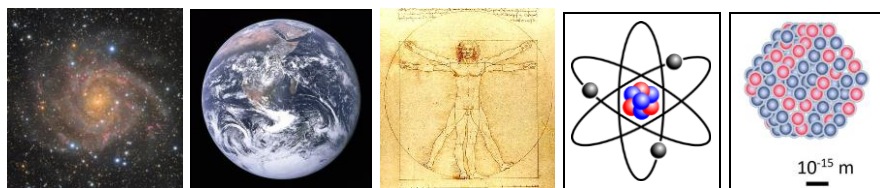


Nieskończenie mały

3.1. Człowiek: wymiar pośredni

Cały Wszechświat, który rozciąga się na 13,8 miliarda lat świetlnych od Ziemi, jest największą strukturą, jaką możemy zaobserwować. Na drugim krańcu, nieskończenie małym, znajduje się atom i jego składniki. Wymiary ludzkiego ciała są gdzieś pomiędzy rozmiarami Wszechświata a pojedynczego atomu.

Wysokość człowieka, trochę ponad metr, stała się również miarą otaczającego go świata. Tak było jeszcze przed wprowadzeniem systemu metrycznego: angielski kciuk i stopa, łokieć tokański (równy 58,4 cm). Milimetr to średnica główki szpilki, a jedna setna milimetra to grubość włosa. Grubość bańki mydlanej wynosi jedną tysięczną milimetra. Atomy, elementarne struktury chemiczne, są jeszcze 10 tysięcy razy mniejsze (w notacji naukowej 10^{-10} metra). Przykładowo, promień orbity elektronu w atomie wodoru wynosi $0,53 \times 10^{-10}$ m.



Ryc. 3.1. Wysokość człowieka (1,7 metra), znajduje się "pośrodku" między średnicą Ziemi $1,3 \times 10^7$ m, fot. Apollo 17 i naszą Galaktyką ($1,2 \times 10^{21}$ m, tutaj zdjęcie galaktyki IC342) z jednej strony, a atomem ($1,1 \times 10^{-10}$) i składnikami jego jądra (około 10^{-15} m) z drugiej. Słońce (ze wszystkimi planetami) jest częścią gigantycznej drożdżówki o średnicy około 130 tysięcy lat świetlnych. To nasza "Galaktyka", po grecku Droga Mleczna, sto miliardów gwiazd, które nas otaczają. Ale Droga Mleczna jest jedną ze 100 miliardów podobnych galaktyk. Wszechświat dostępny dla naszej wiedzy ma promień 13,78 miliarda lat świetlnych. W metrach daje to $1,3 \times 10^{26}$ m. ŹRÓDŁO: a) D. WOS; b) NASA, Apollo 17 Crew; (c) Wikipedia, rys. Leonardo da Vinci, Da_Vinci_Vitruve_Luc_Viatour.jpg; (d) https://en.wikiquote.org/wiki/Atomic_theory, (e) rys. T. WRÓBLEWSKI.

Czy istnieją struktury mniejsze niż atom? Tak, składniki atomu: - elektron i proton nadal mają średnice sto tysięcy razy mniejsze, równe 10^{-15} metra. A następnie składniki protonu, trzy *kwarki* są rozmiaru rzędu 10^{-18} m, jeśli nadal możemy mówić o wielkościach, chociaż nie mamy sposobu na ich zmierzenie. Fizycy spekulują na temat jeszcze mniejszych rozmiarów, do 10^{-34} m (tzw. wymiar Plancka).

W przeciwnym stronę - obwód Ziemi wynosi 40 tysięcy kilometrów (i to była pierwotna definicja metra), odległość między Ziemią a Księżycem wynosi (średnio) 384 tysięcy kilometrów (statek kosmiczny dociera na Księżyc w niecałe dwa dni). Od Słońca dzieli nas 150 milionów kilometrów (i nazywa się to "astronomiczną jednostką miary" – $1,5 \times 10^{11}$ m). Układ Słoneczny rozciąga się na jakieś 130 jednostek astronomicznych.

Ale nawet jednostka astronomiczna nie jest wystarczająca do zmierzenia rozmiarów całego Wszechświata. Astronomowie używają "parseka", opartego na kącie obserwacji. Fizycy stosują pomiar oparty na prędkości światła, która jest bardzo duża (około 300 tysięcy kilometrów na sekundę): promień światła potrzebuje 8 minut, aby dotrzeć się ze Słońca na Ziemię. Dotarcie do najbliższej gwiazdy, oczywiście nazywanej "Proxima", w gwiazdozborze Centaura, zajmuje światłu około 4,5 roku.

3.2. A-tomos, czyli in-dywiduum

Georges Lemaître postawił hipotezę, że Wszechświat rozpoczął się od pojedynczego pierwotnego atomu¹. W ten sposób kosmologia wiąże się z fizyką – tym razem nie nieskończenie rozległego wszechświata, ale nieskończenie małego świata cząstek elementarnych. Aby je odtworzyć, cofniemy się do starożytnych Greków.

Kawałek skandynawskiego granitu skalnego zawiera kryształy trzech różnych kolorów, które można od niego oddzielić. Ziarno piasku, czyli kwarc, można rozdrobnić na biały proszek, używany w postaci zawiesiny do czyszczenia łazienki (nigdy garnków ze stali nierdzewnej, ponieważ pozostaną porysowane!). Te ziarenka, prawie niewidoczne gołym okiem (jedna milionowa metra), można dalej

¹ Równie interesująca była obserwacja George'a Lemaître'a, że pojęcia przestrzeni i czasu nie miały sensu, zanim pierwotny atom nie rozpadł się na dwie części. Tak więc przestrzeń i czas powstały na chwilę przed narodzinami wszechświata.

dzielić. Czy istnieje granica tego rozdrobnienia? Współczesna fizyka (a raczej chemia) odpowiada twierdząco. Jest to jednostka niepodzielna (za pomocą środków mechanicznych lub chemicznych) zwana atomem, czyli *niepodzielna*. Nadal w greckim moderno *atomos* oznacza "o-sobę", czyli *in-dividuo*.

Prawdopodobnie to Demokryt (460-370 p.n.e.) był pierwszym filozofem, który postawił hipotezę o istnieniu atomów. Zgodnie z jego teorią wszystkie atomy są tej samej wielkości, ale różnią się kształtem, podobnie jak dwie litery F $\sqcup$, chociaż poprzez dopasowanie do siebie mogą tworzyć związki. Atomy były niewidoczne, emitując "efluidy". Co mówi współczesna fizyka (i chemia)? Jeszcze sto lat temu naukowcy, w tym Albert Einstein, nie wierzyli w możliwość zobaczenia atomów.

Dziś wiemy, że wszystkie atomy są zbudowane w bardzo podobny sposób, z prostych składników dwóch jedynie rodzajów (trzech, jeśli liczy się neutron²): protonów (w atomach cięższych od wodoru także neutronów), które tworzą małe jądro (o średnicy około 10^{-15} m), oraz elektronów, które krążą wokół w odległości około 10^{-10} metra.³



Ryc. 3.2. a) Kawałek granitu z Łotwy: można wyróżnić duże kryształy ortoklazu (różowe), kwarcu (białe) i miki (czarne). b) Białe kryształy w kawałku granitu są wykonane z kwarcu. Na tym zdjęciu niektóre kryształy są wielkości piasku, inne tysiąc razy mniejsze (wielkości mikrometra) służą do wcierania wrogiego brudu na twarde powierzchnie. (c) Dzielenie tego ostatniego jeszcze tysiąc razy doprowadziłoby do powstania pojedynczych atomów, tutaj widocznych przez mikroskop "siły atomowej": białe kropki to atomy, podczas gdy czarne przestrzenie wskazują na ich brak. ŹRÓDŁO: (a, b) Zdjęcie GK; (c) RHK Technology (2006), Dr. Xue Kun, Prof. Xu Jian Bin – The Chinese University of Hong Kong.

² Neutron, odkryty przez Jamesa Chadwicka w 1932 roku, można w pierwszym przybliżeniu uznać za zlepek protonu i elektronu.

³ Atom jest prawie pusty. Porównując jądro atomu wodoru z pomarańczą (średnica 10 cm), elektron wiruje w odległości 10 km. Podobne proporcje charakteryzują Słońce i planety, w tym Ziemię. Używając podobnej analogii i przyjmując Słońce wielkości pomarańczy, nasza planeta, wielkości łebka szpilki, krąży w odległości 10 m od Słońca. Kosmos jest pusty.

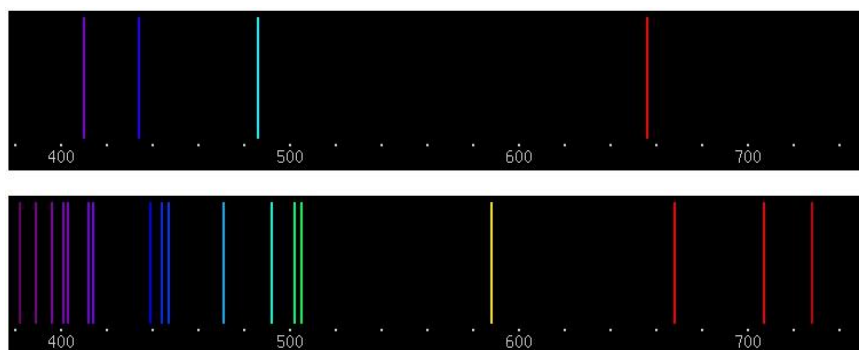
O dziwo (tj. z powodu praw elektrostatyki) wszystkie atomy, niezależnie od ich masy, od wodoru do ołowiu, są podobnej wielkości, około 10^{-10} m. Identyczne (rządzące się tymi samymi prawami mikroświata) jest też rozmieszczenie elektronów (które formują "orbitale", jak na rys. 3.6 dalej w tym rozdziale).

Od kilku lat istnieją bezpośrednie metody wizualizacji atomów, proste z koncepcyjnie, ale dość wyrafinowane z technicznego punktu widzenia: cienki jak igła palec, który przesuwają nad powierzchnią kryształu. Końcówka igły jest tak blisko powierzchni, że przyciągają ją pojedyncze atomy. Mierzona jest siła, z jaką igła jest przyciągana do powierzchni: siła jest większa, jeśli atomy wystają z powierzchni. Na zdjęciu 3.2c pokazujemy powierzchnię kryształu krzemu, jak w obwodach elektronicznych telefonu komórkowego. Wielkość poszczególnych punktów wynosi około 10^{-10} m. Jeśli brakuje atomu, kryształ jest „zdefektowany”.

3.3. Efluidy, czyli fotony

Ale materia jest widoczna także z innego powodu: atomy emitują rodzaj "efluidów" (używając terminu Demokryta), czyli *fotony*, cząstki światła. W zależności od niesionej energii fotony mają różne kolory: fioletowe są bardziej energetyczne niż czerwone.

Procesy emisji fotonów są ściśle związane ze strukturą atomu, w szczególności z liczbą posiadanych przez niego elektronów i poziomami energetycznymi, na których znajdują się te elektrony. To determinuje różne kolory lamp neonowych, rtęciowych, sodowych.



Ryc. 3.3. Widma emisyjne (światło widzialne) wodoru atomowego (powyżej) i helu (poniżej). Na odciętej długość fali w nanometrach. ŹRÓDŁO: Wikipedia.

Na rysunku 3.3 widzimy kolory (prążki) emitowane przez atomy wodoru i helu. Ogólnie rzecz biorąc, im więcej elektronów zawiera atom, tym więcej linii pojawia się w widmie: na rys. 3.3 widoczne są 4 linie w wodorze (tylko 1 elektron w różnych stanach energetycznych) i 18 linii w helu (2 elektrony). Atomy emitują kolory nie tylko wtedy, gdy są podgrzewane (jak w płomieniu), ale także wtedy, gdy są po prostu oświetlane. Widoczny kolor ciała jest wynikiem procesów pochłaniania (absorpcji) i odbicia fotonów.

Tak więc kolor jest „odciskiem”, linią papilarną każdej substancji. Arystoteles już to wyczuł w *De anima*⁴ (Księga B7, "Wzrok i jego przedmiot"), pisząc:

Przedmiotem właściwym wzroku jest „rzecz widzialna”. Jest nią barwa oraz pewien rodzaj rzeczy, który można wprawdzie opisać słowami, lecz któremu brak własnej nazwy. Co przez to chcemy powiedzieć, wyjaśni się w dalszym ciągu. Rzeczą widzialną jest barwa [kolor]. Ona znajduje się na powierzchni tego, co jest przez się widzialne; ale „przez się” nie w znaczeniu logicznym, lecz że zawiera w sobie przyczynę, dla której może być widziane.

Każda barwa posiada zdolność wprawiania w ruch ośrodka aktualnie przezroczystego; ta zdolność stanowi jego naturę; dlatego nie jest ona [tj. barwa] widzialna bez światła; tylko w świetle widzi się barwę każdego w ogóle przedmiotu. Wobec tego wypada najpierw wyjaśnić, czym jest światło.

Istnieją bez wątpienia rzeczy, które są przezroczyste. „Przezroczystym” nazywam to, co jest wprawdzie widzialne, ale – by wyrazić się dokładniej – widzialne nie samo przez się, lecz dzięki barwie czegoś innego; takimi są powietrze, woda i wiele ciał stałych. (418a26 – 418b8)

Wyjaśniliśmy zatem, co to jest przezroczystość a co światło. [Powiedzieliśmy, że] nie jest ono ogniem – bo w tym wypadku byłoby również rodzajem ciała – lecz jest obecnością ognia lub czegoś w rodzaju materii przezroczystej [...] (418b14–16)

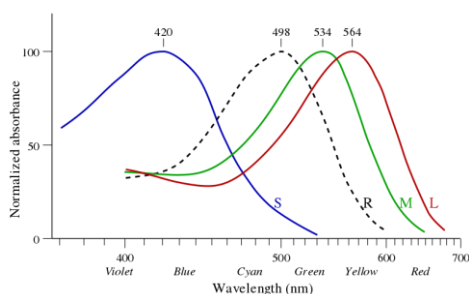
To, czy fotony (światło Arystotelesa) są ciałami, czy nie, pozostaje otwartą debatą wśród fizyków: fotony posiadają masę, ale tylko wtedy, gdy podróżują (z prędkością światła). Kiedy są nieruchome, nie mają masy, w rzeczywistości po prostu nie istnieją. I znowu w jednym fakcie Arystoteles miał rację: ogień (tj. rozgrzane atomy) emituje światło, ale światło nie jest ogniem. Światło, w zasadzie, nie jest ciałem: dziś zaliczamy je do materii, znów dzięki $E=mc^2$ Einsteina.

Dyskurs o kolorach znajduje się w *O duszy*, a nie w *Fizyce*: w rzeczywistości kolory, jakie je widzimy, są wytwarzane przez fizykę, ale

⁴ Arystoteles, *O Duszy*, przełożył Paweł Siwek, PWN, Warszawa, 1972, str. 55-56.

interpretowane dopiero przez nasz mózg. Spośród siedmiu kolorów tęczy ludzkie oko używa praktycznie tylko trzech: czerwonego, zielonego i niebieskiego. Te trzy czujniki wykazują maksymalną czułość w tych trzech obszarach "widma", patrz rysunek 3.4a.

Pszczoły widzą kolory inaczej (patrz rys. 3.4b): zielony jest dla nich szary, brązowy jest czarny, nie widzą niebieskiego (indygo; więc nie ma niebieskich kwiatów zapylanych przez pszczoły), podczas gdy bardzo dobrze widzą czerwony, żółty i ultrafiolet. W białych kwiatach jabłoni oświetlonych słońcem błyszczą w środku małe, nad-fioletowe żaróweczki, ale tylko wtedy, gdy nektar nadal tam jest.



Ryc. 3.4. Czułość ludzkiego oka (trzy rodzaje czopków widzenia kolorów) i pręcików do widzenia w skali szarości. ŹRÓDŁO: Wikipedia (Rod_cell). b) Symulacja widzenia kolorów pszczoł. ZDJĘCIE: M. KARWASZ, obróbka obrazu GK.

Arystoteles dobrze rozumiał, że to kolory niosą najwięcej informacji o przedmiotach i że tylko w ciemności musimy używać zapasowych receptorów oka, czyli tak zwanych *pręcików*, do widzenia szarej gradacji. Światło widoczne dla ludzkiego oka jest tylko częścią całego spektrum promieniowania elektromagnetycznego pochodzącego ze Słońca, które poza widzialnym obejmuje ultrafiolet i podczerwień. Z całego widma słonecznego dla długości fal od 0,1 do 10 mikrometrów widzimy tylko wąski zakres: od 0,38 (fioletowy) do 0,76 mikrometra (czerwony).

Wydaje się niewiele, ale 50% energii fal elektromagnetycznych, które docierają do powierzchni Ziemi, jest zawarte w obszarze widocznym dla ludzkiego oka. Ponadto wszystkie gazy w atmosferze są przezroczyste w tym zakresie widma. Ale nawet pies nie widzi wszystkich kolorów, które my postrzegamy: dla niego zielony jest bezbarwny. Bo to nie oko tworzy obraz, ale ludzki mózg: z miliona

kropek ("pikseli") składa widok świata. Owady, które mają bardzo prymitywne układy nerwowe, posiadają oko "złożone" z setek komórek, z których każda jest oddzielnym foto-receptorem. Ptaki reagują głównie na ruch, bardziej niż na kształt czy kolor gąsienicy, która ma się stać ich pożywieniem.

W przeciwieństwie do szczeniąt, dziecko widzi świat już w pierwszych minutach po urodzeniu. Potrzebuje kilku dni, aby zrozumieć, że zestawy kolorowych plam są obiektami fizycznymi, namacalnymi, a następnie, wyciągając rękę i dotykając twarzy matki, zaczyna rozumieć, że obiekty są trójwymiarowe; zdejmując matce okulary z nosa, dziecko zaczyna rozumieć, że niektóre części twarzy można zdemonstrować, inne jak ucho - nie.

Ludzkie oko, z setkami milionów receptorów, widzeniem kolorów, niezwykle wysoką czułością i szerokim spektrum kolorów jest naprawdę cudem Natury. Nie wspominając już o ludzkim mózgu...

3.4. Dlaczego widzimy kolory?

Na wyjaśnienie widzenia kolorów czekaliśmy do XX wieku i wymagało ono umysłu tak błyskotliwego jak Einstein.

Światło ultrafioletowe, nawet o minimalnej intensywności, może powodować raka, ponieważ niesie wystarczającą ilość energii, aby pociąć delikatną nić DNA. Ale niemniej wydaje się to dziwne, jeśli rozważamy światło jako falę elektromagnetyczną: energia fal zależy przede wszystkim od ich amplitudy. Na tej samej powierzchni morza delikatna bryza nie powoduje szkód tak jak wichura z gigantycznymi falami. Ze światłem jest inaczej: światło czerwone, nawet bardzo intensywne, nie niesie wystarczającej ilości energii aby przeciąć DNA, ultrafiolet – nawet bardzo słaby – tak.

Energia światła dociera w pakietach, zwanych kwantami lub fotonami. Energia pojedynczego fotonu zależy wyłącznie; [nie od długości fali światła, czyli jego koloru, zgodnie z zależnością $E = h\nu$, gdzie częstotliwość ν fali jest powiązana z jej długością λ i prędkością światła c , zależnością $\nu = c/\lambda$]. Innymi słowy, im krótsza fala (jak światła ultrafioletowego), tym większa energia przenoszona przez pojedynczy foton.

Zależność $E = h\nu$ (h jest stałą fizyczną wprowadzoną przez Maxa Plancka) została wydedukowana przez Einsteina w celu wyjaśnienia tak zwanego *efektu fotoelektrycznego*. Na przełomie XIX i XX wieku

zaobserwowano, że powierzchnie niektórych metali tracą ładunek elektryczny, jeśli są oświetlone światłem: efekt zależy od barwy światła, a nie od jego natężenia.

Najwyraźniej kwanty światła uderzające w metalową powierzchnię wyrzucają z niej elektrony. Ale z punktu widzenia fali zjawisko jest bardzo dziwne. Ktoś porównał efekt fotowoltaiczny do portu morskiego z łodziami zakotwiczonymi, kołyszącymi się na falach. Nagle jakaś łódź wyskakuje na wysokość 20 metrów, spada z powrotem w dół i wszystko wraca do spokoju.

Efekt nie zależy tylko od koloru światła, ale także od rodzaju metalu: metale alkaliczne, takie jak sód i potas, łatwiej tracą ładunek elektryczny, tj. wystarczy nawet niebieskie światło, a niekoniecznie ultrafiolet. Ludzkie oko działa w ten sam sposób: kwant światła uderza w siatkówkę i wywołuje minimalny prąd elektryczny, który trafia do mózgu. Ale aby zobaczyć kolory osobno, potrzebujemy różnych receptorów. Mamy trzy, wrażliwe na światło czerwone, zielone i niebieskie, jak na rysunku 3.4a. W szczegółach zakresy czułości tych receptorów częściowo się pokrywają: złożenie światła czerwonego i zielonego wydaje się być kolorem żółtym; fioletowe zabarwienie pada na krawędź czuciową niebieskiego receptora i chociaż fiolet składa się z wysokoenergetycznych kwantów, wydaje nam się raczej błady.

Oczywiście możemy założyć, że to ślepa ewolucja uformowała trzy różne receptory, które w uzupełniający się sposób pokrywają zakres światła od czerwieni do fioletu: nie jest to całe spektrum światła słonecznego, ale tylko 380-760 nanometrów⁵. Ale w tym wąskim zakresie zawiera się prawie 50% energii światła słonecznego (a oznacza to mnóstwo informacji o świecie zewnętrznym). Ale różne - praktycznie nieskończone kolory, oprócz tego, że są użyteczne, ponieważ niosą informacje, są również piękne: dlaczego "ślepa ewolucja" stworzyła tak wyrafinowane oko⁶, wrażliwe nie na matematykę kwantów ale na piękno kwiatów, motyli, malarstwa?

⁵ Przypominamy, że grubość ludzkiego włosa (około 0,02 mm) to jakieś 30 długości fali światła (dla koloru czerwonego) a 60 długości fali światła fioletowego.

⁶ Zakres obejmujący częstotliwości (odpowiadające długościom fal) 1:2 nazywany jest w akustyce "oktawą", czyli ośmioma kolejnymi białymi klawiszami w fortepianie. Na klawiaturze jest ponad siedem oktaw (które słyszymy doskonale), ale oko pokrywa tylko jedną oktawę światła. Ale już fakt, że obejmuje tę oktawę i rozróżnia kolory, pozostaje cudem natury.

3.5. Atomy z haczykami

Atomy różnych pierwiastków posiadają różną liczbę elektronów. Liczba elektronów określa w unikalny sposób wszystkie właściwości fizyczne atomów, takie jak ich stan makroskopowy (stały, płynny, gazowy), twardość, temperatura parowania, kolor, a nawet chemiczne: czy jest to metal alkaliczny, utleniacz, gaz obojętny itp. Różnorodność tych cech jest bardzo szeroka: hel, najlżejszy gaz szlachetny, pozostaje ciekły nawet w temperaturze zera kelwinów (tj. $-273,15^{\circ}\text{C}$); wolfram, bardzo ciężki i twardy metal, topi się w temperaturze 3695 K i odparowuje w temperaturze 6200 K; węgiel (lekki atom) nie topi się, ale odparowuje bezpośrednio z fazy stałej (czyli podlega sublimacji) w temperaturze 3915 K.

Atomy, podobnie jak dwie litery F, mogą "pasować do siebie", wymieniając swoje elektrony, tworząc tak zwane *związki chemiczne*. Żółty proszek siarkowy (patrz rys. 3.5b), roztarty z kroplą rtęci, tworzy szary związek (czerwony, jeśli tworzy kryształy), siarczan rtęci HgS (minerał zwany cynobrem), patrz rys. 3.5c.

Około stu różnych pierwiastków (czyli różnych atomów), które istnieją w świecie chemii⁷, połączonych ze sobą, może dać nieskończoność materiałów - kryształy górskie (kwarc, ametyst), stopy metale, sole⁸ a także związki organiczne, na których opiera się życie.

Związane atomy tworzą cząsteczki. Mogą to czynić na wiele różnych sposobów: oddając (lub przyjmując) elektrony lub współniając niektóre z nich (najbardziej zewnętrzne) między dwoma atomami. Łącząc atomy tlenu (z 6 zewnętrznymi elektronami, dającymi tzw. "wartościowość" równą 2) z azotem (5 elektronów, kilka możliwych „wartościowości”) otrzymujemy gazy o różnym składzie i właściwościach chemicznych.

Na przykład, wśród związków azotu i tlenu, podtlenek azotu N_2O jest środkiem znieczulającym przy operacjach chirurgicznych i gazem spieniającym w bitej śmietanie. NO jest bezbarwny, a NO_2 brązowy; oba tworzą smog ruchu samochodowego. NO (który w bardzo małych ilościach tworzy się na śluzówce nosa) stymuluje oddychanie, podczas gdy NO_2 jest trujący.

⁷ W tabeli Mendelejewa, która dziś (2026) zawiera 118 pierwiastków, tylko 80 jest stabilnych, od wodoru (nr 1) do ołowiu (nr 82).

⁸ Ten podział minerałów pochodzi od arabskiego myśliciela, Awicenny (980-1037) i był używany aż do XVII wieku.



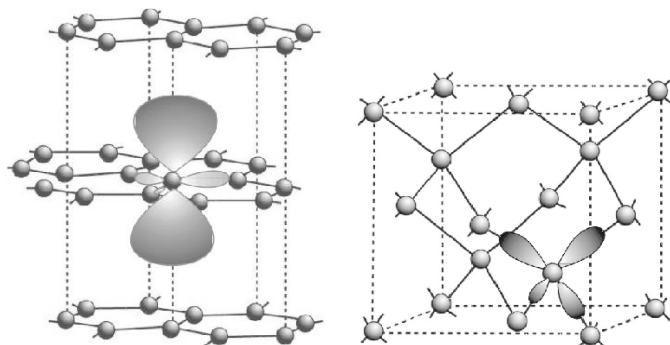
Ryc. 3.5. Związki atomów mogą mieć właściwości fizyczne bardzo różne od ich składników. a) Rtęć, Hg, metal ciężki, jest cieczą w temperaturze pokojowej; rozarta z siarką (b), tworzy szary proszek HgS; w postaci krystalicznej HgS jest minerałem zwanym cynobrem, jasnoczerwonym pigmentem (c). ŹRÓDŁO: AUTOR

Nawet te same atomy mogą tworzyć różne struktury. Atomy węgla, jeśli wymieniają trzy elektrony, tworzą grafit - bardzo miękki minerał, używany w ołówkach, a jeśli wymieniają cztery - diament, najtwardszą substancję ze wszystkich (która jednak staje się grafitem w temperaturze 1000° C). Powodem tych różnic jest odmienne ułożenie atomów węgla w graficie i diamencie, patrz rysunek 3.6.

Bogactwo chemii i materiałoznawstwa wywodzi się właśnie z tej niezwyklej różnicy właściwości elektrycznych, chemicznych, strukturalnych, mechanicznych, którą powoduje niewielka pozornie zmiana pewnych "pozycji" elektronów. Chemicy, jak wyjaśniamy poniżej, nazywają te dobrze zdefiniowane, *skwantyfikowane* pozycje "orbitalne". W atomie węgla, w różnych związkach chemicznych, elektrony mogą krążyć na różnych orbitalach. Co więcej, orbitale te zależą od atomu, z którym wiąże się atom węgla.

Następnie pojawia się struktura krystalograficzna, czyli sposób, w jaki miliony atomów tworzą ziarno. Kawałek stali pozostaje miękki, jeśli atomy żelaza z dodatkiem pewnego procentu atomów węgla tworzą strukturę sześcianu ("regularną"), natomiast staje się bardzo twardy (i kruchy), gdy kryształ ma wydłużony kształt – stal hartowana.

Nawet właściwości optyczne, czyli "przezroczystość" Arystotelesa i kolor "który przychodzi" zależą od ułożenia elektronów w atomach i cząsteczkach. Substancja jest "zabarwiona", gdy odbija (np. siarka kolor żółty) lub pochłania (jak kamień szlachetny rubin) pewne długości fal światła widzialnego.



Ryc. 3.6. (a) Struktura krystalograficzna grafitu: atomy węgla wymieniają 3 elektrony. (b) Struktura krystalograficzna diamentu: atomy węgla wymieniają 4 elektrony. Atomy są oznaczone jako punkty, a "halo" reprezentują "chmury" opisane przez wymieniane elektrony. ŹRÓDŁO: S. MITURA *et al.*, J. Achiev. Materials & Manufact. Eng, **16**, 1-2 (2006) s. 1.244 i informacja prywatna.

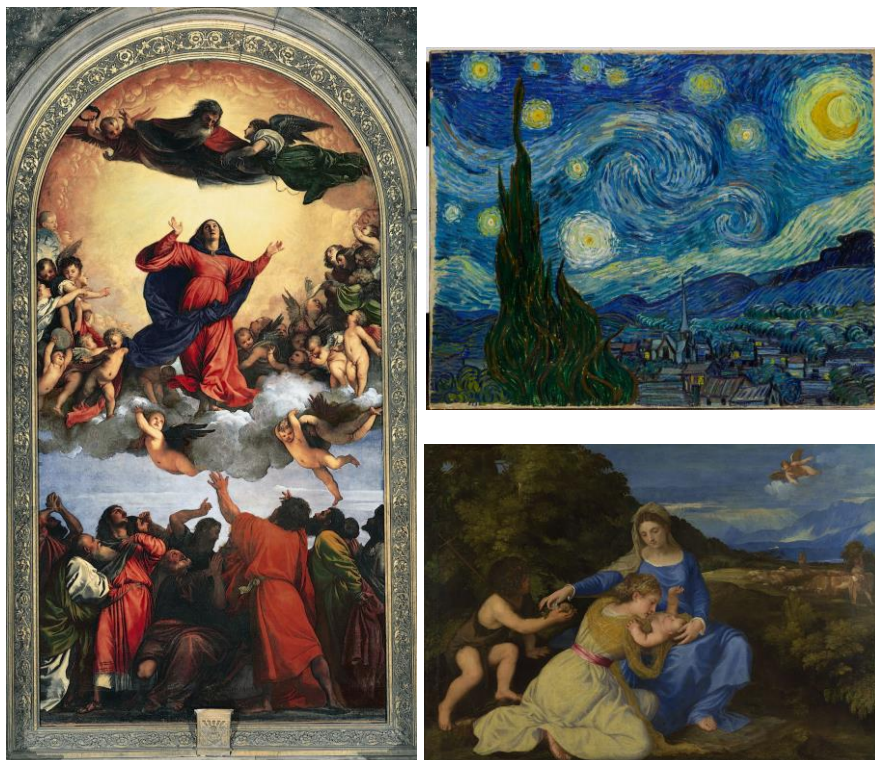
Określone długości fali światła odpowiadają konkretnym "skokom" z jednego orbitalu na drugi, którym elektrony podlegają w materiale. Światło widzialne odpowiada skokom (w naszych wygodnych jednostkach) kilku eV (elektronowoltów): dokładniej między 1,8 eV (światło czerwone) a 3,6 eV (światło fioletowe).⁹

Poziomy tych przeskoków zależą od wielu czynników. Atom chromu daje żółte zabarwienie w wielu, różnych związkach chemicznych, ale wywołuje piękny czerwony kolor, gdy jest zawarty w (bezbarnym) kryształach tlenku glinu, Al_2O_3 : rubinie, do zaręczynowego pierścionka. Inne są kolory, jeśli chrom tworzy tlenek lub chlorek. Inne – kiedy te tlenki są w postaci stałej, a inne – kiedy rozpuszczamy je w wodzie.

Tlenek żelaza ma kolor rdzy, jeśli jego wzór chemiczny to Fe_2O_3 , a kolor czarny, jeśli - FeO . Stąd pochodzą wszystkie odcienie pigmentów, z których korzystają malarze: podziwiał obrazy na ryc. 3.7.

Dlaczego atomy tak podobne w swojej budowie tworzą tak różne związki chemiczne? Do tego pytania wrócimy później, cytując dwóch znakomych autorów, Wolfganga Pauliego, fizyka XX wieku, i św. Tomasza z Akwinu, filozofa z XIII wieku.

⁹ Dla porównania, elektron wewnątrz stosu telefonów komórkowych wykonuje skok o 3,7 eV z jednego orbitalu litowego na drugi, w dwóch różnych "elektrodach".



Ryc. 3.7. (a) Tycjan użył koloru czerwonego *vermiglione* (HgS) dla efektu dramaturgii we *Wniebowzięciu NMP* (Wenecja, 1516-1518): czerwone szaty kierują wzrok w stronę głównych bohaterów. (b) Van Gogh użył najtańszych pigmentów na gwiazdzistą noc: błękit kobaltowy (CoAl_2O_4) i błękit pruski, cyjano-żelazian. (c) Do szat Madonny (Aldobrandini, 1532 r.) Tycjan używał ultramaryny (*lapis lazuli*), glino-krzemianu, pigmentu droższego od złota. ŹRÓDŁO: Santa Maria Gloriosa dei Frari, Patriarchat Wenecki, per gentile concessione; Museum of Modern Arts, N.Y. & Scala Group, za koncesją; The National Gallery, Londyn (pozwolenie edukacyjne gratis, with thanks).

3.6. Dlaczego istnieje chemia?

Pełne pytanie brzmi: co sprawia, że chemia jest możliwa, to znaczy skąd bierze się cała różnorodność pierwiastków chemicznych – metali, gazów, półprzewodników itp. – skoro wszystkie atomy są zbudowane z dokładnie tych samych składników? Odpowiedź brzmi: nie wiemy. A dokładniej - mamy kilka niebezpośrednich odpowiedzi, ale one tylko przesuwają problem dalej.

1A 2A 3B 4B 5B 6B 7B 8B 1B 2B 3A 4A 5A 6A 7A 8A																	
1	2															3	4
H	He															B	C
Li	Be															N	O
Na	Mg															F	Ne
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71																	
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Metals alcalinos

Metals alcalino-terrosos

Metals de transição

Lantanídeos

Actinídeos

Metals representativos

Semi-metals

Não-metals

Halogénios

Gases nobres

C Sólido

Hg Líquido

H Gasoso

Rf Desconhecido

Nº Atómico

Simbolo

Nome

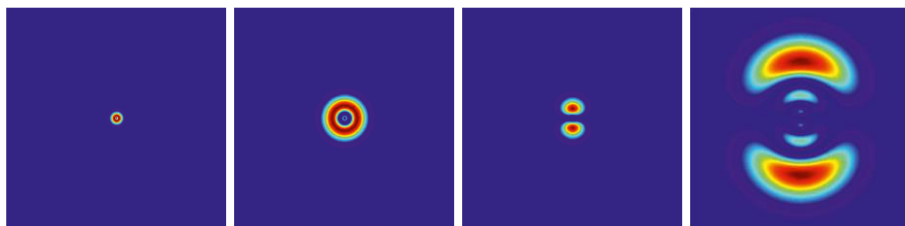
Ryc. 3.8. Układ okresowy pierwiastków chemicznych: dodanie jednego, jedyne go elektronu radykalnie zmienia właściwości chemiczne, tak jak między fluorem (gaz bardzo reaktywny) a neonem (gaz chemicznie obojętny). ŹRÓDŁO: Wikipedia.

Pierwszym przybliżeniem odpowiedzi jest "układ okresowy" Mendelejewa – tabela chemicznego podobieństwa pierwiastków, patrz ryc. 3.8. Kiedy pod koniec XIX wieku zidentyfikowano elektron (dokładnie jego masę i ładunek elektryczny zmierzył J.J. Thompson), było jasne, że układ okresowy Mendelejewa buduje się przez kolejne dodawanie po jednym elektronie: wodór atomowy H ma jeden elektron, hel He dwa, lit Li – trzy, itd.

Ale dlaczego dodanie elektronu tak drastycznie zmienia właściwości atomu? Zależy to od położenia elektronów w przestrzeni. Pojedynczy elektron w atomie wodoru krąży na orbicie, którą można uznać za kołową; na tej orbicie możemy umieścić jeszcze jeden elektron i nie więcej. Dwa elektrony na orbicie kołowej, dość zwartej, dają chemicznie obojętny atom, hel. Trzeci elektron musi zajmować nową orbitę, również "kołową", ale cztery razy szerszą.

Tak więc trzeci elektron (tj. najbardziej zewnętrzny elektron w atomie litu) znajduje się daleko od jądra i łatwo "łączy się" z jakimś elektronem innego atomu: lit jest niezwykle reaktywny. Pojedynczy elektron w atomie wodoru jest również reaktywny: wodór w stanie gazowym tworzy dwuatomową cząsteczkę H_2 , a w fazie ciekłej (np. po rozpuszczeniu gazowego chlorowodoru, HCl w wodzie), atom wodoru traci elektron i tworzy H^+ , który jest jonem decydującym o właściwościach wszystkich kwasów.

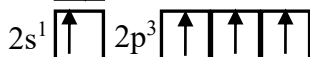
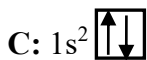
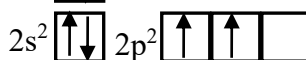
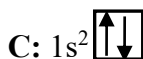
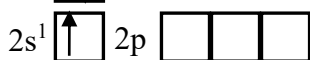
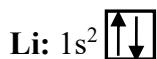
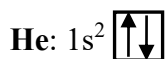
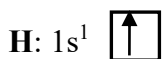
W berylu czwarty elektron może nadal zajmować orbitę kołową; w borze (lekkim, ale twardym metalu), a następnie w węglu, azocie, tlenie, fluorze, neonie - elektrony zajmują, jeden po drugim, orbity w kształcie podwójnego obwarzanka, jak cyfra "8" (patrz rys. 3.9c). Możliwe są trzy różne pozycje (wzdłuż trzech prostopadłych osi) tych „obwarzanków”, dzięki czemu możemy umieścić na nich 6 elektronów. Złoto jest bardzo plastyczne, dzięki szczególnemu, mocno wydłużonemu kształtowi jednego z zewnętrznych orbitali, patrz rys. 3.9d.



Ryc. 3.9. Rozwiązania równania Schrödingera dla atomu wodoru (z pojedynczym elektronem): kształty orbitali $1s$, $2s$, $2p$, $4d$. Czerwony kolor odpowiada najwyższemu prawdopodobieństwu znalezienia elektronu. ŹRÓDŁO: K. FEDUS & AUTOR.

Zrozumieliśmy, że kształt orbity i parzysta lub nieparzysta liczba elektronów determinuje właściwości chemiczne. Ale nie wyjaśniliśmy, dlaczego więcej niż dwa elektrony nie mogą zajmować tej samej orbity. W chemii elementarnej wyjaśnia się to konstruowaniem pudełek, jak w grze bitwy morskiej: pojedynczego, potrójnego, pięciokrotnego itp. Następnie elektrony są dodawane do kolejnych „komórek”. Tak więc wodór (H) jest rysowany z jednym elektronem w komórce (czyli na orbitalu) $1s$, hel - z dwoma (ale przeciwnymi strzałkami, jak zostanie wyjaśnione poniżej) w tej komórce, itd., patrz rys. 3.10.

Struktura "pudełkowa" jest tylko malowniczą reprezentacją matematycznego rozwiązania równania rządzącego ruchem (i położeniem) elektronów w atomie. Rozwiązania te są "skwantowane": nie wszystkie orientacje orbit (i elektronów) są dozwolone. W każdym "pudełku" dozwolone są dwa elektrony. Wynika to z krętu (obrotu własnego) elektronów: obracają się one same, jak Ziemia wokół własnej osi. Ale w przeciwieństwie do rotacji planet, oś obrotu elektronu przyjmuje tylko jeden kierunek, za to z dwoma przeciwnymi zwrotami (stąd strzałki w górę i w dół). W ten sposób dwa elektrony są *rozdzielalne*. Na orbitalu, czyli w pojedynczym „pudełku” w schematycznej reprezentacji, dozwolone są maksymalnie dwa elektrony.



Ryc. 3.10. Struktura elektronowa atomów opisana przez "orbitale": w wodorze atomowym pojedynczy elektron zajmuje orbital $1s$, w helu dwa elektrony zajmują ten sam orbital; w litie trzeci elektron znajduje się na orbitalu $2s$; dwie formy węgla, grafit - z dwoma elektronami na orbitalu $2s$ i dwoma na $2p$ lub diament - z jednym elektronem na orbitalu $2s$ i trzema na $2p$. ŹRÓDŁO: Autor

Zasada ta nazywana jest "zakazem" (lub zasadą) Pauliego. Przeformułujmy tę zasadę wykluczenia: co najwyżej dwa elektrony (ale o przeciwnych *spinach*) mogą zajmować ten sam orbital.

W dokładnym języku mechaniki kwantowej określa się to tak: "tylko jeden elektron może zajmować ten sam element przestrzeni fazowej". Mówiąc najprościej, dwa elektrony unikają się nawzajem, jak dwie kobiety w tej samej sukience na balu noworocznym. Ponieważ? Nie wiemy. Elektron jest mały, lekki, bez wewnętrznej struktury, więc możemy go nazwać "elementarnym". Ale jego *spin*, czyli kręt, wynosi $\frac{1}{2}$ (odpowiednich jednostek): i przez to elektrony się unikają...

3.7. Bohr: prawie pusty atom

Rysunki atomów, takie jak ten poniżej (3.11a), są błędne z kilku powodów. Po pierwsze, na tym samym typie orbitalu (kołowym na tym rysunku) mogą znajdować się tylko dwa elektrony: trzeci elektron krąży po orbicie, owszem, kołowej, ale znacznie bardziej odległej. Drugim powodem jest wielkość atomu i jego centrum, czyli jądro, które są poza skalą na poniższym rysunku. Orbita elektronu (w prostym modelu, stworzonym przez Nielsa Bohra w 1916 roku), o promieniu $0,53 \times 10^{-10}$ m, jest sto tysięcy razy (10^5) większa niż promień protonu ($0,88 \times 10^{-15}$ m).



Ryc. 3.11. (a) Schemat atomu, w tak zwanym modelu Bohra, jest błędny z kilku powodów: nie istnieją cztery orbity kołowe, ale tylko dwie; ogólnie rzecz biorąc, orbity nie są dobrze określone. (b) Elektron (który krąży wokół jądra) zachowuje się jak fala. Stacjonarne orbity są tylko te, dla których fala zamyka się w sobie, jak dekoracja tego spodka w kawiarni w Paryżu. (c) Planety, w przeciwieństwie do elektronów, krążą w tej samej płaszczyźnie (zwanej ekliptyką): siły grawitacyjne między planetami są przyciągające, między elektronami odpychające. Na tym rysunku orbity są w odpowiednich proporcjach, ale Słońce jest większe. ŹRÓDŁO: E.G. BLACKMAN, University of Rochester; Autor: Wikipedia (H. SMITH, L. GENEROSA), NASA.

Zakładając rozmiar jądra około jednego centymetra, elektron (również w promieniu¹⁰ kilku milimetrów) krążyłby w odległości jednego kilometra. Innymi słowy, atom jest prawie całkowicie pusty.

Nawet Układ Słoneczny jest prawie pusty: porównując Słońce (średnica 1,3 miliona km) do pomarańczy, Ziemia wygląda jak główka od szpilki, umieszczona w odległości 10 m. Ale nic nie stoi na przeszkodzie, aby planety były bliżej lub dalej od Słońca: Merkury, który jest trzy razy bliżej Ziemi, patrz rys. 3.11c, nie spada na Słońce, ponieważ (zgodnie z prawami Keplera) po prostu obiega je szybciej¹¹ niż Ziemia. Co stoi na przeszkodzie, aby elektron znajdował się bliżej jądra niż promień Bohra? Mechanika kwantowa, a raczej kwantowa mechanika falowa.

Dla wyjaśnienia swego modelu atomu, Bohr postawił nieco sztuczny warunek na wielkość orbity: iloczyn promienia r orbity i prędkości v elektronu na tej orbicie jest całkowitą wielokrotnością znanej nam już stałej fizycznej, zwanej stałą Plancka, h .

$$mvr = nh \quad 3,1)$$

gdzie m jest masą elektronu. Była to arbitralna hipoteza aż do czasu pojawienia się innej interpretacji: mechaniki falowej. W 1924 roku

¹⁰ W przeciwieństwie do protonu, nie mamy bezpośrednich sposobów pomiaru promienia elektronu. Granica wyznaczona przez prawa fizyki klasycznej (elektrostatyk i szczególnej teorii względności Einsteina) wynosi $0,28 \times 10^{-15}$ m.

¹¹ Planeta Merkury wykonuje pełną orbitę w 88 dni.

absolwent historii, hrabia Louis de Broglie, napisał pracę doktorską z fizyki. W swojej pracy zakładał, że elektron, podobnie jak foton, może czasami wykazywać naturę falową. W rzeczywistości w fotokomórce telefonu komórkowego foton zachowuje się jak cząstka, w tęczy - jak fala (patrz rys. 2.9).

Długość fali elektronu, w modelu de Broglie'a, zależy od jego prędkości. A ponieważ ta z kolei musi być związana z promieniem orbity (poprzez prawa Keplera, które dotyczą również sił elektrycznych, a nie tylko grawitacji), otrzymuje się warunek Bohra (3.1): dla orbity stacjonarnej (tj. tak, aby elektron nie spadł natychmiast na jądro), długość fali musi "zamknąć się" w sobie (patrz rys. na filizance, 3.11b).

Inne rozumowanie prowadzi również do wniosku, że orbita elektronu jest ogromna w porównaniu z rozmiarem jądra: innymi słowy, atom składa się głównie z próżni. Co by się stało, gdyby elektron przestał wirować i spadł na jądro? Dodatni ładunek protonu w jądrze znosi się z ujemnym ładunkiem elektronu i powstaje cząstka o prawie takiej samej masie jak proton, ale elektrycznie obojętna, neutron. Żegnajcie atomy, z całą ich różnorodnością chemiczną: zbiór neutronów jest nie do odróżnienia, jak stłoczone pingwiny na lodzie!

Czy skupisko neutronów może istnieć? Tak, gwiazdy, które kończą swoje życie, mogą się zapadać: siła grawitacji miażdży atomy, elektrony neutralizują się z protonami, a wszystko to tworzy gwiazdę neutronową¹². Słońce, składające się głównie z atomów wodoru i helu, stając się gwiazdą neutronową, miałoby średnicę 11 km, to znaczy zmniejszyłoby się o współczynnik 10^5 , ten sam czynnik, który rzuciliśmy na początku tego akapitu dla atomów. Atom, szczęśliwie dla chemii (i dla nas), jest prawie pusty, wypełniony czymś w rodzaju światła (polem elektromagnetycznym). Zauważył to jako pierwszy angielski filozof średniowieczny, Robert Grossatest (1175-1253 r.). Ale też „postulaty” Bohra nadal pozostają nieco metafizyczne.

3.8. Schrödinger: funkcja falowa

Max Planck, aby wyjaśnić natężenia kolorów tęczy (tj. ciągłe widmo Słońca), musiał założyć, że światło jest wysyłane porcjami energii, zwanymi kwantami. Wąskie linie różnych kolorów, które emitują roz-

¹² Dopiero niedawno, w 2017 roku, zaobserwowano fale grawitacyjne spowodowane zderzeniem dwóch gwiazd neutronowych: niezbitý dowód na ich istnienie.

rzędzone a rozgrzane gazy, pokazują, że elektrony w atomach wykonują "skoki" z dobrze zdefiniowanych, tj. skwantyfikowanych, poziomów energii. Bohr był w stanie obliczyć te poziomy dla atomu wodoru, uzyskują prawie całkowitą zgodność z obserwowanymi liniami. Ale jego hipotezy były "postulatami". Co więcej, teoria kwantowa Bohra przewidywała pewne zjawiska, ale zawodziła w przypadku innych eksperymentów z elektronami.

Jednym z tych eksperymentów była praca opublikowana przez Carla Ramsauera na Politechnice w Gdańsku w 1920 roku. Badając przejście elektronów przez rozrzedzone gazy (argon, krypton), zauważył, że przy niskich energiach gazy te stają się prawie całkowicie przezroczyste. Przy wyższych energiach było inaczej: gazy pozostawały prawie nieprzeniknione, patrz rys. 3.12a.

Nic dziwnego, że szkło jest przezroczyste: ot i tyle! Nie! szkło nie jest przezroczyste, ale ani dla gumowych kulek, ani dla kamieni; jest przezroczyste tylko dla światła i to tylko dla światła widzialnego. Nie jest przezroczyste¹³ dla podczerwieni (stąd funkcja tafla szkła jako "grzejnika" w ogrodniczych szklarniach), ani dla ultrafioletu (ślady gogli pozostają, gdy ktoś opala się w okularach ze szklanymi soczewkami). Światło jest falą¹⁴!

Efektu Ramsauera nie można wyjaśnić, chyba że założy się, że elektrony też są falami i że ich długość tych fal zależy od energii. Zmieniając długość fali, w pewnych warunkach gazy stają się dla elektronów przezroczyste. Po pracy de Broglie'a stało się jasne, że elektron można opisać jako falę. Potrzebne było równanie.

Równanie opisujące falę na jeziorze (lub na naprężonej strunie) ma postać

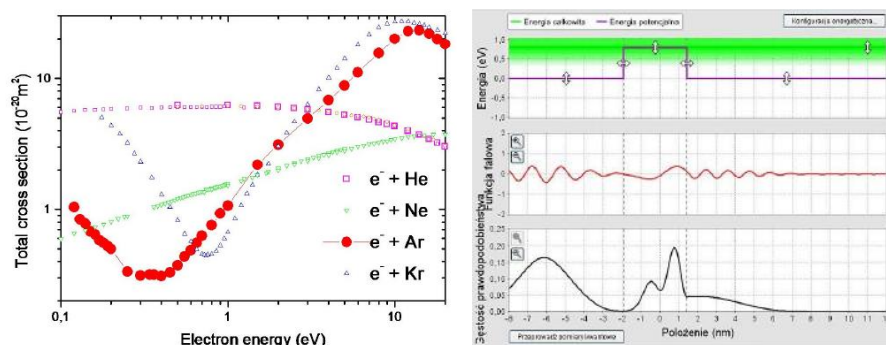
$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -c \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (3.2)$$

gdzie c jest prędkością rozchodzenia się fali, t jest czasem, x oznacza, że fala rozchodzi się wzdłuż tego kierunku i że oscylacje (w górę i w

¹³ Szkło składa się zasadniczo z tlenku krzemu, SiO_2 . Krystaliczny krzem, Si, jest metalicznie szary w świetle widzialnym, ale przezroczysty w podczerwieni.

¹⁴ Jak już mówiliśmy, w efekcie fotoelektrycznym (odpowiedzialnym za nasze widzenie) światło zachowuje się jako cząstka. Czymże więc jest? Z czym jest moneta? Orłem czy reszką? Wróćmy do problemu już zaraz.

dół) zachodzą w kierunku y (∂ jest zmianą albo w kierunku x , albo zmianą w czasie).



Ryc. 3.12. Fizyka równania Schrödingera: (a) przy danej energii elektron może przejść przez niektóre gazy prawie bez przeszkód (minimum czerwonej krzywej wskazującej argon): pomiary "przekrojów", czyli "rozmiaru" atomu w funkcji energii kinetycznej elektronu. (b) Podobnie cząstka ma pewne prawdopodobieństwo (dolna krzywa) przekroczenia bariery potencjału (górny prostokąt); czerwona krzywa pokazuje funkcję falową, a czarna krzywa (dolny panel) prawdopodobieństwo znalezienia elektronu: elektron może przejść, może zostać odbity, ale także uwięziony na pewien czas wewnątrz bariery. ŹRÓDŁO: Autor, Rozprawa habilitacyjna, 1997; PhET University of Colorado, parametry symulacji GK.

Nie musimy wchodzić w szczegóły tematu, aby zrozumieć, że równanie opisujące ruch elektronu (o masie m) jest podobne:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \quad (3.3)$$

Matematyka jest nieco bardziej złożona, używa liczby urojonej i , a elektron (tj. jego położenie w przestrzeni i czasie) jest opisany przez "funkcję falową" Ψ . Używana jest stała $\hbar$, tj. stała Plancka h podzielona przez 2π (dzięki temu łatwiej rozumiemy, że funkcja falowa elektronu w atomie zamyka się na pełnym okręgu, patrz rys. 3.11b).

Powyższe równanie, zaproponowane w 1927 roku przez Erwina Schrödingera, różni się nieco od równania fal na jeziorze (lub świetle). Światło (w próżni) zawsze rozchodzi się z tą samą prędkością, podobnie - dźwięk (w powietrzu). Ale elektrony w doświadczeniu Ramsaue-ra możemy przyspieszać do dowolnej prędkości. Równanie Schrödingera, obowiązujące dla elektronów, musi to uwzględniać. Stało się ono naszym kluczem do zrozumienia mikro-świata.

Elektron zachowuje się jak fala nie tylko wtedy, gdy przechodzi przez atom: jest również odbijany (i częściowo¹⁵ przechodzi) przez barierę, patrz rys. 3.12b. W tym przypadku elektron (i inne ciała mikrokosmosu) różnią się od ciał makrokosmosu, takich jak piłka tenisowa. Ta ostatnia, jeśli zostanie uderzona poniżej krawędzi siatki tenisowej, nie przejdzie na drogą stronę boiska: elektron może, z pewnym prawdopodobieństwem, przejść, nawet jeśli nie ma energii (kinetycznej) większej niż bariera potencjału. Oj! Znow trudne słowa!

Prawdopodobieństwo znalezienia elektronu w danym miejscu opisuje wspomniana funkcja falowa Ψ (a raczej: "moduł" tej funkcji, czyli jej kwadrat, patrz rys. 3.12b). W fizyce klasycznej możliwe było określenie położenia cząstki w dowolnym momencie. W fizyce kwantowej mówimy tylko o *prawdopodobieństwie* znalezienia cząstki w danym miejscu.

Równanie Schrödingera stworzyło poważne problemy pojęciowe: elektron, cząstka prawie punktowa, zachowuje się jak rozciągnięta fala - czasami przechodzi przez barierę, innym razem odbija się (i przez pewien czas jest uwięziony wewnątrz bariery). Fizyka straciła swoją klasyczną pewność. Albo raczej: zabroniono nam (poprzez równanie Schrödingera?) posiadanie tej klasycznej, naukowej pewności.

3.9. Heisenberg: pewność niepewności

Równanie Schrödingera opisuje położenie elektronu (lub innego obiektu w mikrokosmosie¹⁶: jądra, cząsteczki, grupy atomów) w funkcji czasu. Ale równanie to, traktując elektron jako falę, nie pozwala na precyzyjne określenie jego położenia, a opisuje jedynie "rozkład prawdopodobieństwa" (patrz rys. 3.12b). Innymi słowy, nie możemy znać z "całą pewnością" lokalizacji cząstki.

Wydaje się to nierozsądne: aby poznać położenie stołu trzeba je po prostu zmierzyć, a nawet wystarczy jedynie "rzucić okiem". Ale to "rzucenie" oznacza wysłanie fotonu w kierunku stołu i zebranie odbitego fotonu. Ta operacja nie wpływa na położenie stołu, ale na położenie lekkiego elektronu - tak!

¹⁵ "Częściowo przejdzie" nie jest całkowicie poprawnym stwierdzeniem: funkcja falowa opisuje *prawdopodobieństwo*, że elektron przejdzie. Innymi słowy, opisuje, ile elektronów, wystrzelonych w dużej ilości, przekracza barierę.

¹⁶ Nie tylko elektron jest opisany funkcją falową, ale także piłką tenisową; Tyle tylko, że dla ciężkich obiektów (tj. dużych mas w równaniu 3.1) efekty "falowe" są małe i mechanika klasyczna wystarcza do opisanie ich ruchu.



Ryc. 3.13. (a) Obiekty mikrokosmosu w skali makro zachowują się jak obiekty klasyczne: w komorze "bąbelkowej" cząstka *alfa* (2 neutrony + 2 protony) uderza w (lżejszy) proton w atomie wodoru: kąt uderzenia jest ostry. Zdjęcie pokazuje również zasadę Heisenberga; ślady nie są ciągłe: tam, gdzie jest punkt, cząstka *alfa* uderzyła w jakiś elektron (wtedy jej pozycja jest dobrze określona), ale nie znamy kierunku i prędkości cząstki; pomiędzy dwoma punktami możemy wydedukować prędkość, ale nie znamy pozycji pośrodku. (b) Obiekty mikrokosmosu zachowują się jak fale: wiązka elektronów przechodzi przez dwie bardzo wąskie szczeliny (zbudowane z potencjału elektrycznego). Pomimo faktu, że elektrony przechodzą jeden po drugim, na ekranie powstaje obraz "falowy", tak jakby następny elektron wiedział, gdzie spadł poprzedni. Oczywiście elektron nie "wie", że rządzi nim równanie wymyślone przez Schrödingera. ŹRÓDŁO: H. HAKEN, H.C. WOLF, *Atoms and quanta*; HITACHI LTD. (Youtube).

Z eksperymentalnego punktu widzenia w mechanice kwantowej pomiar wpływa na mierzony obiekt. Matematycznie każdy inny pomiar oznacza wykonanie innej operacji na funkcji falowej. Okazuje się, że nawet matematycznie jeden pomiar wpływa na drugi: jeśli zmierzmy położenie elektronu, zmienimy jego prędkość, i kolejny pomiar prędkości będzie nieprawidłowy.

Zasada ta została po raz pierwszy zauważona przez Wernera Heisenberga (1901-1976): niektóre pary pomiarów, takie jak położenie i prędkość, energia i czas, nie mogą być mierzone z większą precyzją niż stała Plancka, a w rzeczywistości $\hbar/2$ lub $\hbar/4$ (fizycy teoretyczni nadal nad tym dyskutują).

Zasadzie Heisenberga często przypisuje się "magiczny" sens: między jednym a drugim punktem trajektorii elektronów nie wiemy, co się dzieje; elektrony w eksperymencie z dwiema bardzo wąskimi szczelinami zachowują się jak fala. Tak! *zachowują się*, ale nie *są* falą. Elektron nie znika między kolejnymi zderzeniami w komorze mgłowej, po prostu my go *nie* wykryliśmy.

3.9.1. Kryptografia kwantowa

Prawa mechaniki kwantowej (tj. mechaniki falowej) są sprzeczne z intuicją: pomimo największej dokładności nie możemy określić pewnych wielkości fizycznych: nawet znając położenie, nie znamy prędkości (nie wolno jej znać: zabrania tego zasada Heisenberga), więc nie możemy *przewidzieć* przyszłego położenia.

Matematyczne zależności między obiektami kwantowymi są źródłem jeszcze innych „paradoksów”. Korzystając z dwóch elektronów atomu helu (z ich przeciwnymi *spinami*), możemy wysyłać wiadomości, które pozostają powiązane nawet na duże odległości. Tak zwana kryptografia kwantowa jest całkowicie bezpiecznym sposobem wysyłania informacji: każda próba szpiegowania części serii 0/1 wiadomości całkowicie ją usuwa. Jak to działa? Dobre pytanie! Słowami jednego z twórców tej gałęzi fizyki, Pawła Horodeckiego, jesteśmy w stanie opisać matematyczne sformułowanie, zakodować komunikaty, rozszyfrować je, ale nie wiemy, jak to *działa*. Nasza intuicja świata zewnętrznego po prostu kończy się tutaj.

3.10. Maria Skłodowska-Curie: podzielić niepodzielny

Atom jest niepodzielny, ale tylko mechanicznie. Już w lampie neonowej prąd elektryczny płynie przez gaz, ponieważ niewielka część atomów traci elektrony. Reakcja, na przykładzie atomu głównego gazu w lampach "energooszczędnych" – argonu, Ar, zachodzi w wyładowaniu elektrycznym: jeden atom Ar traci elektron (czyli ujemny ładunek elektryczny) i tworzy jon (o ładunku dodatnim)



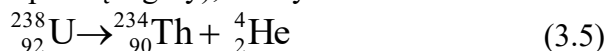
Elektrony są cząstkami, które przenoszą prąd elektryczny w miedzianym drucie; są to cząstki, które rysują obraz na ekranie starego telewizora (z tak zwaną "lampą kineskopową"); są to cząstki, które przyspieszone w lampie ("magnetronie") kuchenki mikrofalowej generują promieniowanie ogrzewające żywność (w szczególności zawierającą wodę). Nazwa „elektron” oznacza po grecku "bursztyn", gdyż potarty bursztyn "elektryzuje się"¹⁷, a w konsekwencji przyciąga kurz.

¹⁷ Nie wiemy szczegółowo, jak przebiega ten proces, pomimo wieków badań, począwszy od czasów Alessandra Volty (1745-1827) i wynalezienia jego "stosu", czyli „baterii”.

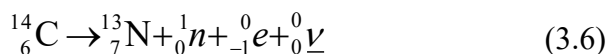
Elektrony są głównymi składnikami całej materii i, jak wykazały ostatnie eksperymenty przeprowadzone, między innymi, we włoskim laboratorium Gran Sasso, są stabilne (tj. wieczne): ich czas życia przekracza wiek Wszechświata.

Jon Ar^+ , który powstaje w reakcji (równanie 3.4), przenosi ładunek dodatni, ponieważ dodatni jest ładunek protonów, które tworzą jądro. Jądro argonu zawiera 18 protonów (tyle samo co elektronów) plus podobną liczbę neutronów.

To Polka, Maria Skłodowska-Curie (1865-1925) odkryła, że nie tylko atomy, ale także ich jądra mogą się dzielić. Pierwszej obserwacji takiego zdarzenia dokonał Henry Becquerel (w 1897 r.), który zauważył, że fotograficzna płyta graficzna czernieje w pobliżu soli uranu. Później odkryto, że jądra uranu zawierające 92 protony i 146 neutronów (tj. 238 neutronów i protonów razem) mogą przekształcać się w inne jądra (tor, z 90 protonami i 144 neutronami) poprzez emisję cząstki złożonej z dwóch protonów i dwóch neutronów (tzw. cząstka *alfa*, która w rzeczywistości jest jądrem helu). Schematycznie, biorąc pod uwagę liczbę elektronów (którą zapisujemy u dołu) i łączną liczbę protonów i neutronów (zapisaną u góry), mamy:



Sto lat po pracach Marii Curie i Henri Becquerela wiemy, że tylko niektóre jądra są stabilne, takie jak węgiel z 6 protonami i 6 neutronami. Węgiel z 8 neutronami, o wzorze ${}^{14}\text{C}$, powstaje w atmosferze¹⁸ pod wpływem promieniowania kosmicznego i rozpada się, zmniejszając o połowę swą ilość w ciągu 5730 ± 40 lat. W transformacji radioaktywnej jeden z neutronów zamienia się w proton, a także emitowany jest elektron oraz bardzo trudna do wykrycia cząstka, neutrino, przewidziana przez włoskiego fizyka Enrico Fermiego. W symboliczny sposób możemy zapisać tę reakcję jako

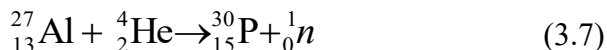


gdzie n oznacza neutron (masa 1, ładunek 0), e – elektron (masa 0, ładunek -1), ν – antyneutrino (masa i ładunek = 0). Ten rozpad, w którym powstaje elektron, nazywany jest *beta*, czyli literą, która została

¹⁸ Próbné wybuchy jądrowe w latach 1950-1970 przyczyniły się do wzrostu zawartości ${}^{14}\text{C}$ w atmosferze.

nadana promieniom emitowanym (tj. elektronom), gdy zostały one zaobserwowane przez Marię Skłodowską-Curie.

W 1937 roku córka Marii Curie, Irène Joliot-Curie, i jej mąż Frédéric odkryli, że rozpad promieniotwórczy może być również sztucznie wywołany. Zaobserwowali, że jądro aluminium absorbujące cząstkę *alfa* zamieniło się w radioaktywne jądro fosforu, emitując neutron, zgodnie z reakcją.



Jądro fosforu jest radioaktywne i w ciągu kilku minut¹⁹ przekształca się, przez emisję elektronu, w krzem, izotop ${}^{30}\text{Si}$. Człowiek spełnił swoje odwieczne marzenie: przemienić jeden pierwiastek chemiczny w drugi.

Skąd te wszystkie reakcje? To one pozwoliły na powstanie wszystkich pierwiastków chemicznych wewnątrz "pieca jądrowego", czyli wewnątrz gwiazdy proto-Słońca. A bez tych elementów nie byłoby życia i my też byśmy nie istnieli. Ktoś powiedział, że powstaliśmy z gwiazdznego pyłu.

3.11. Energia gwiazd

Jeszcze sto lat temu nie było wiadomo, jakie jest źródło energii Słońca. W 1897 roku słynny fizyk, Lord Kelvin (który wynalazł absolutną skalę temperatury), ewidentnie pomylił wiek Słońca (szacując go na zaledwie 50 milionów lat): wierzył, że źródłem energii Słońca jest jego zapadanie się pod wpływem siły grawitacji. W rzeczywistości już wtedy było wiadomo, że rozpady promieniotwórcze "wytwarzają" energię, jak na przykład w przypadku uranu, ale nie tylko: znacznie więcej (o tej samej masie) otrzymuje się z *syntezy* helu z dwóch jąder ciężkiego wodoru, patrz rys. 3.14a:

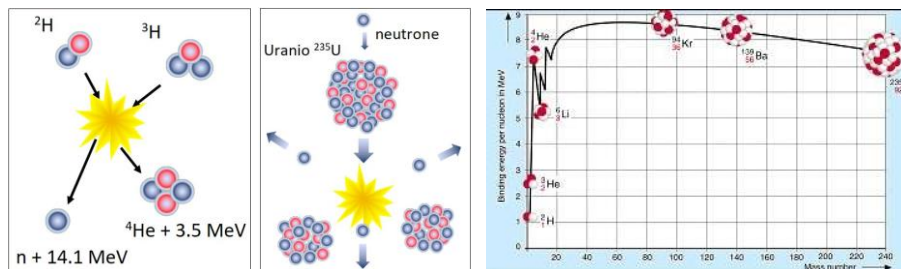


Chociaż dwa protony (w atomach wodoru) odpychają się nawzajem (będąc dwoma ładunkami dodatnimi), na niedużych odległościach

¹⁹ Radioaktywny okres półtrwania izotopu ${}^{30}\text{P}$ wynosi 2,5 minuty.

neutrony i protony wzajemnie się przyciągają. Ponieważ siła netto jest przyciągająca, powstaje jądro helu i uwalniana jest duża ilość energii.

Sytuacja jest podobna spalania gazu w domowej kuchence: z metanu i tlenu powstają inne związki (para wodna i dwutlenek węgla) a nadmiar energii zamienia się w ciepło płomienia. W reakcjach nuklearnych uwalniana energia netto jest znacznie większa i ostatecznie zamienia się w ciepło, dużo ciepła.



Ryc. 3.14. (a) Synteza jądra helu, jak w elektrowni termojądrowej (i w sercu Słońca), odbywa się z dwóch jąder ciężkiego wodoru (deuteru i trytu); wytwarzane jest jądro helu, neutron i 17,6 MeV energii kinetycznej (w praktyce oznacza to ciepło). (b) Rozszczepienie jądra uranu ^{235}U : jądro pochłania jeden neutron i dzieli się na dwa fragmenty w przybliżeniu (ale nie dokładnie) równej masie; emitowane są również dwa lub trzy neutrony i uwalniane jest mnóstwo energii. (c) Energia wiązania nukleonów (tj. protonów lub neutronów) dla różnych atomów od wodoru do uranu: najbardziej stabilnym jądrem jest jądro żelaza ^{56}Fe ; jądro helu ^4He również jest nadzwyczaj silnie związane; ŹRÓDŁO: (a, b) T. Wróblewski; c) Eur. Nuclear Society.

Jeśli reakcje chemiczne, takie jak tworzenie cząsteczki CO_2 , spalanie węgla uwalniają energię kilku eV (elektronowoltów), tworzenie jądra helu z atomów wodoru daje aż 14,4 MeV (milion razy więcej).²⁰

Tak więc w reakcjach syntezy jądrowej (helu z wodoru, węgla i tlenu z helu²¹ itp.) uwalniana jest ogromna ilość energii: jest to mechanizm, który pozwala gwiazdom świecić, a naszemu Słońcu podtrzymywać życie na Ziemi.

Jest jednak "ale": synteza ciężkich jąder odbywa się aż do żelaza; powyżej żelaza synteza nie jest już korzystna z punktu widzenia energetycznego. Bardzo ciężkie jądra stają się niestabilne; korzystne energetycznie staje się ich rozszczepienie. Zależności te przedstawiamy na

²⁰ Oczywiście, zgodnie z $E = mc^2$, gdy energia jest uzyskiwana w syntezie helu, masa maleje, ale w niezauważalny sposób (mniej niż 1%).

²¹ Reakcja syntezy węgla zachodzi z pośrednim etapem berylu, patrz rys. 9.4 w ostatnim rozdziale tej książki.

wykresie 3.14c. Od wodoru do helu (niskie liczby na osi masy) krzywa wznosi się: cięższe jądra mają wyższą energię wiązania; powyżej żelaza krzywa opada, a energia wiązania (w przeliczeniu na jeden proton lub neutron) spada.

Skąd to zależność? Szczegółów nie rozumiemy: zaobserwowano to eksperymentalnie. Dlaczego nie potrafimy tego obliczyć? Ponieważ mechanika kwantowa działa dobrze dla atomu wodoru, gdzie energia wiązania wynosi 13,6 eV; podczas gdy dla fizyki jądrowej energie stają się mega-elektronowoltami (MeV) i potrzebne są znacznie bardziej skomplikowane obliczenia, niż pozwalają na to obecne metody.

Krzywa przedstawiona na rys. 3.14c jest kluczem do pojawienia się Układu Słonecznego: nastąpił kolaps gwiazdy, powstanie ciężkich jąder w „piecu” gwiazdy neutronowej, jej eksplozja jako supernowa, a dopiero później "koagulacja" materii wyrzuconej w postaci planet (komet, satelitów itp.). W ten sposób powstały ciężkie pierwiastki, takie jak selen, miedź, cynk - niezbędne dla życia, i najcięższe jak uran.

Bez wątpienia duża ilość żelaza powstałego w proto-Słońcu była niezbędna dla zaistnienia pola magnetycznego na Ziemi. A to, znowu, jest przyjazne dla życia, jak to omówimy w IV rozdziale.

3.12. Cząstki "elementarne"

Do połowy XX wieku świat cząstek subatomowych zawierał: elektron o ujemnym ładunku²² o wartości $-e$, proton o ładunku dodatnim $+e$, neutron o ładunku zerowym. Ze wszystkich trzech cząstek wiadomo było również, że charakteryzują się one własną rotacją²³ (*spinem*), która w jednostkach "atomowych" wynosi $\frac{1}{2}$. Wierzano również, że elektron, proton i neutron są "elementarnymi" cząstkami-kulkami, to znaczy nie są już podzielne.

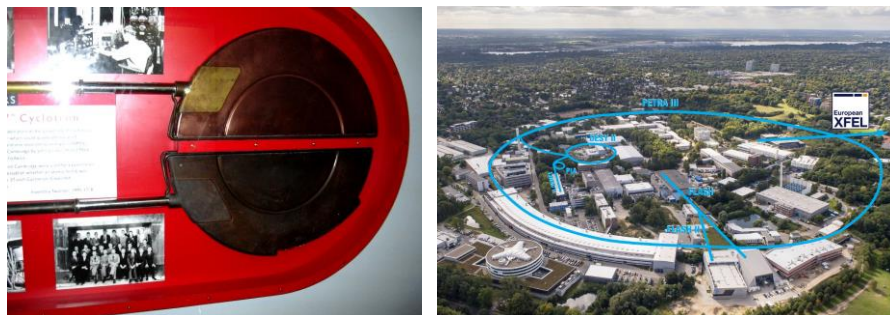
Pewne wątpliwości wynikały z faktu, że w niektórych rozpadach (wspomnianych *beta-minus*) neutron rozpada się na proton i elektron, podczas gdy w innych bardzo podobnych rozpadach proton rozpada się na neutron i elektron o ładunku dodatnim, zwany pozytonem. Ten elektron o ładunku dodatnim został teoretycznie przewidziany, jako

²² Gdzie $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C: jeśli przez przewód elektryczny przepływa prąd o natężeniu 1,6 Ampera (czyli typowy dla pralki), oznacza to 10^{19} elektronów na sekundę.

²³ Zasady zachowania odnoszą się również do *spinu*: rozpad neutronu na proton plus elektron wydawał się naruszać tę zasadę, więc istnienie neutrina okazało się konieczne. Neutrino oprócz spinu $\frac{1}{2}$ unosiło część energii, której brakowało w bilansie rozpadu beta.

niezamierzony wynik, przez Paula Diraca (1902-1984): połączył on mechaniką kwantową Schrödingera z teorią Einsteina.

Po odkryciu sztucznych reakcji jądrowych (równanie 3.7), postanowiono stworzyć specjalne reaktory, patrz rys. 3.15, które mogą "wstrzyknąć" protony (lub cząstki *alfa*) do innych jąder.



Ryc. 3.15. (a) Pierwszy akcelerator protonów, synchrotron (tutaj konstrukcja Cambridge) zajmował powierzchnię stołu. (b) Dzisiejsze akceleratory, takie jak synchrotron hamburski, mają rozmiary setek metrów, jeśli nie dziesiątek kilometrów, jak ten w CERN w Genewie. ŹRÓDŁO: GK; (C) DESY, Hamburg, 2015.

Tak więc w 1934 roku zbudowano pierwszy "akcelerator", czyli urządzenie do przyspieszania do wielkich prędkości naładowanych cząstek, takich jak protony (które, pamiętajmy, są jądrami wodoru). Podobnie jak w neonowej lampie, elektrony wyładowania elektrycznego, przyspieszone napięciem sieciowym 220 V, uderzają w atomy argonu i wyrzucają z nich elektron, przypuszczano, że protony (lub elektrony) przyspieszane napięciami milionów woltów, mogą rozbijać jądra. Wraz ze zbudowaniem pierwszego akceleratora (fot. 3.15a) otworzyła się droga dla niezliczonych nowych reakcji, dobrze sterowalnych, w przeciwieństwie do reakcji indukowanych naturalnym promieniowaniem kosmicznym (jak powstawanie węgla ^{14}C).

Wkrótce odkryto, że istnieją nie tylko dodatnio naładowane elektrony, ale także ujemnie naładowane protony (antyprotony). Pojawiło się kilka pytań: co składa się z czego? Neutron z protonu plus elektron czy proton z neutronu i antyelektronu (pozytonu)? A co się stanie, jeśli antyproton dołączy do antyelektronu? Czy powstaje atom antywodoru? Identyczny czy nie z atomem wodoru? Znacznie wyprzedzając czas, możemy powiedzieć, że są to jedne z najbardziej palących pytań w dzisiejszej fizyce i ktokolwiek na nie odpowie, otrzyma Nagrodę Nobla. A może nawet dwie - jak Maria Curie-Skłodowska.

3.13. Niewidzialne, przenikliwe, niebezpieczne, korzystne

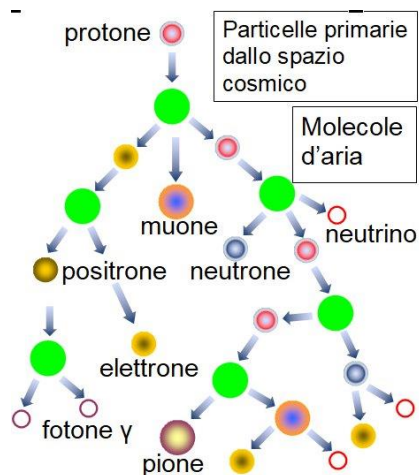
Promieniowanie jądrowe, takie jak cząstka *alfa* emitowana w reakcji (3.8), przenosi energię i z tego powodu może jonizować nie tylko atomy (rozdział 3.4), ale także bardziej złożone cząsteczki, takie jak DNA. W reakcjach jądrowych emitowane są nie tylko cząstki, ale także energia, w postaci fal elektromagnetycznych. Ale w przeciwieństwie do lampy neonowej, w której powstaje widzialne fale elektromagnetyczne (tj. światło), w reakcjach jądrowych emitowane są znacznie bardziej energetyczne fale gamma. Aby dać wyobrażenie, światło czerwone ma energię odpowiadającą 2 eV (czyli energię elektronu przyspieszoną napięciem 2 woltów), kwanty gamma mogą mieć 2 MeV, a w głębokim kosmosie nawet 2 Giga (miliardy eV, GeV).

Źródła promieniowania są różne: rozpady promieniotwórcze w skorupie ziemskiej (to sprawia, że skorupa jest nadal płynna, 4,5 miliarda lat po jej uformowaniu się), radioaktywne atomy w materiałach użytych do budowy (cement), radioaktywny gaz radon, który powstaje w rozpadzie uranu (dlatego wychodzi ze skał, zwłaszcza na terenach post-wulkanicznych), energetyczne cząstki, które pochodzą z odległych centrów galaktyk, i wreszcie nasze Słońce, itp.

Energetyczna "cząstka" *promieniowania* elektromagnetycznego może wielokrotnie jonizować cząsteczki DNA w tkance biologicznej. Dlatego promieniowanie jądrowe jest niebezpiecznym czynnikiem rakotwórczym. Ale jednocześnie ich biologiczne działanie niszczące jest stosowane w leczeniu raka. W zależności od charakteru nowotworu, który ma zostać zniszczony, mogą być użyte protony, czyli ciężkie cząstki do płytkich zabiegów lub wysokoenergetyczne fale elektromagnetyczne (promieniowanie gamma), które przenikają przez całe ciało.

Termin "promienie" pochodzi z czasów Marii Skłodowskiej-Curie, kiedy ślady promieniowania emitowanego przez uran (i produkty jego rozpadu) obserwowano na kliszy fotograficznej (trochę jak na rys. 3.13a). Poprzez przyłożenie pola magnetycznego część "promieni" została odchylona w prawo (*alfa*), część w lewo (*beta*), a część kontynuowała bez zakłóceń. Od tego czasu nazwy pozostały takie same, pomimo podstawowych różnic: promienie *gamma* to promieniowanie elektromagnetyczne (jak światło), *promienie beta* to szybkie wiązki elektronów, a promienie *alfa* to jądra helu (czyli dwa protony i dwa neutrony). Więcej: w promieniowaniu kosmicznym (i akceleratorach

jądrowych), szybkie cząstki (a nawet promieniowanie *gamma*) mogą indukować powstawanie innych cząstek, zgodnie ze wzorem $E = mc^2$.



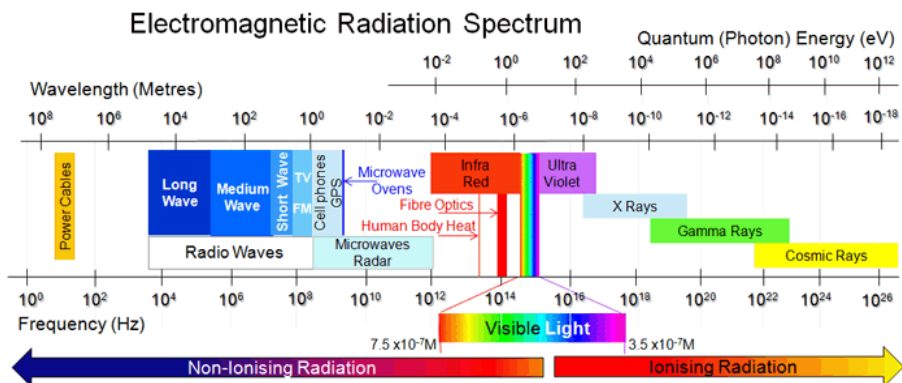
Ryc. 3.16. "Deszcz" cząstek elementarnych (elektronów, pozytonów, mionów, neutronów) jest generowany przez wysokoenergetyczny proton pochodzący z promieniowania kosmicznego. Wszystkie te cząstki, włączając promieniowanie *gamma*, mogą powodować uszkodzenie struktury DNA, wywołując w ten sposób mutacje. Mutacje dla jednostki są zwykle śmiertelne, ale w skali globalnej mutacje są jednym z mechanizmów ewolucji biologicznej (diagram nie jest precyzyjny i jest przedstawiony wyłącznie w celach ilustracyjnych).
ŹRÓDŁO: Projekt własny.

Rysunek 3.17 pokazuje "widmo" fal elektromagnetycznych, od tych mało energetycznych (takich jak fale radiowe o długości kilku kilometrów), bardziej energetycznych (takich jak mikrofały, o długości kilku milimetrów), światła widzialnego od 0,760 mikrometra (μm) koloru czerwonego do 0,380 μm światła fioletowego, poprzez światło ultrafioletowe, które jest już niebezpieczne dla DNA, promieniowanie rentgenowskie (około 1 Å, tj. 0,0001 μm) do promieni gamma. Trudno jest ustalić dolną i górną granicę dla tych długości fal.²⁴

Ludzkie oko widzi tylko ułamek widma fal elektromagnetycznych (ale jego zdolności poznawcze są cudem natury). Za pomocą specjalnych anten możemy skanować zarówno odległy, jak i nano-skopowy Wszechświat. Praktycznie nic nie umknie nam z całego spektrum cząstek ani promieniowania: z wyjątkiem tego, czego nie *znamy*...

Bez wątpienia jesteśmy zanurzeni w *oceanie niewidzialnych fal i cząstek*. Odkrycie fal milimetrowych przenikających cały kosmos pomogło dostarczyć decydujących argumentów na rzecz wiedzy o początku Wszechświata. Więcej o tym później. Skończymy opis naszego *zoo* cząstek elementarnych.

²⁴ Na przykład fale grawitacyjne, które nie są elektromagnetyczne, mają długość fali tysięcy km.



Ryc. 3.17. Widmo fal elektromagnetycznych, od fal radiowych, dłuższych (ale mniej energetycznych) i mikrofalowych, po promieniowanie rentgenowskie i promieniowanie gamma pochodzenia kosmicznego. Światło widzialne, między 760 a 380 nm (co odpowiada energii od 1,6 do 3,2 eV), stanowi niewielką część całego widma. ŹRÓDŁO: Woodbank, <https://www.mpoweruk.com/images/emspectrum.gif>.

3. 14. Gell-Mann: kwarki

Jeśli rozpad *alfa*, reakcja (3.5), jest łatwa do wyjaśnienia jako rozszczepienie jądra (nawet jeśli jeden z fragmentów jest małeńki w porównaniu z innym), rozpad *beta* (3.6) wymaga przemiany. Odkryto również, że oprócz rozpadów *beta*, w których neutron wydaje się zmieniać w proton plus elektron, jak to się dzieje w potasie ^{40}K (składniku naszej krwi), istnieją jądra, które rozpadają się w odwrotny sposób: proton zamienia się w neutron i pozyton. W ten sposób dawne określenie „składać się z” nie ma już zastosowania. Nawet jeśli neutron jest nieco cięższy od protonu, suma mas produktów rozpadu nie odpowiada masie pierwotnej cząstki²⁵. Tutaj wchodzi w grę słynny wzór Einsteina na równowagę energii i masy: $E = mc^2$. Brakująca masa składników jest równoważona nadwyżce energii, a także odwrotnie: pochłaniając energię można tworzyć cięższe obiekty ze składników, które razem nie miałyby wystarczającej masy.

Dwaj polscy badacze, Marian Danysz i Jerzy Pniewski, w 1951 roku zaobserwowali na płycie fotograficznej zderzenie promieniowania kosmicznego, które wytworzyło cząstkę podobną do protonu, ale nie-

²⁵ Masa neutronu (jak już wspomniano) wynosi $m_n = 939,5654133(58) \text{ MeV}/c^2$ (c jest prędkością światła potrzebną do przeliczenia jednostki miary, nawiasy wskazują, że niepewność dotyczy tylko dwóch ostatnich podanych cyfr). Masa protonu $m_p = 938,2720813(58) \text{ MeV}/c^2$ i masa elektronu $m_e = 0,5109989461(13) \text{ MeV}/c^2$. Więc, $m_p + m_e < m_n$. Masa neutrina nie jest znana, ale z pewnością bardzo mała, rzędu kilku eV.

stabilną²⁶; nazywali ją "dziwną" (*strange*). W ciągu kilku lat odkryto dziesiątki dziwnych cząstek, które zdawały się tworzyć rodziny.

W 1963 roku dwaj fizycy teoretyczni, Murray Gell-Mann i Georg Zweig, wysunęli hipotezę, że ani neutrony, ani protony nie są cząstkami elementarnymi, ale złożonymi obiektami, składającymi się z trzech mniejszych, dwóch typów: cząstki dodatniej o ładunku elektrycznym $+2/3$ i ujemnej o ładunku $-1/3$, które Gell-Mann nazwał "kwarkami".²⁷ Dodatkowo kwarki zostały nazwane „górnymi” (*up*), ujemne „dolnymi” (*down*). Tak więc proton składa się z dwóch kwarków górnych i jednego dolnego, podczas gdy neutron składa się z dwóch dolnych i jednego górnego. Rozpad neutronu na proton w reakcji *beta* polega na przemianie kwarka dolnego na kwark górny z emisją elektronu (i antyneutrino):

$$udd \rightarrow uud + e^- + \bar{\nu} \quad (3.9)$$

oraz rozpad *beta-plus* (w którym powstaje elektron z ładunkiem dodatnim, czyli pozytonem) w reakcji

$$uud \rightarrow udd + e^+ + \nu \quad (3.10)$$

Niewiadomych w świecie kwarków pozostaje wiele. Nie możemy przewidzieć ich czasów życia ani ich mas; nie do końca rozumiemy, dlaczego tworzą tylko dwa rodzaje związków: pary kwark-antykwar (takie jak *mezon J/Ψ* lub *mezon K*) lub trzy kwarki (tworząc takie cząstki jak neutron, proton i ich odpowiedniki z cięższymi kwarkami).

W neutronie i protonie kwarki są związane siłami, które rosną wraz z odległością; próba rozdzielienia ich poza rozmiar protonu (10^{-15} m) wymaga siły równej sile wymaganej do podniesienia samochodu. Mówimy więc o uwięzionych kwarkach: żadne doświadczenie nie wykazało istnienia izolowanych kwarków.

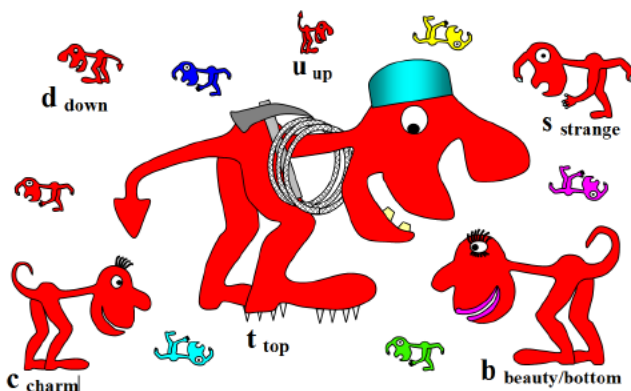
Niektóre teorie (które jednak nie mają eksperymentalnej weryfikacji) przewidują, że w bardzo wysokich temperaturach (10^{14} K) protony, neutrony i mezony mogą "rozpuszczać się" w plazmie lub w "zupie" wolnych kwarków. Bez wątpienia te formy materii byłyby bardzo egzotyczne, *nieuporządkowane* i *niestabilne*, wcale nie podobne do

²⁶ Czas życia protonu, oszacowany eksperymentalnie, przekracza wiek Wszechświata.

²⁷ Murray Gell-Mann wyjaśnia pochodzenie nazwy "kwark": "W 1963 roku, kiedy nazwałem te cząstki 'kwarkiem', po raz pierwszy pomyślałem o brzmieniu słowa, które mogło być *quo:k*. Potem, podczas przypadkowej lektury *Finnegans Wake* Jamesa Joyce'a, natknąłem się na słowo "kwark" w wierszu: Trzy kwarki dla Muster Marka. M. GELL-MANN, *Il quark e il giaguaro. Avventura nel semplice e nel complesso* (Kwark i jaguar. Przygoda z prostym i ze złożonym), Bollati Boringhieri, Turyn 2000, s. 211.

normalnej materii ("ziemi", używając terminologii Księgi Rodzaju). Niektóre spekulacje astrofizyczne przewidują nawet gwiazdy zbudowane z kwarków swobodnych (małe, ale bardzo ciężkie gwiazdy: może czarne?), ale znowu brakuje wskazań eksperymentalnych.

Odkrycie trzech generacji kwarków (z których tylko pierwsza, lżejsza jest stabilna), z ich rosnącą masą, doprowadziło fizyków do pomysłu, że zbliżyli się na kilka chwil od Wielkiego Wybuchu.



Ryc. 3.18. Trzy generacje kwarków, według dr. T. Wróblewskiego: 1) pierwsza, najlżejsza, istniejąca w materii (dziś, czyli normalnej) utworzona przez dwa kwarki: „górny” *up* i „dolny” *down* (patrz na ogon); 2) druga, cięższa i bardziej niestabilna (żyje miliardową część sekundy) utworzona przez kwark dziwny (*strange*) i kwark „powabny” (*charm*); 3) trzecia, zawierająca kwark „niski” (*bottom*) i „wysoki” (*top*) została odkryta w zderzeniach w gigantycznych akceleratorach cząstek w USA. Kierunek pyska wskazuje znak ładunku elektrycznego (prawy – ładunek dodatni); wymiary odpowiadają (a właściwie ich czwarta potęga) - masie. Kwarki mogą mieć 3 kolory (czerwony, niebieski, zielony); istnieją również anty-kwarki o tej samej masie, ale o przeciwnym ładunku elektrycznym i uzupełniającym "kolorze" (anty-kolor zieleni to magenta itp.). Za tymi prostymi wizualizacjami kryją się trudne teorie kwantowe. ŹRÓDŁO: Autor i dr Tomasz Wróblewski.

Wielkie masy kwarków dziwnych i powabnych, które odpowiadają ich wielkiej energii (ponownie według $E = mc^2$), można porównać do ogromnych temperatur: nie miliony, ale setki miliardów stopni. Takich, jakie „panowały” w ciągu pierwszych miliardowych części sekundy istnienia naszego Wszechświata. Następnie najcięższe kwarki rozpadły się na inne, lżejsze, w ciągu milionowych części sekundy. Tak więc, odkrywając ciężkie kwarki w akceleratorach cząstek, odtworzyliśmy warunki Wszechświata w pierwszej sekundzie jego życia. Fizycy są o tym przekonani...

3.15. Weinberg: pierwsze trzy minuty²⁸

Różne rozpady jądrowe, reakcje w jądrach wywołane przez bombardowanie innymi cząstkami, nieskończoność (dziś kilka tysięcy) możliwych aglomeratów sześciu kwarków i sześciu anty-kwarków: wszystko to wskazuje, że obserwowana dziś obecność wodoru i helu w gwiazdach (czyli źródło życia na Ziemi) wcale nie była z góry „przesądzona”. Co więcej: proporcje między wodorem i helem, które obserwujemy dzisiaj, zostały "zdefiniowane" w pierwszych trzech minutach historii Wszechświata.

Widzieliśmy, że atom wodoru składa się z protonu w centrum i elektronu, który krąży dookoła niego z dużą prędkością ($1/137$ prędkości światła). Elektron i proton przyciągają się wzajemnie, ale prawa mechaniki kwantowej zapobiegają zbytniemu zbliżeniu się elektronu do protonu: ich minimalna odległość wynosi około $1/2$ angstrema ($1\text{Å} = 10^{-10}\text{ m}$). Gdyby elektron spadł na proton, mógłby utworzyć neutron²⁹, bez ładunku elektrycznego. Dzieje się tak w starych i masywnych gwiazdach, które składają się tylko z neutronów – gwiazdach gorących, ale już martwych.

Ale cała chemia zależy od elektronów wirujących na różnych orbitalach, stąd pojawia się różnorodność atomów: metali, niemetali, gazów itp. W materii złożonej z neutronów nie jest możliwa żadna różnorodność, ani chemiczna, ani biologiczna. Jakże były mechanizmy, dzięki którym materia nie zapadała się w neutrony już w pierwszych minutach wszechświata? Najczęstszą odpowiedzią jest: ponieważ wartości stałych fizycznych są "właściwe". Jak to możliwe? Do tego pytania powrócimy w rozdziale VII.

Modele fizyczne pierwszych chwil wszechświata są dość złożone i opierają się na właściwościach cząstek elementarnych odkrytych za pomocą dużych akceleratorów. Z drugiej strony modele te pozwoliły przewidzieć różne cechy dzisiejszego wszechświata, takie jak proporcje wodoru i helu, zawartość ciężkiego wodoru, stosunek liczby cząstek jądrowych (protonów i neutronów) do cząstek światła (fotonów), które wędrują w przestrzeni.

²⁸ Dla dalszych informacji polecamy wyjątkową książkę laureata Nagrody Nobla, S. WEINBERGA, *Pierwsze trzy minuty. Fascynująca historia powstania wszechświata*. Prószyński i S-ka, Warszawa, 1998.

²⁹ Neutrino nadal wchodzi w grę, ale nie znamy dokładnie jego właściwości ani funkcji.

Wszechświat początkowo był bardzo gorący, bardzo gęsty i bardzo mały, chociaż pierwszy moment, jaki możemy sobie wyobrazić, to wszechświat wielkości już kilku tysięcy lat świetlnych. Gorący wszechświat oznacza, że cząstki poruszały się z dużą prędkością, to znaczy, że ich energia była bardzo wysoka. Z relacji Einsteina $E = mc^2$ wynika, że energia kinetyczna może zostać przekształcona w inne cząstki (a dokładniej w pary cząstek o przeciwnych ładunkach elektrycznych, takie jak elektron i antyelektron, czyli pozyton). Z drugiej strony, cząstki anihilują z własnymi antycząstkami, ponownie wytwarzając promieniowanie, które zderzając się z innymi cząstkami tworzyło nowe pary i tak dalej. W swoich wczesnych stadiach wszechświat składał się z tej dziwnej "zupy" cząstek, bardzo egzotycznych i promieniujących. Ten etap trwałby wiecznie, gdyby wszechświat nie rozszerzył się natychmiast, powodując spadek temperatury.

Wraz ze spadkiem temperatury najpierw stało się niemożliwe powstawanie cząstek powyżej pewnej masy. W ten sposób protony i neutrony mogły zaistnieć na trwałe i pozostać we wzajemnej równowadze, ale tylko przez 0,01 sekundy po „starcie”. Od tego momentu liczba neutronów zaczęła się zmniejszać: będąc niestabilnymi z natury, rozpadały się na protony i elektrony.

Słynny rosyjski fizyk teoretyczny (i nasz wielki przyjaciel, profesor Lew Pitaewski), zapytany, dlaczego masy kwarków, protonów, elektronów są tak dziwne i wydają się nie podążać za żadną logiką, odpowiedział: "Są naukowcy, którzy mówią, że gdyby te masy były inne, nie istnielibyśmy". Nie można sobie wyobrazić dokładniejszej odpowiedzi. O ile masy dwóch kwarków *górnego* i *dolnego* są podobne, trzeci kwark jest 20 razy cięższy. Jeśli masy protonu i neutronu są równe z dokładnością do 0,1%, elektron jest 1837 razy lżejszy (jego masa to 0,51 MeV/c²). Neutrino, które towarzyszy elektronowi jako produkt rozpadu neutronów, ma masę³⁰ pojedynczych eV/c². Różnice te pozwoliły pierwszym wszechświatowi "krokami" przez pierwsze minuty.

Najpierw zatrzymała się synteza protonów i neutronów, która zachodziła poprzez zderzenia fotonów (0,01 s); następnie (w 0,1 s) ustąpiło tworzenie się par elektron-pozyton. Po pierwszej sekundzie neutrony oddzielają się od materii; w tym czasie część neutronów już uległa rozpadowi: stosunek liczby neutronów i protonów wynosi 1 do 3.

³⁰ Masa neutrin nie jest jeszcze (w 2026 r.) dokładnie znana.

Po 14 sekundach elektrony anihilują masowo z pozytonami wytwarzając ogromną ilość fotonów (dziś pozostaje w kosmosie miliard fotonów na jeden elektron). Przetrwa tylko ta część elektronów, która odpowiada liczbie protonów (ładunek elektryczny Wszechświata wynosi zero, a przynajmniej jesteśmy przekonani, że tak jest).

W tej temperaturze (3×10^9 K) neutrony i protony mogą wiązać się w jądra helu (energia wiązania 24 MeV), co pozwoliło neutronom przetrwać aż po nasze czasy. Nadmiar protonów pozostaje jako przyszłe jądra wodoru, a bardzo mała ilość neutronów (kilka części na milion) przeżywa w postaci ciężkich jąder wodoru, deuteru³¹. Jak pisze Stephen Weinberg, w ten sposób od początku wszechświata minęły dokładnie trzy minuty i 46 sekund³². Skład materii został ustalony³³, z wyjątkiem przyszłych reakcji, mierzonych teraz w milionach i miliardach lat, w jądrach gwiazd (i w laboratoriach naukowców).

Podsumowując: tylko elektrony są cząstkami elementarnymi. Protony, złożone z trzech kwarków (*uud*) są stabilne zaś neutrony, złożone z tych samych kwarków, ale w innych proporcjach (*udd*), są niestabilne, z wyjątkiem tych związanych w jądrach atomowych (lub gwiazdach neutronowych). Zrozumieliśmy, że świat cząstek elementarnych jest bardzo skomplikowany: znamy jego cechy z wielką precyzją. Nie wiemy tylko, jak zwykle: *dlaczego?*

3.16. Czarno-biały telewizor

Mój tato kupił pierwszy telewizor około 1966 roku: była to ciężka i elegancka drewniana obudowa z cyrylicą "РУБИН" (RUBIN). Po naciśnięciu prawego przycisku zapalała się mała żarówka, potem inne, a na koniec pudełko zaczynało burczeć i na ekranie pojawiał się dość regularny obraz z wieloma, małymi białymi i szarymi plamami. Po długich próbach można było zsynchronizować antenę i można było zobaczyć program. Zawsze byłem ciekawy, jaki obraz jest zakodowany tymi biało-szarymi łatkami. Zrozumiałem to wiele lat później: jest to informacja, którą wszechświat wysłał nam zaraz po narodzinach;

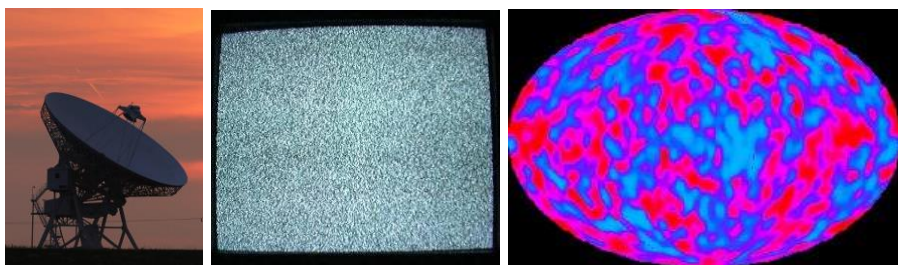
³¹ Deuter znajduje się również w cząsteczkach wody w oceanach. Będzie on wykorzystywany do zasilania reaktorów termojądrowych przyszłości. Zasoby są wystarczające, aby zapewnić energię dla całej ludzkości na następne 3000 lat.

³² S. WEINBERG, *op. cyt.*, s. 125.

³³ Hel stanowi 25% masy wszechświata, reszta to zasadniczo wodór.

Dokładniej, 380 tysięcy lat po jego powstaniu, Wszechświat wysłał (sobie i nam) szum elektromagnetyczny w częstotliwościach typowych dla kuchenek mikrofalowych (czyli także fal telewizyjnych)³⁴.

Cały Wszechświat w tym czasie był wielkości naszej Galaktyki, wciąż bardzo gęsty, jak opary sodu w żółtej lampie używanej do oświetlania ulic. Widmo lampy sodowej powinno zatem składać się z wąskich linii, takich jak hel i wodór. W szczególności sód emituje żółte światło o długości fali 590 nm. Ale lampa uliczna nie działa w ten sposób: tam, gdzie w widmie powinny być dwa żółte paski obok siebie, jest duże minimum, zob. ryc. 3.20a, jakby żółte światło było uwięzione wewnątrz bańki z oparami sodu.



Ryc. 3.19. (a) W obserwacjach nieba za pomocą radioteleskopów (takich jak ten w Toruniu) wykryto uporczywy sygnał ze wszystkich kierunków. (b) Ten sam sygnał jest odbierany przez stary czarno-biały telewizor. (c) Szczegółowo, skanując niebo, zaobserwowano bardzo małe różnice w temperaturze tego sygnału (tj. promieniowania mikrofalowego); rozkład ten odpowiada dzisiejszym galaktykom i jest pierwszym sygnałem nowonarodzonego Wszechświata, który możemy wykryć. ŹRÓDŁO DANYCH: A. ROMAŃSKI, UMK; Autor; ESA.

Tak było również we Wszechświecie 380 tysięcy lat po jego powstaniu: wciąż było gorąco (w temperaturze około K), ale także bardzo gęsto. Światło emitowane przez gorące atomy zostało natychmiast pochłonięte przez inne atomy; wszechświat widziany z zewnątrz wydawał się czarny. Potem, kiedy gęstość Wszechświata (i jego temperatura) spadła, światło nagle uwolniło się z materii. Nie ma lepszego przedstawienia tej koncepcji niż ta, którą można znaleźć na mozaice w Bazylice św. Marka w Wenecji, ryc. 3.20b.

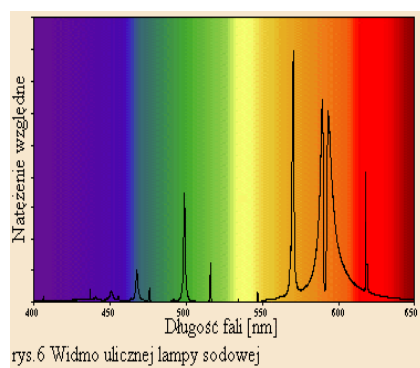
W momencie rozdzielenia światła i materii temperatura wszechświata wynosiła około 3000 K, co odpowiada dokładnie pomarańczowo-

³⁴ Oczywiście większość szumu na ekranie pochodzi z elektronicznych układów telewizora; według różnych szacunków tylko 20% tego szumu pochodzi z promieniowania kosmicznego.

wo-żółtemu światłu, o długości fali kilku ułamków mikrometra. Następnie wszechświat znacznie się rozszerzył, a długość fali również wzrosła, która dziś wynosi około dziesięciu centymetrów, właśnie w domenie fal telewizyjnych i odpowiada temperaturze 2,3 K.

Promieniowanie "tła" zostało odkryte przypadkowo w 1964 roku przez dwóch amerykańskich techników, Arno Penziasa i Roberta Wilsona, którym zlecono zbudowanie dużej anteny do komunikacji ze sztucznymi satelitami, podobnej do tej na ryc. 3.19a. Zauważyli dziwny szum dochodzący ze wszystkich kierunków. Dziś wiemy, że to promieniowanie jest reliktem bardzo młodego wszechświata. Istnienie tego promieniowania stało się też niezbitym dowodem Wielkiego Wybuchu.

Niestety, po przyjęciu idei Wielkiego Wybuchu pozostaje kilka trudności. Biorąc pod uwagę równoważność $E = mc^2$, energia może być wytwarzana kosztem masy i odwrotnie, pojawia się pytanie: skąd wzięła się cała ta prawie nieskończona masa (i energia) wszechświata?



Ryc. 3.20. (a) Widmo żółtej lampy ulicznej (pary sodu) wykazuje minimum w zakresie koloru pomarańczowego: opary są gęste, więc światło nie opuszcza szklanej bańki. (b) Genialna prezentacja światła wychodzącego z ciemnego wszechświata: żółty kolor odpowiada temperaturze oddzielenia się materii od promieniowania elektromagnetycznego. ŹRÓDŁO: (a) Autor, (b) Bazylika św. Marka, Patriarchat Wenecji, dzięki uprzejmości Patriarchy Wenecji, zdjęcie: Kina Editions.

3.17. W mgnieniu oka

Model "pierwszych trzech minut", opisany w książce Weinberga, jest wynikiem dziesięcioleci rozwoju fizyki cząstek jądrowych i elementarnych. Duże akceleratory umożliwiły tworzenie egzotycznych cząstek, bardzo niestabilnych i o dużych masach, które przekładają się na

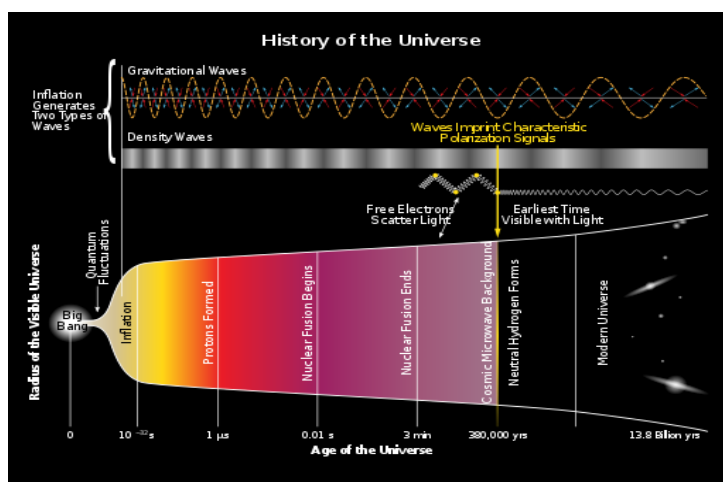
temperaturę odpowiadającą miliardom stopni. Oczywiście, w porównaniu z fizyką Galileusza – powtarzalnych eksperymentów ze spadkiem kulek – Wielki Wybuch nie pasuje do kanonów weryfikowalnej teorii naukowej: nie możemy powtórzyć Wielkiego Wybuchu w swojej złożoności. Jednak wszyscy fizycy zgadzają się (tj. wierzą), że początek Wszechświata był właśnie taki.

Ale jest jeden problem, a raczej trzy. Pierwszym z nich jest jednolitość praw fizyki: linie widmowe wodoru w galaktykach najdalej od nas, czyli 13 miliardów lat świetlnych (zarówno pod względem odległości czasowej jak i przestrzennej), są dokładnie takie same (z oczywistym przesunięciem ku czerwieni dla efektu Dopplera), jak w lampie w toruńskim laboratorium. Sam Wielki Wybuch, z szybko rozszerzającym się Wszechświatem, nie musiał gwarantować tej jednolitości praw fizyki. Nie było czasu na dostrojenie najdalszych zakątków wszechświata do tych samych praw i stałych fizycznych.

Drugi problem wynika z jednorodności promieniowania tła. We wszystkich kierunkach Wszechświata temperatura tego promieniowania jest taka sama (a niewielkie różnice w przybliżeniu odpowiadają rozkładowi dzisiejszych galaktyk). W dużej skali, tysiące lub milionów lat świetlnych, nie ma mechanizmu osiągnięcia tej *równowagi termicznej*, obserwowanej w całym Wszechświecie. Oznacza to, że musi był moment, kiedy było możliwe wyrównanie się temperatury, w całym, młodym jeszcze wszechświecie. Jaki był mechanizm tego wyrównania się, który nie naruszył limitu szybkości propagacji sygnałów materialnych odkrytego przez Einsteina?

Trzecim problemem, najpoważniejszym ze wszystkich, jest samo istnienie wszechświata. Aby umożliwić rozkład kwarków pierwotnych na kwarki istniejące dziś, stałe *sprzężenia* (które znamy tylko z doświadczeń) musiały być bardzo precyzyjne; to samo dotyczyło mas kwarków. Aby zapobiec łączeniu się elektronów z protonami zaraz po „starcie”, czas życia neutronu musi mieć wartość, którą faktycznie obserwujemy: w pierwszych minutach powstały neutrony, które zostały włączone do jąder helu. Jądra helu są stabilne (pamiętajmy, że ich energia wiązania wynosi 24 MeV), więc hel nie zamienił się natychmiast w węgiel, a następnie w tlen. To pozwala gwiazdom stopniowo się zapalać a później jasno i w miarę trwale świecić. Nie mówiąc o tym, że i tlen i wodór i węgiel to główne składniki naszego ciała.

Innymi słowy, wiele różnych *stałych* fizyki musiało mieć bardzo precyzyjne wartości, aby wszechświat mógł istnieć i ewoluować³⁵. Alan Guth, amerykański fizyk, napisał w 1981 roku, że prawdopodobieństwo dostosowania tych stałych do siebie wynosi około 10^{-50} , tj. „1” po pięćdziesięciu zerach: w praktyce całkowicie niemożliwe, - chyba że istnieje inny mechanizm regulacji tych stałych. Tak narodziła się teoria *inflacji*³⁶ nawet jeśli ta nazwa jest myląca, jak zresztą i ta „Wielkiego Wybuchu”, patrz ryc. 3.21.



Ryc. 3.21. Reprezentacja historii Wszechświata, obecnie bardzo popularna. Początkowa eksplozja miała miejsce *poza* prawami fizyki: nie mamy najmniejszego modelu ani w dziedzinie kosmologii, ani w dziedzinie fizyki cząstek elementarnych, aby opisać pierwszą chwilę Wszechświata. Po rozdzieleniu materii i światła, tj. po 380 tysiącach lat, model rozszerzającego się Wszechświata działa dobrze; ostatni fragment "tuby" wskazuje, że ekspansja przyspiesza. Chociaż rysunek jest często powielany, pozostaje mylący: skala czasu nie odróżnia miliardowych części sekundy od miliarda lat. Początkowa bańka, "fluktuacja kwantowa", jest czystą fantazją, bez możliwości potwierdzenia doświadczalnego. ŹRÓDŁO: Wikipedia Commons.

³⁵ Tutaj dochodzimy do pytania o zasadę antropiczną: czy stałe fizyki są takie, że z czasem stało się możliwe pojawienie się życia, czyli również nasze, ludzkie istnienie? A może takie stałe *pozwalają* nam istnieć?

³⁶ "Problemy te wynikają z obserwacji, że aby wyglądać tak jak dzisiaj, Wszechświat musiałby zacząć od bardzo precyzyjnie dostrojonych lub "specjalnych" warunków początkowych w Wielkim Wybuchu. Teoria inflacji w dużej mierze rozwiązuje również te problemy, czyniąc wszechświat taki jak nasz znacznie bardziej prawdopodobnym w kontekście teorii Wielkiego Wybuchu. ŹRÓDŁO: [https://en.wikipedia.org/wiki/Inflation_\(kosmologia\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Inflation_(kosmologia)), tłum. GK.

Zwolennicy³⁷ koncepcji początkowej inflacji Wszechświata uważają, że wszechświat eksplodował o współczynnik równy około 10^{26} w ciągu 10^{-32} sekund. Współczynnik 10^{26} oznacza, że wszechświat urósł z wielkości główki od szpilki³⁸ do średnicy 100 razy większej niż rozmiar naszej galaktyki (tj. 14 *milionów* lat świetlnych). Potem nastąpiło już tylko powolne (tysiącrotnie) „puchnięcie”, do wielkości 13,78 miliarda lat świetlnych dzisiaj.

Nie ma żadnych praw fizyki (jak obserwujemy obecnie, czyli przez ostatnie 13,78 miliarda lat), które mogłyby pozwolić na taką inflację. A może Fizyka, jaką znamy, po prostu nie istniała w tym pierwszym momencie istnienia Wszechświata? .

Ale absolutnie bardziej zaskakująca jest inna liczba: 10^{-32} sekundy. Najkrótszy czas dla procesów fizycznych jakie znamy, to przeskok skok elektronu z jednej orbity na drugą (czyli wytworzenie kwantu światła): 10^{-18} s. Wartość Gutha odpowiada najkrótszemu czasowi, jaki możemy sobie wyobrazić, zbliżonemu³⁹ do tzw. "czasu Plancka" (10^{-43} s), który może być tak mały jak *punkt* na osi czasu. Innymi słowy: *cały Wszechświat pojawił się w mgnieniu oka*.

Pojawia się jeszcze jeden problem: eksplozja o współczynnik 10^{26} w ciągu 10^{-32} sekund narusza wszystkie prawa fizyki, w szczególności zasadę Einsteina (udowodnioną we wszystkich eksperymentach), że prędkość światła stanowi maksymalną możliwą prędkość wymiany informacji (tj. tym bardziej ruchu materii). Prędkość materii w początkowej eksplozji powinna przekraczać prędkość światła o współczynnik niemożliwy do obliczenia.

Najbardziej rozsądny jest wniosek, że prawa fizyki narodziły się po inflacji, to znaczy, że początkowa eksplozja miała miejsce *niezależnie od przestrzeni i czasu*, lub że przestrzeń i czas pojawiły się "po początkowym rozszczepieniu atomu na dwie części", jak to po raz pierwszy sformułował belgijski ksiądz, Georges Lemaître.

³⁷ "Szczegółowy mechanizm fizyki cząstek elementarnych odpowiedzialny za inflację nie jest znany. Podstawowy paradygmat inflacyjny jest akceptowany przez większość naukowców, ponieważ wiele przewidywań modelu inflacyjnego zostało potwierdzonych przez obserwacje.» ŹRÓDŁO: Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Inflation_\(kosmologia\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Inflation_(kosmologia)).

³⁸ Alternatywne obliczenie, wykonane przez przyjaciela kosmologa, rozpoczyna się od początkowego pomiaru 10^{-17} m, który może odpowiadać rozmiarowi kwarku, najmniejszego obiektu fizycznego, jaki można sobie wyobrazić. Po inflacji rozmiar wszechświata wynosiłby kilka metrów, jak czarne i żółte kule na średniowiecznej mozaice w Bazylice Św. Marka.

³⁹ Tak zwany czas Plancka nie wywodzi się od niego i nie ma fizycznego znaczenia: jest po prostu grą stałych fizycznych zorganizowanych tak, aby wytworzyć jednostkę miary czasu.

3.18. Ponowne przeliczenie wymiarów

Ekspansja Wszechświata, która trwa od 13 miliardów lat, zwiększyła jego rozmiar tysiąckrotnie. Widzieliśmy już, że atom wodoru z elektronem jest praktycznie pusty. Kosmos jest również ogromną pustką. Wszystkie planety Układu Słonecznego wzięte razem ważą mniej niż Słońce (około $1/5$).

Przyjaciół, profesor kosmologii, zastanawiając się, jak bardzo wszechświat napompował się w fazie "inflacji" i jakie były wymiary po tej fazie, napisał następujące równanie: *nieznany razy nieznany = nieznany*. Możemy tylko spekulować.

Z fizyki atomowej wiemy, że poprzez zmiążdżenie atomu elektrony są zmuszane do łączenia się z protonami (choć potrzebujemy jeszcze nieuchwytnych cząstek zwanych neutrinami) w neutrony. Więc przechodzi od wielkości 10^{-10} m do 10^{-15} m. Materia złożona z neutronów jest zatem bardzo ciężka: główka szpilki z tej materii "waży" jak 10-piętrowy budynek. I wcale nie jest zróżnicowana.

Słońce zredukowane do gwiazdy neutronowej miałoby średnicę około 14 km: 100 000 razy mniejszą niż jego obecna średnica. Najbliższa Ziemi gwiazda, Proxima Centauri, znajduje się w odległości nieco ponad 4 lat świetlnych od Ziemi, czyli 4×10^{14} km. Są też niezliczone inne gwiazdy, ale zawsze co najmniej kilka lat świetlnych stąd⁴⁰: i tak to Wszechświat jest zasadniczo pusty, nawet bardziej niż atom. Cały wszechświat zredukowany do gęstości gwiazdy neutronowej byłby jedynie nieco większy niż nasze Słońce.

Innymi słowy, w pierwszych sekundach i do momentu 380 tysięcy lat nie mamy bezpośrednich dowodów eksperymentalnych historii wszechświata. Możemy spekulować na temat tych wczesnych momentów, ekstrapolując wstecz eksperymenty z pierwotnymi kwarkami. Masa (tj. równoważna energia) cięższych, górnego (*top*) kwarku ($172 \text{ GeV}/c^2$) w przeliczeniu na temperaturę T (przy użyciu równoważności $E = kT$) odpowiada 2 bilionom (2×10^{15}) stopni Celsjusza. Czy jest sens mówić o temperaturze? Czy możemy zastosować te sa-

⁴⁰ Na przykład gwiazda Pegasi-51, na której odkryto pierwszy układ planetarny poza Słońcem, znajduje się 51 lat świetlnych od nas (za to odkrycie została przyznana Nagroda Nobla w 2019 roku).

me prawa natury, które znamy, do tak ekstremalnych warunków? Czy w tak ekstremalnych warunkach obowiązują te same stałe fizyczne⁴¹?

Podsumowując, nie ma wątpliwości, że Wszechświat miał swój początek tak w przestrzeni jak w czasie. Nie ma wątpliwości, że formy materii ("ziemia", jak mówi Księga Rodzaju) były bardzo, bardzo dziwne. Jakie? Nie wiemy. Nie ma również wątpliwości, że historia wszechświata, w tym pojawienie się gwiazd i powstanie Ziemi jako całej planety, była długa i skomplikowana. Ale jednocześnie ewolucja ta wydaje się bardzo "ukierunkowana", to znaczy "teleologiczna", używając języka Arystotelesa (i św. Tomasza).

Prawie, prawie, początek Wszechświata nadal należy bardziej do filozofii niż do fizyki.

Podsumowując kosmologię i fizykę, trudno nazwać pierwszy ułamek mikrosekundy (10^{-32} s) w historii Wszechświata inną nazwą niż *stworzenie ex nihilo*.

To stworzenie jako pierwsze ustanowiło prawa Natury: Natury, która według słów Galileusza pozostaje "najbardziej uważną wykonawczynią Bożych rozkazów".

Następnie, w pewnym sensie, po ustanowieniu praw fizyki, Wszechświat poszedł "sam".

Ale to nie znaczy, że Bóg pozostaje w bezczynności...

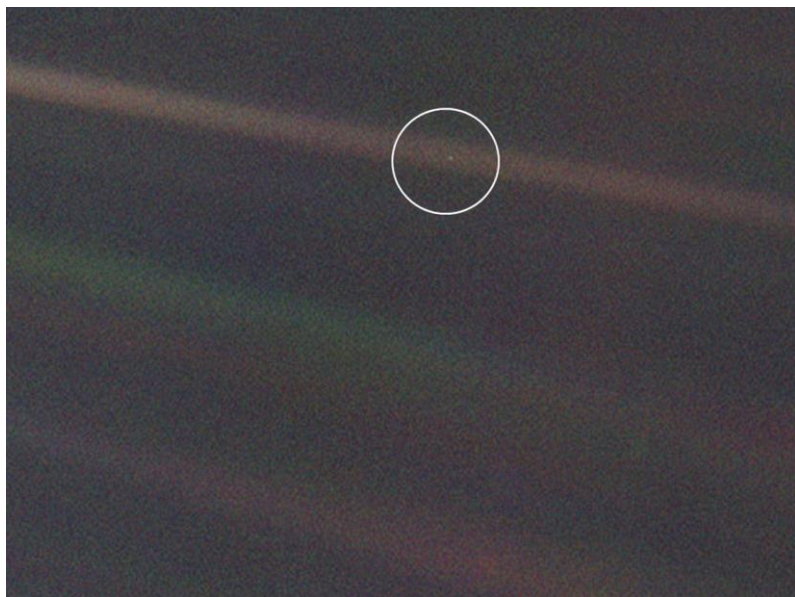
P.S. Krąży opinia, że wielu fizyków, w przeciwieństwie do niektórych innych naukowców, jest wierzących. Dlaczego? Fizycy wiedzą, że wszechświatem rządzą prawa matematyczne i rozumieją, że nic nie dzieje się przypadkowo. Wiedzą również, że prawa fizyki są bardzo złożone (co znajduje odzwierciedlenie w złożonej strukturze materii).

⁴¹Dyskusja o stałych Natury została poświęcona omówieniu stałych fizyki przez słynnego fizyka teoretycznego z Cambridge, JOHN A. BARROWA, *The Numbers of the Universe. Stałe natury i teoria wszystkiego*, Oscar Saggi, 2004. Wydaje się, że stałe fizyki pozostają takie same od początku istnienia Wszechświata. Niestety, niewiele jest możliwych wniosków na pytanie: "Dlaczego świat jest taki?".

Co więcej, fizycy są świadomi, że nie potrafią wyjaśnić, *dlaczego* świat został stworzony takim, jaki jest.

Sokrates powiedział⁴²:

Wróciwszy do domu zacząłem miarkować, że od tego człowieka jednak jestem mądrzejszy. Bo z nas dwóch żaden, zdaje się, nie wie o tym, co piękne i dobre, ale jemu zdaje się, że coś wie, choć nic nie wie, a ja, jak nic nie wiem, tak mi się nawet i nie zdaje. Więc może o tę właśnie odrobinę jestem od niego mądrzejszy, że jak czego nie wiem, to i nie myślę, że wiem.



Ryc. 3.22. Żegnaj Ziemi! Ostatnie zdjęcie Ziemi wykonane przez sondę kosmiczną Voyager 1, w odległości 6,4 miliarda km, przed opuszczeniem Układu Słonecznego. Cała nasza planeta jest ledwo widoczną niebieską kropką. Ale to ziarenko piasku jest domem dla życia, w szczególności życia inteligentnego. FOTO: NASA.

⁴² PLATON, *Obrona Sokratesa*, 21D, tłum. Władysław Witwicki, PWN 1984, str. 253.