrycie tego promieniowania zawdzięczamy początkom lotów kosmicznych. Dwóch fizyków, Arno Penzias i Robert W. Wilson, pracujących nad łącznością z satelitami, starało się pozbyć uporczywego szumu, który przeszkadzał w komunikacji. Nie pomogło kręcenie antenami – szum nadchodził ze wszystkich stron Kosmosu i niezależnie od pory dnia. Po konsultacjach z astronomami, Penzias i Wilson uświadomili sobie (1964 r.), że szum nie pochodzi z określonego punktu w przestrzeni – on pochodził z określonego punktu w *historii* Wszechświata, 300 tys. lat po jego powstaniu.

Na podstawie naszej wiedzy z fizyki jądrowej i atomowej potrafimy wyobrazić sobie początki Wszechświata. Co było przed powstaniem atomów wodoru? Na pewno w gorącym, początkowym Wszechświecie, w którym „rządziły” energie megaelektronowoltów, atomy wodoru (i helu) nie posiadały elektronów (przypominamy wartość energii jonizacji atomu wodoru 13,6 eV). Atomy utworzyły się dopiero, gdy rozszerzający się Wszechświat trochę ostygł; wzbudzone elektrony w atomach zaczęły emitować światło. Niestety, kosmos nadal był ciemny, ponieważ to promieniowanie było w materii uwięzione. Jedne atomy promieniowanie emitowały, a sąsiednie natychmiast pochłaniały – Wszechświat był zbyt gęsty. Dopiero, gdy jego gęstość spadła, promieniowanie (o temperaturze ok. 10 tys. K, czyli energii około 1 eV) wydostało się z materii. Wszechświat się rozświetlił!



Ryc. 5.6. Zjawisko uwięzienia promieniowania na przykładzie ulicznej (żółtej) lampy sodowej; w lampach tych panuje stosunkowo wysokie ciśnienie, więc linie widmowe są bardzo poszerzone; co więcej, w zakresie fal pomarańczowych, gdzie lampa powinna najsilniej świecić, obserwujemy ciemny prążek („dziura” w widmie); w podobny sposób było uwięzione światło w gęstym, początkowym okresie Wszechświata (widmo PAP Słupsk, materiały G.K.)

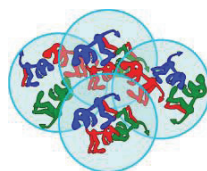
Promieniowanie uwolnione z materii zaczęło „wędrować” po Wszechświecie i razem z nim stygnąć. Z początkowych długości fali, może np. $0,73 \mu$, światło „rozszerzyło się” do dziś obserwowanych $\lambda=7,35 \text{ cm}$; temperatura promieniowania (zgodnie z prawem Plancka) z jakichś 10 tys. K w momencie ucieczki spadła do obserwowanych dziś 2,73 K. Promieniowanie mikrofalowe tła jest więc pierwszą „fotografią” Wszechświata dla nas dostępną. Fotografia ta pochodzi z momentu ok. 270 tys. lat po początku Wszechświata.



Ryc. 5.7. a) Biblijne oddzielenie światłości od ciemności wg Księgi Rodzaju, w wyobraźni artysty z XII wieku mozaika na sklepieniu katedry św. Marka w Wenecji; **b)** jeszcze jedno wyobrażenie stworzenia pochodzące z tego samego okresu, ale innego kręgu kulturowego (Normanowie), katedra w Monreale na Sycylii.

Źródło: dokumentacja fotograficzna katedr, za pozwoleniem.

Pozostałą część historii Wszechświata, od samego początku, musimy sobie wyobrazić na podstawie naszej wiedzy doświadczalnej i teoretycznej o fizyce i astrofizyce. Przed powstaniem jąder wodoru i helu musiały istnieć swobodne kwarki – i to nie tylko w „zwykłym” zapachu, *up* i *down*, ale w początkowym momencie (zapewne przez 10^{-9} s) właśnie te najcięższe *top* i *bottom*, zob. rozdział 3. W ciągu 0,01 s (zapewne) powstały protony i neutrony, a w ciągu pierwszych trzech minut jądra wodoru i helu.



Minęły miliony lat, zanim powstały pierwsze gwiazdy, a z nich mgławice, galaktyki, układy lokalne galaktyk itd. Jak pisał Stanisław Lem w „Bajkach robotów”, przez nieuwagę Kłapacjusza zniknęły natomiast *pćmy* i *murkwie*⁹.

Wszystkie dane wskazują, że Wszechświat miał swój początek; Anglicy nazwali go nieco ironicznie „Big Bang”. Twórca tej idei, Georges Lemaître, kanonik katedry w Malinas, w Belgii (kanonik jak Kopernik we Fromborku), w 1927 roku pisał:

„Jeśli Wszechświat zaczął się od pojedynczego atomu, pojęcia przestrzeni i czasu nie miały żadnego sensu; nabrały one sensu dopiero wówczas, kiedy początkowy atom podzielił się na dostateczną liczbę atomów. Jeśli to rozumowanie jest poprawne, początek Wszechświata miał miejsce nieco przed początkiem czasu i przestrzeni”¹⁰.

Podobnie jak odkrycie fal elektromagnetycznych przyszło po teorii Maxwella, tak odkrycie Hubble’a przyszło po drugiej epokowej teorii Einsteina¹¹ – ogólnej teorii względności. Sformułował ją w 1916 roku, pisząc równanie jeszcze krótsze niż Maxwell, ale zawierające, według profesora Michała Hellera, jedynego polskiego uczonego w Papieskiej Akademii Nauk w Rzymie, dziesięć tysięcy składników. Dziś potrafimy zrozumieć 4–5 z nich. Równanie ogólnej teorii względności operuje uogólnieniem wektorów, tzw. tensorami:

$$\mathbf{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \mathbf{g}_{\mu\nu} \mathbf{R} + \mathbf{g}_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}_{\mu\nu} \quad (5.5)$$

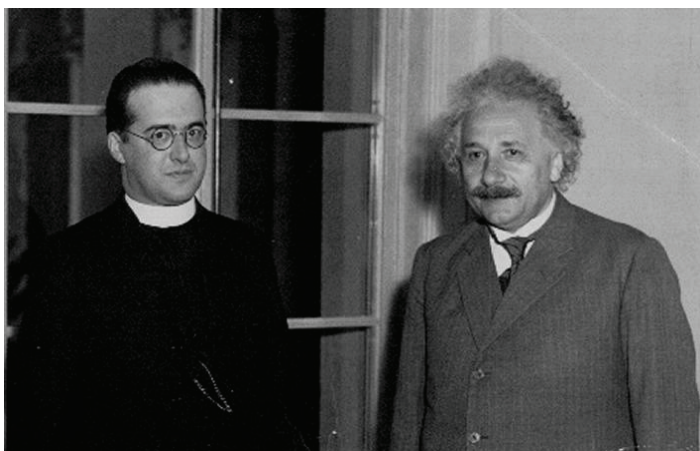
⁹ To jest oczywiście literacki żart znakomitego polskiego pisarza.

¹⁰ G. Lemaître, *The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory*. „Nature” 127 (1931), s. 706.

¹¹ Pierwszą teorią była szczególna teoria względności, mówiąca, że mierzona prędkość światła nie zależy od tego, czy obserwator porusza się względem źródła, czy nie. Prędkość światła jest stała dla wszystkich układów poruszających się ruchem jednostajnym. Konsekwencją tej teorii jest równoważność masy i energii, a także np. znaczne wydłużanie się czasu życia cząstek poruszających się z prędkościami bliskimi prędkości światła.

W równaniu tym $R_{\mu\nu}$, $g_{\mu\nu}$ i R opisują *geometrię* czasoprzestrzeni, a $T_{\mu\nu}$ oddziaływania fizyczne (siły, w tym grawitację). W najprostszym przypadku równanie Einsteina sprowadza się do równania grawitacji Newtona¹².

Już sam Einstein zorientował się, że jego równanie prowadzi do rozwiązań „niestabilnych”. Innymi słowy, Wszechświat nie mógłby istnieć! Jeszcze inaczej, istniałby, ale tylko przez krótką chwilę, po później zapadłby się lub rozleciał na wszystkie strony. Aby temu zapobiec, Einstein wprowadził do równania (5.5) tzw. czynnik kosmologiczny Λ , „zapobiegający” niestabilności Wszechświata. Upłynęło prawie sto lat, zanim przekonaliśmy się, że Einstein miał rację.



Ryc. 5.8. Kiedy w 1935 roku G. Lemaître odwiedził Pinceton, A. Einstein po jego wykładzie wykrzyknął: „To jest najpiękniejsze i wiarygodne wyjaśnienie Stworzenia, o jakim kiedykolwiek słyszałem”

Źródło: Catholic Education Resource Center.

Dowodem na słuszność teorii wielkiego wybuchu jest obserwowanie oddalających się galaktyk, mikrofalowego promieniowania tła czy też względny procentowy udział lekkich pierwiastków.

¹² Więcej o rozwiązaniach szczególnych równania (5.5) znajdzie Czytelnik na plakacie dydaktycznym „*E pur si muove*” w projekcie EU „Physics is Fun”, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/posters/gen-rel35.ppt

Wiek Wszechświata szacuje się na $13,799 \pm 0,021$ mld lat, czyli około 14 miliardów lat. Tyle czasu istnieje pojęcie czasu, przestrzeni i materii.

Pytanie, co było „przed tym” nie ma sensu.

5.5. Czy już wszystko wiemy?

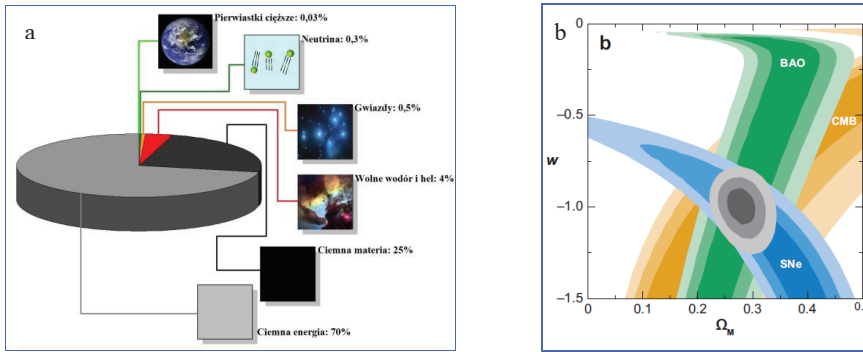
Jak zwykle, gdy się już nam wydaje, że wszystko wiemy, w ciszy fromborskiej pustelni lub obserwatoriów gdzieś na antypodach, ktoś robi obliczenia lub patrzy w gwiazdy. Z oceny jasności bardzo, bardzo odległych gwiazd supernowych okazało się – tak około 1998 roku¹³, że prędkość oddalania się galaktyk nie była w historii Wszechświata stała – raz Wszechświat rozszerzał się szybciej, raz wolniej. Jakby niewidzialna siła ścisnęła go jak piłkę. Ponieważ mówimy o obiekcie rozmiarów¹⁴ 10^{27} m, zawierającym tyle gwiazd, ile atomów zawiera mol gazu (10^{23}), działające „siły”(?) muszą być *kosmologiczne*.

Obliczenia wykonane na różne sposoby pokazują, że we wszystkich „kanałach” obserwacji – świetle widzialnym, podczerwonym, promieniowania gamma, przez rejestrację neutrin itd. – widzimy jedynie małą część materii istniejącej we Wszechświecie, a oddziałującej grawitacyjnie. Pozostałą część nazwali kosmologowie „ciemną materią” – jest jej około pięć razy więcej niż materii widzialnej. Ale jeśli Wszechświat przyspiesza swoją ekspansję, musi istnieć jeszcze trzy razy więcej „ciemnej energii”, napędzającej to dodatkowe rozszerzanie się. Sumarycznie, widoczna nam materia stanowi jedynie 4% całego Wszechświata, ciemna materia stanowi 25%, a ciemna energia około 70%, zobacz ryc. 5.9a. Z różnych danych – pomiarów mikrofalowego promieniowania tła kosmologicznego, z pomiarów oscylacji barionów we Wszechświecie i z pomiarów jasności supernowych,

¹³ Za odkrycie przyspieszającego rozszerzania się Wszechświata S. Perlmutter, A. Riess i B.P. Schmidt otrzymali Nagrodę Nobla w 2011 roku w dziedzinie fizyki.

¹⁴ Tyle wynosi obecna średnica Wszechświata przy założeniu, że najodleglejsze widoczne dla nas obszary, oddalone o 13,7 mld lat świetlnych, w „międzyczasie” oddaliły się jeszcze bardziej.

możemy ustalić parametry ciemnej energii, ryc. 5.9b, mimo że jej natury nie rozumiemy.



Ryc. 5.9. Dwa głosy w dyskusji na temat jednej z największych zagadek nauki na dziś: ciemnej energii i ciemnej materii: **a)** widzialna materia (czerwono-zielony wycinek koła na diagramie) stanowi zaledwie 4% całego Wszechświata (źródło: „Nature”, 19 July 2007, vol. 448(7151), s. 245–248); **b)** różne oszacowania – z jasności supernowych (SNe), z promieniowania tła (CMB), gęstości barionów (BAO) – wskazują na wartość współczynnika opisującego czynnik „rozszerzający” Wszechświat (tzw. człon kosmologiczny w ogólnej teorii względności Einsteina lub – innymi słowy – ciśnienie „ciemnej energii”) $w = -1$; na osi x – gęstość Wszechświata (J. A. Frieman, M. S. Turner, D. Huterer, *Dark Energy and the Accelerating Universe*, „Rev. Astr. Astrophys.” 2008, vol. 46, s. 385).

Wszystkie te rozważania pokazują, jak daleko w głąb świata kwantów, kwarków i na krańce Wszechświata potrafimy zajrzeć. Z drugiej strony zasada nieoznaczoności Heisenberga w świecie kwantów i Einsteina ograniczona prędkość światła w świecie kosmologii nakładają na nasze poznanie *fizyczne granice*. Jeszcze raz zacytujemy Mikołaja Kopernika i jego dzieło: „[...] cały świat się obraca, którego granic nie znamy, *ani ich nawet znać nie możemy*”.



Ryc. 5.10. Ilustracja¹⁵ (pozornej) naiwnych przekonań średniowiecznych uczonych, że Wszechświat kończy się „sferą gwiazd stałych” – sam Kopernik o niej jeszcze pisał. Dziś, od czasów Einsteina wiemy, że nie możemy zajrzeć w głąb Wszechświata poza odległość, jaką światło przebyło przez 13,7 mld lat. Rozumiał to Kopernik, gdy pisał: „[...] że cały świat się obraca, którego granic nie znamy, *ani ich nawet znać nie możemy*”.

Źródło: Wikipedia Commons (Heikenwaelder Hugo).

Na zakończenie

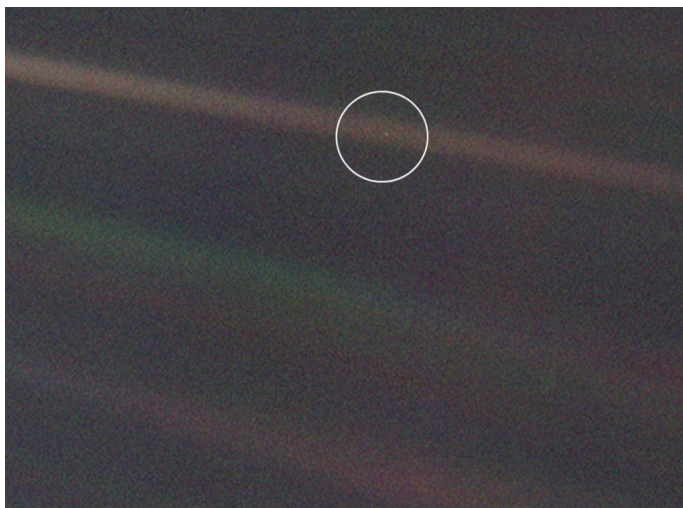
Astronomia pozwala przewidzieć, co nas czeka w przyszłości, przynajmniej w skali kosmicznej. Najbliższa przyszłość nie wydaje się specjalnie burzliwa. Za 12 tys. lat biegun północy osi obrotu Ziemi w swej powolnej

¹⁵ Był to, w zamierzeniu, ironiczny rysunek, imitujący średniowieczny drzeworyt i miał ośmieszać dawniejsze wyobrażenie o skończonym Wszechświecie (autorstwa przypuszczalnie Flaumbarta). W rzeczywistości taki właśnie jest Wszechświat: skończona prędkość światła nie pozwala nam na „wychylenie głowy” poza odległości 13,87 mld lat świetlnych. Wszechświat, zapewne nieskończony, dla nas jest niepoznawalny.

wędrowce po stożku przesunie się tak, że gwiazdą polarną będzie bardzo jasna Vega. Wówczas lato w Europie będzie przypadać w styczniu...

Raz na 66 mln lat możemy spodziewać się upadku gigantycznego meteorytu, takiego jaki spowodował wyginięcie dinozaurów. Tu należy wykazać się czujnością, bo ostatni taki upadek miał miejsce 65 mln lat temu...

Gorzej będzie w dalszej przyszłości. Za 4 mld lat zacznie przygasać Słońce. Jeszcze wcześniej, za jakieś 3 mld lat, może dojść do zderzenia naszej Galaktyki z mgławicą Andromedy. Jak pokazują modele matematyczne, kolizja ta może mieć dramatyczny przebieg. Na szczęście, nie powinniśmy ucierpieć¹⁶...

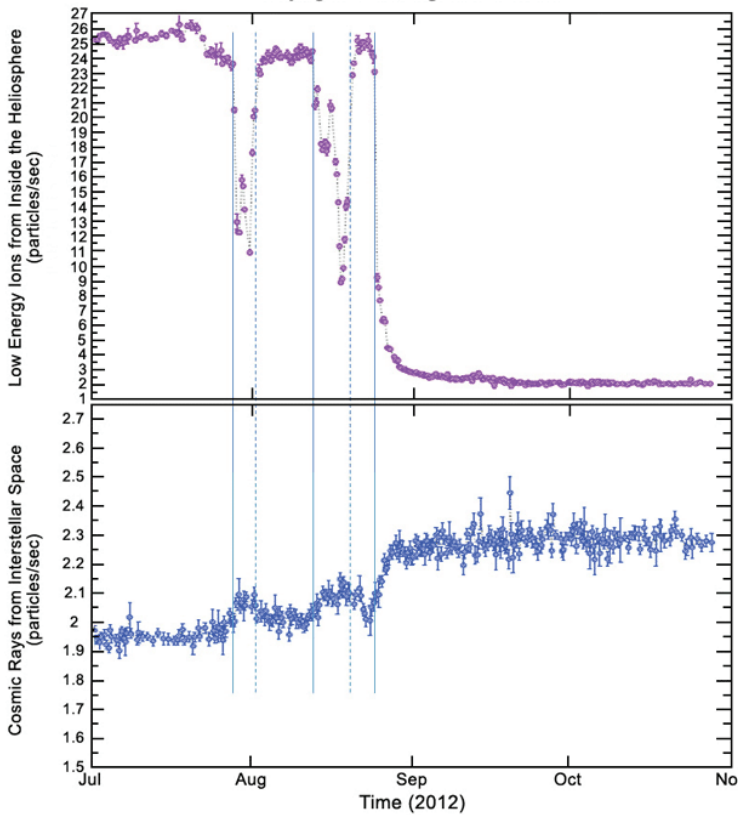


Ryc. 5.11. Bye-bye Earth! Niebieska kropczka to ostatnie zdjęcie Ziemi z pokładu Voyagera 1, z odległości 6,4 mld km. Ziemia, na złożeniu 60 zdjęć o wysokiej rozdzielczości, zajmuje 0,12 piksela. Voyager 1 od czerwca 2012 roku rejestruje wzrost promieniowania kosmicznego, przed którym nas, na Ziemi, chroni „wiatr słoneczny”.

Źródło: NASA.

¹⁶ Więcej w tematyce astronomii, astrofizyki (i lotów kosmicznych) w książce Autora *Mały astronom. Przewodnik dla dzieci*, Wyd. Publicat, Poznań, 2017. Wbrew tytułowi, książka zawiera sporo aktualnych wiadomości o kosmosie

^wprzygotowaniu materiałów do rozdziałów IV i V uczestniczyła doktorantka UMK, mgr Magda Więcek.



Ryc. 5.12. Wzrost wysokoenergetycznego promieniowania kosmicznego (niebieskie punkty na wykresie) i spadek natężenia niskoenergetycznych jonów pochodzących z wnętrza Układu Słonecznego, rejestrowany przez sondę Voyager od sierpnia 2012 roku: Voyager 1 dotarł do granic Układu Słonecznego.

Źródło: NASA.

Zastosowania fizyki

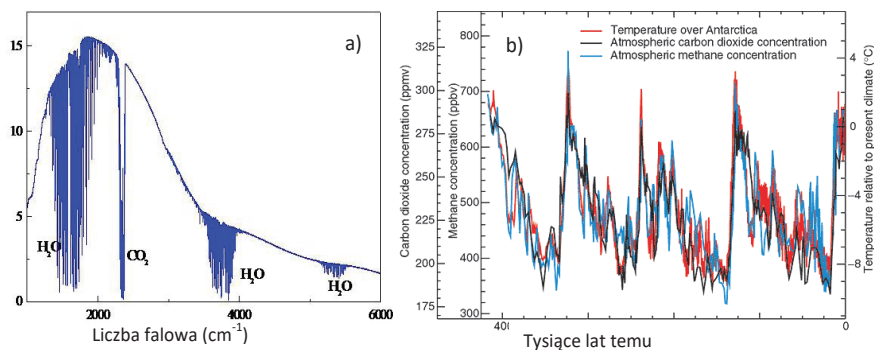
6.1. Czy grozi nam efekt cieplarniany?

Dyskusja na temat występowania lub nie efektu cieplarnianego w odniesieniu do globalnego klimatu na Ziemi jest bardzo gorąca, jak na klimat przystało. Konieczność dostosowania się do regulacji prawnych Unii Europejskiej oznacza dodatkowe podatki, tzw. *carbon tax*, które obciążają ceny paliw, gazu, a także wszystkich innych dóbr, szczególnie tych energochłonnych, jak materiały budowlane. Przeciwnicy tych uregulowań prawnych podnoszą argument o występowaniu *naturalnego* efektu cieplarnianego. Tak! Występuje on rzeczywiście, i to dużo większy niż efekt spowodowany działalnością człowieka.

Naturalny **efekt cieplarniany** jest jednym z mechanizmów, dzięki któremu istnieje życie na Ziemi. Mimo ogromnej ilości energii docierającej do Ziemi ze Słońca (1340 W na każdy metr kwadratowy powierzchni prostopadłej do padania promieni) średnia temperatura na Ziemi wynosiłaby, bez atmosfery, zaledwie -15°C . 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 pochłaniane przez gazy wieloatomowe¹, zobacz ryc. 3.10. Wskutek 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 to zasadnicza różnica!



Ryc. 6.1. Mechanizmy efektu cieplarnianego: **a)** 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 „zamyka” skutecznie możliwe okno ucieczki ciepła z Ziemi (pomiar G.K.); **b)** w ciągu ostatnich 400 tys. lat temperatura na Antarktydzie ($^{\circ}\text{C}$, linia czerwona) i zawartość CO_2 w atmosferze (w częściach na milion, linia czarna) oraz metanu (w częściach na miliard, niebieska) były ściśle skorelowane

Źródło: IPCC, 2001.

¹ 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 powracającej z Ziemi w kosmos jest unoszona przez promieniowanie podczerwone. Gazy cieplarniane przeszkadzają w tej ucieczce, co w konsekwencji podnosi średnią temperaturę na Ziemi. Zob. G. Karwasz, K. Służewski, *Ciepło, ciepło, coraz zimniej*, „Foton” 2013, vol. 122, s. 16, dydaktyka. fizyka.umk.pl/Publikacje_2013/Cieplo2_2013.pdf

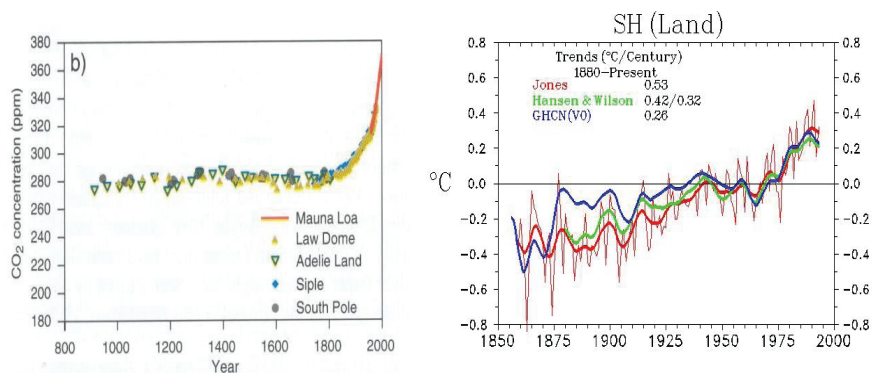
Mechanizmy efektu cieplarnianego nie są proste, stąd i jego skutki nie są bezpośrednie. W szczególności, o ile zawartość dwutlenku węgla w atmosferze nie zależy od temperatury², o tyle ilość pary wodnej zależy niezwykle silnie od zawartości prawie 0% w temperaturze 0°C do zawartości 100% w temperaturze³ 100°C. Mały wzrost temperatury na Ziemi powoduje znaczny wzrost ilości H₂O w atmosferze, co potęguje efekt cieplarniany. Jest to rodzaj *dodatniego* sprzężenia zwrotnego, jak piszczące głośniki, kiedy w pobliżu jest mikrofon!

Ilość CO₂ w atmosferze w ciągu ostatnich setek tysięcy lat zmieniała się niewiele, co potrafimy udokumentować, badając głębokie pokłady lodu na Antarktydzie, zobacz ryc. 6.1a. Okazuje się, że średnia temperatura na Ziemi (a tę znamy np. z badania osadów muszli skorupiaków) jest ściśle skorelowana z zawartością CO₂ (ryc. 6.1b). Zawartość CO₂ zmieniała się od 200 ppm (części na milion) – wówczas średnia temperatura spadała o 8°C, do nieco ponad 300 ppm – wówczas temperatura rosła o +2°C. Ryc. 6.2a przedstawia zmiany koncentracji CO₂ w ciągu ostatniego tysiąca lat. Od początku ery przemysłowej, tak około 1850 roku, obserwujemy wzrost CO₂ – do dziś naturalny poziom tego gazu w atmosferze (wynoszący około 280 ppm) został przekroczony prawie o 30%!

Wzrost poziomu CO₂ nie oznacza wzrostu temperatury *wszędzie i zawsze*. Efekt cieplarniany oznacza niekoniecznie większą temperaturę, ale większą ilość *ciepła* akumulowanego w atmosferze. Atmosfera – z prądami powietrznymi, wiatrami, opadami deszczu, burzami – używa tego ciepła do napędzania wewnętrznych procesów. Stąd efekt cieplarniany może oznaczać nawet *niższe* temperatury latem i w dzień, pochmurne lata, ciepłe zimy, ale z gwałtownymi prądami mroźnego powietrza znad bieguna.

² Jak to pokazuje przykład Wenus z gigantycznymi ilościami CO₂ w atmosferze i ogromną temperaturą (do 500° C), ilość CO₂ w atmosferze nie zależy od temperatury tylko w „rozsądnym” zakresie temperatur.

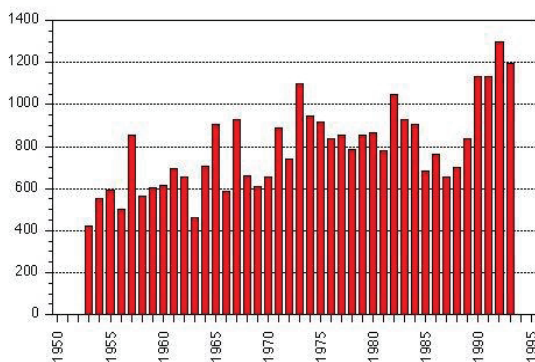
³ W saunie jest duszno z powodu małej zawartości tlenu – ciśnienie pary wodnej wypycha z sauny powietrze.



Ryc. 6.2. a) Wzrost CO₂ w atmosferze; b) zmiany temperatury na półkuli południowej (NOAA, 1997)

Oceń sam, czy grozi nam dodatkowy efekt cieplarniany spowodowany spalaniem paliw przez człowieka, jakie może mieć skutki i jak można jemu zapobiec!

NUMBER OF OBSERVED TORNADOES - U.S.



Ryc. 6.3. Liczba tornad w USA w okresie 1955–1995

Źródło: NOAA, 1997

6.2. Problemy energetyki jądrowej

W rozdziale 3 poznaliśmy reakcje rozszczepienia jądra uranu ^{235}U . Odkrycie dokonane przez niemieckich uczonych, zostało opublikowane w lutym 1939 roku. Jak opowiadał polski noblista, fizyk, prof. Józef Rotblat⁴: „My w Warszawie, po I wojnie wiedzieliśmy, jakie niebezpieczeństwo niesie możliwa, nowa broń w niepowołanych rękach. I tak z kopią artykułu poleciałem 23 sierpnia do Chadwicka [odkrywcy neutronu]. Ten nie zastanawiając się, zapakował nas do Londynu. Churchill tylko spojrzął i już siedzieliśmy w samolocie do Ameryki. Tak zaczął się Program «Manhattan»”⁵. W ramach tego programu został zbudowany pierwszy, eksperymentalny reaktor jądrowy. Pierwszy reaktor jądrowy do celów wytwarzania energii elektrycznej został uruchomiony w 1954 roku w Związku Radzieckim.

Elektrownie jądrowe działają na zasadzie rozszczepienia uranu ^{235}U lub „półproduktu” reakcji jądrowych, plutonu ^{239}Pu (ten również ma zastosowania militarne). Reaktor jądrowy jest napełniany paliwem (np. w postaci tlenku uranu UO_2), a szybkość reakcji rozszczepiania jest kontrolowana przez wsuwanie i wysuwanie prętów z kadmu; kadm ma właściwość pochłaniania neutronów, przez co zapobiega nadmiernej szybkości reakcji.

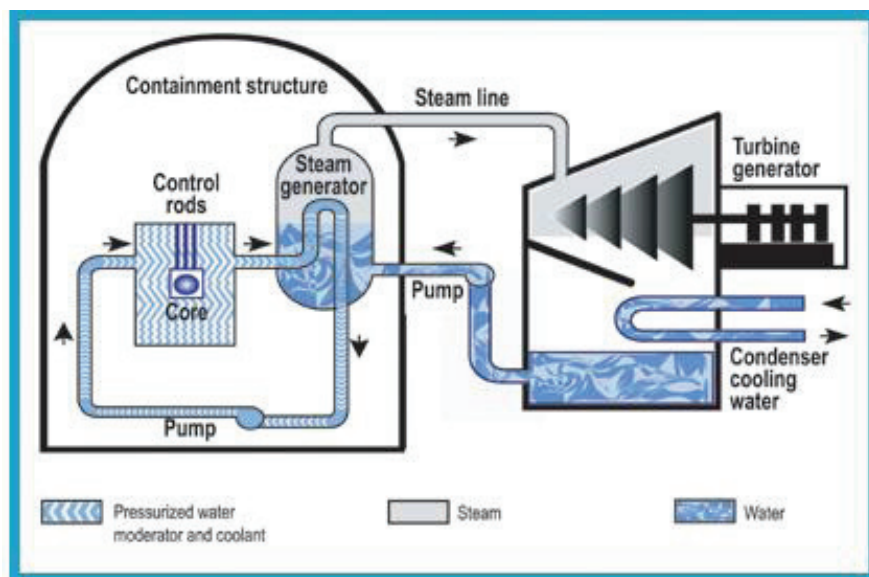
Istotnym problemem kontrolującym przebieg reakcji jądrowej jest również tzw. moderator. Okazuje się, że jeśli neutrony mają małą prędkość, większa jest szansa na ich wychwyt przez jądro uranu⁶, a przez to prawdopodobieństwo reakcji rozszczepienia. Neutrony tracą efektywnie energię w zderzeniach z lekkimi jądrami, np. jądrem deuteru ^2H lub węgla ^{12}C . Stąd zastosowanie grafitu⁷ lub ciężkiej wody jako wypełnienie reaktora.

⁴ Zob. G. Karwasz, *Polak, fizyk, noblista*, „Głos Koszaliński” 14 października 2000, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/812.

⁵ Program „Manhattan” to amerykańskie badania nad energią i bronią jądrową.

⁶ Jest tu pewna analogia z przekrojem czynnym na oddziaływanie elektronów z helem, zob. ryc. 2.26.

⁷ Awaria w Czernobylu na Ukrainie, 26 kwietnia 1986 roku polegała na zapaleniu się grafitu, wskutek niezachowania elementarnych zasad bezpieczeństwa, co doprowadziło do przegrzania się reaktora.



Ryc. 6.4. Schemat działania elektrowni jądrowej; paliwo jądrowe znajduje się w rdzeniu (*core*); pręty kontrolne (*control rods*) regulują prędkość reakcji, gorące chłodziwo (woda pod ciśnieniem) wytwarza parę wodną (*steam generator*) w wymienniku ciepła, gorąca para (*steam line*) napędza turbinę generatora (*turbine generator*), dodatkowa linia wody (*cooling water*) chłodzi parę po przejściu przez turbinę.

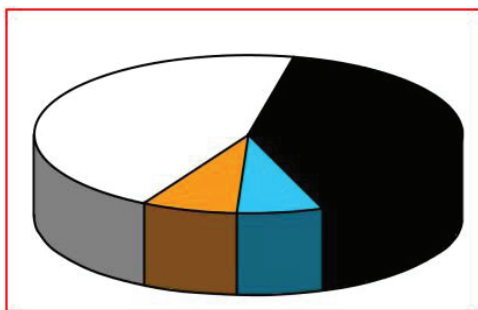
Źródło: World Nuclear Association (dostęp: 5 kwietnia 2017)

W odróżnieniu od elektrowni napędzanych węglem, gazem lub ropą naftową, elektrownie jądrowe pozwalają na szybkie włączanie się do sieci, a tym samym reagowanie na zapotrzebowanie odbiorców. Wydobycie węgla wiąże się ze znacznymi zniszczeniami środowiska oraz kosztami zdrowotnymi dla osób zatrudnionych w górnictwie. Dodatkowym argumentem przeciw energetyce opartej na węglu (jak to ma miejsce w Polsce, w 90%) jest rosnąca presja dla ograniczania skutków efektu cieplarnianego.

Elektrownie jądrowe, w odróżnieniu od elektrowni napędzanych paliwami „kopalnymi”, takimi jak węgiel i ropa naftowa, zużywają bardzo małe ilości wsadu. Elektrownia o mocy 1 GW zużywa dziennie 1 kg uranu lub plutonu; aby uzyskać podobną ilość energii z węgla trzeba spalić go 3 tys. ton (uwalniając do atmosfery tysiące ton CO_2). Całkowita moc

elektrowni jądrowych na świecie to obecnie (2019 r.) 400 GW. Francja wytwarza 79% energii elektrycznej w swoich 59 elektrowniach jądrowych; energia elektryczna we Francji należy do najtańszych w Europie.

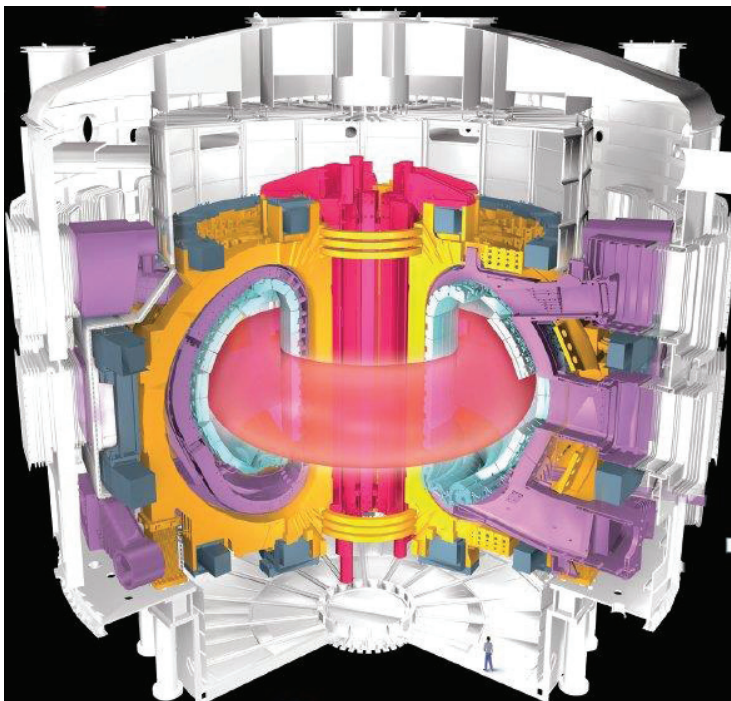
Problemem pozostaje przechowywanie odpadów radioaktywnych, ale na kuli ziemskiej istnieją obszary geologicznie stabilne od 2–3 mld lat. Większym znacznie problemem jest natomiast wyczerpywanie się tradycyjnych paliw kopalnych: węgla kamiennego powinno wystarczyć na 200 lat, gazu ziemnego na 55 lat, ale ropy naftowej na mniej niż 40 lat. Bilans pokazujemy na ryc. 6.5.



Ryc. 6.5. Zasoby paliw kopalnych w skali świata: kolor czarny – węgiel kamienny (200 lat); niebieski – gaz ziemny (ok. 50 lat); żółty – ropa naftowa (ok. 40 lat); pozostała część zasobów już została przez ludzkość skonsumowana.

Źródło: „Nature” 20 listopada 2002 r.

Oprócz różnorodnych „alternatywnych” źródeł energii elektrycznej, jak ogniwa foto- voltaiczne, biogaz, energia wiatrowa, intensywne prace są prowadzone nad kontrolowaną syntezą termojądrową. W procesie syntezy jąder helu z deuteru i trytu udało się już uzyskać produkcję netto energii (16 MW), a założonym celem nowego centrum ITER w południowej Francji jest produkcja 500 MW mocy. (Dla porównania, jest to moc 250 „wiatraków” o długości śmigieł 40 m). Koszt instalacji ITER to 13 mld euro, ale trudno przecenić możliwe korzyści technologiczne.



Ryc. 6.6. Schemat próbnego reaktora do kontrolowanej syntezy termojądrowej ITER we Francji; sercem urządzenia zwanego „tokamak” jest sznur plazmy o temperaturze 150 mln K utrzymywanej w komorze z próżnią za pomocą gigantycznych magnesów nadprzewodzących; dla porównania rozmiarów – sylwetka człowieka w prawym dolnym rogu; koszt instalacji 13 mld euro.

Źródło: ITER

6.3. Fizyka w medycynie⁸

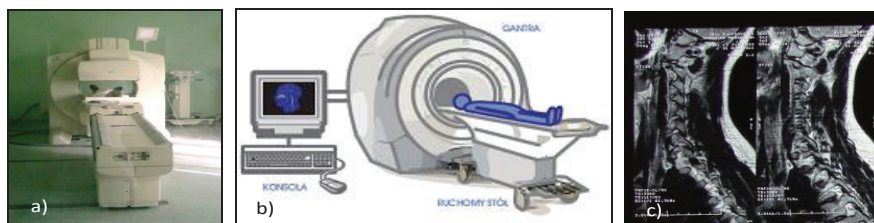
Jeszcze sto lat temu, po paru tysiącach lat rozwoju wiedzy medycznej, podstawowym narzędziem diagnozy było osłuchiwanie pacjenta za pomocą *stetoskopu*. W XX wieku fizyka zrewolucjonizowała medycynę, počawszy od medycznych zastosowań promieni Röntgena w czasie I wojny

⁸ Współpraca mgr A. Kozłowska

światowej⁹, poprzez terapie nowotworów za pomocą izotopów promieniotwórczych, do nowoczesnych komputerowych metod diagnostycznych.

Rentgenowska tomografia komputerowa

Promienie rentgenowskie są silniej absorbowane przez tkanki gęste takie jak kości. Rentgenowska tomografia komputerowa (ang. *computer tomography*, CT) polega na wykonywaniu szeregu zdjęć badanego narządu w różnych płaszczyznach i pod różnym kątem. Komputerowa obróbka serii zdjęć pozwala uzyskać kilkuwarstwowy obraz, na którym można zaobserwować nawet niewielkie detale anatomiczne, zobacz ryc. 6.7c.



Ryc. 6.7. Rentgenowska tomografia komputerowa: **a)** stanowisko diagnostyczne w Centrum Onkologii w Bydgoszczy; **b)** schemat urządzenia; **c)** zdjęcie boczne kręgosłupa za pomocą tomografii komputerowej

Źródło: A. Kozłowska

Aparat rentgenowski do tomografii (podobnie jak do paru innych technik diagnostycznych) składa się ze stołu, na którym leży pacjent, oraz gantry, czyli obrotowej obręczy zawierającej lampę rentgenowską i detektory. Konsola pomiarowa i komputery znajdują się na zewnątrz sali. Dawka, jaką otrzymuje pacjent podczas badania, wynosi ok. 15 milisivertów (mSv), jest to więcej niż roczna dawka promieniowania naturalnego w tym promieniowania kosmicznego, wynosząca około 2,4 mSv. Narażenie na

⁹ 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 minicieżarówkach, przeprowadziła 1,5 mln badań rentgenowskich rannych na froncie żołnierzy.

promieniowanie w tomografii komputerowej zależy w największym stopniu od parametrów technicznych aparatu i rodzaju badania. Dawki promieniowania w badaniu podczas 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.

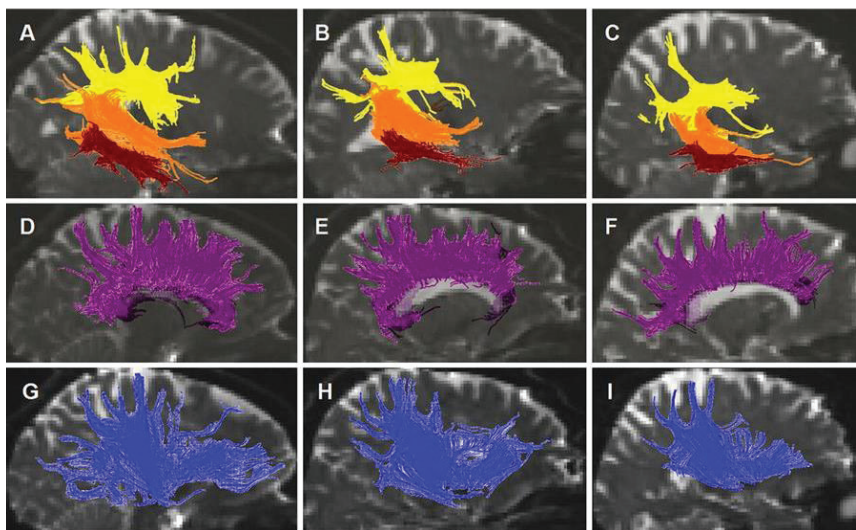
Rezonans magnetyczny

Komplementarnym badaniem do tomografii rentgenowskiej jest *rezonans magnetyczny* (ang. *magnetic resonance imaging* MRI). O ile CT służy głównie do badania tkanek twardych, MRI obrazuje tkanki miękkie, np. mózgu. Rezonans magnetyczny polega na umieszczeniu pacjenta w stałym polu magnetycznym wewnątrz aparatu, rzędu 1 tesli. Pod wpływem tego pola spiny (tj. momenty własne krętu) elektronów i jąder ustawiają się zgodnie z tym polem. Pod wpływem zmiennego *poprzecznego* pola magnetycznego (w postaci impulsu fali elektromagnetycznej) spiny zaczynają wykonywać precesję dookoła kierunku głównego pola magnetycznego, jak wirujący bąk pod wpływem zaburzenia. Częstotliwość tej precesji możemy mierzyć. Zmieniając natężenie pola magnetycznego, jego konfigurację, fazę i częstotliwość fali elektromagnetycznej, możemy precyzyjnie obrazować poszczególne obszary wewnątrz ciała człowieka.

Nadzwyczajna czułość MRI do obrazowania tkanek miękkich, czyli zawierających dużo wody, wynika ze szczególnych własności magnetycznych jądra atomu wodoru (czyli protonu). Własności te wynikają ze spinu protonów, ale również z tzw. współczynnika żyromagnetycznego. Dla elektronów współczynnik ten wynosi nieco ponad 2, a dla protonu aż 5,59, tj. pięciokrotnie więcej niż wynikałoby to z klasycznej fizyki¹⁰. Za pomocą

¹⁰ Ten sam współczynnik dla elektronu wynosi -2,002 319 304 3622 i jest jedną ze stałych fizycznych znanych z największą dokładnością; w fizyce klasycznej współczynniki ten powinien wynosić -1,0, w kwantowej -2,0; małe odchylenie od -2,0 jest wynikiem zjawisk opisanych przez *elektrodynamikę kwantową*. Dla neutronów czynnik żyromagnetyczny wynosi -3,83, ale też nie wiemy dlaczego.

MRI możemy obrazować nie tylko struktury w mózgu, zobacz ryc. 6.8, ale również *pracę* mózgu.



Ryc. 6.8. Zmiany strukturalne w mózgu z wiekiem: A, D, G – 25-letni mężczyzna, B, E, H – 55-letni mężczyzna, C, F, I – 81-letnia kobieta.

Źródło: „Radiology” 2008, vol. 247.

Tomografia anihilacji pozytonów

Tomografia pozytonowa (ang. *positron emission tomography*, PET) korzysta ze szczególnych własności antymaterii: antyelektrony (czyli pozytony), emitowane z miniźródła radioaktywnego wewnątrz organizmu, anihilują z elektronami tkanki. Powstające, przenikliwe promieniowanie gamma opuszcza tkankę pacjenta, jest rejestrowane przez detektory w gantrze, jak na ryc. 6.7b, i wskazuje dokładnie na miejsce anihilacji.

Niezwykle ważnym elementem dla rozwoju tej techniki była obserwacja, że tkanki nowotworowe mają zwiększone zapotrzebowanie na niektóre substancje, np. glukozę. Jeżeli cząsteczkę glukozy zastąpi się jej analogiem zawierającym np. sztuczny izotop fluoru, ^{18}F , to nowotwór absorbuje

tę radioaktywną glukozę i zaczyna „świecić” promieniowaniem gamma. Co więcej, ten analog glukozy nie jest w komórce metabolizowany, aż do chwili rozpadu ^{18}F . Jądro fluoru ^{18}F , z czasem połowicznego zaniku 110 minut, zamienia się w tkance na jądro (nieradioaktywnego) tlenu ^{18}O , według znanej reakcji rozpadu beta:



Powstały pozyton anihiluje w czasie rzędu 10^{-10} s, praktycznie w miejscu, gdzie powstał. W reakcji wysyłane są dwa kwanty gamma, o tej samej energii 511 keV, według schematu:



Układ detekcji w gantrze reaguje tylko na te dwa kwanty gamma, w koincydencji, co pozwala znacznie obniżyć tło zewnętrzne, a przez to dawkę izotopu dla pacjenta. Jednocześnie precyzyjnie jest określane miejsce anihilacji pozytonu.

Przystępując do badania pacjenta, wykonuje się tzw. topogram. Jest to krótki, kilkusekundowy skan rentgenowski, sprawdzający prawidłowe ułożenie pacjenta. Kolejny etap to badanie CT dające obraz rentgenowski, stanowiący mapę anatomiczną dla obrazu PET. Dokładność metody pozwala na znalezienie nowotworów nawet o rozmiarach 2–3 mm. Jest to jednocześnie diagnostyka praktycznie nieinwazyjna – pochłonięta dawka promieniowania jest w granicach 5–20 mSv, jako że resztki izotopu są szybko wydalane z organizmu.

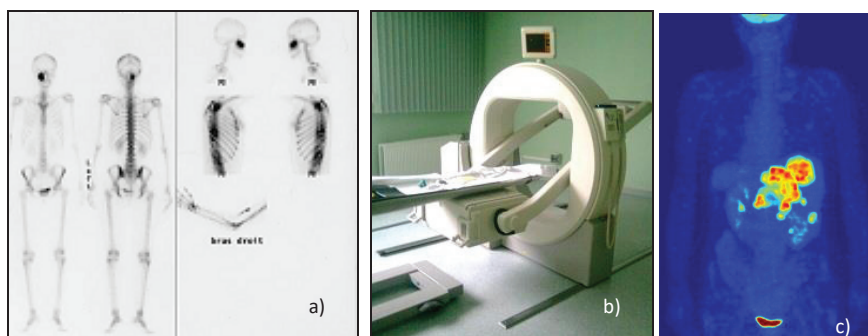
Scyntygrafia

Uzupełnieniem badania PET (pozytonowej tomografii emisyjnej) jest scyntygrafia, która polega na uzyskiwaniu obrazu narządów oraz oceny ich czynności za pomocą niedużych ilości izotopów promieniotwórczych (radioznaczników). Izotopy takie lokują się w badanych narządach, co pozwala na ocenę jego wielkości, kształtu, położenia, ale także funkcjonowania.

Scyntygrafię stosuje się nie tylko w obrazowaniu zmian nowotworowych, ale i innych efektów typu anatomicznego i funkcjonalnego, np. w tkance kostnej i nerkach.

Izotop podawany jest pacjentowi doustnie w ilości zależnej od masy i powierzchni ciała pacjenta. Radioizotop najczęściej stosowany to meta-stabilny izotop technetu ^{99}Tc (o okresie połowicznej deaktywacji 6 godz.). Rzadziej używa się jodu ^{131}I ($\tau_{1/2} = 8$ dni), który jest selektywnie absorbowany w tarczycy, talu ^{201}Tl (w badaniach serca) i galu ^{67}Ga (który imituje w organizmie jony żelaza, przez co lokuje się w obszarach np. zakażeń).

Tak w scyntygrafii, jak w tomografii anihilacji pozytonów izotopy radioaktywne wprowadzane są do organizmu jako „podstawniki” pierwiastków naturalnie metabolizowanych w organizmie człowieka. I tak np. fluor ^{18}F jest podstawiany w miejsce wodoru w glukozie, siarka wychwytywana jest przez komórki wątroby, fosforany gromadzą się w kościach itd. Używane w badaniach scyntygraficznych radioizotopy są mało szkodliwe dla organizmu. Jednakże nadmiar badań prowadzi do kumulacji dawek promieniowania pochłoniętego, a co za tym idzie – wzrostu ryzyka choroby nowotworowej.



Ryc. 6.9. Nowoczesne techniki diagnostyczne **a)** obraz scyntygraficzny człowieka; **b)** scyntygraf jednogłowicowy znajdujący się w Centrum Onkologii w Bydgoszczy (A.K.); **c)** tomografia anihilacji pozytonów (PET) – widoczna akumulacja radioizotopu w niektórych narządach

Źródło: Wikipedia.

6.4. Fizyka w naukach o Ziemi¹¹

Kształt Ziemi

Kształt Ziemi nie jest zagadnieniem prostym. Określamy go często jako *geoida*. Niewiele to określenie jednak mówi: kształt Ziemi to *ziemio-kula*. Od rozważań o kształcie Ziemi zaczyna się *De revolutionibus* Kopernika: „[...] Chociaż wyraźnej jej kulistości bezpośrednio widzieć nie można, z przyczyn wyniosłości gór i wklęsłości dolin, to przecież nierówności te bynajmniej nie zmieniają ogólnej jej okrągłości, co się daje tak uzasadnić. [...] Także i wody morskie układają się w postaci kulistej, o czym wiedzą żeglarze, dostrzegając z wysokości masztu łód stały, którego z pokładu okrętu jeszcze nie widać”¹².

Kulisty kształt Ziemi rodził nie byle problem: dlaczego woda nie spływa z takiej kuli? Kopernik korzystał częściowo z wyjaśnienia Arystotelesa, według którego ciała ciężkie dążą do środka Ziemi, bo tam jest ich „miejsce naturalne”. A woda? Jest przecież lżejsza niż skała, a łądy nad morza wystają. Kopernik pisał więc, że „[...] jako łód i woda wspierają się na jednym *środku ciężkości* Ziemi, który jest zarazem *środkiem* jej objętości. Woda, będąc lżejszą, wypełnia rozpadliny ziemskie i dlatego mało jest wody w stosunku do łądy, chociaż może na powierzchni więcej widać wody”¹³.

Jak wiemy, prawo powszechnego ciężenia sformułował dopiero Newton, 150 lat po Koperniku. Ale nasz rodak był „na właściwym tropie” – kluczem do zrozumienia kształtu Ziemi jest *prawo ciężenia*. Geoida to nie kula geograficzna, ale *fizyczna*.

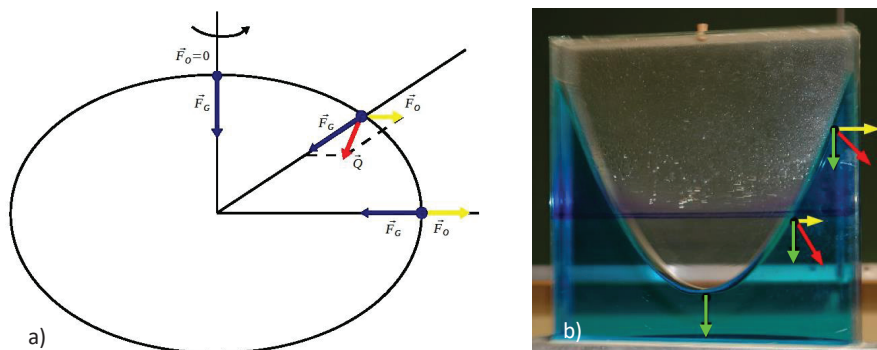
¹¹ Zob. J. Chojnacka, G. Karwasz, *Jakiego kształtu jest „kula” ziemiska*, „Geografia w Szkole” 2011, nr 6, s. 45; G. Karwasz, J. Chojnacka, *Wewnętrzny ogień, czyli o tektonice płyt Ziemi*, „Geografia w Szkole” 2012, nr 3, s. 28.

¹² M. Kopernik, *De Revolutionibus*, ks. 1.

¹³ Tamże.

Geoida to idealny kształt (wirującej) Ziemi, który by przyjęła oblana w całości wodą.

Problem komplikuje fakt, że Ziemia wiruje, i to z dużą prędkością (kątową). Na wodę na kuli ziemskiej działa więc nie tylko siła ciężkości (skierowana do środka kuli), ale i siła odśrodkowa bezwładności (zob. par 1.5), skierowana „poziomo” na ryc. 6.10. Woda nie przyjmuje kształtu kuli, ale jak to pokazujemy na ryc. 6.10, kształt elipsoidy. Dla takiej elipsoidy siła wypadkowa, będąca sumą siły ciężkości i siły odśrodkowej, jest zawsze *prostopadła* do powierzchni elipsoidy. Tak jak powierzchnia wody w talerzu jest prostopadła do (lokalnego) kierunku siły grawitacji.



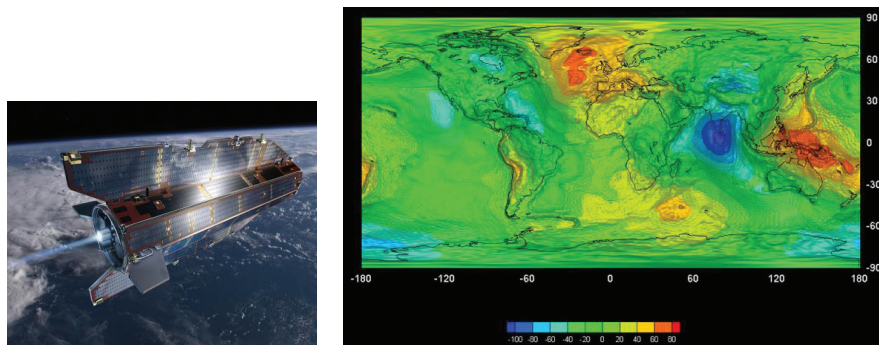
Ryc. 6.10. a) Rozkład sił na obracającej się Ziemi; elipsoida obrotowa jest „idealną” powierzchnią Ziemi – tylko w tym przypadku wektor siły nie ma składowej stycznej do powierzchni Ziemi; **b)** na wodę w wirującym akwarium działa siła grawitacji (pionowo w dół) i siła odśrodkowa (poziomo); powierzchnia wody jest prostopadła do wypadkowej z tych sił i przyjmuje kształt paraboli

Różnice w gęstości poszczególnych sfer Ziemi, a także rowy oceaniczne, wysokie pasma górskie i złoża surowców sprawiają jednak, że masa elipsoidy ziemskiej nie jest rozłożona równomiernie w całej jej objętości. Pozostaje to nie bez wpływu na pole grawitacyjne Ziemi. Konstrukcja mapy pola grawitacyjnego pozwala na odtworzenie prawdziwego kształtu geoidy. Geoida jest bryłą o powierzchni prostopadłej w każdym punkcie

do (wypadkowego) wektora siły grawitacji. W fizyce taką powierzchnię nazywamy powierzchnią stałego potencjału grawitacyjnego. Nie wprowadzaliśmy tego pojęcia do tej pory, ale byliśmy blisko w równaniu (1.32). Potencjał grawitacyjny V w odległości R od masy punktowej M obliczamy ze wzoru:

$$V(R) = -\frac{GM}{R} \quad (6.3)$$

Jak widzisz, wyznaczenie kształtu Ziemi nie jest proste. W dobie lotów kosmicznych mamy na to jednak nowe sposoby: sztuczny satelita Ziemi, który lata na niskiej wysokości (150 km) i mierzy precyzyjnie pole grawitacyjne, ryc. 6.11a. W ten sposób powierzchnia geoidy została wyznaczona z dokładnością do kilkudziesięciu centymetrów, zob. ryc. 6.11b.



Ryc. 6.11. a) Satelita do pomiarów grawitacji (GOCE) lata na niskiej orbicie (150 km) i używa silników jonowych na ksenon do korekty trajektorii lotu; b) Powierzchnia geoidy to powierzchnia stałego potencjału grawitacyjnego, z uwzględnieniem siły odśrodkowej; powierzchnia ta jest pod elipsoidą, np. w rejonie Himalajów

Źródło: ESA

W obszarze Himalajów teoretyczna, tj. określona przez potencjał grawitacji, powierzchnia geoidy wypada *pod* powierzchnią matematycznej elipsoidy. Himalaje zbudowane są bowiem z lekkich skał osadowych spoczywających niegdyś (100 mln lat temu) na dnie ciepłego morza. Powierzchnia geoidy „wybrzusza się” w górę w rejonie Islandii.

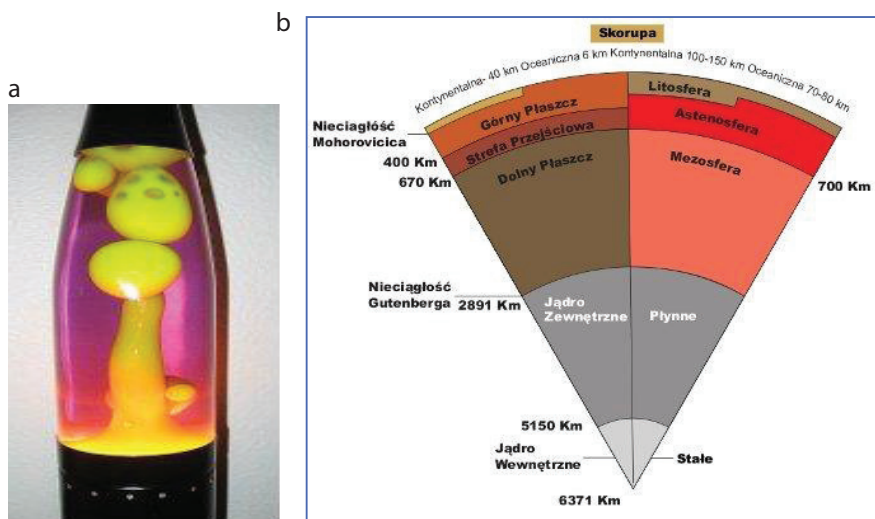
Tektonika płyt

Skorupa ziemska pozostaje w stałym ruchu, którego przyczyną jest „wewnętrzny ogień”.

Znany jest fakt, że temperatura w miarę wzrostu głębokości rośnie. Powody, dla których Ziemia jest gorąca wewnątrz (przypuszczalna temperatura w jej środku wynosi ok. 5000°C), są co najmniej dwie. Po pierwsze, Ziemia nie zdążyła wystygnać: **4,567 mld lat** od jej uformowania się to w astronomicznej skali czasu zaledwie 1/3 czasu od Big Bangu, przewodność cieplna skał jest niska, a ich ciepło właściwe duże. Po drugie, we wnętrzu Ziemi cały czas zachodzą rozpady promieniotwórcze, które wytwarzają duże ilości energii.

Uran, którego zawartość w skorupie ziemskiej szacuje się na 0,0002%, rozpada się z okresem połowicznego zaniku 4,51 mld lat, porównywalnym z wiekiem Ziemi (mówimy o izotopie ^{238}U , którego zawartość w naturalnym uranie wynosi 99%). Ciepło uzyskane w reakcji rozpadu 1 g uranu, poprzez długi szereg radioaktywny aż do ołowiu ($^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} \rightarrow \dots \rightarrow ^{206}\text{Pb}$), dostarcza łącznie energii rzędu 100 tys. kWh. Sumarycznie, jak wykazały ostatnio badania przeprowadzone przez japońskich fizyków zajmujących się cząstkami elementarnymi, neutrinami, połowa bilansu cieplnego pochodzącego z wnętrza Ziemi ma źródło w rozpadach promieniotwórczych; druga połowa to stygnięcie wnętrza. Dokładniej, w skorupie i płaszczu Ziemi wydzielą się około 8 TW (terawat) mocy z rozpadów uranu (^{238}U), kolejne 8 TW z rozpadu toru (^{232}Th) i 4 TW z rozpadu potasu (^{40}K). Dla porównania cała produkcja energii elektrycznej na Ziemi ze wszystkich źródeł daje moc około 10 TW.

Ciepło wydzielone wewnątrz Ziemi powoduje wznoszenie się części materiału, czyli *konwekcję*. Konwekcja to ruch cieczy wskutek jej podgrzewania od dołu i wynikająca z tego podgrzewania różnica gęstości. Wykorzystuje się ją np. w kolorowych lampach, gdzie podgrzewana od spodu ciecz formułuje bąble poruszające się do góry, a po ostygnięciu spadające w dół (ryc. 6.12a).

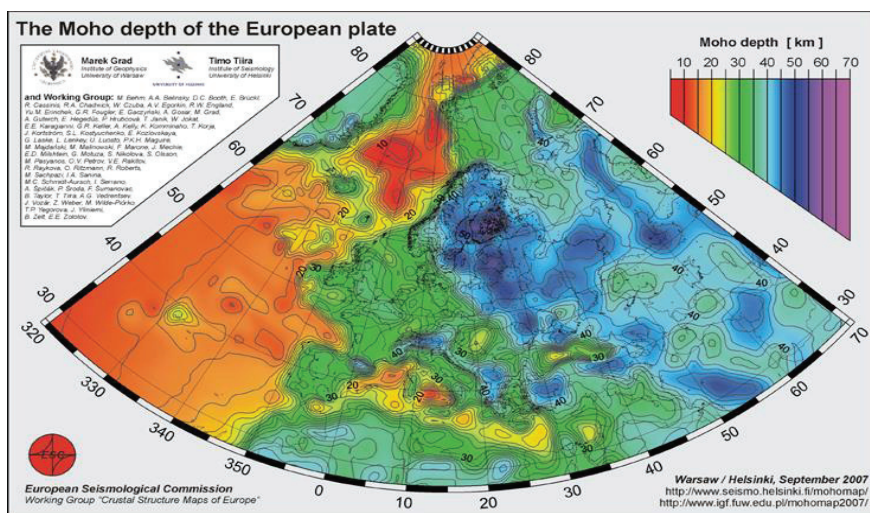


Ryc. 6.12. a) Lampa typu „lawia”. Proces konwekcji wymusza ruch żółtej cieczy. Znajdujące się u dołu lampy źródło ciepła ogrzewa ciecz. Podczas podgrzewania objętość bąbli leżących na dnie rośnie, czyli maleje ich gęstość. Na skutek działania siły wyporu żółta ciecz wypychana jest ku górze. Bąble, wędrując ku górze, oddalają się od źródła ciepła – stają się chłodniejsze, ich gęstość rośnie i opadają na dno. Wznoszenie się i opadanie cieczy przypomina konwekcję materiału pod powierzchnią Ziemi; **b)** Przekrój przez planetę Ziemię. Żelazowo-niklowe jądro sięga mniej więcej do połowy promienia, w zewnętrznej swej części jest płynne; płaszcz składa się z krzemu, tlenu i innych lekkich pierwiastków chemicznych; zawiera również uran.

Źródło: G. Karwasz i J. Chojnacka, „Geografia w szkole” 2012, nr 3, s. 28. (G.K.)

Proces konwekcji dotyczy również Ziemi. Za jej sprawą, a także różnic w składzie chemicznym i właściwościach fizycznych poszczególnych sfer Ziemi dochodzi do trzęsień ziemi, wybuchów wulkanów oraz szeregu innych procesów. Ziemia nie jest bowiem jednorodna. W jej strukturze możemy wyróżnić trzy zasadnicze części. Pierwsza – zewnętrzna, składa się ze stosunkowo lekkich skał, zawierających głównie krzem i tlen, druga – wewnętrzna złożona jest prawdopodobnie z żelaza, niklu z domieszką innych pierwiastków.

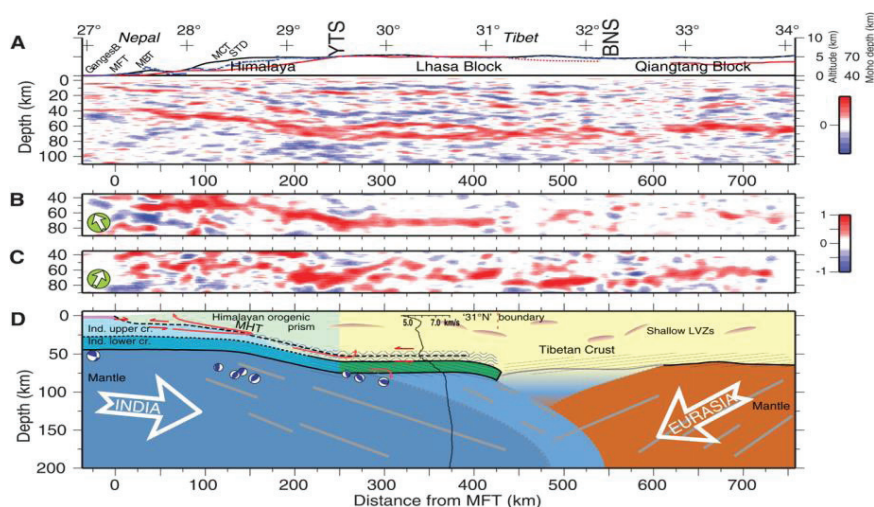
Odkrycie bardziej subtelnych różnic w budowie Ziemi stało się możliwe dzięki badaniom nad rozchodzeniem się fal sejsmicznych, powstających chociażby wskutek trzęsień Ziemi. Pomiaru amplitud i czasów dobiegu fal sejsmicznych w różnych punktach pomiarowych na całym świecie pozwoliły wyznaczyć głębokość, na jakiej znajduje się tzw. nieciągłość Moho-ro-więcia, a tym samym wyznaczyć grubość skorupy – najbardziej zewnętrznej części kuli ziemskiej. Skorupa ta ma grubość od 10 km w rejonie Islandii, gdzie ciągle powstaje na nowo, aż to 60–70 km w rejonie Finlandii, gdzie powstała 3–3,5 mld lat temu, zobacz ryc. 6.13.



Ryc. 6.13. Głębokość, na jakiej znajduje się nieciągłość Moho dla płyty europejskiej. Na najmniejszej głębokości znajduje się ona w obrębie oceanów (kolor czerwony, pomarańczowy), najgłębiej zaś położona jest w rejonie Finlandii i Estonii. Źródło: M. Grad i in., *The Moho depth map of the European Plate*, „Geophys. J. Int.” 2009, vol. 176, s. 279, za zgodą autorów

Zewnętrzna warstwa Ziemi, tzw. litosfera, nie stanowi jednej całości, ale składa się z gigantycznych kawałków – płyt tektonicznych, obejmujących swoim zasięgiem zarówno kontynenty, jak i dno oceaniczne. Płyty te unoszą się na powierzchni płaszcza, a dryfujące ku sobie kontynenty wcześniej czy później się zderzą. Ogólnie linie zderzeń płyt to pasma wzmożonej aktywności wulkanicznej i sejsmicznej. Szczegółowe mechanizmy zderzeń

płyt (i obserwowane krajobrazy) zależą zasadniczo od dwóch czynników. Po pierwsze, od rodzaju zderzających się płyt: kontynentalne, grube, ale zbudowane ze stosunkowo lekkich skał, czy oceaniczne: cienkie, ale zbudowane ze stosunkowo ciężkich bazaltów. Po drugie, zależą od kierunku zanurzania się (subdukcji) brzegów płyt: ze wschodu na zachód lub odwrotnie.



Ryc. 6.14. Kolizja kry indyjskiej z euroazjatycką jest bezpośrednią przyczyną wypiętrzenia się Himalajów. Materiał, z którego składają się Himalaje, został „zeskrobany” ze skorupy indyjskiej (kolor niebieski) przez twardszy klin skorupy tybetańskiej (kolor rdzaw). Strefa Moho leży na głębokości ok. 40 km pod deltą Gangesu i 70 km osiąga w okolicach Lhasy (Tybet). W rejonie zderzenia górny płaszcz płyty indyjskiej i płyty azjatyckiej zanurzają się w głąb Ziemi.

Źródło: J. Nábělek et al., *Underplating in the Himalaya-Tibet Collision Zone Revealed by the Hi CLIMB Experiment*, „Science” 11 September 2009, vol. 325, no. 5946

Współczesne kontynenty przypuszczalnie kilkakrotnie w dziejach Ziemi łączyły się w ogromne super-kontynenty, a następnie rozpadały się na pojedyncze masy kontynentalne. Prawdopodobnie oprócz Pangei 200 mln lat temu istniał inny super-kontynent, zwany Rodinią. Jego rozpad na mniejsze kry pływające w okolicy równika, ryc. 6.15, prawdopodobnie przyczyniło się do globalnego zlodowacenia, jakie ogarnęło naszą planetę

jakieś 600 mln lat temu. Jak przewidują geofizycy, obecne kontynenty zde-
rzą się za jakieś 100 mln lat w rejonie bieguna północnego.



Ryc. 6.15. Współczesne kontynenty przypuszczalnie kilkakrotnie w historii Ziemi łączyły się w ogromne superkontynenty, by następnie rozpaść się na pojedyncze masy kontynentalne. Tu przedstawiamy hipotezę, jak wyglądała powierzchnia Ziemi 600 mln lat temu (rys. Katarzyna Konieczna wg P. F. Hoffman, D. P. Schrag, *Snowball Earth*, Scientific American, January 2000)

6.5. Polacy w fizyce współczesnej

Zaczęliśmy opowieść o fizyce od Mikołaja Kopernika (1473–1543) nie bez powodu. Postawił on szereg istotnych pytań, nie tylko o trzy rodzaje ruchu Ziemi, ale także w zakresie fizyki: o grawitację, o ruch względny, o granice Wszechświata. Jego dzieło „De revolutionibus” jest warte przewertowania: jest to pierwszy traktat pisany w nowoczesny, empiryczny sposób. Już nie założenia i wnioski, jak u Euklidesa, ale obserwacje, hipotezy, dalsze obserwacje i wreszcie kompletna *teoria heliocentryczna*.

Oczywiście Włosi zaczynają podręczniki od Galileusza (1564–1642), Francuzi od Kartezjusza (1596–1650), Anglicy od Newtona (1643–1727). Każdy z nich miał wielki wkład, ale rewolucji dokonał (i tu są wszyscy zgodni) tylko Kopernik. Wynik uzyskał po dwunastu latach studiów

uniwersyteckich w zakresie prawa, greki, łaciny, medycyny i astronomii w Krakowie, Bolonii i Padwie i po dziesięcioleciach mozolnych obserwacji astronomicznych.

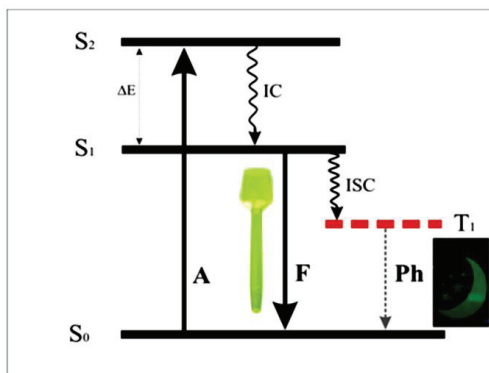
Tytanem pracy była również Maria Skłodowska, która w obcym kraju spędzała miesiące w nieogrzewanym laboratorium, separując chemicznie, po 20 g na raz, ponad tonę radioaktywnej rudy uranowej. Później służyła jako ochotniczka na froncie, dokonując prześwietleń rentgenowskich rannych żołnierzy. Z powodów narodowo-politycznych nie została wybrana do Francuskiej Akademii Nauk, a i w Polsce nie „zadomowiła się”.

Historii uczonych, którzy mimo trudności dokonali rzeczy wielkich, jest więcej. Tu opisujemy kilka z odkryć dokonanych przez Polaków w fizyce współczesnej. Zaczniemy od życiorysu założyciela Instytutu Fizyki na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, Aleksandra Jabłońskiego.

Aleksander Jabłoński – ur. 26 lutego 1898 w Woskresnówce na Ukrainie, zm. 9 września 1980 w Warszawie, pracował w dziedzinie optyki, fizyki atomowej i cząsteczkowej. Studia z zakresu fizyki na Uniwersytecie w Charkowie przerwała I wojna światowa – został powołany do armii rosyjskiej. Studia podjął ponownie w Warszawie i znów wojna (tzw. sowiecka) je przerwała. Jako saper przygotowuje w bezpośrednim sąsiedztwie wojsk nieprzyjacielskich przeprawę przez rzekę pod Baranowiczami, za co zostaje odznaczony Krzyżem Walecznych. W listopadzie 1920 roku po raz czwarty podejmuje studia fizyczne. Jednocześnie studiuje grę na skrzypcach – w latach 1921–1926 grał w grupie pierwszych skrzypiec Teatru Wielkiego w Warszawie. Niezwykle burzliwe były lata II wojny światowej – był więźniem obozu w Kozielsku, później jako żołnierz Armii Polskiej przez Iran i rejssem dookoła Afryki trafił do Anglii. W 1945 roku wraca do Polski i obejmuje katedrę fizyki doświadczalnej na UMK.

Aleksander Jabłoński zasłynął jako twórca diagramu opisującego mechanizm zjawisk fotoluminescencji, w świetle znanego pod nazwą *diagramu Jabłońskiego*. Nie bez echa przeszły także jego dalsze badania nad wpływem zderzeń atomowych na kształt linii widmowych, które przyniosły mu uznanie badaczy zajmujących się oddziaływaniami międzyatomowymi i spektroskopią. Wkrótce jego odkrycia przyczyniły się do wynalezienia lasera barwnikowego, który odegrał istotną rolę w wielu dziedzinach nauki, techniki, a także w medycynie.

Diagram Jabłońskiego wyjaśnia, dlaczego „świecą” na zielonkawo lub różowo niektóre barwniki, np. w kamizelkach dla kierowców. Otóż, obok natychmiastowego pochłaniania (absorpcji) i wysyłania (emisji) światła, możliwe są procesy „opóźnione” i widma wzajemnie przesunięte. Dzieje się tak, gdy bezpośrednie przejścia elektronów między poziomami energii są zabronione, np. z uwagi na ustawienia spinów. Istotne stają się wówczas *bezpromienne* przejścia między różnymi poziomami energetycznymi¹⁴.



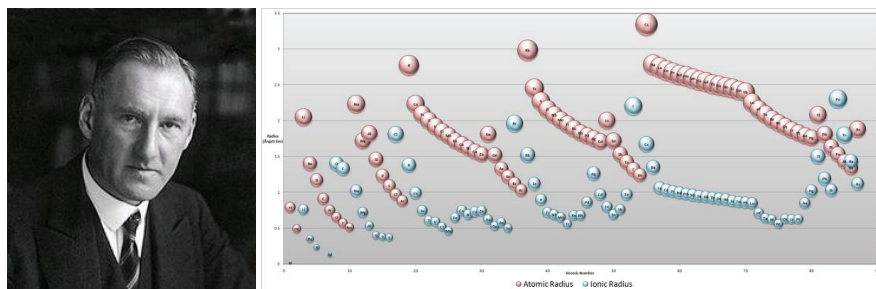
Ryc. 6.16. Uproszczony schemat poziomów energetycznych Jabłońskiego, przedstawiający wzbudzone stany elektronowe o różnych wartościach całkowitego spinu: 0 – stan singletowy (S) i 1 – stan trypletowy (T). Przejścia między stanami S a T są *zabronione*. Strzałki proste ilustrują procesy promienne, a strzałki faliste procesy bezpromienne. Literami oznaczono poszczególne procesy fizyczne: A – absorpcja, F – fluorescencja (fotoluminescencja natychmiastowa), Ph – fosforescencja (fotoluminescencja opóźniona), IC – konwersja wewnętrzna, ISC – konwersja interkombinacyjna (międzysystemowa). „Fluoryzuje” łyżeczka do lodów zabarwiona organicznym barwnikiem, kumaryną a „fosforyzują” gwiazdki do dziecięcej sypialni. Na zdjęciu na lewo – profesor Jabłoński z nieodłączną fajką.

Źródło: Archiwum Instytutu Fizyki UMK; G. Karwasz, M. Gagoś, 2012

¹⁴ Więcej o kolorach i przejściach elektronowych w artykułach G. Karwasz, M. Gagoś, *Rubiny, złote szkło i brazylijskie motyle, czyli o kolorach w fizyce, chemii i biologii*, „Chemia w Szkole” 2012, nr 3, s. 5–25.

Kazimierz Fajans – ur. 27 maja 1887 w Warszawie, zm. 18 maja 1975 roku w Ann Arbor, Michigan, USA, był fizykiem jądrowym, atomowym i chemikiem. W 1912 roku odkrył niezależnie od Anglika Fredericka Soddy’ego prawo przesunięć promieniotwórczych, znane dziś jako reguła Soddy’ego – Fajansa.

Prawo to już poznaliśmy: określa ono, jakie jądro powstanie w przemianie radioaktywnej w zależności od typu przemiany. W przypadku rozpadu α powstaje pierwiastek o liczbie atomowej mniejszej o dwa (a liczbie masowej mniejszej o 4). Oznacza to przesunięcie w układzie okresowym o dwa miejsca w lewo. Podobnie znajdujemy położenie pierwiastka po przemianach β^- i β^+ . Gdy pierwiastek promieniotwórczy ulega przemianie β^- , to otrzymujemy nuklid o liczbie atomowej większej o jeden, a więc pierwiastek położony o jedną pozycję dalej (czyli w prawo) niż pierwiastek ulegający rozpadowi. Dla przemiany β^+ będzie to pierwiastek przesunięty o jedno miejsce w lewo; liczba masowa się nie zmienia.



Ryc. 6.17. Kazimierz Fajans i jego schemat promieni atomowych (różowe) i jonowych (niebieskie) różnych pierwiastków chemicznych¹⁵; atomy z jednym elektronem na orbitalu 2s, 3s itd., jak lit, sód, potas, rubid, cez (metale „alkaliczne” w chemii) mają największe promienie atomowe, zgodnie z naszym schematem orbitali z rys. 2.36b; po odłączeniu tego elektronu promienie jonów metali alkalicznych wynoszą mniej więcej 1,5 Å.

Źródło: Wikipedia³⁷.

Reguła ta pozwoliła ustalić położenie wszystkich (znanych) pierwiastków w układzie okresowym. Kazimierz Fajans wraz ze swoim doktorantem

¹⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Atomic_vs_Ionic_Radius.png

Oswaldem H. Göhringiem dokonali odkrycia pierwiastka o liczbie atomowej 91 znanego początkowo pod nazwą brevis, później jednak nazwano go protaktynem. W momencie, kiedy objął Katedrę Chemii Fizycznej na Uniwersytecie w Monachium, skupił swoje wysiłki na badaniach kryształów oraz cząsteczek. To on opracował regułę, która pozwala nam określić, jaki typ wiązań, kowalencyjne czy jonowe, łączy dwa atomy.

W 1935 roku opuścił Niemcy i podjął pracę na Uniwersytecie Michigan w Ann Arbor, zajął się m.in. poszukiwaniem nowych izotopów, korzystając z pierwszych akceleratorów protonów (cyklotronów).

Sir Józef Rotblat – ur. 4 listopada 1908 roku w Warszawie, był fizykiem, filantropem i działaczem pacyfistycznym, jednym z twórców bomby atomowej. W 1955 roku jako najmłodszy z 11 sygnatariuszy był współautorem tzw. Manifestu Russella – Einsteina¹⁶, wzywającym do pokojowej współpracy w zakresie energii jądrowej. Był twórcą ruchu „Pugwash”. Wielu Polaków zostało uhonorowanych Nagrodą Nobla. Jednym z nich był sir Józef Rotblat.

Józef Rotblat pochodził z niezbyt bogatej rodziny i po I wojnie światowej pracował jako elektryk. Ukończył fizykę na Uniwersytecie Warszawskim w 1938 roku, uzyskując tytuł doktora fizyki na Uniwersytecie Warszawskim w 1938 roku. W 1939 roku wyjechał do laboratorium J. Chadwicka w Anglii, odkrywcy neutronu. O udziale Rotblata w programie „Manhattan” już pisaliśmy. W momencie, kiedy było jasne, że Niemcy wojnę przegrają, zwrócił się do generała L. Grovesa, który przejął kierowanie projektem z rąk Enrico Fermiego, o zaprzestanie prac nad śmiercionośnym ładunkiem. Był jedynym naukowcem pracującym nad bombą jądrową, który wycofał się z projektu z powodów sumienia. Z tej przyczyny został w USA skazany na *ostracyzm*.

Wrócił do Wielkiej Brytanii, gdzie został wykładowcą na Uniwersytecie w Liverpool. Zajmował się badaniem skutków medycznych promieniowania jądrowego, m.in. z eksplozji termonuklearnych. W 1957 roku zorganizował pierwszą konferencję, z udziałem naukowców amerykańskich

¹⁶ Sygnatariuszami byli m.in. Max Born, Frédéric Joliot-Curie, Leopold Infeld. Dziesięciu z 11 sygnatariuszy zostało laureatami Nagrody Nobla.

i radzickich, poświęconą zagadnieniom rozbrojenia jądrowego. Od małego miasteczka w Kanadzie seria konferencji przyjęła nazwę „Pugwash”¹⁷. Pokojową Nagrodę Nobla, jako przewodniczący ruchu „Pugwash”, uzyskał w 1995 roku. Był odznaczony najwyższymi orderami imperium brytyjskiego, ale do końca życia uważał się za Polaka.



Ryc. 6.18. Wykład prof. Rotblata na Konferencji ISODARCO, Rovereto, sierpień 2000 rok; profesor miał wówczas 92 lata (fot. G.K.); Bertrand Russel odczytuje *Manifesto*, Londyn, 9 lipiec 1955 rok

Źródło: Pugwash

Tragiczne było życie prywatne J. Rotblata. Jak sam opowiadał: „Wyleciałem z Warszawy 23 sierpnia (1939 roku), moja żona miała bilet na 31 sierpnia – oczywiście samolot nie odleciał. Na wiosnę (1940 roku) załatwiłem jej wizę belgijską, ale Hitler zajął Belgię, później wizę jugosłowiańską, ale Hitler zajął Jugosławię. I tak czekam na nią do dziś (2000 r.)”¹⁸

Józef Rotblat zmarł 31 sierpnia 2005 roku.

¹⁷ W pierwszej konferencji „Pugwash” uczestniczyło 22 naukowców z 10 krajów, w tym z Polski M. Danysz.

¹⁸ Zob. G. Karwasz, *Jak zbudowałem bombę atomową*, „Głos Koszaliński” 2001, <http://planeta-terra.blogspot.com/2008/08/jak-zbudowaem-bomb-atomow-opowiada-jzef.html>

Dziwne kwarki

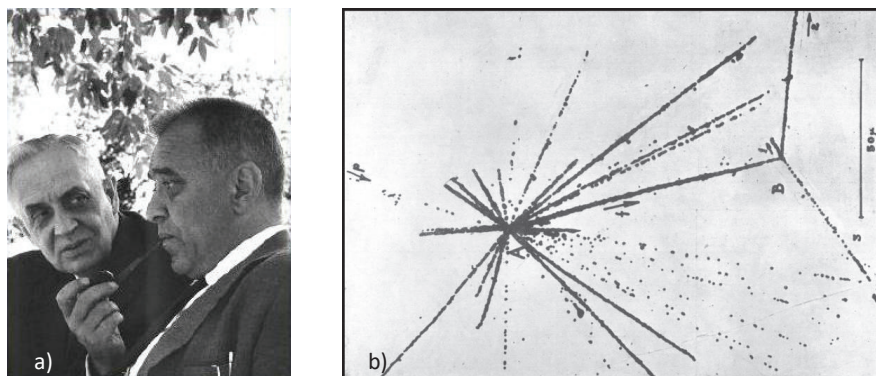
W dziedzinie fizyki jądrowej i cząstek elementarnych znaczącego odkrycia dokonali na początku lat 50. XX wieku fizycy z Uniwersytetu Warszawskiego, Marian Danysz i Jerzy Pniewski. Udowodnili oni, iż składnikami jądra mogą być nie tylko protony i neutrony, ale i inne cząstki, nazwane wówczas „dziwnymi”. Dziś wiemy, że odkryta „dziwna” cząstka elementarna zawiera kwark, niespotykany w normalnej materii, kwark *strange*, zobacz ryc. 3.12.

Na przełomie lat 40. i 50. ubiegłego stulecia głównym źródłem informacji o nowych cząstkach były obserwacje promieni kosmicznych. Ich oddziaływanie rejestrowano, wykorzystując emulsje fotograficzne, które wysyłano na duże wysokości za pomocą balonów. Wywołane emulsje obserwowano pod mikroskopem przy dużym powiększeniu. Tak naświetloną emulsję przywiózł w 1952 roku do Warszawy Marian Danysz, wracający z najważniejszego wówczas ośrodka badawczego Powella w Bristolu. Postanowił on stworzyć w Warszawie zespół mający zająć się badaniami w dziedzinie cząstek elementarnych, a do współpracy namówił Jerzego Pniewskiego, z którym zaprzyjaźnił się podczas ich pobytu w Anglii. Ich współpraca doprowadziła do jednego z największych odkryć współczesnej fizyki.

Pod koniec 1952 roku, przeglądając pod mikroskopem przywiezioną z Bristolu emulsję, Danysz zaobserwował dwie „gwiazdy” połączone grubym torem („gwiazdą” nazywano zarejestrowaną w emulsji fotograficznej eksplozję jądra). Wraz z Pniewskim przystąpili do analizy tego przypadku, proponując wkrótce oryginalne interpretacje. Zgodnie z tą interpretacją wytworzona pod wpływem promieniowania kosmicznego w pierwszej gwiazdzie ciężka cząstka, tzw. hiperon, ulega związaniu za pomocą oddziaływania silnego we fragmencie jądrowym, znaczącym swój ślad w emulsji jako gruby tor. Fragment ten jest nietrwały; następnie rozpada się w oddziaływaniu słabym, co zostało zarejestrowane w postaci drugiej gwiazdy.

„Nasza interpretacja czyniła właściwie tę cząstkę [hiperon] trzecim składnikiem jądra atomowego, obok protonu i neutronu” – napisał później Pniewski. Bardzo szybko okazało się, że proponowana interpretacja

istotnie jest poprawna – świadczyły o tym liczne obserwacje podobnych przypadków w emulsjach jądrowych. Worek z kwarkami został otwarty, zob. rozdział 3.



Ryc. 6.19. a) Jerzy Pniewski (z lewej) i Marian Danysz; **b)** mikrografia rozpadu pierwszego hiperjądra – rozwidlony ślad w prawej części zdjęcia.

Źródło: Uniwersytet Warszawski.

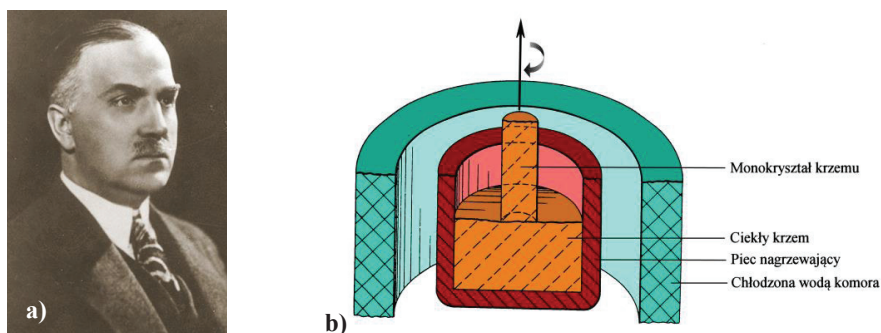
Jan Czochralski – ojciec epoki krzemowej

Bez niego i jego metody nie byłoby współczesnej elektroniki półprzewodnikowej, technologii i techniki. Codziennie na świecie otrzymuje się kilkadziesiąt ton monokryształów hodowanych jego metodą. Jest autorem szeroko cytowanych publikacji oraz wielu patentów. Przez wielu uważany za „ojca współczesnej elektroniki”.

Jan Czochralski urodził się on 23 października 1885 r. w Kcyni jako ósme z dziesięciorga dzieci. Swoją edukację rozpoczął, pobierając naukę w seminarium nauczycielskim. Czochralski nie odebrał jednak świadectwa maturalnego, ponieważ nie mógł pogodzić się ze złymi, jego zdaniem, ocenami.

Brak dokumentu stwierdzającego jego wykształcenie uniemożliwił mu dalszą karierę nauczyciela. Opuścił Kcynię i przybył do Berlina, by rozpocząć pracę w aptece dr. A. Herbranda. To właśnie tu, prowadząc analizy rud, olejów, smarów i metali, zdobył wiedzę, doświadczenie i dużą

samodzielność w formułowaniu problemów badawczych. Następnie podjął pracę w laboratorium koncernu Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG), która przygotowała go do objęcia stanowiska kierownika laboratorium badania stali i żelaza. Ponadto, mimo formalnego braku uprawnień do dalszego kształcenia się, uczęszczał na wykłady chemii na Politechnice w Charlottenburgu, gdzie w roku 1910 zdobył tytuł inżyniera chemii. Ale to właśnie okres pracy w laboratorium AEG okazał się dla Czochralskiego przełomowym.



Ryc. 6.20. a) Jan Czochralski (23 października 1885–22 kwietnia 1953); **b)** metoda Czochralskiego otrzymywania monokryształu polega na powolnym wyciąganiu z roztopionego materiału zarodka kryształu

Któregoś dnia Czochralski, przygotowując notatki z przeprowadzonych badań, zanurzył pióro w tyglu z chłodzącą się, stopioną cyną zamiast w kałamarzu. Wyciągając gwałtownie pióro, zauważył, że ze stalówki zwiisa nić zestalonego metalu. Czochralski dostrzegł w tym zjawisku ogromną wagę dla nauki.

Z czasem szczelina stalówki została zastąpiona kapilarą, a później przez drobny kryształ (zarodek). Czochralski sprawdził, że otrzymany drucik jest monokryształem. Zastosowanie tej właśnie metody w 1950 roku do otrzymywania monokryształów germanu, a później krzemu umożliwiło przemysłową produkcję tranzystorów i doprowadziło do rewolucji elektronicznej.

W wieku 32 lat Czochralski został kierownikiem jednego z najlepiej wyposażonych laboratoriów przemysłowych w Niemczech, gdzie powstało wiele cennych prac naukowych i patentów. W 1919 roku założył i został

przewodniczącym Niemieckiego Towarzystwa Metaloznawczego. Po zakończeniu I wojny światowej na zaproszenie prof. Ignacego Mościckiego, prezydenta Rzeczypospolitej Polski, Czochralski powrócił do kraju, gdzie objął Katedrę Metalurgii i Metaloznawstwa na Wydziale Chemii Politechniki Warszawskiej.

W czasie II wojny światowej, jako obywatel również Niemiec, został zmilitaryzowany. Kontynuował prace na Politechnice Warszawskiej, zatrudniając wielu polskich naukowców, ratując ich w ten sposób przed aresztowaniem i wywiezieniem. Po wojnie został napiętnowany jako zdrajca narodu i powrócił do rodzinnej Kcyni. Profesor zmarł w Poznaniu na serce 22 kwietnia 1953 roku i został pochowany na starym cmentarzu w rodzinnej Kcyni. Został zrehabilitowany dopiero w 2011 roku.

W Polsce pracują setki tysięcy zdolnych naukowców, lekarzy i inżynierów. Liczymy, że i Ty do nich kiedyś dołączysz!

Podsumowanie

1. Rozpoczęliśmy nasze rozważania o fizyce współczesnej od pierwszego uczonego nowożytnej nauki, Mikołaja Kopernika. Przez dziesięciolecia pieczołowitych pomiarów uzbierał on dość dowodów, aby to, co w czasach Greków starożytnych było jedynie pomysłem (hipotezą), zamienić na *teorię*, czyli poprawny opis świata. Kopernik wiedział, że im planety dalej od Słońca, to wolniej je obiegają.

Teorię heliocentryczną przez kolejne dziesięciolecia sprawdzał duński astronom, Tycho de Brahe. Choć sam nie był jej zwolennikiem, jego pomiary pozwoliły Johannowi Keplerowi sformułować matematyczne zależności dla orbit planet. Nie mogły one być wyjaśnione, aż do czasów Izaaka Newtona.

Newton nadał zależności matematyczne tak siłom w ruchu po okręgu

$$F = m \frac{v^2}{R}, \text{ jak siłę grawitacji } F = G \frac{Mm}{r^2}$$

Z przyrównania tych dwóch sił otrzymujemy III prawo Keplera

$$\frac{R^3}{T^2} = \text{const}$$

2. Ruchem elektronów rządzą te same prawa, z tym że rolę siły dośrodkowej odgrywa siła

Coulomba, tj. oddziaływania między ładunkami elektrycznymi

$$F = \frac{ke^2}{r^2}$$

Elektron jest jednak obiektem kwantowym, trochę cząstką – trochę falą, i nie wszystkie orbity w atomie są dozwolone. Widzimy to „gołym okiem” w postaci oddzielnych prążków w widmie żarówki energooszczędnej, oglądanej za pomocą płyty CD.

3. W skład atomów wchodzi elektrony, których nie udało się podzielić; w skład jądra atomu – protony, również trwałe i nietrwałe neutrony. Protony i neutrony składają się z trójek cząstek mniejszych, zwanych kwarkami.

Kwarki w neutronach (jak i całe jądra) od czasu do czasu (w regularnością zegara jądrowego) mogą się rozpadać. Stąd bierze się promieniotwórczość naturalna, którą badała nasza rodaczka, Maria Skłodowska-Curie. W ramach pracy doktorskiej przerobiła półtorej tony (promieniotwórczej) rudy uranowej.

4. Organizację Układu Słonecznego możemy wyjaśnić z praw Keplera. Ale prawa te nie wyjaśniają, skąd Słońce czerpie swą energię.

Źródłem energii w gwiazdach są reakcje termojądrowe – syntezy helu z wodoru i cięższych jąder, przez węgiel i tlen aż do żelaza. Kolejne cięższe pierwiastki, obecne również na Ziemi, mogą powstać tylko w gwiazdach neutronowych.

Słońce jest więc pozostałością po wcześniejszej gwiazdzie, która zapadła się do gwiazdy neutronowej. Wiek Ziemi (i Układu Słonecznego) to 4,567 mld lat, w porównaniu z trzykrotnie dłuższym (13,8 mld lat) wiekiem Wszechświata.

Wiemy to m.in. dzięki dziesięcioleciom pracy kobiet astronomów z Harvardu.

5. Wszechświat miał swój początek, który potrafimy opisać. Nie wiemy jednak, co było źródłem energii dla Wielkiego Wybuchu. Nie zgadza się również, i to bardzo poważnie, bilans masy i energii w całym Wszechświecie.

Rozwiązanie tej zagadki czeka na Was!

Posłowie

Jerome Bruner, współtwórca jednego z najważniejszych prądów kulturowych drugiej połowy XX wieku – kognitywizmu, powiedział, że książki są jak kontynenty wyłaniające się z archipelagu wysepek – artykułów naukowych i działań dydaktycznych. Przedstawiona Państwu książka powstawała ponad dwadzieścia lat. Kiedy w 1997 roku z Włoch po raz pierwszy znalazłem się w Brukseli w panelu fizyków decydujących o europejskich projektach badawczych, uświadomiłem sobie, że od mojego ukończenia studiów fizyka światowa dokonała ogromnego postępu: znajomość podręczników z lat 70. okazała się nieadekwatna do decydowania o liniach rozwojowych światowej nauki. Mniej więcej w tym samym czasie podjąłem pracę w Pomorskiej Akademii Pedagogicznej i rozpoczynałem w Polsce przygodę „Fizyki zabawek” – w 1998 roku na II Festiwalu Nauki w Warszawie, a rok później na XXXV Zjeździe Fizyków w Białymstoku.

W 2003 roku, po licznych edycjach „Fizyki zabawek”, ogarnęło nas niejakie znużenie prostymi, interaktywnymi obiektami. I tak na XXXVII Zjazd PTF w Gdańsku, oprócz wystaw dydaktycznych dla publiczności i dla nauczycieli, z moimi młodymi współpracownikami ze Słupska zorganizowaliśmy interaktywną wystawę „Na ścieżkach fizyki współczesnej”: zdjęcia historycznych przyrządów fizycznych (np. Irène i Frédérica Joliot-Curie) z Science Museum z Londynu przeplatały się z kolorami okładek „Nature” i opowieściami o spektroskopii masowej, zastosowanej do resztek ze stopy króla Midasa sprzed prawie trzech tysięcy lat, oraz działającymi modelami laserów i doświadczeniami z fizyki współczesnej. Po czym wystawa ta, z plakatami i realnymi obiektami, została przeniesiona do przestrzeni wirtualnej: w postaci krótkich, możliwie zabawnych historyjek.

W 2004 roku realizowaliśmy projekt Unijny „Physics is Fun”, który umożliwił nam zorganizowanie wystaw Fizyki Współczesnej w Trydencie, Paryżu, Berlinie i Lublianie, oraz pozwolił na pełniejszą dokumentację naszych działań: wydanie płyt CD-Rom, opracowanie nowych stron internetowych oraz wydrukowanie plakatów dydaktycznych. Brakowało jedynie podręcznika.

Sprawnie działająca struktura wydawnicza na UMK, gdzie zagościłem począwszy od 2006 roku, pozwoliła na wydanie kilku książek z dydaktyki i popularyzacji fizyki. Ta o fizyce współczesnej powstawała powoli...

Kilka osób wspomagało jej powstanie w ramach działań statutowych wyższych uczelni: dydaktyki i popularyzacji. W pierwszej kolejności wspomnę moich współpracowników z PAP – dr Annę Kamińską (Okoniewską) i dr Tomasza Wróblewskiego, oraz UMK – dr. Andrzeja Karbowskiego i dr. Kamila Fedusa. Prace nad książką były prowadzone wspólnie z przygotowaniem prac kilku doktorantek Zakładu Dydaktyki Fizyki: mgr Magdy Więcek, mgr Magdaleny Sadowskiej, mgr inż. Anny Kozłowskiej i mgr Justyny Chojnackiej. Nieoceniony wkład we wszystkie działania ZDF, w tym w powstanie tej książki, miał mgr Krzysztof Służewski. I wreszcie – moja Małżonka, Maria, towarzysząca logistycznie i merytorycznie w prawie wszystkich stacjonarnych i wyjazdowych wykładach, pokazach, wystawach, a także dokonująca skrupulatnej dokumentacji fotograficznej.

Wszystkim tym osobom serdecznie dziękuję!

Autor

Źródła ilustracji

Poniżej podajemy dodatkowe szczegóły (niepodane w podpisach pod rysunkami ani w przypisach na stronach) źródeł ilustracji. Skróty użyte w podpisach: A.K. – Anna Kozłowska, K.S. – Krzysztof Służewski, T.W. – Tomasz Wróblewski, M.K. – Maria Karwasz, G.K. – Grzegorz Karwasz. O ile nie podano inaczej – dostęp do stron internetowych sprawdzony 20 maja 2020.

Źródła obce (poza UMK) – reprodukcja za zezwoleniem (za wyjątkiem źródeł zezwalających użycie materiałów w celach dydaktycznych, jak NASA, ESA, Wikipedia Commons).

- 1.2. Mikołaj Kopernik, *De revolutionibus orbium coelestium*, 1543, rękopis, wersja cyfrowana na stronie, <https://kpbc.umk.pl/dlibra/publication/31520/edition/40130>, s. 113
- 1.10. National Geographic, T. Appenzeller, *Serach for Other Earths*, National Geographic, Dec. 2004, str. 68, <https://www.nationalgeographic.com/science/space/universe/new-planets/>
- 1.14. NASA, obecnie na stronie: <https://www.space.com/36886-apollo-10-nasa-moon-landing-rehearsal-mission-in-photos.html>
- 1.15. NASA, (a) <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/images/history/November1967.html>; (b) https://en.wikipedia.org/wiki/File:Apollo_11_Lunar_Lander_-_5927_NASA.jpg.
- 2.3. (b) Karkonoska Wyższa Szkoła Zawodowa, Jelenia Góra, <http://chemia.wpt.kpswjg.pl/semestr2/temat2/grafika/elektroda7.gif>
- 2.4. (a) https://pl.wikipedia.org/wiki/Tramwaje_w_Toruniu

- 2.5. (a) <https://ivanpankov.files.wordpress.com/2009/07/sun-spectrum.gif>.
- 2.6. (A) https://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell
- 2.7. (a) Planck, M., *Annalen der Physik*, vol. 4, p. 553, 1901; <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19013090310>, rysunek: Rubens, H. & Kurlbaum, F., 1900, *Sitz. d. k. Akad. d. Wiss. zu Berlin*, 929, cytowane z: A. Kiejna, *Stulecie wzoru i stałej Plancka, Postępy Fizyki*, 2000, 51 (6), 294; (b) A. Einstein, *Annalen der Physik* 17 (1905) 132 <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-doc/185>
- 2.12. (b) https://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_elektromagnetyczne
- 2.14. (a) Micro Angela, Hawaii University, <http://www.pbrc.hawaii.edu/microangela/>; (b) V. Raineri i in., *Defects Created by Helium Implantation at Different Temperatures in Silicon*, „Solid State Phenomena” 2001, vol. 82, s. 285.
- 2.16. <https://www.kruess.com/en/campus/spectroscopy/history-of-spectroscopy/>
- 2.36. J.-M. Zuo, M. Kim, M. O’Keeffe, J. C. H. Spence, *Direct Observation of d-Orbital Holes and Cu-Cu Bonding in Cu₂O*, „Nature” 1999, 401(6748), s. 49-52.
- 2.37. <http://cronodon.com/Atomic/AtomTech4.html>; https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_orbital
- 2.38. (a) https://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized_solar_cell#/media/File:BlackDye.png; (b) <https://en.wikipedia.org/wiki/Sildenafil>
- 3.3. (a) <https://www.pw.edu.pl/Badania-i-nauka/Badania-Innowacje-Technologie-BIT-PW/Co-warto-wiedziec-o-Marii-Sklodowskiej-Curie>; (b) <http://www.gutenberg.org/files/43233/43233-h/images/x-page-51.jpg>
- 3.10. <https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/images/fissionyield.jpg>
- 4.4. Kevin Hadley, https://en.wikipedia.org/wiki/Celestial_pole#/media/File:Star_Trails_Shoreline.jpg
- 4.10. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Moon_phases_en.jpg, wersja z polskimi didaskaliami
- 4.14. (a) <https://apod.nasa.gov/apod/ap190501.html>; (b) <http://www.eso.org/public/images/eso0907a/>; (c) https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/The_Hourglass_Nebula_MyCn-18; (d) https://pl.wikipedia.org/wiki/Mg%C5%82awica_Kraba#/media/Plik:Crab_Nebula.jpg
- 4.15. (a) https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2016/05/mars_in_opposition_2016/15994323-1-eng-GB/Mars_in_opposition_2016_pillars.jpg; (b) <https://www.space.com/28463-rare-jupiter-moon-views-hubble.html>; (c) https://solarsystem.nasa.gov/system/news_items/main_images/12983_7504_PIA21046_1280.jpg; (d) https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_eclipses_on_Uranus#/media/File:Arieluranus.jpg

- 4.16. https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/Heliosphere.html;
NASA/Goddard/Walt Feimer
- 5.4. <https://svs.gsfc.nasa.gov/30946>
- 5.8. <https://www.catholiceducation.org/en/images/people/lemaitre-and-einstein.jpg>
- 5.10. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flammarion_engraving_colored_\(edited\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flammarion_engraving_colored_(edited).jpg)
- 5.11. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/71/PaleBlueDot.jpg/220px-PaleBlueDot.jpg>
- 5.12. http://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/multimedia/stone2.html
- 6.1. (b) Intergovernmental Panel on Climate Changes, Report 2001, str. 137;
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGI_TAR_full_report.pdf
- 6.4. <https://www.world-nuclear.org/getmedia/de70ab05-7c99-4f3e-a139-fba-8ad6dc786/pressurized-water-reactor-pwr.png.aspx>
- 6.6. D.J. Campbell, *Progress towards Fusion Energy at ITER*, Referat zaproszony AWPMI2014, Daejeon, Korea, 15.12.2014 (za zezwoleniem)
- 6.8. A. Stadlbauer in., Age-related Degradation in the Central Nervous System: Assessment with Diffusion-Tensor Imaging and Quantitative Fiber Tracking, *Radiology* 247 (2008): n179
- 6.11. (a) <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/6/65/GOCE.jpg/285px-GOCE.jpg>; (b) https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2010/06/goce_first_global_gravity_model/10084403-2-eng-GB/GOCE_first_global_gravity_model_pillars.jpg
- 6.12. G. Karwasz, J. Chojnacka, *Wewnętrzny ogień, czyli o tektonice płyt Ziemi*, „Geografia w Szkole” 2012, nr 3, s. 28, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2012/Geografia_1strona.pdf
- 6.17. https://pl.wikipedia.org/wiki/Kazimierz_Fajans
- 6.18. https://pugwashconferences.files.wordpress.com/2014/02/1955_london_manifestopressconf.jpg?w=1140&h=855
- 6.19. (a), (b) <https://www.fuw.edu.pl/~ajduk/hiper.png>
- 6.20. (a) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/Jan_Czochralski.jpg; (b) <https://meroli.web.cern>