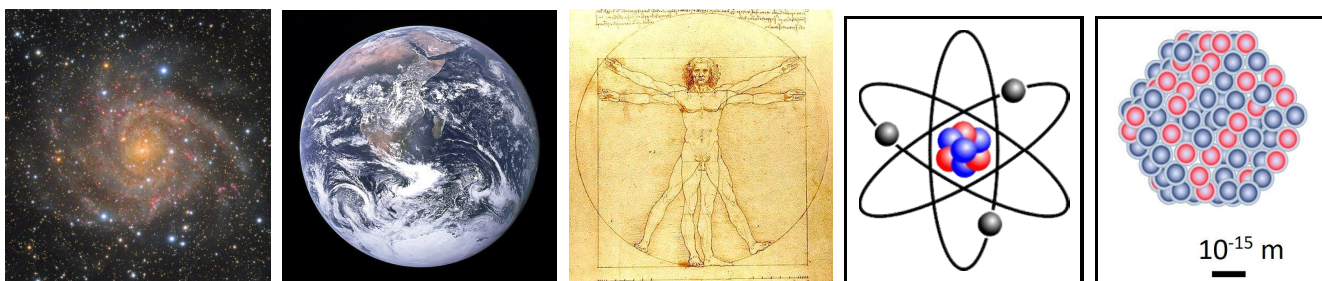


## Nieskończenie mały

## 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 toskański (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", w greckiej Drodze Mlecznej, 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](http://Da_Vinci_Vitruve_Luc_Viatour.jpg);  
 (d) [https://en.wikiquote.org/wiki/Atomic\\_theory](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 wielkości, 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, specjalnie nazywanej "Proxima", w gwiazdozbiore 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 atomu<sup>1</sup>. 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: gęstego płynu do pocierania podłóg (nigdy garnków ze stali nierdzewnej, ponieważ pozostaną porysowane!). Te ziarenka, prawie niewidoczne gołym okiem (jedna mi-

<sup>1</sup> Równie interesująca była obserwacja 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.

lionowa milimetra), można dalej dzielić. Czy istnieje granica tego rozdrobnienia? Współczesna fizyka (a raczej chemia) odpowiada twierdząco. Jest to jednostka niepodzielna (za pomocą środków mechanicznych lub chemicznych) zwana a-tomem, *czyli niepodzielna*. Nadal w greckim moderno *atomos* oznacza "osobę", 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 Einstein, nie wierzyli w możliwość zobaczenia atomów.

Dziś wiemy, że wszystkie atomy są zbudowane w bardzo podobny sposób z tylko dwoma (a raczej trzema, jeśli liczy się neutron<sup>2</sup>) identycznymi składnikami: protonami (w atomach cięższych od wodoru także neutronami), które tworzą małe jądro (średnica około  $10^{-15}$  m), oraz elektronami, które krążą wokół w odległości około  $10^{-10}$  metra.<sup>3</sup>



**Ryc. 3.2.** a) Kawalek 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 powierzchni. (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.

<sup>2</sup> Neutron, odkryty przez Jamesa Chadwicka w 1932 roku, można w pierwszym przybliżeniu uznać za zbiór protonu i elektronu.

<sup>3</sup> 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. 10 km

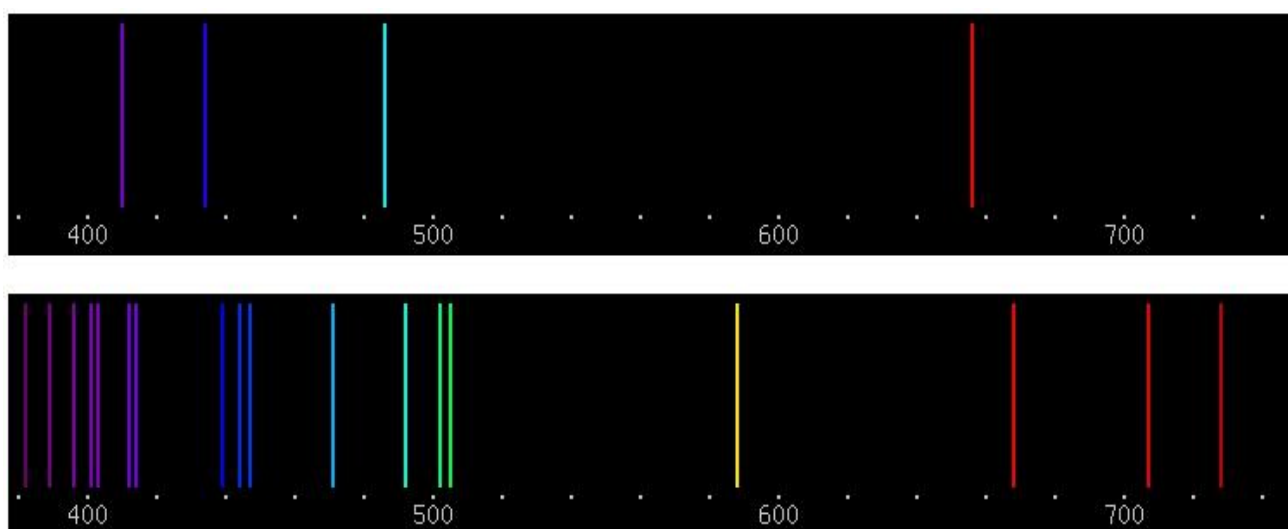
O dziwo (tj. z powodu praw elektrostatyki) wszystkie atomy, niezależnie od ich masy, od wodoru do ołowiu, są podobnej wielkości, około  $10^{-10}$  m. Identyczne (rządzące się tymi samymi prawami mikroświata) jest też rozmieszczenie elektronów (które formują "orbitale", jak na rys. 3.6 poniżej).

Od kilku lat istnieją bezpośrednie metody wizualizacji atomów, proste z konceptualnego punktu widzenia, ale dość wyrafinowane z technicznego punktu widzenia: cienki palec, który idzie po powierzchni 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 widzimy 4 linie w wodrze (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*<sup>4</sup> (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)

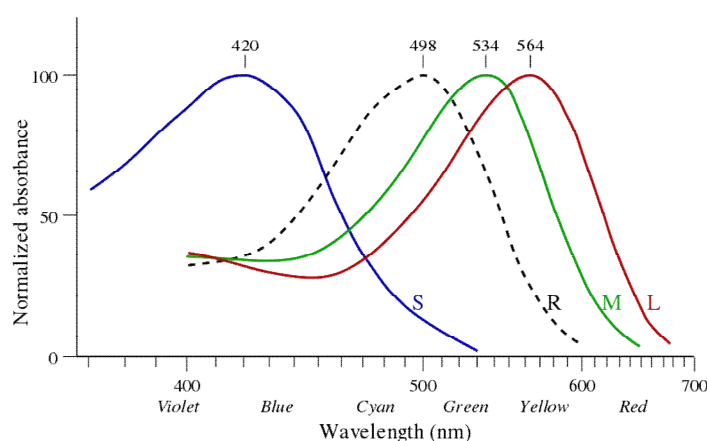
To, czy fotony (światło Arystotelesa) są ciałami, czy nie, pozostaje otwartą debatą wśród fizyków: fotony posiadają masę, ale tylko wtedy, gdy podróżują (z prędkością światła). Kiedy są nieruchome, nie mają masy, w rzeczywistości po prostu nie istnieją. I znowu w jednym fakcie Arystoteles miał rację: 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

<sup>4</sup> 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 kwiatkach 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 na świat już w pierwszych minutach po urodzeniu. Potrzeba 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 zdemontować, inne jak ucho - nie .

Ludzkie oko, z setkami milionów receptorów, widzeniem kolorów, bardzo 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 nić DNA. Ale niemniej wydaje się to dziwne, jeśli weźmiemy rozważamy światło jako falę elektromagnetyczną: energia fal zależy przede wszystkim od ich amplitudy. Na tej samej powierzchni morza delikatna bryza nie powoduje szkód jak wichura z gigantycznymi falami. Ze światłem jest inaczej: światło czerwone, nawet bardzo intensywne, nie przynosi 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 od długości fali światła, czyli jego koloru, zgodnie z zależnością  $E = hv$ , gdzie częstotliwość  $\nu$  fali jest powiązana z jej długością  $\lambda$  i *prędkością światła*, zgodnie z zależnością  $\nu = c/\lambda$ . Innymi słowy, im krótsza fala (tj. światło ultrafioletowe), tym większa energia przenoszona przez pojedynczy foton.

Zależność  $E = hv$  ( $h$  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 niebieskie światło, a nie ultrafiolet. Ludzkie oko działa w ten sam sposób: kwant światła uderza w siatkówkę i powoduje 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: połączone czerwone i zielone oświetlenie wydaje się być żółte; fioletowe zabarwienie pada na krawędź czuciową niebieskiego receptora i chociaż fiolet składa się z wysokoenergetycznych kwantów, wydaje nam się raczej blady.

Oczywiście możemy założyć, że to ślepa ewolucja uformowała trzy różne receptory, które w komplementarny sposób pokrywają zakres światła od czerwieni do fioletu: nie jest to całe spektrum światła słonecznego, ale tylko 380-760 nanometrów<sup>5</sup>. Ale w tym wąskim zakresie zawiera się aż 50% energii światła słonecznego (a oznacza to informację o świecie zewnętrznym). Ale różne i praktycznie nieskończone kolory, oprócz tego, że są użyteczne, ponieważ niosą informacje, są również piękne: dlaczego "ślepa ewolucja" stworzyła tak wyrafinowane oko<sup>6</sup>, wrażliwe nie na matematykę kwantów ale na piękno obrazu?

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

<sup>6</sup> Zakres obejmujący częstotliwości (odpowiadające długościom fal) 1:2 nazywany jest w akustyce "oktawą", ośmioma białymi na klawiaturze fortepianu. Na klawiaturze jest ponad siedem oktaw (które słyszymy doskonale), ale oko pokrywa tylko 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: 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.

Okolo stu różnych pierwiastków (czyli różnych atomów), które istnieją w świecie chemii<sup>7</sup>, połączonych ze sobą może dać nieskończoność materiałów - kryształy górskie, stopy metali i związki organiczne, na których opiera się życie.

Związane atomy tworzą cząsteczki. Mogą to czynić na wiele różnych sposobów: oddając (lub przyjmując) elektrony lub uwspólniając 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”) otrzymuje się gazy o różnym składzie i właściwościach chemicznych.

Na przykład wśród związków azotu i tlenu, podtlenek azotu  $\text{N}_2\text{O}$  jest środkiem znieczulającym przy operacjach chirurgicznych i gazem spieniającym w bitej śmietanie. NO jest bezbarwny, a  $\text{NO}_2$  brązowy; oba tworzą smog ruchu samochodowego. NO (który w bardzo małych ilościach tworzy się w nosie) stymuluje oddychanie, podczas gdy  $\text{NO}_2$  jest trujący.

<sup>7</sup> W tabeli Mendelejewa, która dziś (2023) zawiera 118 pierwiastków, tylko 80 jest stabilnych, od wodoru (nr 1) do ołowiu (nr 82).



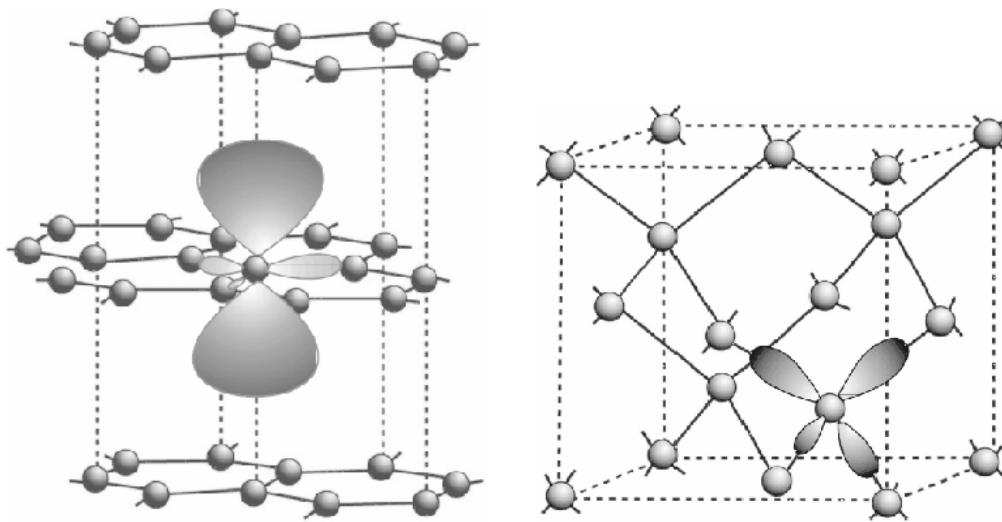
**Ryc. 3.5.** Związki atomów mogą mieć właściwości fizyczne bardzo różne od ich składników. a) Ręć, Hg, metal ciężki, jest ciecżą w temperaturze otoczenia: roztaarta z siarką (b), tworzy szary proszek HgS; w postaci krystalicznej HgS jest minerałem zwanym cynobrem, jasnoczerwonym pigmentem (c). ŹRÓDŁO: 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, która powoduje niewielką zmianą pewnych "pozycji" elektronów. Chemicy, jak wyjaśnimy poniżej, nazywają te dobrze zdefiniowane, *skwantyfikowane* pozycje "orbitale". W atomie węgla, w różnych związkach chemicznych, elektrony mogą wirować na różnych orbitalach. Rzeczywiście, orbitale te zależą od atomu, z którym wiąże się atom węgla.

Następnie pojawia się struktura krystalograficzna, czyli sposób, w jaki miliony atomów tworzą ziarno. Kawalek stali pozostaje miękki, jeśli atomy żelaza z dodatkiem pewnego procentu atomów węgla tworzą strukturę sześciangu ("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 DANYCH: S. MITURA *et al.*, J. Achiev. Materials & Manufact. Eng, **16**, 1-2 (2006) s. 1.244.

Pewne długości odpowiadają konkretnym "skokom" z jednego orbitalu na drugi, które elektrony wytwarzają wewnątrz materiału. Światło widzialne odpowiada skokom (w naszych komfortowych jednostkach) kilku eV (elektronowoltów): dokładniej między 1,8 eV (światło czerwone) a 3,6 eV (światło fioletowe).<sup>8</sup>

Poziomy tych skoków zależą od wielu czynników. Atom chromu daje żółte zabarwienie w kilku związkach chemicznych, ale piękny czerwony kolor, gdy jest zawarty w (bezbarwnym) kryształach tlenku glinu,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : rubin, do zaręczynowego pierścionka. Kolory są też różne, jeśli chrom tworzy tlenek lub chlorek.

Tlenek żelaza ma kolor rdzy, jeśli jego wzór chemiczny to  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , a kolor czarny, jeśli -  $\text{FeO}$ . Stąd pochodzą wszystkie niuanse, które wykorzystują malarze: podziwiaj 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.

<sup>8</sup> 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 ( $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ) 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; 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. Oznacza to, że mamy kilka niebezpośrednich odpowiedzi, ale one tylko przesuwają problem.

The periodic table is color-coded by groups and physical states. The legend indicates the following categories:

- Metals:** Metais alcalinos (orange), Metais alcalino-terrosos (yellow), Metais de transição (red), Lantanídeos (purple), Actinídeos (pink).
- Other Metals:** Metais representativos (green), Semi-metals (light green).
- Non-metals:** Não-metals (light blue).
- Other Elements:** Halogénios (cyan), Gases nobres (dark blue).
- Physical States:** Sólido (white), Líquido (red), Gasoso (yellow), Desconhecido (grey).

The table shows elements from Hydrogen (1) to Oganesson (118), with the Lanthanide and Actinide series shown below the main table. A box in the bottom left corner defines the columns: 'Nº Atómico' (Atomic Number), 'Símbolo' (Symbol), and 'Nome' (Name).

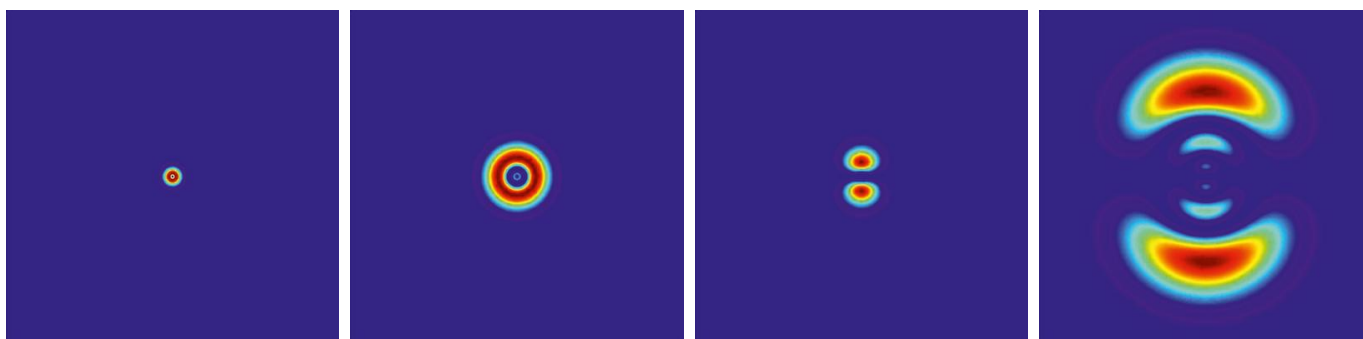
**Ryc. 3.8.** Układ okresowy pierwiastków chemicznych: dodanie elektronu radykalnie zmienia właściwości chemiczne, tak jak między fluorem (gaz bardzo reaktywny) a neonem (gaz chemicznie obojętny). ŹRÓDŁO: Wikipedia.

Pierwszym przybliżeniem odpowiedzi jest "układ okresowy" Mendelejewa, 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 dodanie jednego elektronu na raz: wodór atomowy H ma jeden, 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,  $HCl$ ), atom wodoru traci elektron i tworzy  $H^+$ , który jest jonem decydującym o własnościach wszystkich kwasów.

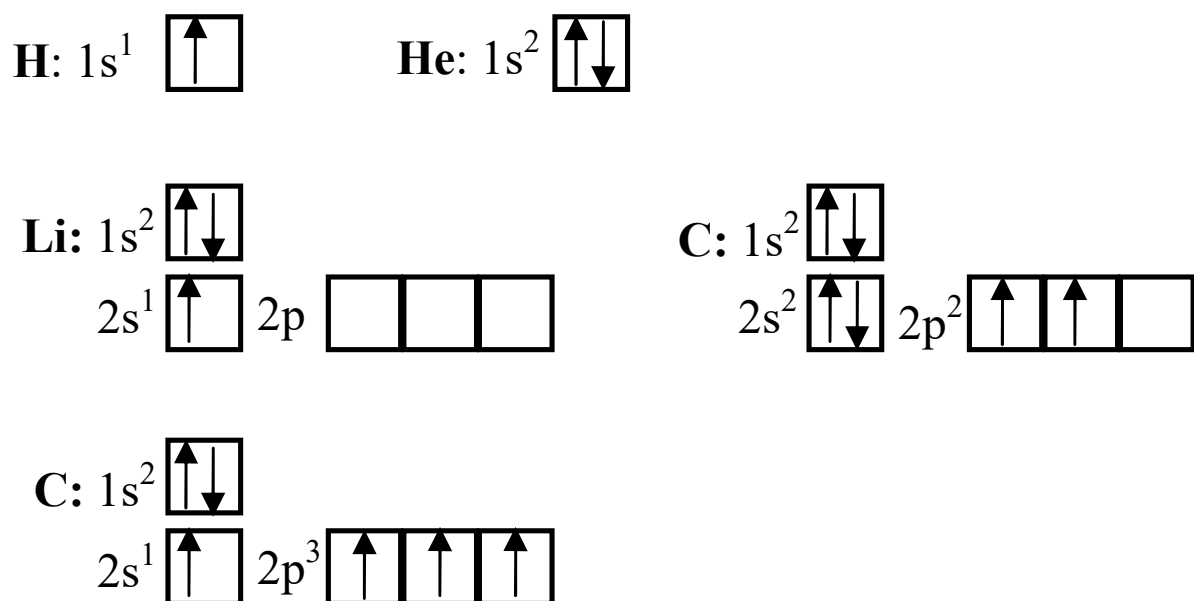
W berylu czwarty elektron może nadal zajmować orbitę kołową; w borze (lekkim, ale twardym metalu), a następnie w węglu, azocie, tlenie, fluorze, neonie, elektrony zajmują, jeden po drugim, orbity w kształcie podwójnego obwarzanka, jak cyfra "8" (patrz rys. 3.9c). Możliwe są trzy różne pozycje (wzdłuż trzech prostopadłych osi) tych „obwarzanków”, dzięki czemu możemy umieścić na nich 6 elektronów. Złoto jest łatwo 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): kształt 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 skrzynek. Tak więc wodór jest rysowany jako elektron w polu ("orbitalnym") 1s, hel z dwoma (z dwoma przeciwległymi strzałkami, jak zostanie wyjaśnione poniżej), itd., patrz rys. 3.10.

Struktura "pudełkowa" jest tylko malowniczą reprezentacją matematycznego rozwiązania równania rządzącego ruchem (i położeniem) elektronów w atomie. Rozwiązania te są "kwantyfikowane": nie wszystkie orientacje orbit (i elektronów) są dozwolone. W każdym "pudełku" dozwolone są dwa elektrony. Wynika to z obrotu elektronów: obracają się one same, jak Ziemia wokół własnej osi. Ale w przeciwieństwie do rotacji planet, oś obrotu elektronu przyjmuje tylko jeden kierunek, ale z dwoma przeciwnymi zwrotami (stąd strzałki w górę i w dół). W ten sposób dwa elektrony są *rozdzielalne*. Następnie, 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  $2p$  lub diamentu, z elektronem  $2s$  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 mówi się: "nie więcej niż 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 wciąż istnieje wiele innych cząstek elementarnych.

### 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 wnętrze, 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 promieniu<sup>9</sup> 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 szybciej<sup>10</sup> niż Ziemia. Co stoi na przeszkodzie, aby elektron znajdował się bliżej jądra niż promień Bohra? Mechanika kwantowa, a raczej kwantowa mechanika falowa.

Dla wyjaśnienia swojego modelu atomu, Bohr postawił nieco sztuczny warunek na wielkość orbity: iloczyn promienia  $r$  orbity i prędkości  $v$  elektronu na tej orbicie jest całkowitą wielokrotnością stałej 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

<sup>9</sup> W przeciwieństwie do protonu, nie mamy bezpośrednich sposobów pomiaru promienia elektronu. Granica wyznaczona przez prawa fizyki klasycznej (elektrostatyka i szczególnie teoria względności Einsteina) wynosi  $0,28 \times 10^{-15}$  m.

<sup>10</sup> 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. 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 zestaw neutronów może istnieć? Tak, gwiazdy, które kończą swoje życie, mogą się zapadać: siła grawitacji miażdży atomy, elektrony neutralizują się nawzajem z protonami, a wszystko to tworzy gwiazdę neutronową<sup>11</sup>. 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. Ale postulaty Bohra 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 rozrzedzone a rozgrzane gazy, pokazują, że elektrony w atomach wykonują "skoki" z dobrze zdefiniowanych, tj. skwantyfikowanych, po-

<sup>11</sup> Dopiero niedawno, w 2017 roku, zaobserwowaliśmy fale grawitacyjne spowodowane zderzeniem dwóch gwiazd neutronowych: niezbitny dowód na ich istnienie.

ziomów energii. Bohr był w stanie obliczyć te poziomy dla atomu wodoru, prawie całkowicie zgadzając się z obserwowanymi liniami. Ale jego hipotezy były "postulatami": teoria kwantowa Bohra przewidywała pewne zjawiska, ale zawodziła w przypadku 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, ani dla gumowych kulek, ani dla kamieni; jest przezroczyste tylko dla światła i to tylko dla światła widzialnego: nie jest przezroczyste<sup>12</sup> dla podczerwieni (stąd funkcja "grzejnika" w szklarniach szklanych), ani dla ultrafioletu ("gogle" pozostają, gdy ktoś opala się w okularach ze szklanymi soczewkami). Światło jest falą!

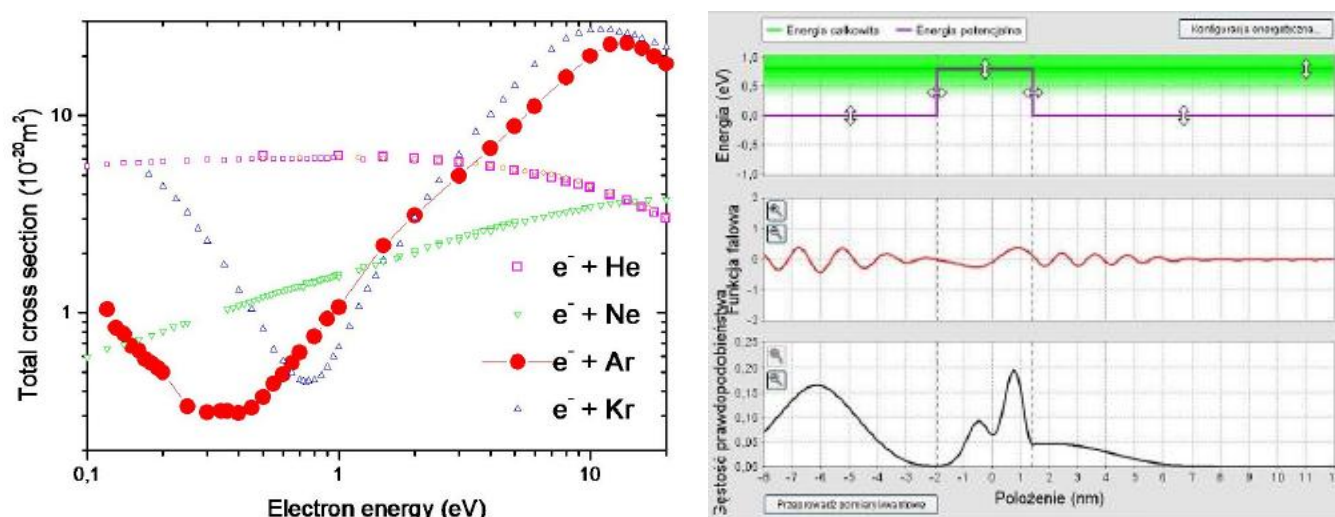
Efektu Ramsauera nie można wyjaśnić, chyba że założy się, że elektrony są falami i że ich długość tych fal zależy od energii. Zmieniając długość fali, w pewnych warunkach gazy stają się przezroczyste. Po pracy de Broglie'a stało się jasne, że elektron można opisać jako falę. Potrzebne było równanie.

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, a  $t$  czasem,  $x$  oznacza, że fala rozchodzi się wzdłuż kierunku  $x$  i że oscylacje (w górę i w dół) zachodzą w kierunku  $y$  ( $\partial$  jest zmianą albo w kierunku  $x$ , albo zmianą w czasie).

<sup>12</sup> Szkło składa się zasadniczo z tlenku krzemu, SiO<sub>2</sub>. Krystaliczny krzem, Si, jest metalicznie szary w świetle widzialnym, ale przezroczysty w podczerwieni.



**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; PhET University of Colorado, symulacja 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, używając liczby urojonej  $i$ , a elektron (tj. jego położenie w przestrzeni i czasie) jest opisany przez "funkcję falową"  $\Psi$ . Używana jest stała  $\hbar$ , tj. stała Plancka  $h$  podzielona przez  $2\pi$  (lepiej więc rozumie się, 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), tym, że światło (w próżni) zawsze rozchodzi się z tą samą prędkością, a elektrony możemy przyspieszać do dowolnej prędkości. Równanie Schrödingera stało się naszym kluczem do zrozumienia mikro-świata.

Elektron zachowuje się jak fala nie tylko wtedy, gdy przechodzi przez atom: jest również odbijany (i częściowo<sup>13</sup> przechodzi) przez

<sup>13</sup> "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.

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 poiska: elektron może, z pewnym prawdopodobieństwem, przejść, nawet jeśli nie ma energii (potencjału) większej niż bariera.

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

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 mikrokosmosie<sup>14</sup>: jądra, cząsteczki, grupy atomów) w funkcji czasu. Traktując elektron jako falę, nie pozwala jednak na precyzyjne określenie położenia, ale opisuje "rozkład prawdopodobieństwa" (patrz rys. 3.12b). Innymi słowy, nie możemy znać z "pewnością" lokalizacji.

Wydaje się to nierozsądne: aby poznać położenie stołu, wystarczy je po prostu zmierzyć, a nawet wystarczy "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<sup>15</sup> elektronu - tak!

<sup>14</sup> 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.

<sup>15</sup> Masa elektronu wynosi zaledwie  $9,1 \times 10^{-31}$  kg.



**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 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 determinują inne paradoksy. Wybierając dwa elektrony 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. Skłodowska-Curie: dzielenie niepodzielnego

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 (który ma 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 katodową"); są to cząstki, które przyspieszone w lampie ("magnetronie") kuchenki mikrofalowej generują promieniowanie ogrzewające żywność (w szczególności zawierające wodę). Nazwa „elektron” oznacza po grecku "bursztyn", gdyż potarty bursztyn "elektryzuje"<sup>16</sup>, a w konsekwencji przyciąga kurz.

<sup>16</sup> Nie wiemy szczegółowo, jak przebiega ten proces, pomimo wieków badań, począwszy od Alessandro Volta (1745-1827) i wynalezienia jego "stosu".

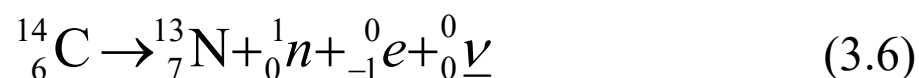
Elektrony są głównymi składnikami całej materii i, jak wykazały ostatnie eksperymenty przeprowadzone we włoskim laboratorium Gran Sasso, są stabilne (tj. wieczne): ich czas życia przekracza wiek Wszechświata.

Jon  $\text{Ar}^+$ , 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 urodzona w Polsce uczona, 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 i protonów plus neutrony, możemy napisać:



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 atmosferze<sup>17</sup> pod wpływem promieniowania kosmicznego i rozpada się, zmniejszając o połowę swą ilość w ciągu  $5730 \pm 40$  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

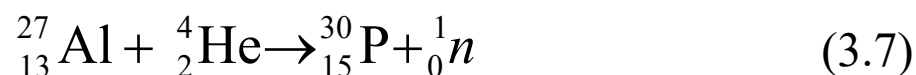


gdzie  $n$  oznacza neutron (masa 1, ładunek 0), a  $-$  dla elektronu (masa 0, ładunek -1),  $\nu$  – antyneutrino (masa i ładunek = 0). Ten rozpad, w którym powstaje elektron, nazywany jest *beta*, czyli nazwą, która zo-

<sup>17</sup> Próbné wybuchy jądrowe w latach 1950-1970 przyczyniły się do wzrostu zawartości  ${}^{14}\text{C}$  w atmosferze.

stała nadana promieniom emitowanym (tj. elektronom), gdy były one obserwowane 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 było radioaktywne i w ciągu kilku minut<sup>18</sup> zostało przekształcone przez emisję elektronu w krzem, izotop <sup>30</sup>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.

### 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), spektakularnie pomylił wiek Słońca (datując go na zaledwie 50 milionów lat), ponieważ wierzył, że źródłem jego energii jest jego kolaps 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:

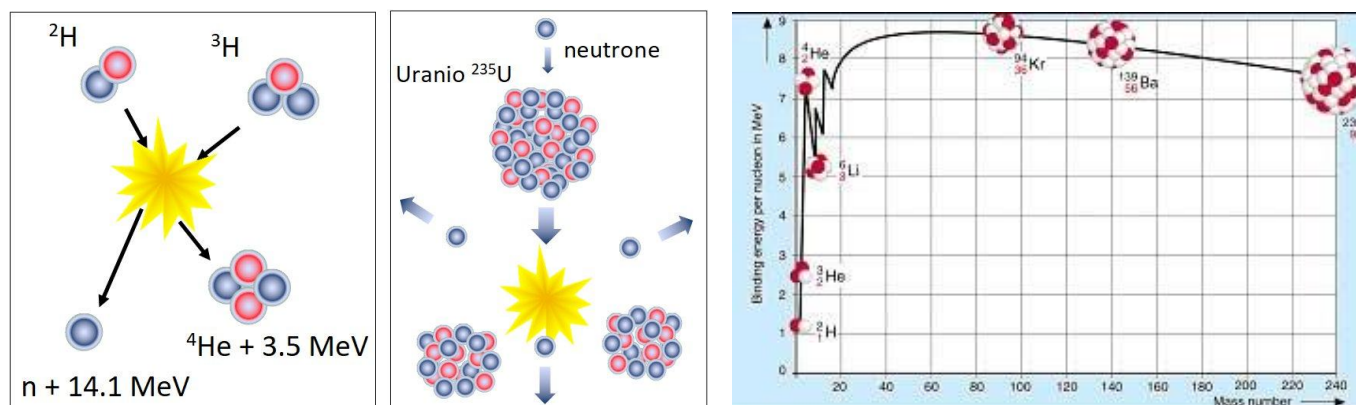


Chociaż dwa protony (w atomach wodoru) odpychają się nawzajem (będąc dwoma ładunkami dodatnimi), w niedużych odległościach neutrony i protony wzajemnie się przyciągają. Ponieważ siła netto jest przyciągająca, powstaje jądro helu i uwalniana jest duża ilość energii.

<sup>18</sup> Radioaktywny okres półtrwania izotopu <sup>30</sup>P wynosi 2,5 minuty.



Sytuacja jest podobna do wpadnięcia spalania gazu w domowej kuchni: 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  $^{235}\text{U}$ : 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 są duże ilości energii. (c) Energia wiązania nukleonów (tj. protonów lub neutronów) dla różnych atomów od wodoru do uranu: najbardziej stabilnym jądrem jest jądro żelaza  $^{56}\text{Fe}$ ; jądro helu  $^4\text{He}$  również jest nadzwyczaj silnie związane; ŹRÓDŁO: (a, b) T. Wróblewski; c) European Nuclear Society.

Jeśli reakcje chemiczne, takie jak tworzenie cząsteczki  $\text{CO}_2$ , spalanie węgla uwalniają energię kilku eV (elektronowoltów), tworzenie jądra helu z atomów wodoru daje 14,4 MeV (milion razy więcej).<sup>19</sup>

Tak więc w reakcjach syntezy jądrowej (helu z wodoru, węgla i tlenu z helu<sup>20</sup> 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; korzystnie energetycznie staje się ich rozszczepienie. Zależności te przedstawiamy na wykresie 3.14c. Od wodoru do helu (niskie liczby na osi masy) krzy-

<sup>19</sup> Oczywiście, zgodnie z  $E = mc^2$ , gdy energia jest uzyskiwana w syntezie helu, masa maleje, ale w niezauważalny sposób (mniej niż 1%).

<sup>20</sup> Reakcja syntezy węgla zachodzi z pośrednim etapem berylu, patrz rys. 9.4 w ostatnim rozdziale tej książki.

wa 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, eksplozja supernowej, a dopiero później "koagulacja" materii wyrzuconej w postaci planet (komet, satelitów itp.). W ten sposób powstały ciężkie pierwiastki, takie jak selen, miedź, uran itp.

Bez wątpliwości duża ilość żelaza powstającego w proto-Słońcu jest niezbędna do istnienia pola magnetycznego na Ziemi.

A to, znowu, jest niezbędne do życia.

### 3.12. Cząstki "elementarne"

Do połowy XX wieku świat cząstek subatomowych zawierał: elektron o ujemnym ładunku<sup>21</sup> o wartości  $-e$ , proton o ładunku dodatnim  $+e$ , neutron o ładunku zerowym. Ze wszystkich trzech cząstek wiadomo było również, że charakteryzują się one własną rotacją<sup>22</sup> (*spinem*), która w jednostkach "atomowych" wynosi  $\frac{1}{2}$ . Wierziono również, że elektron, proton i neutron są "elementarnymi" cząstkami-komórkami, to znaczy nie są już podzielne, a to wynikało z badań rozpadów promieniotwórczych i reakcji jądrowych.

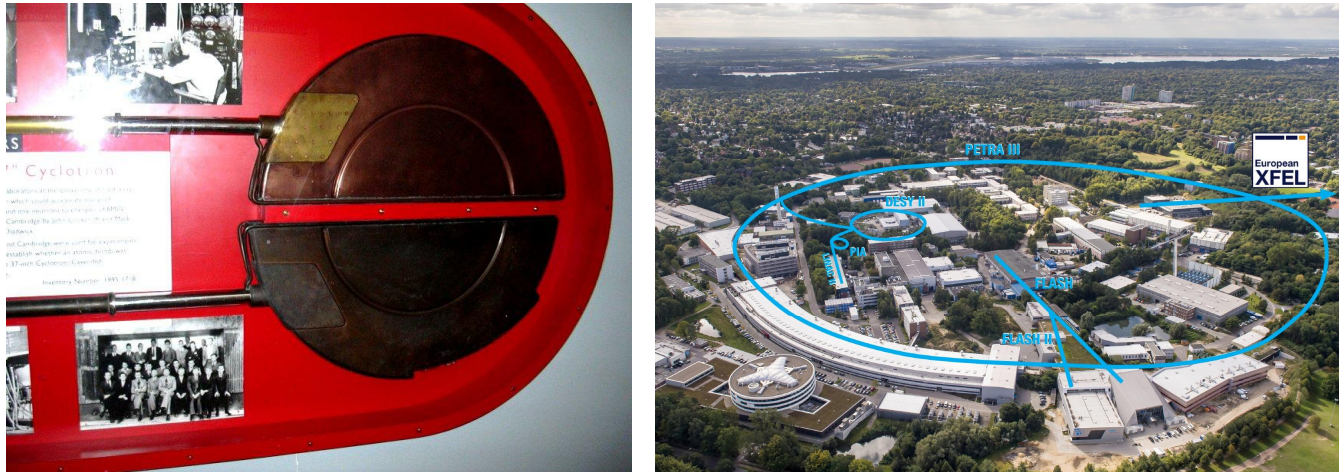
Pewne wątpliwości wynikały z faktu, że w niektórych rozpadach (zwanymi *beta-minus*) neutron rozpada się na proton i elektron, podczas gdy w innych bardzo podobnych rozpadach proton rozpada się na neutron i elektron o ładunku dodatnim, zwany pozytonem. Ten elek-

<sup>21</sup> 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.

<sup>22</sup> 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.

tron o ładunku dodatnim był teoretycznie przewidywany, jako niezamierzony wynik, równania Diraca (1902-1984).

Po odkryciu indukowanych 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 naładowanych cząstek, takich jak protony (które, pamiętajmy, są jądrami wodoru) z dużymi prędkościami. 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 reakcji, dobrze sterowalnych, w przeciwieństwie do reakcji indukowanych promieniowaniem kosmicznym.

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? Identyfikacja 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.

### 3.13. Niewidzialne, przenikliwe, niebezpieczne, korzystne

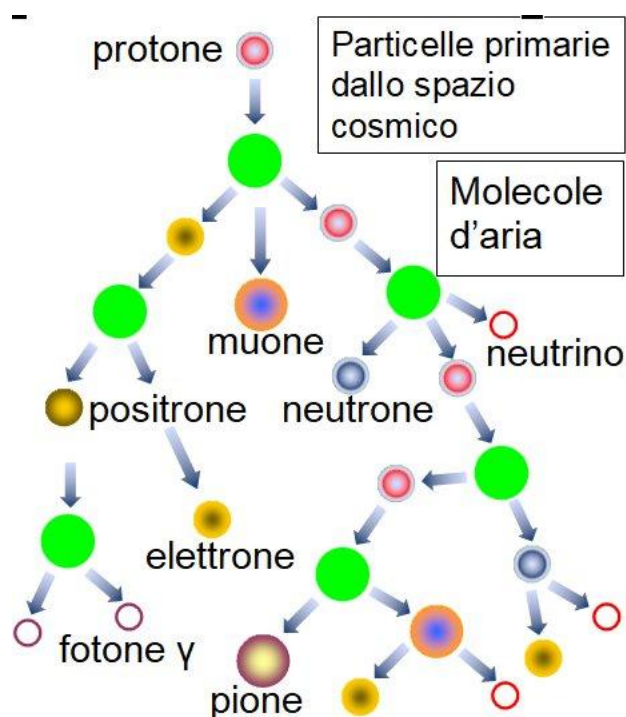
Promieniowanie jądrowe, takie jak cząstka *alfa* emitowana w reakcji (3.8), przenosi energię i z tego powodu może jonizować nie tylko atomy (rozdział 3.4), ale także bardziej złożone cząsteczki, takie jak DNA. W reakcjach jądrowych emitowane są nie tylko cząstki, ale także energia, w postaci fal elektromagnetycznych. 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 radonowy, który powstaje w rozpadzie uranu (dlatego pochodzi 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 zakłócające jest stosowane w leczeniu raka. W zależności od charakteru nowotworu, który ma zostać zniszczony, mogą być użyte protony, czyli ciężkie części 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 słynnym wzorem  $E = mc^2$ .



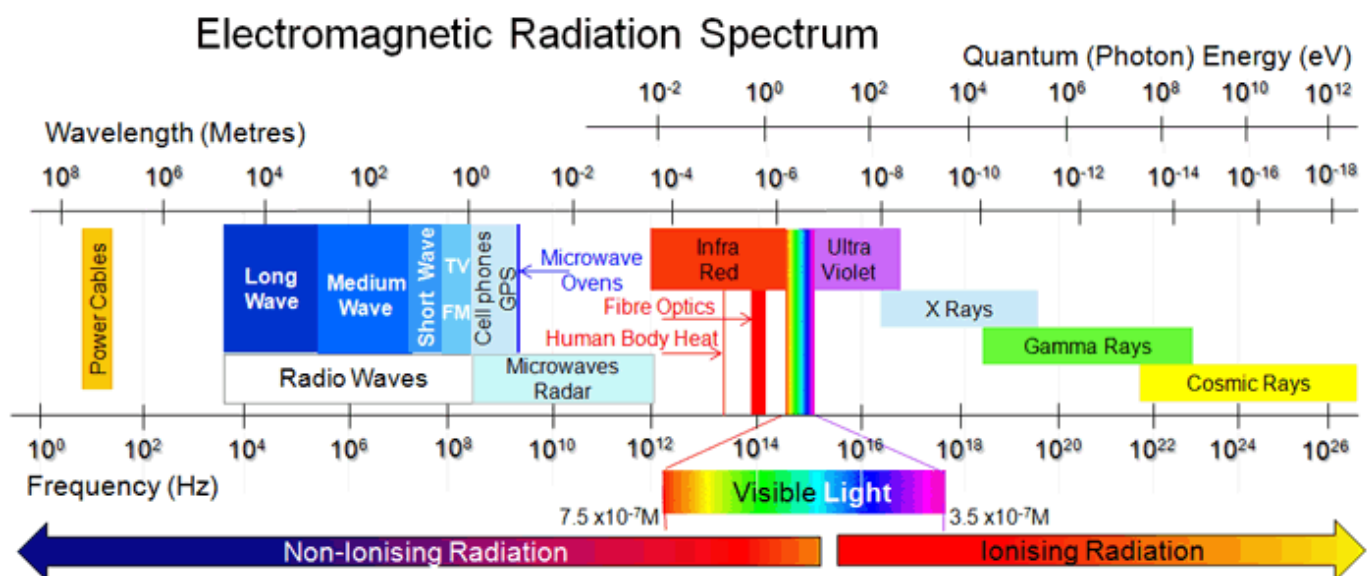
**Ryc. 3.16.** "Deszcz" cząstek elementarnych (elektronów, pozytonów, mionów, neutronów) jest generowany przez wysokoenergetyczny proton pochodzący z promieniowania kosmicznego. Wszystkie te cząstki, włączając promieniowanie *gamma*, mogą powodować uszkodzenie struktury DNA, wywołując w ten sposób mutacje. 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 ( $\mu\text{m}$ ) koloru czerwonego do 0,380  $\mu\text{m}$  światła fioletowego, poprzez światło ultrafioletowe, które jest już niebezpieczne dla DNA, promieniowanie rentgenowskie (około 1  $\text{\AA}$ , tj. 0,0001  $\mu\text{m}$ ) do promieni *gamma*. Trudno jest ustalić dolną i górną granicę dla tych długości fal.<sup>23</sup>

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

Bez wątplenia 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. Ale najpierw kończymy opis *zoo* cząstek elementarnych.

<sup>23</sup> 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 małej w porównaniu z innym), rozpad beta (3.6) wymaga przemiany. Odkryto również, że oprócz rozpadów beta, w których neutron wydaje się transmutować w proton plus elektron, jak w potasie  $^{40}\text{K}$  (w naszej krwi), istnieją jądra, które rozpadają się w odwrotny sposób: proton zamienia się w neutron i pozyton). W ten sposób dawne przekonanie „składać się z” nie ma już zastosowania. Nawet jeśli neutron jest nieco cięższy od protonu, suma mas produktów rozpadu nie odpowiada masie pierwotnej cząstki<sup>24</sup>. Tutaj wchodzi w grę słynny wzór Einsteina na równowagę energii i masy:  $E = mc^2$ . Brakująca masa składników jest równoważona przez nadwyżkę 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-

<sup>24</sup> 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.

stabilną<sup>25</sup>; 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".<sup>26</sup> Dodatnie 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  $J/\Psi$  lub mezon  $K$ ) lub trzy kwarki (takie jak neutron, proton i ich odpowiedniki z cięższymi kwarkami).

W neutronie i protonie kwarki są związane siłami, które rosną wraz z odległością; próba rozdzielenia 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.

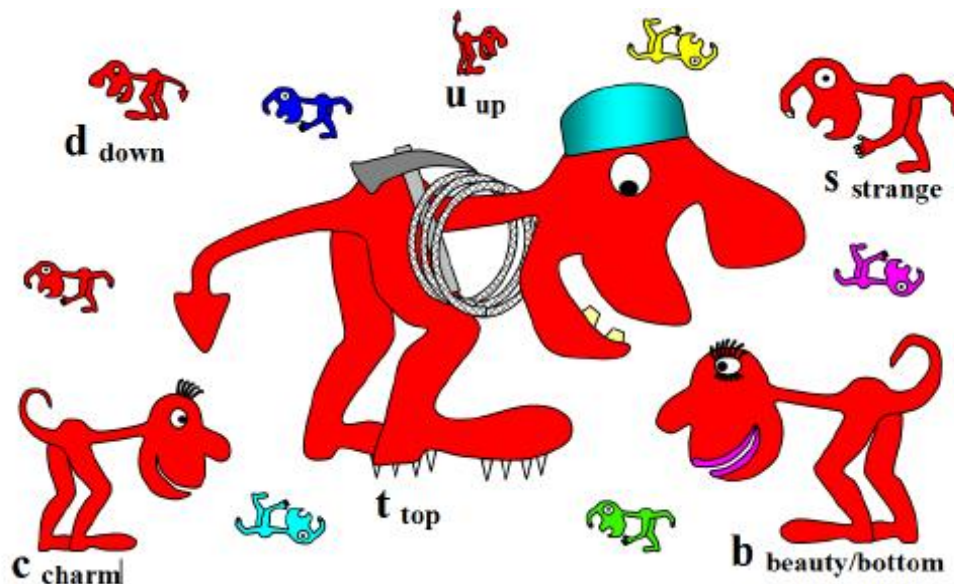
Niektóre teorie (które jednak nie mają eksperymentalnej weryfikacji) przewidują, że w bardzo wysokich temperaturach ( $10^{14}$  K) protony, neutrony i mezony mogą "rozpuszczać się" w plazmie lub w "zupie" wolnych kwarków. Bez wątplenia te formy materii byłyby bardzo egzotyczne, *nieuporządkowane* i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

<sup>25</sup> Czas życia protonu, oszacowany eksperymentalnie, przekracza wiek Wszechświata.

<sup>26</sup> 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 jednego z moich okazjonalnych odczytów *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 jagura. 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 dodatkowym "kolorze" (anty-kolor zieleni to magenta itp.). Za tymi prostymi wizualizacjami kryją się trudne teorie kwantowe. Źródło: Autor i T. Wróblewski

Wielkie masy kwarków dziwnych i powabnych, które odpowiadają ich wielkiej energii (ponownie według  $E = mc^2$ ), można porównać do wielkich temperatur: nie miliony, ale setki miliardów stopni. Następnie kwarki te rozpadają się na inne, lżejsze, w ciągu milionowych części sekundy. Tak więc, odtwarzając ciężkie kwarki w akceleratorach cząstek, odtworzyliśmy warunki Wszechświata w pierwszej sekundzie jego życia. Fizycy są o tym przekonani...



### 3.15. Weinberg: pierwsze trzy minuty<sup>27</sup>

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”. 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 angstroma ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ). Gdyby elektron spadł na proton, mógłby utworzyć neutron<sup>28</sup>, 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. Jakie 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.

<sup>27</sup> Dla dalszych informacji polecamy wyjątkową książkę laureata Nagrody Nobla, S. WEINBERGA, *Pierwsze trzy minuty. Fascynująca historia powstania wszechświata*. Mondadori-DeAgostini, Novara 1994; Prószyński i S-ka, Warszawa, 1998.

<sup>28</sup> 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 ich energia kinetyczna może zostać przekształcona w inne cząstki-komórki (a dokładniej w pary cząstek o przeciwnych ładunkach elektrycznych, takie jak elektron i antyelektron, czyli pozyton). Z drugiej strony, cząstki anihilują 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 stopniowo niemożliwe stało się tworzenie cząstek powyżej pewnej masy. W ten sposób protony i neutrony mogły powstać i pozostać we wzajemnej równowadze, tylko przez 0,01 sekundy po „starcie”. Od tego momentu liczba neutronów zaczęła się zmniejszać: będąc niestabilnymi z natury, rozpadły 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. Jeśli masy dwóch kwarków *górnego* i *dolnego* są podobne, trzeci kwark jest 20 razy cięższy. Jeśli masy protonu i neutronu są równe 0,1%, elektron jest 1837 razy lżejszy (i "waży"  $0,51 \text{ MeV}/c^2$ ). Neutrino, które towarzyszy elektronowi jako produkt rozpadu neutronów, ma masę kilku pojedynczych<sup>29</sup>  $\text{eV}/c^2$ . Różnice te pozwoliły pierwszym trzem minutom wszechświata iść "krokami".

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

<sup>29</sup> Masa neutrin nie jest jeszcze (w 2019 r.) dokładnie określona.

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 ( $3 \times 10^9$  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, deuteru<sup>30</sup>. Jak pisze Stephen Weinberg, od początku wszechświata minęły dokładnie trzy minuty i 46 sekund<sup>31</sup>. Skład materii został ustalony<sup>32</sup>, 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; z drugiej strony, neutrony, złożone z samych kwarków (*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: *dłaczego?*

### 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;

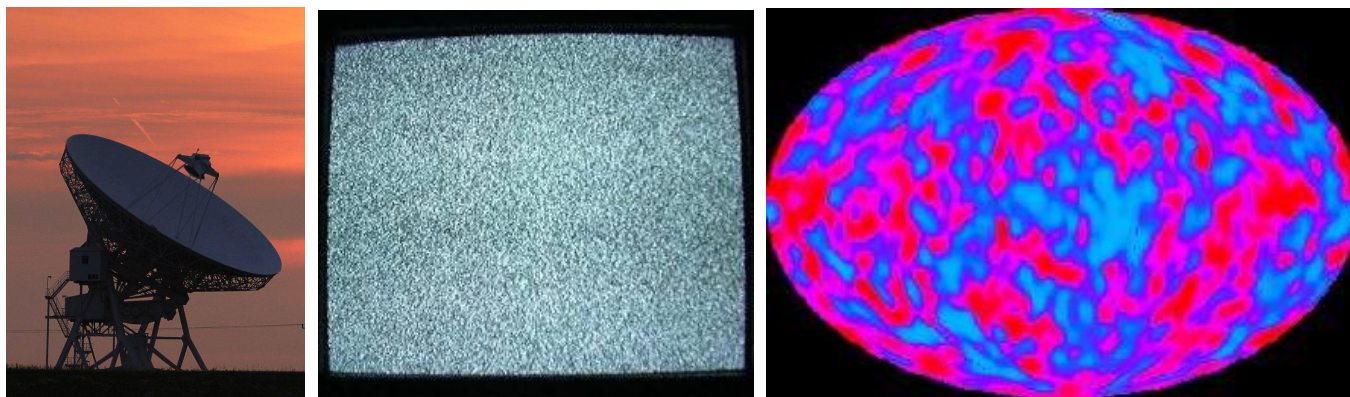
<sup>30</sup> Deuter znajduje się również w cząsteczkach wody w oceanach. Będzie on wykorzystywany do zasilania reaktorów termojądrowych przyszłości. Zasoby są wystarczające, aby zapewnić energię dla całej ludzkości na następne 3000 lat.

<sup>31</sup> S. WEINBERG, *op. cyt.*, s. 125.

<sup>32</sup> Hel stanowi 25% masy wszechświata, reszta to zasadniczo wodór.

Dokładniej, 380 tysięcy lat po jego powstaniu, szum elektromagnetyczny w częstotliwościach typowych dla kuchenek mikrofalowych (czyli także fal telewizyjnych)<sup>33</sup>.

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 przy 590 nm. Ale lampa uliczna nie działa w ten sposób: tam, gdzie w widmie powinny być dwa żółte paski obok siebie, jest duży dziura, 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.

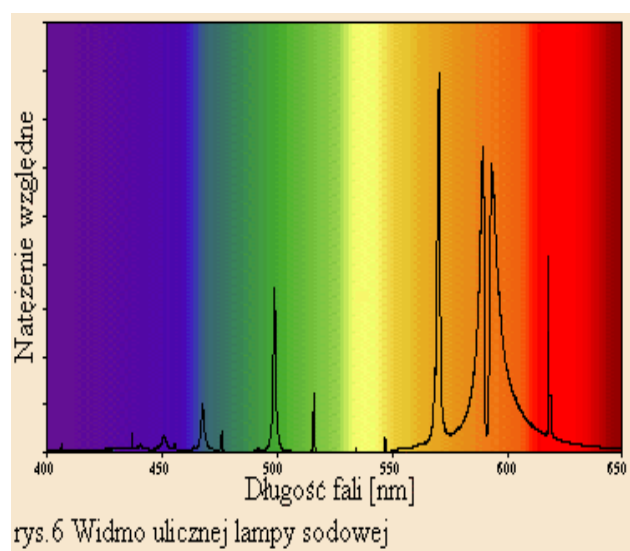
W momencie rozdzielenia światła i materii temperatura wszechświata wynosiła około 3000 K, co odpowiada dokładnie pomarańczowo-

<sup>33</sup> Ovviamente, gran parte del rumore sullo schermo proviene dai circuiti elettronici del televisore; secondo diverse stime solo il 20% di questo rumore arriva dalla radiazione cosmica.

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 domenę 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 hałas dochodzący ze wszystkich kierunków. Dziś wiemy, że to promieniowanie jest wrakiem bardzo młodego wszechświata. Istnienie tego promieniowania jest 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) pokazuje dziurę w pomarańczowej strefie koloru: opary są gęste, a następnie światło nie opuszcza pojemnika sodu (widmo GK). (b) Genialna prezentacja światła wychodzącego z ciemnego kierunku: żółty kolor odpowiada temperaturze oddzielenia materii od promieniowania elektromagnetycznego. ŹRÓDŁO: Bazylika św. Marka, Patriarchat Wenecki, 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

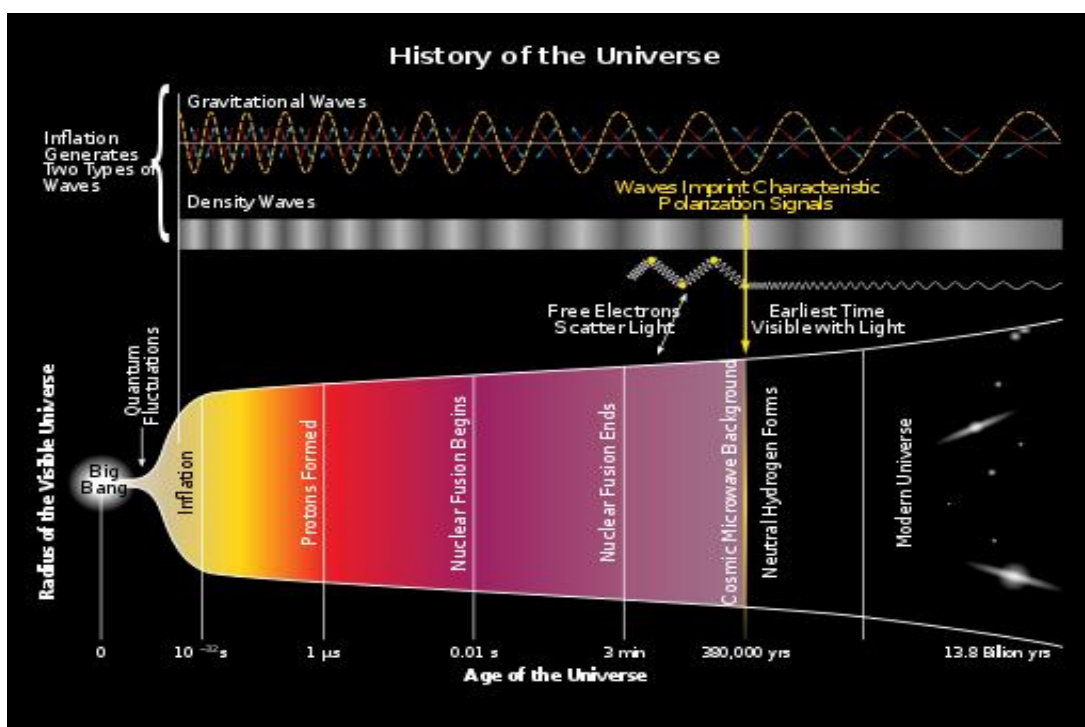
temperaturę odpowiadającą miliardom stopni. Oczywiście, jeśli chodzi o fizykę Galileusza – powtarzalne eksperymenty z poważnymi upadkami – Wielki Wybuch nie pasuje do kanonów weryfikowalnej teorii naukowej: nie możemy powtórzyć Wielkiego Wybuchu w swojej złożoności. Jednak wszyscy fizycy zgadzają się (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, jnie 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 miliony 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 współczesne, stałe *sprzężenia* (które znamy tylko z doświadczeń) musiały być bardzo precyzyjne; to samo dotyczyło mas kwarków. Aby zapobiec łączeniu się elektronów z protonami 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, pozwalając gwiazdom stopniowo się świecić.

Innymi słowy, wiele różnych *stałych* fizyki musiało mieć bardzo precyzyjne wartości, aby wszechświat mógł istnieć i ewoluować<sup>34</sup>. Allan 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*<sup>35</sup> 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 380 000 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 bilardu sekundy. Początkowa bańka, "fluktuacja kwantowa", jest czystą fantazją, bez możliwości potwierdzenia doświadczalnego. ŹRÓDŁO: Wikipedia Commons.

<sup>34</sup> 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?

<sup>35</sup> "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. CZCIONKA: [https://en.wikipedia.org/wiki/Inflation\\_\(kosmologia\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Inflation_(kosmologia))

Zwolennicy<sup>36</sup> 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 szpilki<sup>37</sup> 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 widzimy to obecnie, czyli przez 13,78 miliarda lat), które mogłyby pozwolić na taką inflację. Być może w tym czasie nie było zwykłej *fizyki*.

Ale absolutnie bardziej zaskakująca jest inna liczba:  $10^{-32}$  sekundy. Najkrótszy czas dla procesów fizycznych jakie znamy, to przeskoczenie elektronu z jednej orbity na drugą (czyli wytworzenie kwantu światła):  $10^{-18}$  s. Wartość Gutha odpowiada najkrótszemu czasowi, jaki możemy sobie wyobrazić, zbliżonemu do "czasu Plancka"<sup>38</sup> ( $10^{-43}$  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.

Bardziej rozsądne pozostaje wnioskowanie, 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 po raz pierwszy domyślił się Georges Lemaître.

<sup>36</sup> "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.» FONTE: Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Inflation\\_\(kosmologia\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Inflation_(kosmologia)).

<sup>37</sup> 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 mozaice bazyliki weneckiej.

<sup>38</sup> Tak zwany czas Plancka nie wywodzi się od niego i nie ma fizycznego znaczenia: jest po prostu stałą 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 razem ważą mniej niż Słońce (około 1/5).

Przyjaciel, profesor kosmologii, zastanawiając się, jak bardzo wszechświat napompował się w fazie "inflacji" i jakie były wymiary po tej fazie, napisał następujące równanie: nieznanym  $\times$  nieznanym = nieznanym. 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 przechodzisz od wielkości  $10^{-10}$  m do  $10^{-15}$  m. Materia złożona z neutronów jest zatem bardzo ciężka: główka szpilki z tej materii "wazy" 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 nieco ponad 4 lata świetlne od Ziemi, czyli  $4 \times 10^{14}$  km. Są też inne gwiazdy, ale zawsze kilka lat świetlnych stąd<sup>39</sup>: nawet Wszechświat jest zasadniczo pusty, nawet bardziej niż atom. Tak więc, paradoksalnie, cały wszechświat zredukowany do gwiazdy neutronowej byłby nieco większy niż nasze Słońce.

Innymi słowy, w pierwszych sekundach i do 380 tysięcy lat nie mamy bezpośrednich dowodów eksperymentalnych historii wszechświata. Możemy spekulować na temat tych wczesnych momentów, ekstrapolując eksperymenty z kwarkami wstecznymi. Masa (tj. równoważna energia) cięższych, górnych kwarków (172 GeV/c<sup>2</sup>) w przeliczeniu na temperaturę (przy użyciu równoważności  $E = kT$ ) odpowiada 2 bilionom ( $2 \times 10^{15}$ ) stopni Celsjusza. Czy jest sens mówić o temperaturze? Czy możemy zastosować te same prawa natury, które

<sup>39</sup> 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).

znamy, do tak ekstremalnych warunków? Czy w tak ekstremalnych warunkach obowiązują te same stałe fizyczne<sup>40</sup>?

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...

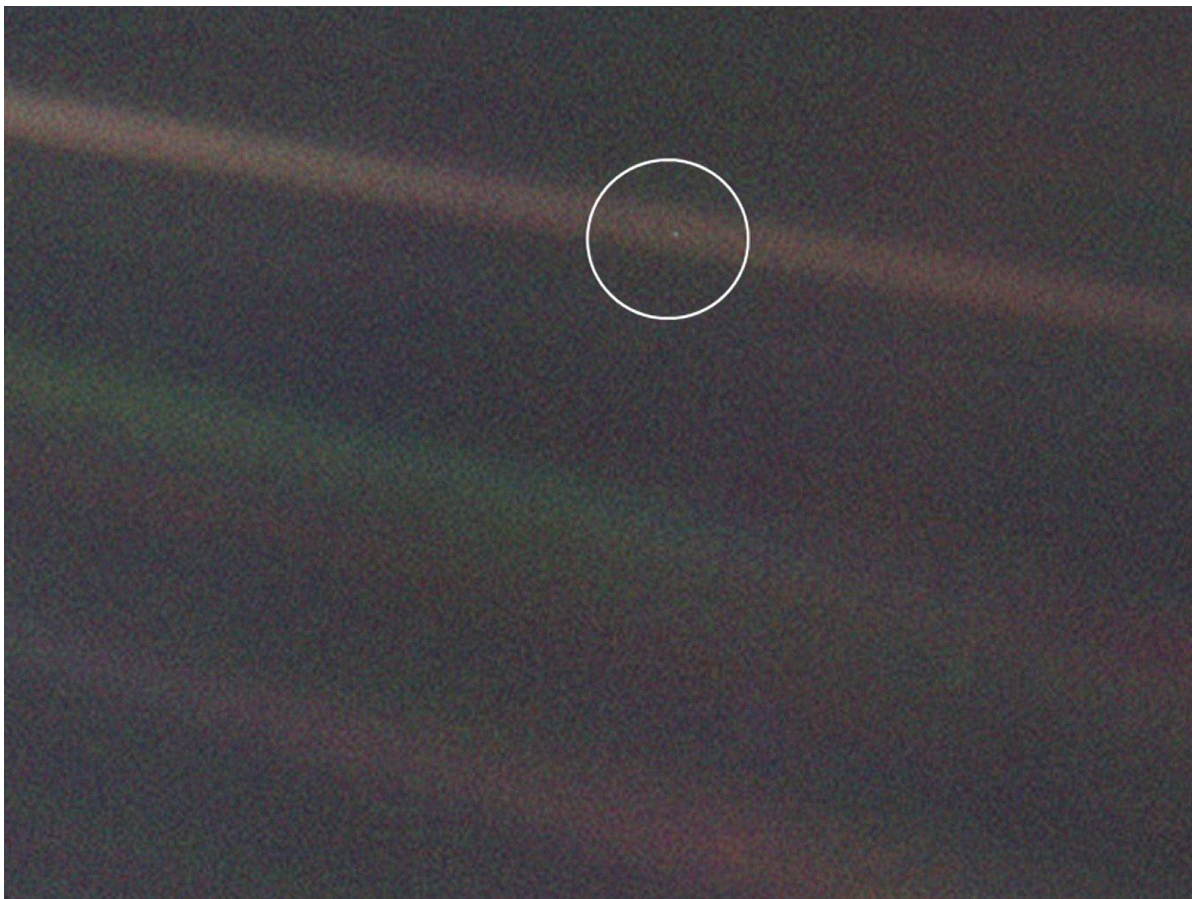
P.S. Krąży opinia, że wielu fizyków, w przeciwieństwie do niektórych innych naukowców, jest wierzących. Dlaczego? Fizycy wiedzą, że wszechświatem rządzą prawa matematyczne i rozumieją, że nic nie dzieje się przypadkowo. Wiedzą również, że prawa fizyki są bardzo złożone (co znajduje odzwierciedlenie w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

<sup>40</sup>Dyskusja o stałych Natury została poświęcona omówieniu stałych fizyki przez słynnego fizyka teoretycznego z Cambridge, JOHN 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, *dłaczego* świat został stworzony takim, jaki jest.

Sokrates powiedział<sup>41</sup>:

Oczywiście jestem mądrzejszy od tego człowieka, nawet jeśli prawdopodobnie obaj nic nie wiemy; Tyle tylko, że on myśli, że nic nie wie i nic nie wie, a ja, jeśli nic nie wiem, to przynajmniej jestem przekonany, dlatego trochę więcej o nim wiem, choćby dlatego, że to, czego nie wiem, to nawet nie sądzę, 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.

<sup>41</sup> PLATON, Apologia Sokratesa, rozdz. 6, <https://it.wikiquote.org/wiki/Socrate>.