

Grzegorz P. Karwasz

Nauka i wiara

Krótki podręcznik

Nauka i Wiara. Krótki podręcznik

(C) Grzegorz P. Karwasz

Tłumaczenie z języka włoskiego: G. Karwasz

Okładka: Monika Pest

Zdjęcie na okładce: Ostatnie Wieczera, witraż w kościele pw. Najświętszego Serca Jezusa Chrystusa w Rypinie, foto Maria Karwasz

Materiał dydaktyczny do użytku wewnętrznego

Druk: Drukarnia Cyfrowa Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

Trento - Toruń, Listopad 2023

P R E P R I N T

*Wersję polską dedykuję
mojemu Aniołowi Stróżowi (MW)*

Stworzył więc Bóg człowieka na swój obraz; na obraz Boży go stworzył: stworzył mężczyznę i niewiastę.

Ks. Rodzaju 1:27

Spis treści

- 11 *Przedmowa*
- 13 *Przedmowa do pre-printu 2023*
- 15 **Rozdział I**
Filozofia i Pismo
 1.1. Wstęp, 15 – 1.1.1. *Ci wspaniali naukowcy, co wiedzą wszystko*, 15 – 1.2. Stworzenie czy Big Bang?, 16 – 1.3. "In principio", 18 – Spróbujmy skonstruować świat, 20 – Wszechświat wieczny?, 22.
- 27 **Rozdział II**
Fizyka i kosmologia
 2.1. "Zasady" fizyki, 27 – 2.2. Zasady zachowania, 2.2.1. „Zasady” fizyki” 29 – 2.3. Dwa paradoksy nieba, 32 – 2.4. Einstein i teoria względności, 34 – 2.5. Swobodnie spadająca winda w swobodnym spadku, 37 – 2.6. Planck: Jakiego koloru jest Słońce?, 40 – 2.7. Arystoteles: Życie gwiazd, 43 – 2.8. Ucieczka galaktyk, 45 – 2.9. Supernowe, 47 – 2.10. Palec Boży, 51 – 2.11. Nasze kosmologiczne granice, 53, – 2.11.1. *Strach przed czarną dziurą*, 54.
- 57 **Rozdział III**
Nieskończenie mały
 3.1. Człowiek: wymiar pośredni, 47 – 3.2. A-tomos, czyli in-dywiduum, 58 – 3.3. Efluidy, czyli fotony, 60 – 3.4. Dlaczego widzimy kolory?, 63 – 3.5. Atomy z haczykami, 65 – 3.6. Dlaczego istnieje chemia?, 68 – 3.7. Bohr: prawie pusty atom, 71 – 3.8. Schrödinger: funkcja falowa, 73 – 3.9 Heisenberg: pewność niepewności, 76 – 3.9.1. *Kryptografia kwantowa* – 78, 3.10 Skłodowska-Curie: dzielenie niepodzielnego, 78 – 3.11. Energia gwiazd, 80 – 3.12. Cząstki "elementarne", 82 – 3.13. Niewidzialne, przenikliwe, niebezpieczne, dobroczynne, 84 – 3.14. Gell-Mann: kwarki, 86 – 3.15. Weinberg: pierwsze trzy minuty, 89 – 3.16. Czarno-biały telewizor, 91 – 3.17. W mgnieniu oka 93 – 3.18. Ponowne przeliczenie wymiarów, 97.
- 101 **Rozdział IV**
„I nazwał powierzchnię suchą: Ziemią”
 4.1. „Dzień trzeci”, 101 – 4.2. Planetka na peryferiach, 103 – 4.3. Skąd się biorą rosy roku? , 104 – 4.4. Satelita, czyli towarzysz, 106 – 4.5. Bacon: Wielkanoc zbyt

wcześniej, 108 – 4.6. Dlaczego zdarzają się trzęsienia ziemi?, 110 – 4.7. Dlaczego nie ma życia na Marsie? 112 – 4.8. Serce z żelaza, 114 – 4.9. Planeta reguluje się sama, 116 – 4.10. Ziemia dla Człowieka, 118 – 4.11. Życie poza Ziemią?, 120.

123 Rozdział V

„*Mnogość żywych istot*”

5.1. Od nieorganicznych do organicznych, 123 – 5.2. Od prostego do złożonego: szlak termodynamiczny?, 125 – 5.3. Pierwotny rosół, 127 – 5.4. Życie z komet?, 128 – 5.5. Na bardzo gorącej Ziemi, 130 – 5.6. Zielona planeta, 133 – 5.7. W głębinach oceanów, 134 – 5.8. DNA – nieco twarde, nieco miękkie, 136 – 5.9. Geny – nieco kombinatoryki, 138 – 5.10. Idealny kod?, 140 – 5.11. Dziesięć wynalazków życia, 141 – 5.12. Po co ta cała rozrzutność?, 145 – 5.13. Ślepa ewolucja?, 146 – 5.14. Czy możemy zbudować sztuczne życie?, 149.

151 Rozdział VI

„*Stworzył mężczyznę i niewiastę*”

6.1. Czy człowiek pochodzi od małpy?, 151 – 6.2. Mocno rozgałęzione drzewo, 153 – Na dwóch nogach, 155 – 6.4 *Homo erectus*: wielki wędrowiec, 156 – 6.5. Wynalazek ognia, 159 – 6.6. Sami na szczycie, 161 – 6.7. Mitochondrialna Ewa, 163 – 6.8. Jeden, wspólny Adam, 166 – 6.9. Samoświadomość, 168 – 6.10. Kultura: decydujące doświadczenie, 172 – 6.11. Wieża Babel: rzeczywistość językowa, 178, – 6.12. Narodziny nauki, 179 – 6.13. Nieśmiertelna dusza, 183 – 6.14. Ani anioł, ani bestia, 186 – 6.15 Świat pełen aniołów, 189 – 6.16. Od jednego tchnienia, 190 – 6.17. Ręką Boga, 192 – 6.18. Mówią, że zmartwychwstał, 192 – 6.19. Dwa światy, 196.

197 Rozdział VII

Świadectwa

7.1. Nauki humanistyczne i nauki ścisłe, 197 – 7.2. Platon: nieśmiertelna dusza, 199 – 7.3 Arystoteles: cztery przyczyny, 201 – 7.4. Św. Tomasz i materia, 203 – 7.5. Kopernik: znajdują się głupcy, 207 – 7.6. Galileo: metoda naukowa, 210 – 7.7. Kartezjusz: sensus communis, 213 – 7.8. Pascal: ogromny świat, 215 – 7.9. Newton: Bóg wszechmogący i wszechwiedzący, 217 – 7.10. Laplace: Bóg zegarmistrz świata?, 222 – 7.11. Kant: gwiaździste niebo, 223 – 7.12. Brakująca część, 226 – 7.13. Darwin: dech życia, 227 – 7.14. Einstein: najtrudniejsza rzecz, 229 – 7.15 Planck: Świat bez religii byłby końcem, 231 – 7.15. Barrow & Tipler: Zasada antropiczna, 234 – 7.17. Davies: Bóg i nowa fizyka, 238 – 7.18. Messori: Kilka powodów, by wierzyć, 234 – 7.19. Oddzielenie ziaren od plew, 244 – 7.10 Subtelny jest Pan, 249.

251 Rozdział VIII

Czytamy ponownie

8.1. „Szalejący wiatr”, 251 – 8.2. „I oddzielił światło od ciemności”, 253 – 8.3. „Wszystko, co żyje i lata”, 255 – 8.4. „Żywa istota”, 257 – 8.5. Drzewo wiedzy, 259 – 8.. Emanuel, czyli Bóg wśród nas, 261.

263 Rozdział IX

Podsumowanie

9.1. O ciągłym przesuwaniu się granic, 263 – 9.2. Dlaczego Bóg nie zrobił wszystkiego jednym kliknięciem?, 266 – 9.3. Na początku było Logos, 267 – 9.4. Pięć „dowodów” na istnienie Boga, 268 – 9.5. Czy wiemy już wszystko?, 269 – 9.6. Św. Jan Paweł II: dwa skrzydła, 271 – 9.7. Streszczenie, 274.

277 Rozdział X

Dziesięć pytań

Dziesięć pytań, 277 – Ringraziamenti, 279.

281 *Bibliografia*

Przedmowa

Dwa światy kulturowe, humanistyczny i naukowy, zdają się żyć odrębnymi życiami: fizycy z lekceważeniem wyrażają się o Arystotelesie, a filozofowie używają Heisenberga do popierania swoich bardzo ryzykownych tez. To wiek dziewiętnasty, wraz z szeregiem ideologii ateistycznych, zadekretował rozłam między wiarą a naukami przyrodniczymi. Poszukiwanie boskiego umysłu w przyrodzie wydaje się kłócić naukowym rygiorem.

Jako rodzaj antidotum często cytuje się naukowców, którzy wierzą, "pomimo tego, że są racjonalni". W tej książce pokazujemy, że zgodność między wiarą a myślą naukową nie jest opinią subiektywną, obejmującą tylko pojedynczych naukowców, ale obiektywną – dotyczącą całych gałęzi nauk przyrodniczych.

Tomasz z Akwinu, doktor Kościoła katolickiego, rozpoczyna swój traktat "Summa Theologica" od pięciu "sposobów" rozumowania na temat istnienia Boga. Cztery z nich opierają się na metafizyce – dedukcji pierwszego, przyczynowego, istotnego, nadrzędnego Bytu. Piąta droga opiera się na istnieniu natury i porządku w niej, a raczej na ukrytym celu tego naturalnego porządku¹:

Piąta droga wywodzi się z rządzenia rzeczami. Widzimy, że niektóre rzeczy pozbawione poznania, a mianowicie ciała fizyczne, dążą do celu, jak to wynika z faktu, że zawsze lub prawie zawsze działają w ten sam sposób, aby osiągnąć doskonałość, stąd też wynika, że osiągają swój cel nie przez przypadek, lecz przez predyspozycje. Otóż to, co jest pozbawione rozumu, nie dąży do celu, chyba że jest kierowane przez istotę wiedzącą i rozumną, jak strzała łucznika. Jest więc jakaś istota rozumna, przez którą wszystkie rzeczy naturalne są uporządkowane ku końcowi: i tę istotę nazywamy Bogiem.

Naszym celem jest poszukiwanie, krok po kroku, tego naturalnego porządku, czyli praw natury (fizyki, astronomii, chemii, biologii, genetyki, antropologii) w ich specyficznych szczegółach, aby zweryfikować, czy są one zgodne z Pismem Świętym. Podążamy tu za sło-

¹ TOMASZ Z AKWINU, *Summa Theologica*, Ia, q. 2, a. 3, co., tłum. Frati Domenicani, Edizioni Studio Domenicano, 2014, s. 48

wami Galileusza o Naturze jako najwierniejszej wykonawczyni Boskich nakazów.

Szczegółowość książki – duża liczba cytatów, odniesień bibliograficznych, ilustracji i wykresów – jest dostosowana do wskazań św. Augustyna, który napominał teologa, aby był przygotowany w rozmowie z matematykiem (czyli naukowcem) i nie był ignorantem w tematach naukowych, ponieważ jego niewiedza może ośmieszyć nie jego, ale wiarę.

Tak więc nauczyciel religii musi być nie mniej przygotowany niż profesor nauk ścisłych. Właśnie z tego powodu ta książka została napisana – dla nauczycieli i ich uczniów – czyli dla nas wszystkich – wierzących lub niewierzących.

Przedmowa do pre-printu 2023

Wydanie książki, jak to pokazuje choćby praca Kopernika (która czekała na druk prawie 40 lat), nie jest łatwym zadaniem. W temacie „Nauka i wiara”, łączącym fizykę, filozofię, sztukę – jest to zadanie wyjątkowo skomplikowane. Mamy więc świadomość, że niniejsza wersja jest daleka od doskonałości. W szczególności konieczne byłoby sięgnięcie do alternatywnych tłumaczeń tekstów filozoficznych i ich porównanie, oraz do najnowszych artykułów naukowych. Wymagałoby to sporej pracy redakcyjnej, poza samym-li tłumaczeniem.

Pilne wydanie pre-printu stało się jednak koniecznością. Włoski oryginał „Scienza e Fede”, Aracne Editrice, Roma, 2019, jest na wyczerpaniu. Książka zdobyła bardzo dobrą recenzję w prestiżowym czasopiśmie (w języku angielskim²), a sporo potencjalnych czytelników pyta o polską wersję językową. Publikujemy więc ją, tak aby była dostępna już w roku akademickim 2023/2024. Za niedoskonałości redakcyjne – przepraszam!

Autor

² Ll. Oviedo, “Grzegorz P. Karwasz, Scienza e fede”, *Reviews in Science, Religion and Theology*, 2-2 (June 2023), International Society of Science and Religion (ISSR), European Society for the Study of Science and Theology (ESSSAT), p. 53

Filozofia i Pismo

1.1. Wstęp

“Wielki Wybuch” jak twierdzą naukowcy, czy “Stworzenie”, jak mówi Biblia¹? Adam u Ewa, pierwsi rodzice rasy ludzkiej czy tylko opowieść (parabola) o znaczeniu przenośnym? Wieża Babel czy historia o źle zorganizowanej pracy, jak czytamy na jednej ze stron internetowych?

A ewolucja? Herezja czy też „już nie tylko hipoteza”, ale teoria o wszystkich cechach naukowych, jak to określił Św. Jan Paweł II²?

Sporo pytań, prostych ale „drażliwych”, które na które muszą odpowiadać nauczyciele religii, również w szkole podstawowej. Naukowcy podważyli Wiarę? Nie, absolutnie nie! Gwarantuje to Wam profesor zwyczajny fizyki doświadczalnej, kierownik Katedry Dydaktyki Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, który w latach 1985-2006 pracował na Wydziale Fizyki Uniwersytetu w Trydencie i jest ekspertem naukowym Unii Europejskiej, Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej ONZ, Republiki Korei itd.

1.1.1. *Ci wspaniali naukowcy, co wszystko wiedzą*

Nauka XX wieku dokonała nadzwyczajnych odkryć: akceleratory cząstek elementarnych odkrywają świat obiektów nieskończenie ma-

¹ Brak wspólnego języka jest poważnym problemem, przede wszystkim w edukacji. We wrześniu 2017 roku, na stronach prestiżowego amerykańskiego czasopisma naukowego «Science» No. 6354, str. 880, H.S. Silva narzekał, że w trzynastu stanach USA uczy się o “Inteligentnym Projekcie” a nie o (uproszczonej) teorii ewolucji. Autor (GK) odpowiada, że zarówno czysta teoria ewolucji jak enigmatyczny “Inteligentny Projekt” mają poważne braki koncepcyjne, zob. dyskusję w częściach końcowych tej książki i odpowiedź autora na stronie internetowej Science : <http://science.sciencemag.org/content/357/6354/880.1/tab-e-letters>.

² «Dziś, prawie pół wieku po publikacji encykliki, nowe zdobycze nauki każą nam uznać, że teoria ewolucji jest czymś więcej niż hipotezą. Zwraca uwagę fakt, że teoria ta zyskiwała coraz większe uznanie naukowców w związku z kolejnymi odkryciami dokonywanymi w różnych dziedzinach nauki. Zbieżność wyników niezależnych badań – bynajmniej nie zamierzona i nie prowokowana – sama w sobie stanowi znaczący argument na poparcie tej teorii.

JAN PAWEŁ II, *Przestanie do członków Papieskiej Akademii Nauk w związku z sesją “Powszechnie i ewolucja życia”* 22.10.1996, Dzieła Zebrane, Wydawnictwo WAM, t. V, str. 308.

łych, komunikujemy się używając niewidzialnych fal, teleskopy zagląдают do krańców wszechświata, badamy przeszłość aż do początku czasu. Wydaje się, że nasza wiedza nie ma granic, prawda?

Bynajmniej! Im więcej wiemy, tym więcej zagadek pojawia się przed oczyma. Niestety, naukowcy opowiadają zazwyczaj o swoich odkryciach, ale rzadko o wątpliwościach, które z nich wynikają. Jak mówi znany włoski fizyk jądrowy, prof. Antonino Zichichi, w książce *Dlaczego wierzę w Tego, który stworzył świat?*, uczeni pobudowali „wieże z kości słoniowej”, w której zamknęli się wraz ze swoją wiedzą. Potrzebne jest tłumaczenie, z języka naukowego na ten codzienny: zadanie skomplikowane, tak dla autora jak i czytelnika. Zaczynamy od początku, tzn. od tak zwanego „Wielkiego Wybuchu” (Big Bang po angielsku)³. Świat został stworzony, czy też jest wynikiem przypadkowego wybuchu bańki mydlanej bańki materii?

1.2. Stworzenie czy Big Bang?

O tak zwanym „Wielkim Wybuchu”, początku wszechświata, wszyscy słyszeli. Była to przeogromna eksplozja, która z objętości mniejszej niż pomarańcza wprawiła w ruch nieogarniętą przestrzeń dzisiejszych galaktyk. Buch! i powstał cały świat! Książka *Pierwsze trzy minuty* noblisty Stephena Weinberga, fizyka o agnostycznych poglądach, opowiada jak w mgnieniu oka z dziwnych form pierwotnej materii powstały elektrony⁴, protony⁵ i neutrony, które stanowią cały obecny

³ Nazwa, ironiczna, została użyta po raz pierwszy w audycji radiowej w 1949 roku przez angielskiego astronoma, Freda Hoyle’a, który nie wierzył, że wszechświat miał początek.

⁴ Elektrony to cząstki najbardziej podstawowe ze składających się na materię: każdy atom zawiera ściśle określoną ich liczbę: wodór - jeden, hel - dwa, lit - trzy itd. Według wszelkich wskazówek zarówno teoretycznych jak doświadczalnych elektrony są niepodzielne i bardzo małe (średnica rzędu 10^{-15} m). Według tych samych wskazówek elektrony nie mają wewnętrznych składników. Ładunek elektryczny elektronu jest ujemny i stanowi jednostkę podstawową: żaden mniejszy ładunek nie został nigdy wydzielony doświadczalnie. Elektrony są bardzo lekkie: odbiornik TV „starej daty”, tzn. kineskopowy, kreślił obraz przemieszczając na ekranie wiązkę elektronów odchylanych za pomocą pola magnetycznego.

⁵ Protony, o masie 1837 razy większej niż elektrony (czyli w wygodnych do użycia jednostkach $911 \text{ MeV}/c^2$), zaskakująco mają w przybliżeniu te same rozmiary, ale składają się z mniejszych cząstek, zwanych *kwarkami*. Proton składa się z dwóch kwarków zwanych „górnym” (ang. *up*) i jednego zwanego „dolnym” (*down*). Ale kwarki są lekkie, *up* i *down* około $2,5$ e $5,5 \text{ MeV}/c^2$, odpowiednio, posiadają ładunek ułamkowy ($+2/3$ e $-1/3$) i które, według wszelkich danych, są nieseparowalne. Czas życia protonu przekracza, według najnowszych eksperymentów, Wszechświata o miliard razy. Innymi słowy: protony (a także elektrony) są *trwale*.

wszczęświat (a przynajmniej tak się nam wydaje). W ciągu pierwszych trzech minut zdefiniowane zostały proporcje między wodorem a helem, dwoma najlżejszymi pierwiastkami, które znajdują się we wszystkich galaktykach.

Nauka wydaje się być w jawnej sprzeczności z biblijnym opisem *Księgi Rodzaju* (a raczej *Powstania*) – Stworzenia w ciągu siedmiu dni. Więcej, w swej całości „opowieść” biblijna wydaje się bez sensu: powstanie Słońca dopiero po niebie i wodzie? Jeden ojciec i jedna matka dla całego rodzaju ludzkiego? Technienie, które ożywiło człowieka ulepionego z gliny?

Liczne pytania, które rodzą się z odkryć nauki współczesnej i poddają w wątpliwość prawdę Wiary. Jak napisał w 1979 roku Joseph Ratzinger, wówczas kardynał, wydaje się, że w ostatnich wiekach wiara bezustannie cofa się w swych stwierdzeniach na pozycje coraz bardziej obronne tak, że za jakiś czas nie będzie już żadnych obowiązujących dogmatów Wiary⁶.

Ta książka ma na celu zatrzymać ten odwrót Wiary, ale nie jest to książka apologetyczna: jest to sprawozdanie naukowe w dziedzinie fizyki, kosmologii, genetyki, lingwistyki, które to pokazuje nie tylko sukcesy nauki ale także jej ograniczenia, gdzie nauka się zatrzymuje, pozostawiając miejsce dla Wiary. Zaczynamy od kosmologii, a raczej od filozofii, a właściwie od *Księgi Powstania*, Co mówi Biblia, a co mówią nauki (fizyka, matematyka, biologia, antropologia, itd.)?

Pytaniem podstawowym jest: Wszczęświat jest wieczny czy też miał początek? W historii uniwersytetów średniowiecznych, dyskusja na temat wieczności świata doprowadziła uczelnie takie jak Paryż czy Oxford do granic herezji⁷. Dziś nie mamy wątpliwości: Wszczęświat miał swój początek. Ale zagadnień do przedyskutowania jest wiele. Oto pierwszy rozdział *Księgi Rodzaju*.

⁶ J. RATZINGER, *Na początku Bóg stworzył... Cztery kazania o stworzeniu i upadku. Konsekwencje wiary w stworzenie*. Wyd. Salwator, Kraków, 2006.

⁷ Pytanie o wieczność świata okazało się zasadnicze zaraz u zarania współczesnej nauki. Jak tylko powstały pierwsze uniwersytety, w latach 60tych i 70tych XIII wieku, w różnych ośrodkach, włączając Paryż i Oxford, podjęto intelektualną debatę, z której wynikało, że świat jest wieczny, czyli nie został stworzony. Był to skutek przyswojenia w Europie Zachodniej dzieł Arystotelesa (za pośrednictwem świata arabskiego), ale nie zostało one dostatecznie dołądnie przeczytane. Biskup Paryża Étienne Tempiere potępił w 1277 roku 210 tez, które zostały uznane za hereetyckie. Dla określenia pozycji Kościoła zasadnicze znaczenie miały wypowiedzi Św. Tomasza i Św. Bonawentury, zob. np. PAOLA BERNARDINI, *Eternità del mondo*, Università di Siena, 2007.

1.3. “In principio”⁸

1 Na początku Bóg stworzył niebo i ziemię. **2** Ziemia zaś była bezładem i pustkowiem: ciemność była nad powierzchnią bezmiaru wód, i wichur potężny wiatr⁹ nad wodami.

3 Wtedy Bóg rzekł: «Niechaj się stanie światłość!» I stała się światłość. **4** Bóg widząc, że światłość jest dobra, oddzielił ją od ciemności. **5** I nazwał Bóg światłość dniem, a ciemność nazwał nocą. I tak upłynął wieczór i poranek - dzień pierwszy.

6 A potem Bóg rzekł: «Niechaj powstanie sklepienie w środku wód i niechaj ono oddzieli wody od drugich!» **7** Uczyniwszy to sklepienie, Bóg oddzielił wody pod sklepieniem od wód ponad sklepieniem; a gdy tak się stało,

8 Bóg nazwał to sklepienie niebem. I tak upłynął wieczór i poranek - dzień drugi.

9 A potem Bóg rzekł: «Niechaj zbiorą się wody spod nieba w jedno miejsce i niech się ukazuje powierzchnia sucha!» A gdy tak się stało, **10** Bóg nazwał tę suchą powierzchnię ziemią, a zbiorowisko wód nazwał morzem. Bóg widząc, że były dobre,

11 rzekł: «Niechaj ziemia wyda rośliny zielone: trawy dające nasiona, drzewa owocowe rodzące na ziemi według swego gatunku owoce, w których są nasiona». I stało się tak.

12 Ziemia wydała rośliny zielone: trawę dającą nasienie według swego gatunku i drzewa rodzące owoce, w których było nasienie według ich gatunków. A Bóg widział, że były dobre.

13 I tak upłynął wieczór i poranek - dzień trzeci.

14 A potem Bóg rzekł: «Niechaj powstaną ciała niebieskie, świecące na sklepieniu nieba, aby oddzielały dzień od nocy, aby wyznaczały pory roku, dni i lata; **15** aby były ciałami jaśniejącymi na sklepieniu nieba i aby świeciły nad ziemią». I stało się tak.

16 Bóg uczynił dwa duże ciała jaśniejące: większe, aby rządziło dniem, i mniejsze, aby rządziło nocą, oraz gwiazdy. **17** I umieścił je Bóg na sklepieniu nieba, aby świeciły nad ziemią; **18** aby rządziły dniem i nocą i oddzielały światłość od ciemności. A widział Bóg, że były dobre.

⁸ Używamy włoskiego określenia “In principio”, które ma podwójne znaczenie: “na początku” albo też “w zasadzie”. Od “Na początku” zaczyna się Biblia we wszystkich językach.

⁹ W cytowanym tu tłumaczeniu mamy “a Duch Boży unosił się” ale przypis w tym miejscu zaezwala na inne możliwe interpretacje: wiatr, tchnienie. *Pallottinum. Biblia Tysiąclecia*. <https://biblia.deon.pl/rozdzial.php?id=1>, Por. też *Pismo Święte*, Pallottinum, wyd. III poprawione, Poznań - Warszawa, 1980

19 I tak upłynął wieczór i poranek - dzień czwarty.

20 Potem Bóg rzekł: «Niechaj się zaroją wody od roju istot żywych, a ptactwo niechaj lata nad ziemią, pod sklepieniem nieba!» **21** Tak stworzył Bóg wielkie potwory morskie i wszelkiego rodzaju pływające istoty żywe, którymi zaroily się wody, oraz wszelkie ptactwo skrzydlate różnego rodzaju. Bóg widząc, że były dobre,

22 pobłogosławił je tymi słowami: «Bądźcie płodne i mnożcie się, abyście zapełniały wody morskie, a ptactwo niechaj się rozmnaża na ziemi».

23 I tak upłynął wieczór i poranek - dzień piąty.

24 Potem Bóg rzekł: «Niechaj ziemia wyda istoty żywe różnego rodzaju: bydło, zwierzęta pełzające i dzikie zwierzęta według ich rodzajów!» I stało się tak.

25 Bóg uczynił różne rodzaje dzikich zwierząt, była i wszelkich zwierząt pełzających po ziemi. I widział Bóg, że były dobre.

26 A wreszcie rzekł Bóg: «Uczyńmy człowieka na Nasz obraz, podobnego Nam. Niech panuje nad rybami morskimi, nad ptactwem powietrznym, nad bydlęm, nad ziemią i nad wszystkimi zwierzętami pełzającymi po ziemi!»

27 Stworzył więc Bóg człowieka na swój obraz, na obraz Boży go stworzył: stworzył mężczyznę i niewiastę.

28 Po czym Bóg im błogosławił, mówiąc do nich: «Bądźcie płodni i rozmnażajcie się, abyście zaludnili ziemię i uczynili ją sobie poddaną; abyście panowali nad rybami morskimi, nad ptactwem powietrznym i nad wszystkimi zwierzętami pełzającymi po ziemi».

29 I rzekł Bóg: «Oto wam daję wszelką roślinę przynoszącą ziarno po całej ziemi i wszelkie drzewo, którego owoc ma w sobie nasienie: dla was będą one pokarmem.

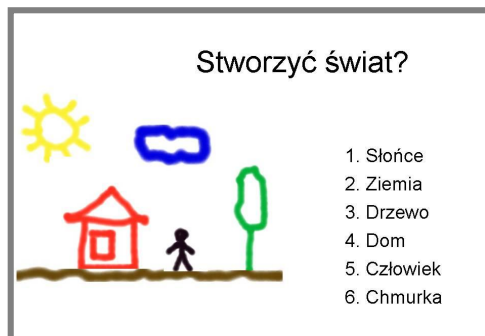
30 A dla wszelkiego zwierzęcia polnego i dla wszelkiego ptactwa w powietrzu, i dla wszystkiego, co się porusza po ziemi i ma w sobie pierwiastek życia, będzie pokarmem wszelka trawa zielona». I stało się tak.

31 A Bóg widział, że wszystko, co uczynił, było bardzo dobre. I tak upłynął wieczór i poranek - dzień szósty.

1.4. Spróbujmy skonstruować świat

Nawet uznane wydawnictwa, jak Pallottinum w Polsce, określają *Księgę Rodzaju* jako rodzaj obrazowej opowieści, niezupełnie do przyjęcia na serio. Sugeruje się, aby interpretować narrację biblijną w kontekście teologicznym, jako uzasadnienie niedzielnego odpoczynku, a w całości uważać ją za mocno odległą od prawdziwej historii świata i powstania życia w nim. I rzeczywiście, „ziemia”, która zostaje stworzona przed Słońcem i wody oddzielone (nie wiadomo od czego), wydają się bezsensowne.

Jak powinna wyglądać opowieść *Księgi Rodzaju* według „potocznego” rozumowania. Innymi słowy: spróbujmy się zastanowić, jak *powinien* zostać stworzony Wszechświat. Uczynimy to w sposób interaktywny, z pomocą rysunków. Co powinniśmy narysować jako pierwsze? Oczywiście Słońce: bez Słońca nie ma życia. A później? Później ziemia, na której rośnie drzewo, później dom (a raczej jaskinia). A na końcu człowiek. Tak, jak to żartobliwie pokazujemy na rysunku poniżej¹⁰.



Ryc. 1.1. Żart intelektualny: jak zaprojektować Świat? Sekwencja, którą proponują wszyscy, niezależnie od języka, wieku i wykształcenia jest zawsze ta sama: najpierw Słońce i ziemia, jak sugeruje „zdrowy rozsądek”, a nie wodór i gwiazdy, jak mówi fizyka. Źródło: Autor

Aby zrozumieć jak wyglądał początek świata według współczesnej nauki, musimy wcześniej przyswoić pewne *zasady* fizyki, chemii, kosmologii. Nie chcemy udawać „ekspertów”, ale pamiętajmy, że pytania o wszechświat stanowią część kultury człowieka w szerokim znaczeniu: od filozofii (metafizyki) do teologii, od sztuk pięknych do literatury, i do astro-fizyki. To samo pytanie stawiano i odpowiadano na nie w różnych sposób w całej historii naszej kultury. Poniżej przed-

¹⁰ Ta sekwencja była eksperymentowana przez autora na licznych wykładach interaktywnych, w kraju i zagranicą, dla dzieci, studentów, dorosłych: zawsze jest ona taka sama. Tak mówi „zdrowy rozsądek”. Aha! Zapomnieliśmy o chmurce, czyli o wodzie.

stawiamy dwa obrazy Pana Boga stwórcy: jeden z nich, mniej znany, z normañskiej Katedry w Monreale na Sycylii, i drugi - dobrze zadowolony w naszej świadomości, renesansowy, z Kapeli Sykstyńskiej.



Ryc. 1.2. Dwa obrazy stworzenia świata: z mozaiki a Katedrze w Montreale na Sycylii, Pan Bóg młody i uśmiechnięty, trzymając w ręce rysunek techniczny kształtuje Słońce i planety. Ta mniejsza, niebieska, przypomina Wenus na współczesnych zdjęciach z NASA, ta czerwona – na orbicie dalszej –

Mars. Drugi obraz, Michała Anioła Buonarottiego, dobrze znamy: to Pan Bóg jak Zeus, rzucający piorunami. ŹRÓDŁO: Duomo Monreale, Foto © Ulrtreya, Milano; Cappella Sistina, Foto © Musei Vaticani, za uprzejmą zgodą.

1.5. Wszechświat wieczny?

Pierwsze pytanie, na które musimy odpowiedzieć, to jest, co mówi nauka na temat początku i wieku Wszechświata. Problem jest tak stary jak myśl człowieka. Nasi przodkowie patrzyli w niebo, z podziwem dla niezmienności cykli gwiazd, noc po nocy, a po roku podobne powtarzanie się pór roku. Tak piramidy Egipcjan jak inne konstrukcje megalityczne w rodzaju Stonehenge w Anglii i Mnajdra na Malcie, opierały się na cyklach słonecznych¹¹.

Dziś wiemy, że Wszechświat się rozszerza: ekstrapolując to rozszerzanie się w przeszłość, dochodzimy do wieku 13,78 miliarda lat. Ale nauka pokonała długą drogę przed zdobyciem tej pewności. Już dwaj najwięksi z greckich filozofów, Platon i Arystoteles dyskutowali na temat początku wszechświata¹². Platon wnioskował o istnieniu „twórcy wszechświata”.

Więc mówmy, z jakiego powodu organizator zorganizował wszystko, co powstaje, i ten wszechświat. Dobry był. A dobry nie ma w sobie żadnej zazdrości o nic. I on był od niej wolny, więc chciał, żeby się wszystko stawało jak najbardziej podobne do niego. Kto by się najbardziej skłaniał przyjąć taki początek powstawania i wszechświata, zgodnie z przeważającym zdaniem ludzi rozumnych, czyniłby założenie najśluszniesze.

Bóg chciał, żeby wszystko było dobre, a lichego żeby nie było nic, ile możliwości, więc wziął wszechświat cały widzialny, który nie miał spokoju, tylko się poruszał byle jak i bez porządku, wyprowadził go z chaosu i doprowadził do ładu, uważając, że to ze wszech miar lepsze niż tamto. Nie było racji i nie ma, żeby ktoś najlepszy robił coś innego, jak tylko to, co najpiękniejsze. Obrachował więc sobie i znalazł, że spośród rzeczy z natury swej widzialnych żadne dzieło nierozumne nie będzie nigdy jako całość piękniejsze od dzieła rozumnego jako całości, a nie może mieć rozumu nic, co nie ma duszy. Zważywszy to

¹¹ Megalityczne bloki w Stonehenge w Anglii są umieszczone w taki sposób, że w dniu letniego przesilenia (22 czerwca) Słońce wschodzi między dwoma blokami stanowiącymi „celownik”. W piramidzie Cheopsa kanał prowadzący z komory grobowej faraona w górę, celował w gwiazdę polarną. Z powodu precesji osi Ziemi nie jest to już, po 5 tysiącach lat, ta sama gwiazda.

¹² Ważny czytelnik zauważy, że czasem piszemy Wszechświat z dużej litery, czasem z małej. Język włoski rozróżnia *l'Universo*, czyli *ten* Wszechświat od *un'universo*, czyli jakiś wszechświat. Jak Galaktyka jest naszą, własną Drogą Mleczną a galaktyk, z małej litery „g” jest 10 miliardów albo i więcej, tak Wszechświat jest jeden, jedyny, mimo że wszechświatów w pomysłach fizyków i filozofów może być dużo i różnych.

sobie, złożył rozum w duszy, a duszę w ciele i w ten sposób wszystko zmajstrował, aby wszechświat (*κόσμον*) był jak najpiękniejszy w swej naturze.¹³

Arystoteles, klasyfikowany zazwyczaj jako filozof „materialista”, w przeciwieństwie do Platona „idealisty”, utrzymywał, że wszechświata i czas są wieczne. Ten wniosek wyciągał z obserwacji pozornie wiecznych ruchów Słońca i planet.¹⁴ Ten sam Arystoteles obserwował jednak, że w „ziemskiej” fizyce ruch nie jest wieczny: ciało przekazuje „ruch” innemu, strzała leci, gdyż jest popychana przez powietrze, które się za nią zamyka. W konkluzji stwierdzał, że musiała istnieć *pierwsza przyczyna* ruchu. W *Metafizyce* Arystoteles pisał wręcz o Pierwszym bycie, czyli pierwszym motorem.

Pierwsza zasada albo byt pierwotny nie porusza się ani sama przez się, ani akcydentalnie, ale powoduje pierwotny, wieczny i jeden ruch. Ale skoro to, co się porusza, musi być poruszane przez coś, a pierwszy poruszenie musi być ze swej natury nieruchomy, zaś wieczny ruch musi być powodowany przez coś wiecznego, a ruch prosty przez coś prostego; i ponieważ widzimy, że oprócz prostego ruchu przestrzennego świata, który, jak twierdzimy, powoduje pierwsza i nieruchoma substancja, istnieją inne ruchy przestrzenne, mianowicie ruchy planet, które są wieczne (bo ciało, które się porusza ruchem kołowym jest wieczne i niezdolne do spoczynku, co wykazane zostało w naszych traktatach fizycznych, każdy z tych ruchów musi być również wywołany przez substancję nieruchomą ze swej istoty i wieczną.¹⁵

¹³ PLATON, *Timajos*, 29d-30c, Tower Press, Gdańsk, 2000, str. 187, <http://www.pistis.pl/biblioteka/Platon%20-%20Dialogi.pdf>.

¹⁴ Arystoteles, rozważał (oczywiście) model taki, jaki wynika z obserwacji bezpośrednich na Ziemi, czyli model geocentryczny. Ale był świadomy komplikacji w ruchu planet, jakich ten model wymagał. Pisał o 55 poruszających się sferach [tłumaczenie w toku] «Jest jednak rzeczą konieczną, jeżeli wszystkie połączone sfery mają wyjaśniać obserwowane zjawiska, ażeby każda planeta miała inną sferą (o jedną mniej iż dotąd się im przyznawało), które by krążyły w kierunku odwrotnym i sprowadzały do tej samej pozycja najdalszą sferą gwiazdy, która w każdym przypadku jest usytuowana poniżej danej gwiazdy. Tylko w ten sposób wszystkie działając siły mogą wywołać ruch planet. Ponieważ sfer, w których się poruszają same planety, jest osiem dla Saturna i Jowisza, a dwadzieścia pięć dla pozostałych i skoro z tych sfer tylko te nie wymagają ruchu w kierunku przeciwny, w których porusza się planeta najniżej ze wszystkich usytuowana, wobec tego dla dwóch pierwszych planet będzie sześć sfer poruszających się w kierunku odwrotnym i szesnaście dla czterech planet pozostałych. Ogółem sfer o ruchu prostym i o ruchu przeciwnym będzie pięćdziesiąt pięć.» Arystoteles, *Metafizyka* 1074 a1-12, tłum. Kazimierz Leśniak, w: Arystoteles, *Dzieła Wszystkie*, tom 2, PWN Warszawa, 2003, str. 817.

¹⁵ Ivi, 1073 a27-34, str. 815.

Również w *Fizyce* (VIII, 259a) Arystoteles podejmował dyskusję na temat przyczyny pierwszej ruchu, która musiała być jedna i wieczna. Mimo, że Filozof nie przyjmował początku czasu (i wszechświata), jego rozumowania w kwestii ruchu i kwestiach bytów w ogólności, prowadziły go do wniosków bardzo *teologicznych*¹⁶: musi istnieć byt Pierwszy, najważniejszy, najwyższy i wieczny. Pisał w *Metafizyce*:

Pierwszy Poruszyciel jest więc bytem koniecznym; o ile jest bytem koniecznym, jego sposobem istnienia jest Dobro, i w tym sensie jest pierwszą Zasadą [wł. Principio¹⁷]. (...) Od takiej to Zasady zależne jest niebo i cała natura. Życie Jej jest najwyższą doskonałością, jaką my się cieszymy przez krótki tylko okres naszego życia. Jej bowiem życia jest wieczne, ponieważ Jej przyjemnością jest sam akt¹⁸. (...) Jeżeli więc Bóg znajduje się zawsze w tym stanie szczęśliwości, w jakim my się znajdujemy tylko czasem, jest to godne podziwu, a jeżeli w większym, to jest to jeszcze bardziej godne podziwu. Bóg znajduje się w tym stanie szczęśliwości. Życie również przysługuje Bogu, bo życie jest aktem rozumu, a Bóg jest samym aktem; ten samoistny akt jest życiem najlepszym i wiecznym. Można więc powiedzieć, że Bóg jest żywym bytem, wiecznym i najlepszym; przysługuje mu też wieczne trwanie; bo to właśnie jest Bóg.¹⁹

Ale Arystoteles zdawał sobie sprawę, że upływ czasu powoduje powolne niszczenie się rzeczy. „Nie ulega wątpliwości, że jak już wyżej stwierdziliśmy, czas jest raczej przyczyną rozkładu niż powstawania (wszak zmiana oddala rzeczy od ich dawnego stanu), a jeśli jest przyczyną powstania czy istnienia, to tylko przypadkowo”.²⁰ Arystoteles, odmiennie od wszystkich innych myślicieli aż do połowy XX wieku (!), był przekonany o „życiu wewnętrznym” gwiazd. Pisał o niezmierzonej ich ilości; dziś wiemy, że tylko w naszej Galaktyce, widocznej na nocnym niebie świecą setki miliardów gwiazd.

¹⁶ Argumenty na temat przyczyny pierwszej ruchu i na temat istnienia bytu niezbędnego zostały podjęte ponad tysiąc lat później przez Św. Tomasza w jego pięciu drogach (*via*) dla „udowodnienia” istnienia Boga.

¹⁷ Przypominamy podwójne znaczenie słowa „principio” w języku włoskim: zasada albo początek.

¹⁸ Zwracamy uwagę na szerokie znaczenie słowa „akt” w filozofii Arystotelesa: byt, stawanie się, urzeczywistnianie. Zob. Władysław Tatarkiewicz, *Historia filozofii* dla pełniejszej wykładni poglądów Arystotelesa.

¹⁹ ARYSTOTELES, *Metafizyka*, 1072 b14-30, *op. cit.* str. 813.

²⁰ ARYSTOTELES, *Fizyka*, IV 222b, tłum. Kazimierz Leśniak, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010, s. 182.

Można by słusznie wysunąć jeszcze jedną trudność następującą: dlaczego właściwie Pierwszy ruch obejmuje tak olbrzymią ilość gwiazd, że jego cały orszak wydaje się niemożliwy do zliczenia, podczas gdy każdy z <innych> ruchów ma tylko jedną gwiazdę [a właściwie gwiazdę „błądzącą”, czyli planetę]. Nie widzimy tu nigdy dwóch lub więcej gwiazd włączonych do tego samego ruchu.

Gdy chodzi o te problemy, warto starać się poszerzyć wiadomości o nich. Wprawdzie mamy mało danych, od których moglibyśmy rozpocząć badania. Ponadto jesteśmy bardzo oddaleni od zjawisk, o których mowa²¹. Jeśli jednak oprzemy nasze badania na tym, co wiemy, obecna trudność nie będzie wyglądać na nierozwiązywalną. My bowiem pojmujemy gwiazdy jako ciała proste i jednostki rozłożone wprawdzie w pewnym porządku, lecz zupełnie nie żyjące, podczas gdy trzeba wiedzieć, że one rozwijają działalność i cieszą się życiem. W ten sposób fakty przestaną nam wyglądać na niedostępne dla naszego rozumu.²²

Uważanie starożytnych filozofów za „przeżytek” może okazać się bardzo ryzykowne. Brakowało im stuleci doświadczeń naukowych ale z pewnością nie umiejętności rozumowania...

Pytanie o wieczność świata i jego rozkład („korozję”) wraz z upływem czasu zostało podjęte przez Immanuela Kanta (1746-1805). Uprzytomnił on sobie, że ewentualność wiecznego świata, tzn. bardzo, bardzo starego oznaczałaby, że jest on nieruchomy. Dyskutując antynomie czystego rozumu tak uzasadnia tezę, że „Świat posiada początek w czasie, a przestrzennie jest również ograniczony”²³:

Jeżeli bowiem przyjmujemy, że świat nie posiada początku w czasie, to aż do każdej danej chwili upłynęła wieczność, a tym samym upłynął nieskończony szereg następujących po sobie stanów rzeczy w świecie. Lecz oto nieskończoność szeregu polega właśnie na tym, że nie może on być nigdy do końca doprowadzony za pomocą syntezy kolejno przeprowadzanej. Nie jest więc możliwy nieskończony miniony szereg światowy, początek świata stanowi przeto konieczny warunek jego istnienia.

Filozofia nie rozstrzygnęła pytania o wieczność świata. Ale dwa wieki przed Kantem narodziła się inna nauka – fizyka. Fizyka została tak nazwana już przez Arystotelesa, ale dopiero z Kopernikiem (1473-

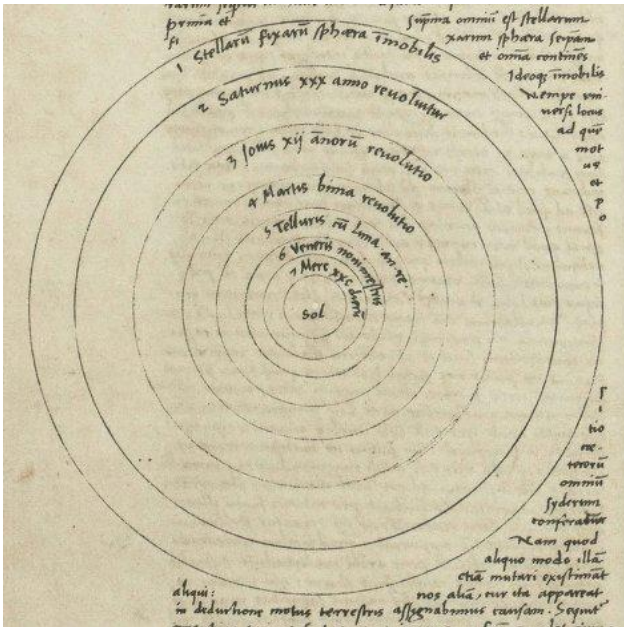
²¹ Arystoteles świadom jest ułomności sądów w temacie astronomii: jak opisujemy w rozdziale III, metody współczesnej fizyki i astronomii pozwalają na znacznie dokładniejszy opis cykli życia gwiazd.

²² ARYSTOTELES, *O niebie*, 292a, tłum. Paweł Siwek, PWN, Warszawa, 1980, str. 83.

²³ I. KANT, *Krytyka czystego rozumu*. Tom 2. *Dialektyka transcendenatalna*. tłum. Roman Ingarden, Wydawnictwo Naukowe PAN, Warszawa, 2010, str. 125-6.

1543), Galileuszem (1567-1642) i Newtonem (1643-1726) stała się nowoczesną nauką. Jak napisał Eric Rogers²⁴, „Fizyka zesła z Nieba na Ziemię po równi pochyłej Galileusza”.

Fizycy twierdzą, że ich dziedzina jest przykładem paradygmatu nauki, która w równej mierze opiera się na doświadczeniu jak na teorii. Warto więc zacząć od fizyki, od astrofizyki, od kosmologii naszą podróż przez współczesną naukę, przez jej odkrycia i sukcesy a także wątpliwości, które pojawiają się wraz z kolejnymi, szczegółowymi odpowiedziami, niestety – zawsze tylko fragmentarycznymi.



Ryc. 1.3. Mikołaj Kopernik wyłożył zasadnicze punkty swojego modelu już na pierwszych stronach traktatu *De revolutionibus orbium coelestium* (1543). W Księdze I, cap. X, o porządku sfer niebieskich pojawia się ten rysunek: autor opisuje System Słoneczny w sposób elegancki i zgodny z naszą współczesną wiedzą. Kopernik kończy ten rozdział słowami „Z pewnością, jest to największe i najwspanialsze dzieło Pana Boga” (*Tanta nimirum est divina haec Optima Maxima fabrica.*)

²⁴ E.M. Rogers, *Fizyka dla dociekliwych*, 2. *Astronomia*, PWN, Warszawa, 1972, str. 182./

Fizyka i kosmologia¹

2.1. „Zasady” fizyki

Fizycy posługują się w językiem *zasad*. Te *zasady* leżą u podstaw naszych poglądów naukowych, czyli zbioru faktów potwierdzonych doświadczalnie, udowodnionych i powiązanych ze sobą teoriami i które rządzą wszechświatem (a przynajmniej tak nam się wydaje).

W mechanice, nauce o ruchu i siłach, wyróżnia się trzy zasady *zachowania*: 1) pędu (tj. prędkości), 2) energii (która może przemienić się w ciepło lub swoje inne formy) oraz 3) zachowania momentu pędu, czyli ruchu obrotowego (która określa “odwieczny ruch planet”, jak to pisał św. Tomasz z Akwinu w „Sumie Teologicznej”).

W elektromagnetyzmie, czyli nauce o elektryczności i magnetyzmie, *wierzmy* w zasadę zachowania ładunku elektrycznego (to jest sumy ładunków ujemnych i dodatnich w całym wszechświecie) oraz w to, że nie istnieją ładunki magnetyczne (tak zwane monopole² magnetyczne): pola magnetyczne są wytwarzane przez przepływ prądu, czyli przez *ruch* ładunków elektrycznych.

W nauce o cieple, czyli termodynamice, zasada równoważności ciepła i pracy głosi, że zawsze można zamienić pracę na ciepło (w przeciwną stronę już niekoniecznie), i że ciepło jest formą energii *wewnętrznej* ciała. Według innej zasady termodynamiki nie można przekazać ciepła z ciała chłodniejszego do ciała cieplejszego *bez* pracy: lodówka wymaga silnika (lub innego sposobu na dostarczenie pracy). Poza tym zawsze można mieszać pół szklanki gorącej wody z połową szklanki ciepłej wody, tak by otrzymać szklankę wody letniej, ale ich rozdzielenie jest już niemożliwe.

W chemii od wieków obowiązywała (i w mniejszym lub większym stopniu obowiązuje do dziś) zasada zachowania masy: łączna masa

¹ Tłumaczenie z oryginału włoskiego dr Olga Kutner.

² Monopole magnetyczne nie istnieją, tak wynika z praw Maxwella: każdy magnes ma dwa bieguny - “północny” i “południowy”. Naukowcy opracowali wiele hipotez na ten temat, dlaczego monopole nie istnieją i/lub gdzie ich szukać i/lub dlaczego zniknęły wraz z początkiem wszechświata, ale żadna z tych hipotez nie jest teorią, która zostałaby dowiedziona z dostatecznie dużą pewnością.

substancji wchodzących w reakcję jest równa masie jej produktów. Teoria względności Einsteina spowodowała niewielkie, na pierwszy rzut oka, zmiany w tej zasadzie. O tym nieco dalej.

Zasady wzajemnie się uzupełniają. Nawet jeśli zasada zachowania energii mówi, że całkowita ilość energii pozostaje zawsze taka sama³, druga zasada *termodynamiki* potwierdza, że wszechświat dąży do „śmierci cieplnej”: nie będzie już *sily napędowej* zdolnej do poruszania rzeczy. To właśnie ta zasada, opisująca działanie silników cieplnych (takich jak silnik o spalaniu wewnętrznym, czyli silnik spalinywy) mówi, że zamiana ciepła w energię mechaniczną wymaga zawsze źródła ciepła (o wyższej temperaturze) oraz chłodnicy o niższej temperaturze, absorbującej tę część ciepła, która nie została zamieniona na pracę. Ilość zużytego ciepła zależy od różnicy temperatur pomiędzy źródłem ciepła a chłodnicą. Ciepło, które przepływa od źródła ciepła do chłodnicy doprowadza do wyrównania się ich temperatur. A zatem, w odległej przyszłości, zamiana ciepła w energię mechaniczną doprowadzi do *śmierci cieplnej* wszechświata: cały świat będzie miał tę samą temperaturę, to oznacza brak przepływów ciepła, a w konsekwencji brak „sił napędowych”. Warto zauważyć, że tego rodzaju „sily napędowe” na Ziemi, jak prądy oceaniczne i wiatry w atmosferze, są kształtowane przez różnice temperatur.

2.2. Zasady zachowania

Warto byłoby zatem powtórzyć pokrótce podstawowe „zasady” fizyki. Te zasady, które, gdzieś pomiędzy Galileuszem a Einsteinem (1879-1956), pozwoliły na usunięcie (wyrugowanie) z *filozofii* prostych zjawisk, takich jak ruch, ciepło, światło i tym podobne. Ale interakcja fizyka ↔ filozofia jest obopólnie korzystna: to te zasady pozwoliły rozstrzygnąć wiele sprzeczności, uwalniając od miana „spekulacji” filozofię naturalną, jak nazywano kiedyś fizykę.

³ Wraz z teorią względności Einsteina oraz słynnym równaniem równoważności energii E i masy m , $E = mc^2$ (gdzie c jest prędkością światła), zasada zachowania energii została uzupełniona o zasadę zachowania *całkowitej* energii i masy.

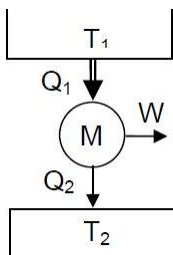
2.2.1. „Zasady” fizyki

Fizyka przyjmuje niektóre stwierdzenia (oparte przede wszystkim na eksperymentach) jak *zasady*. Pierwszą, sformułowaną jeszcze w Średniowieczu (około roku 1300, przez rektora Uniwersytetu Paryskiego, Jana Buridana), była zasada zachowania pędu (ruchu), zwana również zasadą bezwładności (inercji). Ciała, które raz nabiorą prędkości, zachowują ją: Ziemia krąży dookoła Słońca od czterech i pół miliarda lat i w tym ruchu nie zwalnia. (Jeśli ciała zatrzymują się „same”, to działają na nie jakieś siły, np. tarcia o podłoże lub siły oporu powietrza). Inercja, czyli zasada zachowania pędu tłumaczy zarówno ruch wagonu pchniętego po torze jak i wieczny ruch planet.

Drugą zasadą mechaniki jest zasada zachowania *energii*, której podstawy zostały opracowane przez Galileusza: jeśli ciało zostanie wyrzucone w górę, to straci prędkość (tzn. swoją energię kinetyczną), ale nabiera wysokości (czyli zyskuje energię potencjalną). Kiedy ciało spada, jego energia potencjalna maleje, za to energia kinetyczna wzrasta. Wahadło, kiedy osiągnie maksymalną wysokość jest nieruchome, podczas gdy w najniższym punkcie porusza się najszybciej. Suma energii kinetycznej i energii potencjalnej jest stała (o ile nie działa siła tarcia).

W XIX wieku, po tym jak skonstruowano silniki cieplne (takie jak maszyna parowa), zasada zachowania energii została poszerzona o zjawiska cieplne: ciepło również jest pewną formą energii i może zostać zamienione na energię mechaniczną. To właśnie jest pierwsza zasada *termodynamiki*.

Ale jednak, według drugiej zasady termodynamiki ta przemiana nie może osiągnąć 100% skuteczności: pewna część ciepła zawsze musi zostać przekazana do chłodnicy. W ten sposób silnik się ochładza, a chłodnica się nagrzewa: różnice temperatur maleją i tak oto, w dłuższej perspektywie, cały wszechświat osiągnie tę samą temperaturę. Wówczas konstruowanie silników termodynamicznych będzie niemożliwe: wszechświat będzie zmierzał do *śmierci cieplnej*.



Ryc. 2.1. Zasada funkcjonowania silnika termodynamicznego „M” (turbina parowa, silnik spalinowy lub tajfun w atmosferze): ciepło Q_1 płynie od cieplejszego źródła (o temperaturze T_1) w kierunku silnika, który pozyskuje pracę mechaniczną (W). Część ciepła (Q_2) musi przepłynąć do zbiornika o niższej temperaturze (T_2). Maksymalna możliwa sprawność silnika wynosi $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$, gdzie temperatury wyrażone są w skali Kelvina.

Kant tworzył swoją filozofię, zanim sformułowano prawa termodynamiki (Carnot, 1834), powtarzając sposób rozumowania Arystotelesa: czas, sam w sobie, prowadzi do bezładu, czyli pewnego rodzaju śmierci. Fizycy wprowadzili konkretny termin w celu zmierzenia stopnia tego nie-uporządkowania: ten termin to „entropia”. Początkowo entropia była definiowana jako stosunek pomiędzy wymienionym ciepłem a temperaturą, w jakiej zachodzi ta wymiana. Ze schematu przedstawionego na rysunku 2.1. można wywnioskować, że dla uzyskania wysokiej sprawności silnika termodynamicznego należy użyć bardzo gorących źródeł, tak aby entropia była niska.

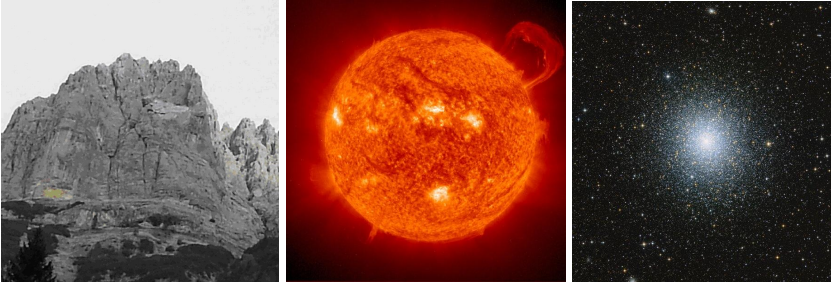
Wraz z narodzinami informatyki, entropię zaczęto utożsamiać z nie-uporządkowaniem: im większe nieuporządkowanie, tym wyższa jest entropia. Jeśli mieszać dwa gazy o dwóch różnych temperaturach, ich całkowita energia nie ulegnie zmianie, ale wzrośnie entropia: oddzielenie ciepłych molekuł od zimnych nie będzie już możliwe. Jak pisał Arystoteles, czas przez swoją naturę jest destrukcyjny, ponieważ zasada się na pewnej ilości zmian - usuwaniu tego, co wcześniej istniało (*Fizyka*, 221b).

Podsumowując, zanim jeszcze nastał wiek XX, istniały już silne przesłanki jakoby wszechświat miał swój początek, nawet jeśli obliczenia fizyków dotyczące jego wieku były bardzo niedokładne. Lord Kelvin (1824-1907), jeden z twórców termodynamiki, szacował wiek wszechświata na około 50 milionów lat, znacznie mniej niż miliard lat, jak to wskazywały obliczenia współczesnych mu geologów oparte na stratyfikacji skał wapiennych widocznych na brzegach mórz.

Kelvin opierał swoje obliczenia na rozmiarach Słońca i próbował ustalić, ile milionów lat taka kula ognia potrzebowałaby do ostygnięcia. Nie mógł wyobrazić sobie wewnętrznego źródła ciepła: wodoru, który zamieniając się w hel, traci część masy m i produkuje energię E ,

zgodnie z relacją równoważności $E=mc^2$, gdzie c jest prędkością światła, 299 792 km/s.

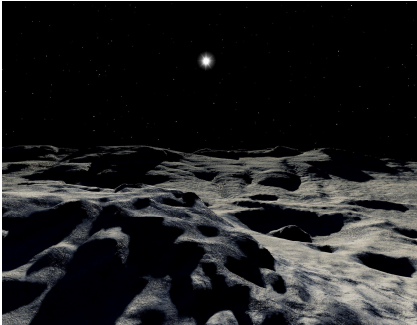
Zasady termodynamiki również musiały ulec zmianom z powodu zasady równoważności Einsteina: Słońce pobiera olbrzymie ilości energii przetwarzając jądra wodoru w hel. Ta ilość jest tak duża, że wystarcza na ogrzanie całego Systemu Słonecznego od 4,5 miliarda lat i wystarczy jej jeszcze co najmniej na najbliższe 10 miliardów lat.



Ryc. 2.2. (a) Liczba warstw, które odkładały się z każdym rokiem na dnie morza, i które podnosiły się, aż uformowały Dolomity, dowodzi, że wiek tych gór to setki milionów lat. (b) Jeszcze na przełomie XIX i XX wieku fizycy byli przekonani, że Słońce nie istnieje dłużej niż 50 milionów lat. Dziś dzięki zdjęciom rentgenowskim, w ultrafiolecie itd., poznaliśmy gwałtowne procesy syntezy (fuzji) termojądrowej, które zachodzą wewnątrz Słońca, i które wytwarzają olbrzymie ilości energii. (c) Gromady kuliste to najstarsze gwiazdy we Wszechświecie. Gromada Tukana zawiera gwiazdy neutronowe liczące 13 mld lat. Źródło: M. Karwasz; NASA; Dominik Woś.

Jednak powoli, wraz upływem czasu, paliwo gwiazd, czyli wodor mógłby się we wszechświecie wyczerpać, nie wcześniej jednak niż za 10^{13} lat (to jest 10 bilionów, czyli tysiąc razy więcej niż liczy sobie wszechświat obecnie). Jeszcze o tysiąc razy więcej, czyli za 10^{16} lat, Ziemia (wówczas całkowicie już zimna) mogłaby wędrować samotnie we Wszechświecie. Według obliczeń szwajcarskiego astrofizyka Arnolda Benza⁴, materia będzie istnieć jeszcze przez najbliższe 10^{35} (miliard miliarda miliardów) lat, o ile nie dłużej...

⁴ ARNOLD BENZ, *Przyszłość wszechświata. Przypadek, chaos, Bóg?* Patmos Verlag, Düsseldorf, 1997, Wyd. Św. Wojciech, Poznań, 2009.



Ryc. 2.3. Ziemia będzie mogła nas gościć jeszcze przez jakieś kilka miliardów lat (o ile nie wydarzy się nic nieprzewidywalne-go). Później zacznie brakować wodoru, który jest głównym źródłem energii słonecznej: to spowoduje rozszerzanie się Słońca, rozgrzanie Ziemi i wyparowanie oceanów. W tym czasie nasza Galaktyka może zderzyć się z inną, na przykład z Galaktyką Andromedy.

Ale miliard lat to dużo czasu... Ilustracja © Ron Miller (with thanks).

2.3. Dwa paradoksy nieba

Kolejna kwestia o fundamentalnym znaczeniu dotyczy istnienia granic Wszechświata. Już Kopernik (w 1543 roku) pisał, że Ziemia, pomimo że wielka, jest niczym w porównaniu z ogromem Wszechświata, którego granic nie znamy, i których być może nawet nie *możemy* poznać⁵. Od czasów teorii heliocentrycznej astronomowie porzucili pojęcie sfer niebieskich⁶, z których najdalsza zawierałaby gwiazdy stałe. Wszechświat stał się potencjalnie nieskończony.

W 1888 roku w książce wydanej w Paryżu pojawił się drzeworyt, imitujący te średniowieczne, w których autor pokpiwał z wyobrażeń o zamkniętym wszechświecie (rys. 2.4). Paradoksalnie, kilka lat później, to Albert Einstein udowodnił, że z powodu ograniczonej prędkości światła, granice wszechświata (ale tylko tego, który możemy poznać) są wyznaczone przez promień o długości 13,8 lat świetlnych (około $1,3 \times 10^{23}$ km). Nasza wiedza i nasze poznanie instrumentalne nie może więc wykraczać poza tę sferę.

⁵ “Nihil enim aliud habet illa demonstratio, quam indefinitam coeli ad terram magnitudinem. At quousque se extendat haec immensitas, minim e constat.” *De revolutionibus orbium coelestium*, Księga I, rozdz. VI, “Cur ergo hacsitamus adhuc, mobilitatem illi formae suae a natura congruentem concedere magis quam quod totus labatur mundus, cujus finis ignoratur, scirique nequit, [...]” rozdz. VIII, Wiki-source s. 122.

⁶ Przypuszcza się, że tytuł „O obrotach sfer niebieskich” dodał norymberski wydawca, nieco przestraszony rewolucyjnym wydźwiękiem też zawartych w książce. Kopernik badał ciała niebieskie na ich orbitach, a nie „sfery”.

Ryc. 2.4. Na tej ilustracji, która ukazała się w 1888 roku w Paryżu, w książce Flammariona, autor chciał wyśmiać filozofię średnio-wieczną, w której „narzuca-no” wszechświatowi granice. W tym samym czasie (1887 r.) w Cleveland eksperyment Abrahama Michelsona, Amerykanina urodzonego w Strzelnie, pokazał, że nie możemy wyznaczyć granic wszechświata. Źródło: Wikipedia



Izaak Newton odkrył prawo powszechnego ciążenia, zgodnie z którym wszystkie masy wzajemnie się przyciągają. To ta siła nie pozwala, żeby planety oddaliły się od Słońca i zmusza je do ruchu po orbitach wokół niego⁷. Ale pojawia się tu pewna trudność, jeśli wziąć pod uwagę, że siła grawitacji ma nieskończony zasięg (nawet jeśli słabnie z kwadratem odległości): w dostatecznie starym wszechświecie wszystkie gwiazdy, wzajemnie na siebie oddziałując, powinny się do siebie zbliżyć: wszechświat zapadłby się w sobie.

Druga trudność dotyczy gwieździstego nieba, które w nocy jest czarne. W nieskończonym wszechświecie powinno być nieskończenie wiele gwiazd. Co więcej, w najodleglejszych od Ziemi zakątkach wszechświata liczba gwiazd stale rośnie⁸. Nawet jeśli ich pozorna jasność maleje wraz z odległością (w podobny sposób jak siła grawitacji), nieskończona liczba gwiazd powinna nieskończenie jasno rozświetlać niebo, zarówno za dnia, jak i w nocy.

Uprzedzając odkrycia współczesnej kosmologii, obie trudności znikają, jeśli przyjąć że wszechświat się rozszerza. W ten sposób gwiazdy „uciekają” przed grawitacyjną zapaścią wszechświata. Światło od uciekających gwiazd dociera do nas z opóźnieniem, przez co

⁷ Zauważmy, że Kopernik używał tego samego argumentu w odpowiedzi na obiekcje, że Ziemia obracając się mogłaby się rozsypać na kawałki, dziś powiedzielibyśmy: pod wpływem siły odśrodkowej. (Księga I, rozdz. VI)

⁸ Przyjmując, że gęstość gwiazd we wszechświecie jest stała, wraz ze wzrostem odległości r liczba gwiazd rośnie tak jak powierzchnia kuli, to jest $4\pi r^2$.

niebo nocą pozostaje czarne. Na podtrzymanie tezy o rozszerzającym się wszechświecie brakowało jednak argumentów popartych dowodami, aż do lat dwudziestych XX wieku. Kilka lat wcześniej opracowano technikę mierzenia odległości galaktyk, a w 1915 roku Einstein sformułował teorię równoważności grawitacji i ruchu przyspieszonego, zwaną ogólną teorią względności. Konsekwencje filozoficzne jakie wynikły z tej teorii są daleko bardziej idące od konsekwencji rewolucji kopernikańskiej.

2.4. Einstein i teoria względności

W 1905 Albert Einstein, tuż po ukończeniu Politechniki Zuryskiej (gdzie odmówiono mu stanowiska naukowego), rozpoczął pracę w urzędzie patentowym w Bernie. Rok wcześniej ożenił się ze swoją ukochaną Milewą Marič i urodził im się syn. Rok 1905 był prawdziwym *annus mirabilis* nie tylko dla Einsteina, ale dla fizyki w ogóle. W artykule, w którym rozważał właściwości fal elektromagnetycznych (czyli światła), Einstein doszedł do wniosku, że nie sposób wykazać czy obserwator porusza się w przestrzeni czy jest nieruchomy: pomiar prędkości światła nie zależy od ruchu obserwatora względem przestrzeni.

Teorię tę nazwano „teorią względności”, chociaż tak naprawdę powinna nazywać się „teorią obiektywności”. Sedno tej teorii tkwi w stwierdzeniu, że prawa fizyki są takie same dla wszystkich obserwatorów, którzy poruszają się ze stałą prędkością (jeden względem drugiego). Można by powiedzieć nawet, że nie jest to nowe spostrzeżenie: trudno rozpoznać ruch absolutny. Względem czego? Względność ruchów została już matematycznie sformułowana przez Galileusza, Kopernik odwoływał się do niej tłumacząc pozorny ruch dzienny (i nocny) nieba. Co więcej, już on cytował Wergiliusza⁹: marynarze, którzy odpływają statkiem widzą jakoby to port uciekał a nie okręt.

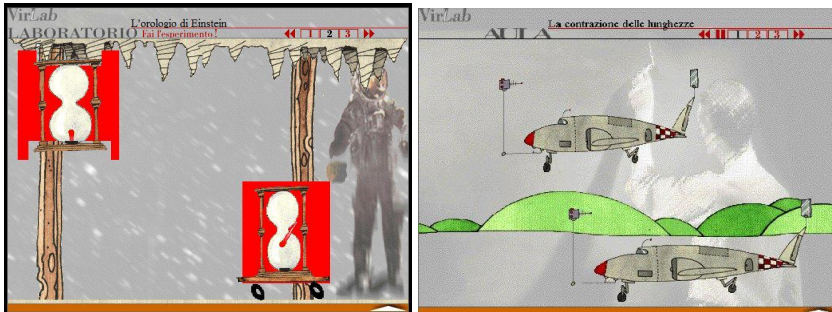
Inaczej niż się może wydawać (i niż to wynikało z obliczeń matematycznych Galileusza), pojęcie względności u Einsteina było prawdziwą rewolucją: prawa fizyki (włączając prędkość światła) są zawsze takie same, ale zmieniają się miary czasu i przestrzeni. Dzięki Einste-

⁹ „Rzucamy port: ład pierzcha i znanych miast wieże”, Wergiliusz, *Eneida*, Księga III, 73, tłum. Tadeusz Karyłowski.

inowi czas i przestrzeń nie są już identyczne dla różnych obserwatorów - są względne: zależą od wzajemnej prędkości pomiędzy nimi.

Bez zagłębiania się w szczegółowe formuły matematyczne, gdy obserwujemy obiekty w ruchu (względem nas), to ich rozmiary (w kierunku ruchu) są krótsze, a odstępy w czasie coraz dłuższe. Jak na rysunku 2.5. - samolot w ruchu (o prędkości zbliżonej do prędkości światła) wydaje się krótszy. Skąd biorą się te „deformacje”?

Einstein wywnioskował, w sposób czysto teoretyczny, kurczenie się współrzędnych przestrzeni i wydłużanie się współrzędnych czasowych, po to żeby „ocalić” równania fal elektromagnetycznych (a właściwie równania Maxwella). Heurystyczne wytłumaczenie tego zjawiska zostało zaprezentowane na rysunku 2.6.



Ryc. 2.5. Zasady szczególnej teorii względności: ciała w ruchu wydają się krótsze, czas na zegarach będących w ruchu zdaje się być spóźniony. Źródło: Ugo Amaldi, „Einstein e la relatività”, CD-Rom, Zanichelli, Padova 1999.

Pomiar przestrzeni to, w uproszczeniu, „rzut okiem”¹⁰, przesłanie promienia światła w stronę zbliżającej się lokomotywy pociągu i jednocześnie kolejnego promienia w stronę ostatniego wagonu. Ale promieniowi wysłanemu na tyły potrzeba więcej czasu na dotarcie do przeciwnika, podczas gdy ten zdążył się już zbliżyć. Zmierzona odległość jest więc krótsza. Kluczem do zrozumienia tego zjawiska jest stała prędkość światła. Piłka rzucona w tylną szybę pociągu odbiłaby się ze zwiększoną prędkością. Dla promienia światła szybkość dotarcia do pociągu i powrotu jest zawsze taka sama: 300 tysięcy km/s.

¹⁰ Włoskiemu czytelnikowi tłumaczyliśmy wyrażenie idiomatyczne „rzut okiem”: szybkie, krótkie spojrzenie. Wyrażenie o podobnym znaczeniu występuje w języku angielskim „to drop an eye”.

Nazwa teorii względności wywodzi się z faktu, że zjawiska są *względne*: obydwaj obserwatorzy w dwóch zbliżających się pociągach są przekonani, że to metr *tego drugiego* jest krótszy (i to zegarek *tego drugiego* się spóźnia¹¹). Czyżby więc transformacje odkryte przez Einsteina były tylko iluzją? Nie! Prawdziwa natura transformacji czasu i odległości wynikających z teorii względności została potwierdzona w eksperymentach. Jeden z najważniejszych, dotyczący czasu życia mionu, cząstki subatomowej, został przeprowadzony przez włoskiego naukowca Bruna Rossiego¹².

Miony wyprodukowane w laboratorium (w wielkich akceleratorach cząstek, takich jak w CERN w Genewie) żyją niespełna 2,2 mikrosekundy. Wiele mionów powstaje w wyniku promieniowania kosmicznego (to jest z bardzo szybkich protonów pochodzących ze Słońca) w wysokich warstwach atmosfery. Jeśli przyjąć, że miony wyprodukowane na wysokości 10 km poruszają się z prędkością światła, to wówczas potrzebowałyby 30 mikrosekund żeby dotrzeć na powierzchnię Ziemi: posługując się „normalną” arytmetyką, nie można by ich wykryć na wysokości poziomu morza, tu potrzeba arytmetyki Einsteina. Z prędkością $0,98c$ czas życia mionu wydłuża się pięćdziesięciokrotnie: mion dociera do ziemi.

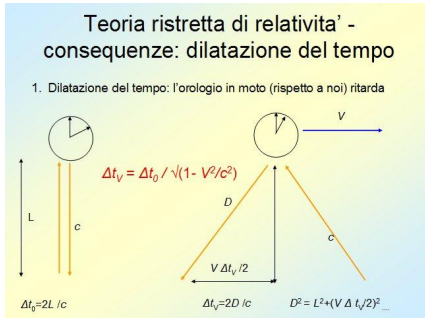
Najważniejszą konsekwencją szczególnej względności Einsteina dla naszego postrzegania świata jest nieprzekraczalna bariera prędkości światła: nie ma takiej informacji, która mogłaby dotrzeć szybciej¹³. Wszechświat mógłby rozszerzyć się o znacznie większe odległości od tych obserwowanych przez nas od 13,8 miliardów lat świetlnych, ale

¹¹ Przy okazji ostatniego stwierdzenia nasuwa się pytanie, kto się mniej zestarzał: ten, kto wyruszył w podróż kosmiczną, czy ten, kto został na Ziemi? W szczególnej teorii względności pojawia się paradoks, obydwaj wierzą, że to ten drugi zestarzeje się wolniej (obaj są w ruchu względnym). Odpowiedzi może dostarczyć jedynie ogólna teoria względności: ten, który wyruszył w kosmos doświadczył *przyspieszenia*, a zatem ich sytuacje nie są względem siebie symetryczne (to, który z nich zestarzeje się bardziej zależy od uwarunkowań biologicznych lotów w kosmos a nie od transformacji Einsteina).

¹² B. Rossi, D. B. Hall, *Phys. Rev.* 59, 223 (1941).

¹³ Warto przypomnieć, że prędkość światła w ośrodkach materialnych, takich jak woda, powietrze, ale również przestrzeń międzygwiazdowa, jest mniejsza od c ; przez co nawet fala grawitacyjna (odkryta 17.09.2017) wydawała się szybsza od światła, tymczasem nie! Prędkość odebranego promieniowania gamma była *niższa* (o jedną część na 10^{20}) od c . W pewnych sytuacjach nawet fale elektromagnetyczne mają prędkość (zwaną *fazową*) większą od c , ale nie mogą nieść ze sobą informacji.

nie znamy żadnego sposobu na to jak się tego dowiedzieć. Jak pisał Kopernik: „wszechświat jest wielki: nie znamy jego granic i nawet nie możemy poznać”.



Ryc. 2.6. Dylatacja czasu w szczególnej teorii względności: odczytanie godziny na zegarze polega na przesłaniu promienia światła w stronę zegara na ścianie, znajdującego się w odległości L od obserwatora. W przypadku nieruchomego zegara światło potrzebuje czasu $2L/c$, ale w przypadku zegara w ruchu promień musi pokonać większą odległość z

powodu dłuższej drogi D . W ten sposób, zanim wróci z odczytem z ruchomego zegara, nasz odmierzył już dłuższy czas: drugi zegar został w tyle. Mówiąc obrazowo, w przypadku obiektów w ruchu czas płynie wolniej. Źródło: rysunek własny, na podstawie L. Lerner, *Physics for scientists and engineers* (1996).

2.5. Swobodnie spadająca winda

Proste pytanie: czy można wyznaczyć ruch o stałej prędkości, doprowadziło do rewolucyjnych konsekwencji. Einstein zadał więc sobie kolejne podobne pytanie: czy można określić ruch o stałym przyspieszeniu? Na przykład skąd wiemy, czy winda, w której jesteśmy zamknięci, jedzie do góry czy zjeżdża na dół? Czujemy to?

Tak, czujemy to, ponieważ jeśli winda rusza do góry, wydaje nam się, że ważymy więcej, natomiast kiedy winda jedzie na dół, przez moment czujemy, że grawitacja częściowo zanika. Dokładnie! Nie ma sposobu, na to żeby odróżnić sztuczne siły, które działają gdy winda przyspiesza, od siły grawitacji: wszystkie działają w tym samym kierunku. Prawie...

Jest drobna różnica pomiędzy przyspieszającą windą a polem grawitacyjnym Ziemi. Wydaje się, że na Ziemi wszystkie obiekty spadają pionowo, podczas gdy w rzeczywistości spadają w stronę centrum Ziemi (jak to twierdził już Arystoteles), to jest w kierunku *radialnym*. Jeśli wziąć pod uwagę olbrzymie rozmiary Ziemi, równoległe trajektorie skierowane w dół (w windzie) i te radialne wydają się identycz-

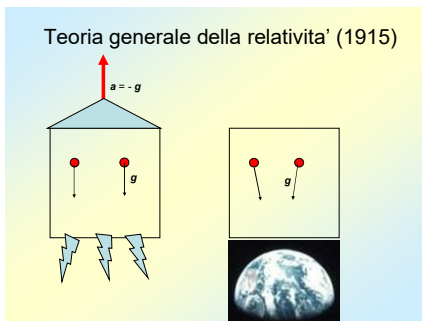
ne. Ale tak nie jest: pole grawitacyjne zakrzywia trajektorie równoległe, co widać na rysunku 2.7.

Inaczej mówiąc, między polem grawitacyjnym a *zakrzywieniem* przestrzeni (czy raczej czasoprzestrzeni) musiałby istnieć jakiś związek. Einstein przez 10 lat rozmyślał nad właściwym sformułowaniem ogólnej teorii względności, musiał specjalnie w tym celu (razem z kolegą Grossmanem) stworzyć nową gałąź matematyki. Wreszcie, między rokiem 1914 a 1917, Einstein sformułował krok po kroku (przy czym pierwsze kroki były niezupełnie poprawne) ogólną teorię względności. Teoria ta łączy geometrię przestrzeni (wcześniej uznawaną za stosunkowo prostą, intuicyjną, tak jak została sformułowana przez greckich matematyków Pitagorasa i Euklidesa) oraz grawitację.

Równanie, bardzo skomplikowane jeśli chodzi o matematyczne szczegóły, w skróconej formie zaskakuje swoim surowym pięknem i przejrzystością:

$$\mathbf{G} = (8\pi G/c^4) \mathbf{T}$$

gdzie złożony obiekt matematyczny (tensor) \mathbf{G} opisuje zakrzywienie czasoprzestrzeni spowodowane działaniem grawitacji, a tensor \mathbf{T} odpowiada energii (która jest równoważna masie). Reszta to stałe uniwersalne: prędkość światła c , stała grawitacji G oraz liczba π .



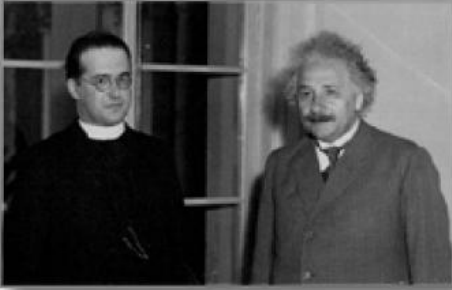
Ryc. 2.7. Streszczenie ogólnej teorii względności Einsteina: jak odróżnić raketę, która przyspiesza, od ciała (na przykład Ziemi), które oddziałuje siłą grawitacji? W rakiecie wszystkie przedmioty spadają wzdłuż linii równoległych. Na powierzchni Ziemi natomiast te trajektorie są skierowane ku jej środkowi i nie są idealnie równoległe. To prowadzi do

pojęcia „zakrzywienia” czasoprzestrzeni, w obecności mas grawitacyjnych. Jeśli wziąć pod uwagę równoważność masy i energii, równanie Einsteina przyrównuje tensor zakrzywienia przestrzeni do tensora masy-energii. Źródło: rysunek własny

Wkrótce po sformułowaniu ogólnej teorii względności powrócił problem zapaści wszechświata. Pierwsze matematyczne rozwiązanie równania Einsteina uzyskane przez de Sittera (w 1927) opisywało wszechświat stacjonarny, ale przy gęstości materii równej zero: świat nieskończony, stabilny, ale idealnie pusty! Sam Einstein, dostrzegając trudność, wprowadził *ad hoc* do równania pewne wyrażenie, rodzaj sztucznego ciśnienia, tak aby zapobiec zapaści wszechświata. Ten składnik Λ nazwano „kosmologicznym”. W ten sposób równanie uzyskało postać:

$$\mathbf{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \mathbf{g}_{\mu\nu} \mathbf{R} + \mathbf{g}_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

gdzie energia \mathbf{T} , zakrzywienie \mathbf{R} oraz metryka \mathbf{g} czasoprzestrzeni są tak zwanymi tensorami.



Ryc. 2.8. W 1933 po wykładzie Georges Lemaître w Princeton Einstein wykrzyknął: «To jest najpiękniejsze i najbardziej satysfakcjonujące wytłumaczenie stworzenia jakie kiedykolwiek słyszałem¹⁴». Idea „początku czasu” została doceniona nawet przez Piusa XII w 1955 roku. Źródło: Catholic Education Resource Center, USA.

Einstein uważał składnik kosmologiczny za „największy błąd swojego życia”. Ponownie, uprzedzając osiągnięcia astrofizyki XXI wieku, która dokonała pomiaru tego „ciśnienia”, składnik „kosmologiczny” okazał się najbardziej doniosłym *przecuciem* Einsteina: Wszechświat miał początek!

Wracając do porządku wydarzeń, rozwiązanie równania Einsteina, które przewidywało długotrwałe istnienie wszechświata zostało opublikowane w 1925 przez rosyjskiego matematyka Aleksandra Friedmanna (1888-1925), który dowiódł, że wszechświat żeby istnieć długo, musi się rozszerzać.

¹⁴ «This is the most beautiful and satisfactory explanation of creation to which I have ever listened». H. Kragh, *Cosmology and Controversy*, Princeton 1996, p. 55, cytat dostępny na stronie: https://en.wikipedia.org/wiki/Georges_Lemaître.

Belgijski ksiądz Georges Lemaître (1894-1966), w 1920 roku kanonik katedry w Mechelen, doszedł niezależnie do innego rozwiązania, z którego płynęły takie same wnioski¹⁵. Postawił hipotezę o początku wszechświata - „pojedynczym pierwotnym atomie”, który podzielił się na więcej atomów. „A zatem początek świata miał miejsce na chwilę przed rozpadem atomu na dwie części¹⁶”. Co Einstein skomentował: „To najpiękniejszy opis Stworzenia jaki kiedykolwiek słyszałem”. Nie początku świata - Einstein powiedział: „Stworzenia” (zob. rys. 2.8.).

Konsekwencje równania ogólnej teorii względności znacznie wykraczają poza rozszerzanie się Wszechświata: wpływają na to jak pojmujemy przestrzeń i czas. Ale wcześniej wróćmy jeszcze do obserwacji astronomicznych.

2.6. Planck: jakiego koloru jest Słońce?

Jaki kolor ma nasza gwiazda? Odpowiedź wydaje się oczywista: to żółta kula ognia. A przynajmniej na taką wygląda. Ale już tęcza, światło Słońca „odbite” w kroplach deszczu ma wiele kolorów, od czerwieni po fiolet. Tak! światło Słońca zawiera wszystkie te barwy, te najbardziej widoczne to żółty i zielony, a najmniej intensywne - kolory na brzegach tęczy.

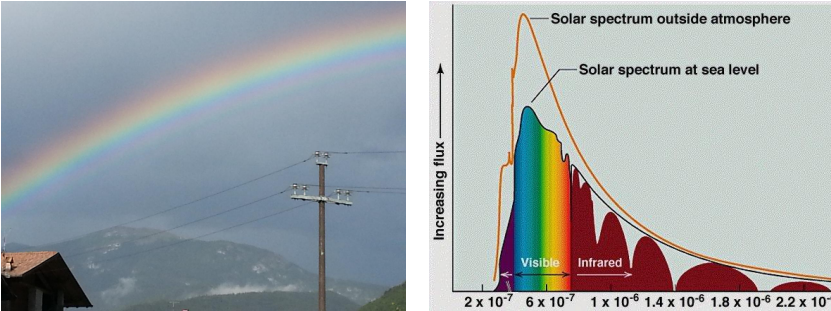
Wrażliwość ludzkiego oka na różne kolory nieco się zmienia, ale fizycy zmierzili intensywność kolorów w widmie (*spektrum*) promieniowania słonecznego: pokazujemy takie widmo na rysunku 2.9. Spektrum zarejestrowane przez przyrządy fizyczne rozciąga się nieco powyżej koloru czerwonego i nieco poniżej fioletu. Mowa tu o świetle *podczerwonym* i *ultrafioletowym*¹⁷

¹⁵ Przypominamy, że autor pierwszej rewolucji kosmologicznej, Mikołaj Kopernik również był kanonikiem, katedry we Fromborku.

¹⁶“The whole story of the world need not have been written down in the first quantum like a song on the disc of a phonograph. The whole matter of the world must have been present at the beginning, but the story it has to tell may be written step by step, G. Lemaître, “The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory.” *Nature* 127 (1931) 706, doi:10.1038/127706b

¹⁷ W tęczy światło podczerwone jest wyżej, a to ultrafioletowe niżej; Newton uzyskał widmo przepuszczając światło słoneczne przez pryzmat ze szkła, ale ustawił go „do góry nogami” stąd pod-czerwień i nad-fiolet.

Słońce to kula bardzo gorącego (i bardzo gęstego) gazu, w której centrum temperatura dochodzi do 15 milionów stopni Celsjusza. Ale im bliżej powierzchni, tym temperatura gazu jest niższa i osiąga jedynie 5500°C (około 5800 K). To nieco zaskakujące, że kula gazu emituje kolory („spektrum” jak na rys. 2.9b) w podobny sposób jak światło emitowane przez podkowę rozgrzaną w piecu kowala.

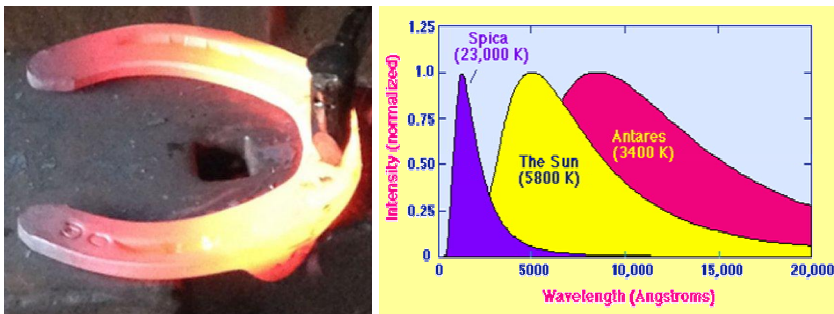


Rys. 2.9. (a) Tęcza w Villa Banale (Trydent); tęcza pojawia się kiedy światło słoneczne za nami odbija się (i załamuje) w kroplach deszczu, które widzimy przed sobą. Pod siedmiokolorowym pasem widać również fukcję i magentę, które powstały w wyniku innego zjawiska optycznego: interferencji. Rozszczepienie białego światła na różne kolory jest przykładem „spektrum”, czyli widma. (b) Światło widzialne (tęcza) to tylko część spektrum Słońca, choć zawiera prawie 50% energii. Atmosfera tłumi nieco światło słoneczne, eliminując bardziej energetyczne światło ultrafioletowe. Ponadto dla podczerwieni atmosfera nie jest przezroczysta, zarówno H_2O jak i CO_2 pochłaniają podczerwień.

Matematyczny opis dwóch widm również jest podobny: zależy od temperatury i może zostać zapisany przy pomocy tego samego wzoru, zwanego prawem „ciała doskonale czarnego”. Faktycznie, zarówno podkowa jak i żarnik w żarówce są czarne, kiedy pozostają zimne. Wraz ze wzrostem temperatury kolor zmienia się - z wiśniowego na czerwony, pomarańczowy i wreszcie żółty, tak jak na rys. 2.10a.

Matematyczna zależność pomiędzy spektrum a temperaturą ciała czarnego, znana „na oko” od epoki żelaza, została wytłumaczona dopiero w 1900 roku (w czwartek, 14 grudnia) przez profesora fizyki z Berlina, Maxa Plancka. Ten, aby tego dokonać, musiał przyjąć, że energia światła jest emitowana porcjami, w „kwantach”. Tego dnia narodziła się fizyka *kwantowa*, która do dziś jest podstawą nie tylko fizyki, ale również chemii, biologii molekularnej a także astronomii.

Przy pomocy matematycznego opisu widma rozżarzonego ciała możemy wyznaczyć jego temperaturę, bez jego dotknięcia. W ten sam sposób, w astronomii możemy ocenić temperaturę najodleglejszych gwiazd, tak jak na rys. 2.10b, i temperaturę przestrzeni kosmicznej (która nie wynosi zero kelwinów). Innymi metodami, nadal opartymi na szczegółowej analizie „koloru”, czyli *spektrum*, możemy odgadnąć skład chemiczny odległych gwiazd. Nauka o widmach dostarcza sposobów na badanie obiektów (atomów, gwiazd, całego kosmosu) z odległości setek miliardów kilometrów.



Ryc. 2.10. (a) Kolor podkowy (i żarnika żarówki) zmienia się wraz z temperaturą: od czerwonego (1000°C), przez żółty, aż po biel światła żarówki z 3000°C . (b) W taki sam sposób zmienia się kolor gwiazd: Spica z powierzchnią o temperaturze 23000°C wydaje się błękitna w porównaniu ze Słońcem (5500°C), i z dużą, ale stosunkowo chłodną, czerwoną Antares (w Pasie Oriona). ŹRÓDŁO: NURE AGLIO; ERIC C. BLACKMAN.

Nasza wiedza o najodleglejszym wszechświecie ma swój początek w pracach jezuita, ojca Angelo Secchiego (1818-1878), dyrektora Obserwatorium Astronomicznego w Kolegium Rzymskim. To on jako pierwszy badał szczegółowo różne kolory gwiazd: czerwone, żółte, biało-niebieskie.

Ale poza samą obserwacją „koloru”, Secchi badał również szczegóły spektrum: linie, które pojawiają się na tle widma ciągłego. Tak jak Galileusz, który jako pierwszy skierował teleskop w niebo, tak Secchi skierował w górę *spektrometr*. Pozwoliło to nie tylko na określenie „koloru” gwiazd i ich temperatury, ale również ich wielkości, odległości, wieku, składu itd.

2.7. Arystoteles: życie gwiazd

To Arystoteles jako pierwszy wysnuł hipotezę o ewolucji gwiazd. Musiało jednak upłynąć ponad dwa tysiące lat, zanim astronomowie potraktowali poważnie jego słowa. Trzeba było najpierw wielu „żmudnych” obserwacji, nie tylko Secchiego, ale również wielu innych astronomów (i kobiet astronomek).

W połowie XIX wieku wprowadzono nową metodę badania materii w stanie gazowym: kolorów światła emitowanego podczas wyładowania elektrycznego. Każda rozgrzana substancja, a raczej odparowana w płomieniu palnika, emituje charakterystyczny dla siebie kolor: sól (czyli sól kuchenna) - żółty, sole miedzi - zielony, sole rubidu - kolor rubinowy. W ten sposób uzyskuje się różne kolory sztucznych ognii.

Tę samą zasadę wykorzystuje się w lampach luminescencyjnych: żółte lampy uliczne zawierają pary sodu, białe lampy biurowe – rtęć i argon, czerwone w szyldach świetlnych - neon. W astronomii ta technika, zwana *spektroskopią* umożliwia rozpoznanie pierwiastków chemicznych w gwiazdach. W ten sposób odkryto hel, który obok wodoru, jest głównym składnikiem naszej gwiazdy. To stąd wiemy też, że na powierzchni Słońca znajdują się nawet pary żelaza.

Kolory charakterystyczne dla poszczególnych pierwiastków znajdujących się w gwiazdach pojawiają się w widmach w taki sam sposób jak cienkie linie na ciągłym tle. Naniesienie tych linii na kliszę fotograficzną było bardzo czasochłonne (dziś wystarczy telefon komórkowy).

Do badań nad kolorem gwiazd, zapoczątkowanych przez ojca Angelo Secchiego, powrócono na początku XX wieku na Harvardzie (dziś wykorzystywany wówczas teleskop znajduje się w Toruniu), zdjęcie 2.12b. Grupa kobiet - astronomek¹⁸, noc po nocy, wykonała zdjęcia widm prawie miliona gwiazd.

Początkowo charakterystyka tych widm była niejasna. Z tego powodu gwiazdy zostały zaklasyfikowane jako A, B, C, następnie M i jeszcze O. W rzeczywistości litery odpowiadały barwom; białe gwiazdy nazwano „A”, żółte „G”, a czerwone „M”. Dopiero potem odkryto podobieństwa *spektralne*, które pozwoliły na sklasyfikowanie

¹⁸ Przypomnijmy kilka nazwisk: Annie Jump Cannon, Williamina Fleming, Henrietta Swan Leavitt, Antonia Maury.

gwiazd ze względu na ich temperaturę i jasność na tak zwanym diagramie Hertzsprunga-Russella.

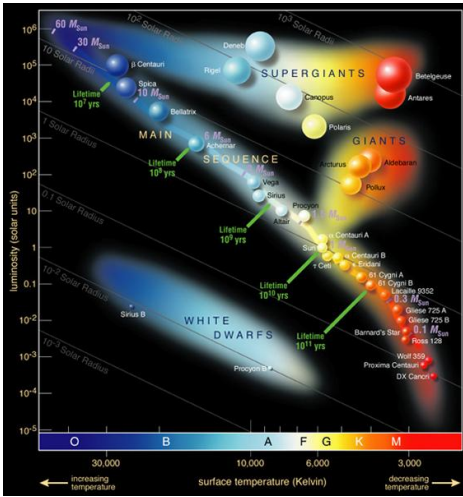


Rys. 2.11. Kolor gwiazdy jest wskaźnikiem jej temperatury, stąd można wywnioskować jej rozmiary i wiek. Na rysunku widać grupę gwiazd w pobliżu Antaresa w konstelacji Skorpiona. Antares jest koloru czerwonego, ale widziany w obłokach międzygwiazdowych wydaje się żółto-zielony.
 ŹRÓDŁO: DOMINIK WOŚ
<https://astrofotografia.eu>

Szybko stało się jasne, że różnice koloru, jasności i rozmiarów wskazują na ściśle określony cykl życia gwiazd. Jak powiedział, cytowany wcześniej Arystoteles: «My bowiem pojmujemy gwiazdy jako ciała proste i jednostki rozłożone wprawdzie w pewnym porządku, lecz zupełnie nie żyjące, podczas gdy trzeba wiedzieć, że one rozwijają działalność i cieszą się życiem¹⁹». Różnice w układzie „gałęzi” diagramu R-H pokazują przebieg ewolucji gwiazd: oddzielne gałęzie, jak np. białych karłów, to ostatni etapy ewolucji gwiazd, swego rodzaju „postój”, zanim zgasną na zawsze. Im wyższa temperatura i im większa masa gwiazdy, tym krótsze jest jej istnienie. Na przykład niebieskie giganty wybuchną za setki milionów lat. Słońce nie jest ani szczególnie duże, ani gorące, w związku z tym jego ewolucja potrwa jeszcze jakieś kilka *miliardów* lat, umożliwiając tym samym życie na Ziemi.

Cykl życia gwiazd to pierwszy potwierdzony dowód na to, że nasz Wszechświat nie jest wieczny: tezy o wiecznym wszechświecie Uniwersytetu Paryskiego, z 1270 roku, okazały się błędem, jeśli nie herezją!

¹⁹ tłum. P. Siwek, PWN, Warszawa, 1990.



Ryc. 2.12. (a) Diagram Hertzsprunga-Russella: stosunek jasności absolutnej do temperatury powierzchni z zaznaczeniem niektórych charakterystycznych dla naszej Galaktyki gwiazd. (b) Historyczny teleskop z Harvardu, który umożliwił tę klasyfikację obecnie znajduje się w Toruniu w Obserwatorium Uniwersyteckim, został wypożyczony na 100 lat. ŹRÓDŁO: ESO; FOT. MARIA KARWASZ.

2.8. Ucieczka galaktyk

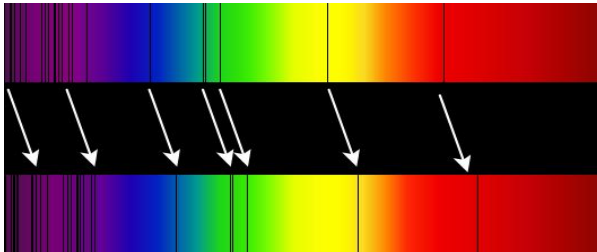
Badanie przebiegu życia gwiazd to gigantyczny krok również w kosmologii, czyli nauce o całym wszechświecie. Wśród gwiazd sklasyfikowanych na Harvardzie znajduje się pewien typ gwiazdy zmiennej, δ -Cephei położonej w gwiazdozborze Cefeusza: jej zmienność odkryto już w XVIII wieku. Wyjątkowość gwiazd zmiennych nazywanych *cefeidami* polega na tym, że ich jasność zmniejsza się stopniowo w ciągu kilku dni, po czym gwałtownie wraca do stanu początkowego. Prawdopodobnie są to czerwone olbrzymy, które zapadają się pod koniec cyklu swojego życia, a potem znów szybko rozbłyskują²⁰. Jeśli zmierzyć ich pozorną jasność i odległość (wykorzystując opisany niżej fortel), dochodzi się do wniosku, że okres zmienności cefeid zależy od ich rozmiarów. W ten sposób astronomowie zdobyli potężne na-

²⁰ Gwiazdą zmienną innego typu jest Betelgeza, alfa Oriona, czerwony nadolbrzym gotowy do eksplozji. Wybuch może nastąpić w ciągu najbliższych 500 lat.

rzędzie - sposób na zmierzenie bezwzględnych odległości gwiazd, nawet jeśli tylko cefeid.

Kilka cefeid zostało odkrytych w najbliższej nam galaktyce, Wielkim Obłoku Magellana, jeszcze przez badaczki astronomii z Harvardu. Inne odkryto później, najpierw w latach 20 XX wieku przez Edwina Hubble'a w Galaktyce Andromedy, oddalonej od nas o 2 miliony lat, a potem w jeszcze odleglejszych galaktykach.

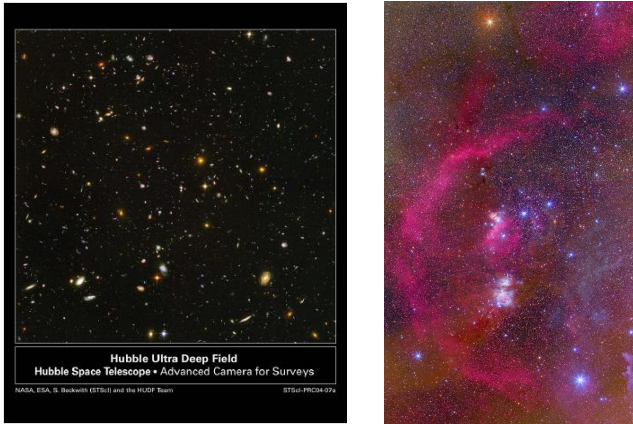
Wielkie odkrycie Hubble'a polegało jednak na czymś innym: to on zdał sobie sprawę że linie *spektralne* gwiazd w odległych galaktykach są przesunięte względem linii gwiazd w naszej Galaktyce. Przesunięcie zachodzi zawsze w tym samym kierunku: ku czerwieni. Ten sam efekt występuje kiedy oddala się od nas karetka pogotowia: dźwięk syreny wydaje się niższy, niż wtedy kiedy karetka się do nas zbliża. To zjawisko (dla syren) zostało odkryte w 1842 roku przez austriackiego fizyka Christiana Dopplera. Dziś efekt Dopplera jest wykorzystywany do pomiaru zarówno prędkości ucieczki odległych galaktyk jak i prędkości krwi w żyłach.



Ryc. 2.13. Efekt Dopplera pozwala na pomiar prędkości ucieczki odległych galaktyk: linie spektralne Słońca, górny panel (widma absorpcyjne: linie czerwone i

niebieskie są wynikiem obecności wodoru), przesuwają się w stronę czerwieni odległej galaktyki (BAS 11, panel dolny). Przemieszczenie zależy od prędkości ucieczki i rośnie wraz z odległością od nas: cały Wszechświat pęcznieje jak wyrastająca babka drożdżowa. ŹRÓDŁO: H.T. STOKES, BYU.

Jeśli połączyć wiedzę o jasności absolutnej (to jest o standardowej odległości) cefeid z właściwą im prędkością ucieczki, nie tylko dochodzi się do wniosku, że wszechświat puchnie, ale również, że prędkość ucieczki galaktyk rośnie wraz z ich odległością od nas. Ponadto staje się jasne, że nie da się wyznaczyć centralnego punktu tego pęcznienia (inflacji). Wszechświat rośnie jak ciasto drożdżowe, równomiernie, we wszystkich kierunkach jednocześnie.



Ryc. 2.14. (a) Kosmiczny teleskop Hubble'a został zwrócony na parę miesięcy w stronę obszaru nieba bez jasnych gwiazd. Pozwoliło to na obserwację bardzo słabych obiektów: odległych galaktyk. Na zdjęciu widać, że niektóre małe obiekty są dużo bardziej czerwone od innych: pozornie czerwone galaktyki są podobne do tych niebieskich, tylko że odległe. To potwierdza oryginalną obserwację Hubble'a: Wszechświat pęcznieje, a prędkość ucieczki wzrasta wraz z odległością. (b) Gwiazdozbiór Oriona, piękny, znakomicie widoczny w zimowe wieczory ponad południowym horyzontem. Na górze - Betelgeza, gwiazda alfa Oriona, czerwony olbrzym gotowy do wybuchu. Źródło: Hubble Telescope; Dominik Woś.

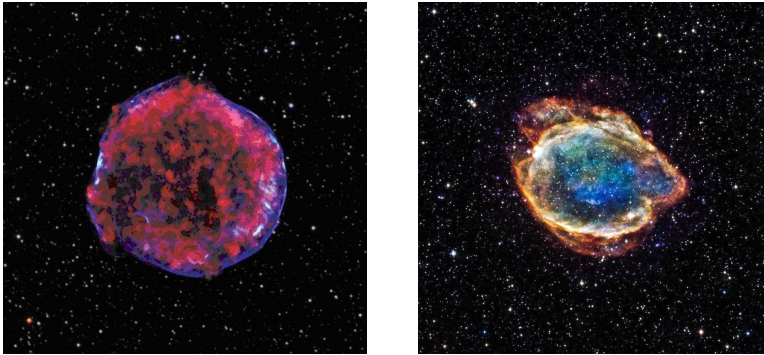
Wychodząc od zależności pomiędzy prędkością a odległościami między galaktykami można było wyprowadzić pierwsze szacunkowe rozmiary kosmosu. Następnie, dzięki zasadzie Einsteina, ustalono z grubsza wiek Wszechświata: około dziesięć miliardów lat. Ta liczba znacznie przewyższa obliczenia nie tylko fizyków (Lord Kelvin), ale nawet geologów.

2.9. Supernowe

Pomiary jasności gwiazd zmiennych określonego typu, cefeid, umożliwiły sprawdzenie czy galaktyki oddalają się od Ziemi. Najistotniejszą właściwością cefeid w tym przypadku jest dokładnie określony stosunek jasności (która zależy od objętości) do okresu zmienności (ten odpowiada okresowi pęcznienia). Cefeidy są średnio od tysiąca do dziesięciu tysięcy razy jaśniejsze od Słońca, ale nawet ta jasność nie wystarcza do zmierzenia odległości galaktyk oddalonych nie o

kilka milionów, ale o kilka miliardów lat świetlnych²¹: potrzebna była inna metodologia.

W 1572 w Gwiazdozborze Kasjopei zaobserwowano „nową” gwiazdę, bardzo jasną, w pierwszych miesiącach dorównującą jasnością Wenus. To był wybuch gwiazdy, która znajdowała się dość blisko nas, około 9 milionów lat świetlnych od Ziemi. Dziś pozostałości po tej eksplozji są ledwie widoczne na nocnym niebie, rys. 2.16a. Podobne zjawisko zaobserwował Kepler w 1604 (pierwszy zauważył je włoski astronom Lodovico delle Colombe). Wybuch miał miejsce 13 milionów lat świetlnych od Ziemi, a początkowa jasność „nowej” gwiazdy była trochę mniejsza od tej z 1572 roku.



Ryc. 2.16. (a) Pozostałości supernowej AD 1572 (Tychona Brahe) w promieniowaniu rentgenowskim: na czerwono promienie o małej energii, na niebiesko promienie o dużej energii. (b) Pozostałości supernowej (G299), prawdopodobnie widocznej gołym okiem 4500 lat temu. ŹRÓDŁO: CHANDRA.HARVARD.EDU.

W chińskich kronikach, w pierwszym roku ery cesarza Zhihe, który odpowiada u nas AD 1054, opisano supernową w Gwiazdozborze Raka. Ta sama gwiazda została zauważona przez Indian w Nowym Meksyku. Dziś dzięki obliczeniom astronomów wiemy, że ta gwiazda musiała być widoczna również za dnia. I rzeczywiście, wybuch nastąpił „zaledwie” 6,5 tysięcy lat świetlnych od Ziemi.

Warto zauważyć, że pozorna jasność, czyli ta widziana z Ziemi, maleje wraz z kwadratem odległości od supernowej. Innymi słowy ja-

²¹ Należy pamiętać, że zaobserwowana jasność zmienia się z kwadratem odległości, jeśli współczynnik tysięcy odpowiada odległości to wówczas współczynnik milion odpowiada jasności.

sność absolutna (mierzona z tej samej, standardowej odległości) dla wszystkich supernowych jest zawsze taka sama.

Podobnie jak w przypadku cefeid, wybuchy supernowych są spowodowane ściśle określonymi procesami i oznaczają wyczerpanie się pewnego typu paliwa nuklearnego, które zasila „gwiazdny piec”. Oznacza to, że supernowe mają podobne rozmiary i temperaturę w momencie wybuchu: znaleźliśmy nową świecę standardową.

W ciągu ostatniego tysiąca lat historii pisanej odnotowano prawdopodobnie pięć supernowych, które odpowiadałyby wybuchom gwiazd w naszej Galaktyce - jedną na około dwieście lat. Supernowa świeci przez kilka miesięcy, a potem znika w kosmosie. Wszechświat jest jednak pełen galaktyk. Dzięki coraz potężniejszym teleskopom astronomowie zaobserwowali wiele supernowych w odległych galaktykach. Podsumowując, przesunięcie koloru galaktyk ku czerwieni umożliwia pomiar prędkości ich „ucieczki”, choć poprawniej byłoby w tym przypadku mówić o prędkości inflacji (puchnięcia) całego Wszechświata. Jeśli zmierzmy pozorną jasność supernowych w odległych galaktykach, jesteśmy w stanie wyznaczyć dość precyzyjnie odległość, w jakiej się znajdują.

W 2011 roku trzem astronomom przyznano Nobla w dziedzinie fizyki za precyzyjny pomiar prędkości, z jaką rozszerza się Wszechświat, dokonany poprzez obserwację supernowych określonego typu znajdujących się w bardzo dużych odległościach (miliardów lat świetlnych) od Ziemi. Celem było ustalenie czy po Wielkim Wybuchu prędkość ekspansji Wszechświata maleje, i jeśli tak to w jaki sposób? Wydawałoby się naturalnym, że prędkość ta maleje wraz z upływem czasu (jak to możemy zaobserwować w mgławicach „planetarnych” po wybuchu gwiazdy, rys. 2.16). Poza tym, za kilka miliardów lat, ta prędkość mogłaby spaść do zera, a Wszechświat powinien wówczas zapaść się w sobie.

Odpowiedź, która nadeszła po wielu latach obserwacji, była zaskakująca: Wszechświat rozszerza się nie z powodu bezwładności, ale z powodu „ciśnienia wewnętrznego”. Innymi słowy, pomiary potwierdzają istnienie czynnika kosmologicznego z ogólnej teorii względności Einsteina, przypisując mu określoną wartość. Poza tym odkryto, że w historii Wszechświata prędkość ekspansji nie była stała: po początkowej szybkiej inflacji, proces ekspansji spowolnił, żeby przyspieszyć w ciągu ostatnich miliardów lat. Jak powiedział Saul Perl-

mutter, jeden z laureatów nagrody, to właśnie było prawdziwym zaskoczeniem:

Najwidoczniej mamy wszechświat zdominowany przez jakiś nowy składnik, nieznaną dotychczas „ciemną energię”, która sprawia, że wszechświat rozszerza się coraz szybciej. To takie rzadkie, natknąć się na coś co nie jest częścią naszego aktualnego modelu fizycznego! Mowa tu o jednym z najlepszych wyników, jaki można uzyskać w projektach takich jak ten. Czuję, że miałem dużo szczęścia, mogąc pracować przy tym projekcie, ponieważ każdy uzyskany wynik byłby ekscytujący: mogliśmy odkryć, że wszechświat jest nieskończony, albo że jest skończony i właśnie zmierza ku końcowi. Oba te rezultaty byłyby wielkie. Znaleźliśmy tymczasem odpowiedź przewyższającą te „wielkie”, i to było prawdziwym zaskoczeniem. W nauce to więcej niż można sobie wymarzyć.

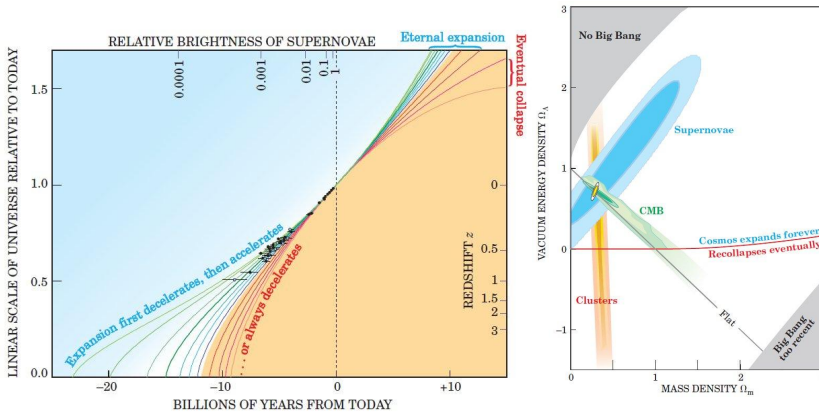
A tak Saul Perlmutter kontynuuje swoją refleksję, nie tylko metodologiczną, ale również filozoficzną:

Ten wynik to idealny przykład tego, jak często nauka staje się bronią obosieczną. Z jednej strony udało się odkryć coś, co było dla nas wszystkich prawdziwym zaskoczeniem tylko dlatego, że w naszej dziedzinie, w fizyce, poczyniono już wcześniej bardzo duże postępy w zrozumieniu Wszechświata. Jeszcze niecały wiek temu nie mieliśmy pojęcia, że we Wszechświecie jest coś więcej oprócz Drogi Mlecznej. Bezkrzesne rozmiary Wszechświata, fakt, że się rozszerza, że jest pełen obiektów takich jak wybuchające gwiazdy, to wszystko i znacznie więcej, musiało zostać odkryte zanim mogliśmy wykonać pracę, która skłoniła nas do zastanowienia się nad nieznaną formą energii, która stanowi ponad dwie trzecie wszystkiego co istnieje.

To niesamowite, ile zrozumieliśmy, a z drugiej strony to niesamowite jak wielka w efekcie tajemnica otworzyła się przed nami i ile jeszcze mamy do odkrycia. Jedną z prawdziwych przyjemności płynących z zajmowania się nauką, która mam nadzieję nadal pozostanie prawdziwą przyjemnością, każdego dnia, w najbliższych stuleciach, jest ta, że pomimo ogromu wiedzy na której możemy się oprzeć, wciąż jeszcze możemy odkryć tak wiele²².

My sami „dobrze wiemy”, że istnieje jeszcze wiele światów do odkrycia, niemniej usłyszeć taką opinię od noblisty, odkrywcy tajemniczych sił przenikających cały Wszechświat, to już zupełnie inna sprawa...

²² S. Perlmutter, Measuring the Acceleration of the Cosmic Expansion Using Supernovae, Nobel Lecture, Dec. 8th, 2011, p. 25. (C) Nobel Foundation. <https://journals.aps.org/rmp/pdf/10.1103/RevModPhys.84.1127>.



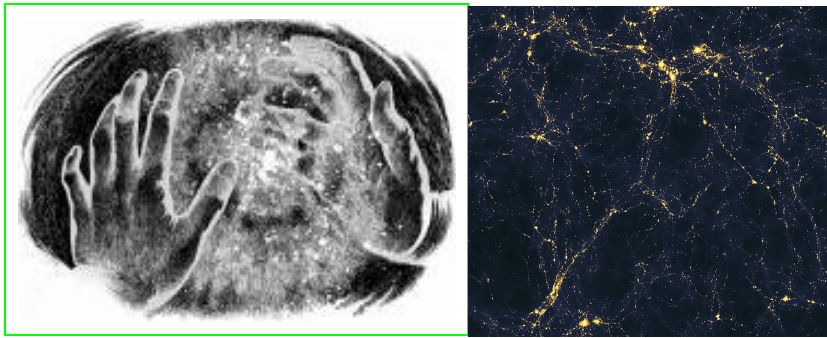
Ryc. 2.17. Dwa rysunki pochodzące z artykułu laureata Nagrody Nobla, S. Perlmuttera: (a) ostateczny rozmiar supernowych typu Ia obserwowanych z dużych odległości (miliardów lat) od Ziemi; wykres przedstawia historię 10 miliardów lat Wszechświata: obszar pokolorowany na jasny brąz odpowiada wszechświatowi, który zwalnia, obszar niebieski wszechświatowi, który przyspiesza. Punkty pomiaru znajdują się na krzywej wszechświata, który po początkowej eksplozji zwolnił swoją ekspansję i przyspieszył kilka miliardów lat temu. Teraz wszystko wskazuje na to, że Wszechświat jest nieskończony, i rozszerza się coraz szybciej. (b) Inne (teoretyczne) możliwości: nie ma żadnego Wielkiego Wybuchu (lewy górny róg), przedwczesny Wielki Wybuch (prawy dolny róg); czerwona krzywa oddziela wszechświat, który stale się rozszerza (powyżej) od wszechświata, który się zapada (poniżej). Czarna linia wyznacza „płaski” wszechświat, to znaczy - trójwymiarowy. Wiele różnych pomiarów pokrywa się. ŹRÓDŁO: PHYSICS TODAY 56, 4, 53 (2003) © AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, ZA ZEZWOLENIEM.

2.10. Palec Boży

Pomiary gwiazd supernowych w odległych galaktykach nie tylko potwierdziły przewidywania Einsteina, dowodząc istnienia „ciemnej” energii, ale dodatkowo stały się dowodem na to, że prędkość ekspansji zmienia się. Na stronach angielskiej Wikipedii poświęconych Nagrodzie Nobla przyznanej w 2011 roku pojawiła się bardzo nietypowa ilustracja (zob. rys. 2.18.). Tytuł strony „Fingers of God” został szybko zmieniony i dziś nosi nazwę „Red-shift space distortion”²³.

²³ https://en.wikipedia.org/wiki/Redshift-space_distortions.

Ten „palec Boży” pojawił się na Wikipedii, ponieważ, jak powszechnie wiadomo, galaktyki tworzą większe grupy - gromady (ang. „cluster”), składające się z kilkudziesięciu z nich, dalej „clusters” łączą się w większe supergromady (ang. „super-clusters”) na odległościach 500 milionów lat świetlnych. Supergromady są powiązane grawitacyjnie, tak że tworzą olbrzymią sieć, która wypełnia Wszechświat (zob. rys. 2.18b.). Nie znamy dotąd wiarygodnej przyczyny istnienia tych sieci.



Ryc. 2.18. „Palec Boży” („Fingers of God”) strona z angielskiej Wikipedii z 2011 roku, dziś zmieniona. (b) Włókna galaktyk widziane w skali całego wszechświata, nie wiemy dla-czego galaktyki łączą się w większe grupy zwane gromadami (mówi się o tajemniczej ciemnej materii jako o spoiwie), nie wiemy również dlaczego gromady tworzą włókna przypominające sieć, nie wiemy czy Wszechświat rozszerza się poza jego widocznymi granicami, nadal pozostaje więcej pytań, niż odpowiedzi. ŹRÓDŁO: WIKIPEDIA 2011, 2019.

Brakujące odpowiedzi z astrofizyki odsyłają nas do metafizyki. Współczesna kosmologia postawiła granice naszym możliwościom poznawczym. Pierwszy był Kopernik, potem Newton, Einstein i Perlmutter.

Czy istnieje coś większego od całego Wszechświata? Wielu naukowców i wielu pseudo-naukowców, spekuluje na ten temat. Nasz Wszechświat, który narodził się „wysysając” energię z innego, równoległego wszechświata, jak osobne bańki mydlane, wszechświata zamknięte w sobie niczym płatanina połączonych ze sobą kółek na klucze i tak dalej. Wszystkim tym pomysłom, niemożliwym do zweryfikowania, a więc zgodnie z „brzytwą Ockhama” nieistniejącym, należałoby przeciwstawić świętego Augustyna:

Pan Bóg stworzył świat...

4.1. Świat jest największy z rzeczy widzialnych. Pan Bóg jest największy z rzeczy niewidzialnych. Dostrzegamy istnienie świata, w istnienie Boga wierzymy. I wierzymy, że Bóg stworzył świat ponieważ nikt nie może dostarczyć dowodu, jeśli nie sam Bóg. Gdzie usłyszeliśmy Jego głos? W żadnym miejscu wśród wielu tak dobrze, jak w Piśmie Świętym, o którym powiedział Prorok: *Na początku Bóg stworzył niebo i ziemię*. Ten prorok nie był obecny, kiedy Bóg stworzył niebo i ziemię, ale była tam mądrość Pana Boga, poprzez którą zostały stworzone wszystkie rzeczy²⁴.

2.11. Nasze kosmologiczne granice

Jakie są filozoficzne konsekwencje nowoczesnej kosmologii? Pierwsza jest taka, że po krótkiej iluzji Oświecenia, znów znamy nasze ograniczenia. Drugie prawo Newtona mówi, że aby osiągnąć określoną prędkość należy przez wystarczająco długi czas działać z określoną siłą. To oznacza również, że aby przyspieszyć potrzeba energii. Prawa Newtona to nasze pierwsze ograniczenie nałożone na podróżę w czaso-przestrzeni: nie da się dotrzeć do granic wszechświata – nie starczy naszego życia ani paliwa dla rakiety.

„Logicznym następstwem” drugiego prawa Newtona jest teoria względności Einsteina: nie można zsumować dwóch prędkości światła, żeby otrzymać podwójną prędkość, prędkość światła przy przesyłaniu dowolnego obiektu materialnego będzie za każdym razem maksymalna (również samego światła).

Zazwyczaj drugie prawo Newtona zapisuje się w następującej formie:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

gdzie \mathbf{F} oznacza siłę, która działa, m masę, która ulega przyspieszeniu i \mathbf{a} przyspieszenie (tłustym drukiem zaznaczono, że \mathbf{F} oraz \mathbf{a} są wektorami, czyli cechują się nie tylko wartością, ale również kierunkiem).

Ale przyspieszenie to wzrost $\Delta\mathbf{v}$ szybkości w przedziale czasowym: Δt : $\mathbf{a} = \Delta\mathbf{v}/\Delta t$, a zatem równanie Newtona można zapisać:

$$\mathbf{F} \Delta t = m \Delta\mathbf{v},$$

stąd jasno wynika, że aby zwiększyć prędkość potrzeba albo większej siły, albo dłuższego czasu. W ten sposób drugie prawo Newtona (wraz z ograniczonymi zasobami energii do wytwarzania nieskończonych sił)

²⁴ „Państwo Boże,” święty Augustyn, tłum. z wł. GK.

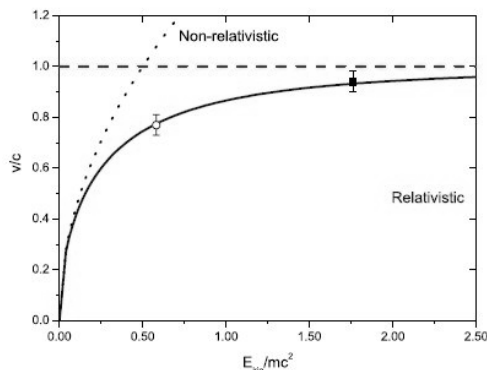
staje się naszą pierwszą „kotwicą”, uniemożliwiając nieskończenie długie podróże w ograniczonym czasie. Nasz umysł może dotrzeć do krańców wszechświata w sekundę, naszemu ciału zajęłoby to miliardy lat.

Skończona prędkość światła wyznacza zatem również granice naszych możliwości poznania przestrzeni: nie wiemy, czy Wszechświat rozszerza się dalej, niż na odległość 13,78 miliardów lat świetlnych, ponieważ światło spoza tej odległości jeszcze do nas nie dotarło.

Co więcej, drugie prawo Newtona również się zmieniło wraz z pojawieniem się teorii względności Einsteina: masa m obiektu, który przyspiesza nie jest stała, ale rośnie do nieskończoności w miarę, jak jego prędkość v zbliża się do prędkości światła c , zgodnie z formułą podaną przez Einsteina:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

gdzie m_0 oznacza „masę spoczynkową”, czyli masę ciała w bezruchu.



Ryc. 2.19. To niemożliwe, aby elektron (czy jakiegokolwiek inny obiekt, który ma masę, a więc wszystkie obiekty poza fotonami i grawitonami) poruszał się z prędkością światła: masa elektronu m w stosunku do jego masy spoczynkowej m_0 rośnie asymptotycznie w granicach prędkości

v równej prędkości światła (podane dwa punkty doświadczalne). ŹRÓDŁO: M. LUND. U.J. UGGERHØJ, AM. J. PHYS. 77 (1982), STR. 757.

To co nieskończenie daleko jest więc dla nas nieosiągalne, bo przyspieszenie do prędkości światła jest praktycznie niemożliwe. Jesteśmy ograniczeni w czasie i przestrzeni. Nasza (meta-fizyczna) myśl – nie, ale (fizyczne) ciało – tak!

2.11.1. Strach przed czarną dziurą

Na zakończenie naszych interaktywnych lekcji astronomii dla dzieci, którym towarzyszy zwykle mnóstwo eksperymentów, pada wiele pytań. Zazwyczaj połowa z nich dotyczy czarnych dziur. Istnieją? Można do nich wejść? Można z nich wyjść? Jak wygląda świat w środku?

Pojęcie czarnej dziury jest bardzo łatwe do wytłumaczenia. Bardzo masywne gwiazdy, których masa jest ponad dziesięć razy większa od masy Słońca, mogą zakończyć życie jako czarne dziury: obiekt tak ciężki, że nic, nawet światło, nie ucieknie przed ich siłą grawitacji. Jak już wcześniej widzieliśmy, gwiazdy, którym kończy się paliwo, mogą wybuchnąć jak supernowe, ale mogą też zapaść się w sobie tworząc kule o bardzo gęstej masie – gwiazdy neutronowe. Gęstość tych gwiazd jest tak duża, że łebek szpilki zrobiony z takiej masy ważyłby tyle ile dziesięciopiętrowy budynek. Gęstość masy wewnątrz czarnej dziury jest jeszcze większa, nie wiemy dokładnie o ile.

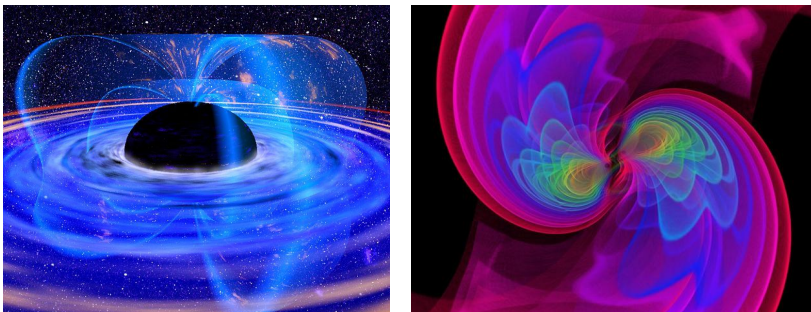
Siła grawitacji wokół czarnej dziury jest tak duża, że nie tylko żaden obiekt nie może uciec, nawet światło może zostać przez nią uwięzione. Teoretycznie światło nie ma masy, ale ponieważ niesie energię, cząsteczkom światła, fotonom, można przypisać masę zgodnie z równaniem Einsteina $E = mc^2$. Przelatując blisko Słońca światło gwiazd ulega lekkiemu przyciąganiu: jego droga odchyła się od linii prostej. Ten efekt zaobserwowano już w 1919 podczas zaćmienia Słońca²⁵. Światło, które dociera do czarnej dziury zostaje dosłownie wchłonięte.

Skoro światło, które tam dociera, już się stamtąd nie wydostaje, to kula utworzona z tak ciężkiej materii wydaje się całkowicie czarna, tak jak na „zdjęciu” 2.20a. Dopiero ostatnio uzyskano niezbite dowody na istnienie czarnych dziur - fale grawitacyjne, czyli zakłócenia czasoprzestrzeni, dopiero od niedawna są wykrywalne za pomocą niezwykle wyrafinowanych urządzeń (z dokładnością względną rzędu 10^{-23}). Pierwsza fala zarejestrowana w 2015 roku, jest dowodem kolizji, a raczej wzajemnego pochłonięcia się dwóch czarnych dziur o masie zbliżonej do 30 mas Słońca, każda, zob. rys. 2.21. Była to tak ważne odkrycie, że zostało natychmiast (w 2017 roku) nagrodzone przez Komitet Nobla.

Jak wygląda materia wewnątrz czarnej dziury? Trudno nawet nazwać ją materią: ekstremalna siła grawitacji miażdży wszystko, nawet atomy. Nie będzie tam już pierwiastków chemicznych: wodoru, węgla, tlenu, znajdziemy tam tylko mieszkankę neutronów, wszystkich

²⁵ Obserwacja dokonana przez dwie angielskie ekspedycje nie była prostym przedsięwzięciem, ale jej rezultat potwierdził ogólną teorię względności Einsteina: odchylenie promienia światła z odległej gwiazdy od linii prostej, przechodzącego w pobliżu Słońca, było dwa razy większe od tego przewidywanego w teorii Newtona.

identycznych. Można by porównać czarną dziurę do kotła pełnego dziwnych cząstek, z pewnością bardzo, ale to bardzo gorących.



Ryc. 2.20. (a) Na zewnątrz dziura grawitacyjna jest idealnie czarną dziurą: nie wychodzi z niej żaden promień światła; silne pole grawitacyjne na zewnątrz dziury przyspiesza materię, sprawiając że ta świeci, zanim zostanie wchłonięta. (b) Artystyczna, ale oparta na szczegółowych obliczeniach, reprodukcja kolizji dwóch czarnych dziur o masach 29 i 36 mas słonecznych, zarejestrowana na Ziemi (14.09.2015 roku) dzięki falom grawitacyjnym, miała miejsce w odległości 1,3 miliardów lat świetlnych. ŹRÓDŁO: GODDARD SPACE FLIGHT CENTER NASA (CC), <http://www.gsfc.nasa.gov/gsfsc/spacesci/pictures/blackhole/BH1.tif>; Nature News, 16/02/2016, doi:10.1038/530261a.

Nie tylko materia jest miażdżona, w czarnej dziurze zatrzymuje się również czas²⁶. Sekunda staje się wiecznością - w sensie fizycznym, a nie tylko metaforycznym. Czarna dziura to bez wątpienia koniec wszystkiego tego, co piękne wokół nas. Strach dzieci przed czarną dziurą jest uzasadniony. Szczęśliwie dla nas, te dotychczas odkryte, które błakają się po kosmosie, są od nas oddalone o miliardy lat świetlnych²⁷.

²⁶ S.S. Gubser, F. Pretorius, *I buchi neri*, (Czare dziury), Le Scienze, Roma 2018.

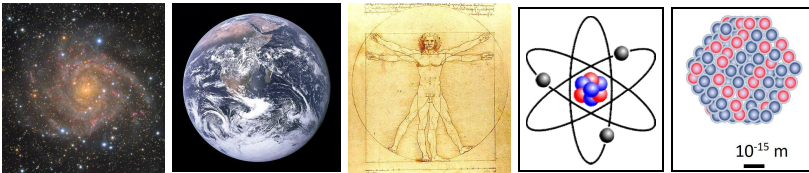
²⁷ Nagrodę Nobla w zakresie fizyki w 2020 roku otrzymali Roger Penrose za teoretyczne przewidywania „konstrukcji” horyzontu czasoprzestrzennego czarnych dziur oraz Reinhard Genzel i Andrea Ghez za doświadczalne (poprzez precyzyjne obserwacje astronomiczne) potwierdzenie istnienia czarnej dziury w centrum naszej Galaktyki. Ma ona masę prawie 4 milionów mas Słońca. Na szczęście jest on nas daleko: 30 tys. lat świetlnych. A raczej Układ Słoneczny leży, na nasze szczęście, daleko od tej czarnej dziury: spadająca na czarną dziurę materia emituje ogromne ilości różnego rodzaju promieniowania – z pewnością niezbyt „zdrowotnego” dla delikatnego życia opartego o chemię węgla.

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", 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; (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 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 gwiazdozbiorze 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: gęstego płynu do pocierania podłóg (nigdy garnków ze stali nierdzewnej, ponieważ pozostaną porysowane!). Te ziarenka, prawie niewidoczne gołym okiem (jedna mi-

¹ 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 i L, 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 neutron²) 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.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 składający się z 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: jeśli przyrównamy Słońce do pomarańczy, to Ziemia, wielkości łebka szpilki byłaby odległa o 10 m.

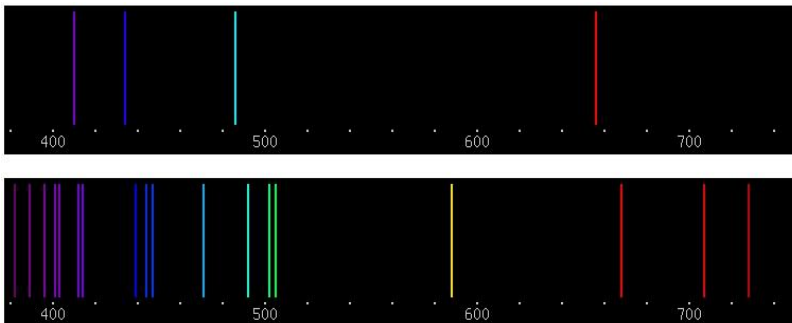
O dziwo (tj. z powodu praw elektrostatyki) wszystkie atomy, niezależnie od ich masy, od wodoru do ołowiu, są podobnej wielkości, około 10^{-10} m. Identyczne (rządzące się tymi samymi prawami mikroświata) jest też rozmieszczenie elektronów (które formują "orbitale", jak na rys. 3.6 poniżej).

Od kilku lat istnieją bezpośrednie metody wizualizacji atomów, proste z conceptualnego 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 odczytej 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*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)

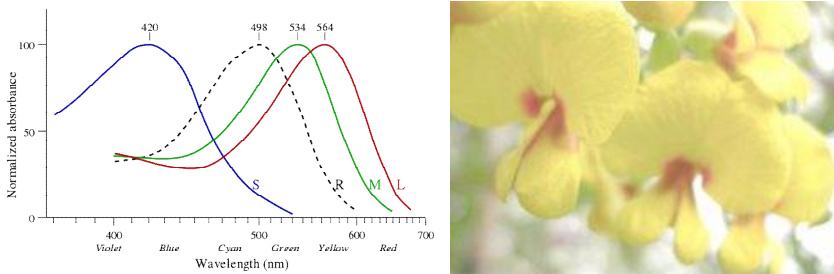
To, czy fotony (światło Arystotelesa) są ciałami, czy nie, pozostaje otwartą debatą wśród fizyków: fotony posiadają masę, ale tylko wtedy, gdy podróżują (z prędkością światła). Kiedy są nieruchome, nie mają masy, w rzeczywistości po prostu nie istnieją. I znowu w jednym fakcie Arystoteles miał rację: 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. Czuość 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 $E = h\nu$, gdzie częstotliwość ν fali jest powiązana z jej długością λ 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 $E = h\nu$ (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 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 błady.

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 nanometrów⁵. 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 oko⁶, wrażliwe nie na matematykę kwantów ale na piękno obrazu?

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

⁶ 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), rozarty 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, 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 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 w nosie) stymuluje oddychanie, podczas gdy NO_2 jest trujący.

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



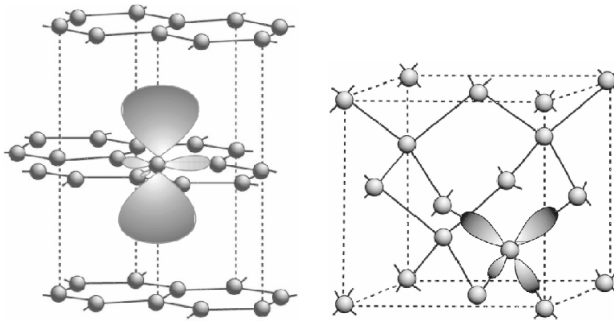
Ryc. 3.5. Związki atomów mogą mieć właściwości fizyczne bardzo różne od ich składników. a) Rtęć, Hg, metal ciężki, jest cieczą w temperaturze otoczenia: roztrąta z siarką (b), tworzy szary proszek HgS; w postaci krystalicznej HgS jest minerałem zwanym cynobrem, jasnoczerwonym pigmentem (c). ŹRÓDŁO: AUTOR

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 niezwykłej różnicy właściwości elektrycznych, chemicznych, strukturalnych, mechanicznych, która powoduje niewielką zmianę 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. 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 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).⁸

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, Al_2O_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 Fe_2O_3 , a kolor czarny, jeśli - FeO . Stąd pochodzą wszystkie niuanse, które wykorzystują malarze: podziwiają obrazy na ryc. 3.7.

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

⁸ 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. & Scalla 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.

1A																	8A			
1																	2			
H																	He			
2	3	4																	10	
Li	Be																	Ne		
3	4	11	12																	18
Li	Be	Na	Mg																	Ar
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr			
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			
6	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
7	87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118		
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uuq	Uuo			
8	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103					
	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					

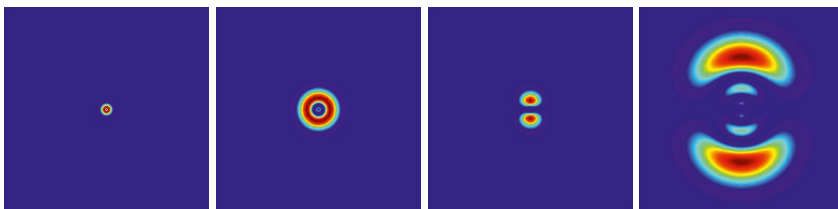
Ryc. 3.8. Układ okresowy pierwiastków chemicznych: dodanie elektronu radykalnie zmienia właściwości chemiczne, tak jak między fluorem (gaz bardzo reaktywny) a neonem (gaz chemicznie obojętny). ŹRÓDŁO: Wikipedia.

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 H₂, 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.

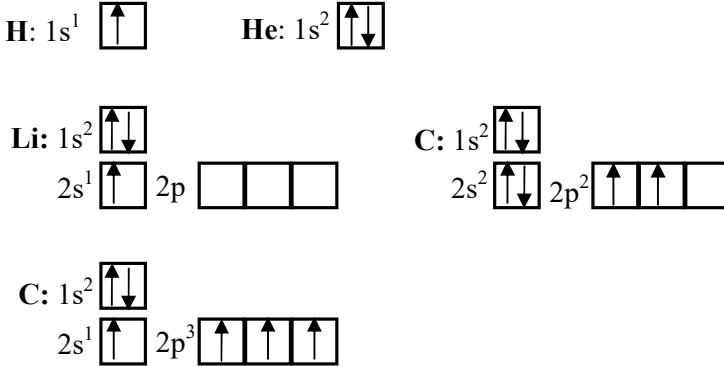
W berylu czwarty elektron może nadal zajmować orbitę kołową; w borze (lekkim, ale twardym metalu), a następnie w węglu, azocie, tlenie, fluorze, neonie, elektrony zajmują, jeden po drugim, orbity w kształcie podwójnego obwarzanka, jak cyfra "8" (patrz rys. 3.9c). Możliwe są trzy różne pozycje (wzdłuż 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 licie 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 promieniu⁹ 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 szybciej¹⁰ 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

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

¹⁰ 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 neutronową¹¹. 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-

¹¹ Dopiero niedawno, w 2017 roku, zaobserwowaliśmy fale grawitacyjne spowodowane zderzeniem dwóch gwiazd neutronowych: niezbity 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 przezroczyste¹² dla podczerwieni (stąd funkcja "grzejnika" w szklarniach szklanych), ani dla ultrafioletu (białe "gogle" pozostają, gdy ktoś opala się w okularach ze szklanymi soczewkami). Światło jest falą!

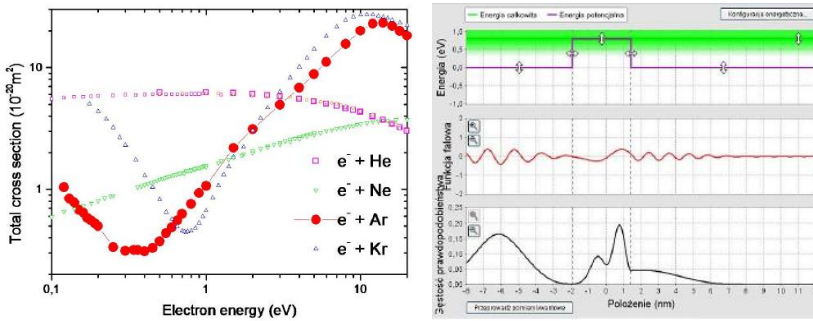
Efektu Ramsauera nie można wyjaśnić, chyba że założy się, że elektrony są falami i że ich długość tych fal zależy od energii. Zmieniając długość fali, w pewnych warunkach gazy stają się przezroczyste. Po pracy de Broglie'a stało się jasne, że elektron można opisać jako falę. Potrzebne było równanie.

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

¹² Szkło składa się zasadniczo z tlenku krzemu, SiO_2 . 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 (górną 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" Ψ . Używana jest stała \hbar , tj. stała Plancka h podzielona przez 2π (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 częściowo¹³ przechodzi) przez

¹³ "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 Ψ (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 mikrokosmosie¹⁴: 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 lekkiego¹⁵ elektronu - tak!

¹⁴ 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.

¹⁵ 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 ciągle: 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 wysłać 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 "bursztyń", gdyż potarty bursztyń "elektryzuje"¹⁶, a w konsekwencji przyciąga kurz.

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

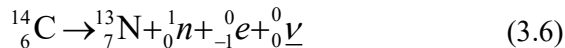
Elektrony są głównymi składnikami całej materii i, jak wykazały ostatnie eksperymenty przeprowadzone we włoskim laboratorium Gran Sasso, są stabilne (tj. wieczne): ich czas życia przekracza wiek Wszechświata.

Jon 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 atmosferze¹⁷ 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

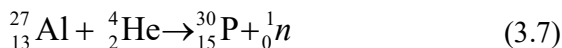


gdzie n oznacza neutron (masa 1, ładunek 0), a $-$ dla elektronu (masa 0, ładunek -1), ν – antyneutrino (masa i ładunek = 0). Ten rozpad, w którym powstaje elektron, nazywany jest *beta*, czyli nazwą, która zo-

¹⁷ 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 minut¹⁸ zostało przekształcone przez emisję elektronu w krzem, izotop ³⁰Si. 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

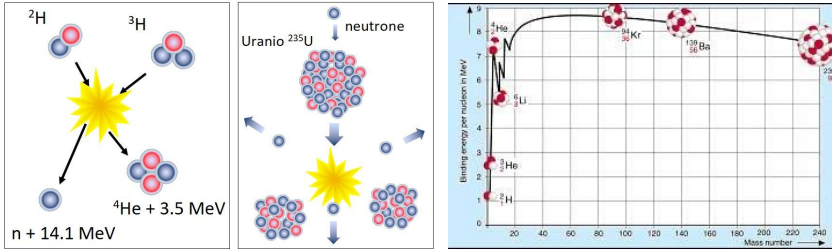
Jeszcze sto lat temu nie było wiadomo, jakie jest źródło energii Słońca. W 1897 roku słynny fizyk, Lord Kelvin (który wynalazł absolutną skalę temperatury), spektakularnie pomylił wiek Słońca (datując go na zaledwie 50 milionów lat), ponieważ wierzył, że źródłem jego energii jest jego kolaps pod wpływem 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.

¹⁸ Radioaktywny okres półtrwania izotopu ³⁰P 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}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}Fe ; jądro helu ^4He również jest nadzwyczaj silnie związane; ŹRÓDŁO: (a, b) T. Wróblewski; c) European 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 14,4 MeV (milion razy więcej).¹⁹

Tak więc w reakcjach syntezy jądrowej (helu z wodoru, węgla i tlenu z helu²⁰ 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) kry-

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

²⁰ 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 wątpienia 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 ładunku²¹ o wartości $-e$, proton o ładunku dodatnim $+e$, neutron o ładunku zerowym. Ze wszystkich trzech cząstek wiadomo było również, że charakteryzują się one własną rotacją²² (*spinem*), która w jednostkach "atomowych" wynosi $\frac{1}{2}$. Wierzone 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.

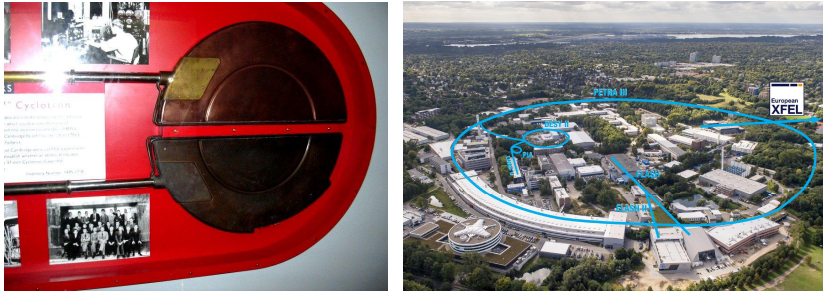
Pewne wątpliwości wynikały z faktu, że w niektórych rozpadach (zwanymi *beta-minus*) neutron rozpada się na proton i elektron, podczas gdy w innych bardzo podobnych rozpadach proton rozpada się na neutron i elektron o ładunku dodatnim, zwany pozytonem. Ten elek-

²¹ 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.

²² 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 elektrony, 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? 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.

3.13. Niewidzialne, przenikliwe, niebezpieczne, korzystne

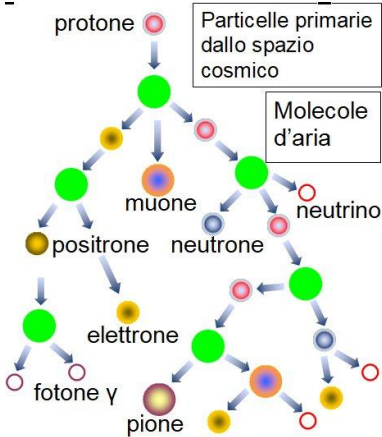
Promieniowanie jądrowe, takie jak cząstka *alfa* emitowana w reakcji (3.8), przenosi energię i z tego powodu może jonizować nie tylko atomy (rozdział 3.4), ale także bardziej złożone cząsteczki, takie jak DNA. W reakcjach jądrowych emitowane są nie tylko cząstki, ale także energia, w postaci fal elektromagnetycznych. 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 $E = mc^2$.



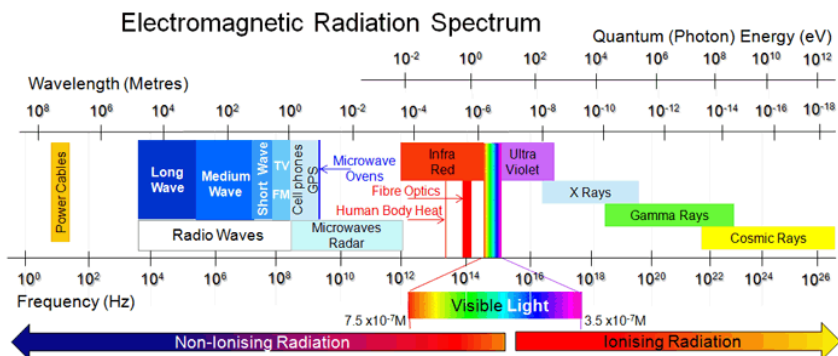
Ryc. 3.16. "Deszcz" cząstek elementarnych (elektronów, pozytonów, mionów, neutronów) jest generowany przez wysokoenergetyczny proton pochodzący z promieniowania kosmicznego. Wszystkie te cząstki, włączając promieniowanie *gamma*, mogą powodować uszkodzenie struktury DNA, wywołując w ten sposób mutacje.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

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 wątpliwości 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.

²³ 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 maleńki 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 ⁴⁰K (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 cząstki²⁴. 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-

²⁴ 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 jest bardzo mała, rzędu kilku eV.

stabilną²⁵; 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".²⁶ 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):



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



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 (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.

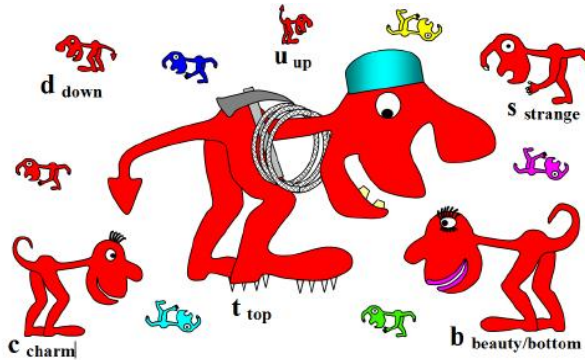
Niektóre teorie (które jednak nie mają eksperymentalnej weryfikacji) przewidują, że w bardzo wysokich temperaturach (10^{14} K) protony, neutrony i mezony mogą "rozpuszczać się" w plazmie lub w "zupie" wolnych kwarków. Bez wątpienia te formy materii byłyby bardzo egzotyczne, *nieuporządkowane* i *niestabilne*,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

²⁵ Czas życia protonu, oszacowany eksperymentalnie, przekracza wiek Wszechświata.

²⁶ 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: „górną” *up* i „dolną” *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 minuty²⁷

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 zbyt niemu zbliżeniu się elektronu do protonu: ich minimalna odległość wynosi około 1/2 angstroma ($1\text{Å} = 10^{-10}\text{ m}$). Gdyby elektron spadł na proton, mógłby utworzyć neutron²⁸, 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.

²⁷ 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.

²⁸ 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 „starciu”. 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 pojedynczych²⁹ 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) ustąpiło 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.

²⁹ 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 (3×10^9 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, deuteru³⁰. Jak pisze Stephen Weinberg, od początku wszechświata minęły dokładnie trzy minuty i 46 sekund³¹. Skład materii został ustalony³², 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;

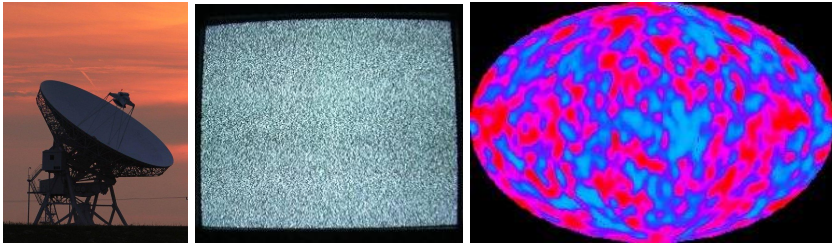
³⁰ Deuter znajduje się również w cząsteczkach wody w oceanach. Będzie on wykorzystywany do zasilania reaktorów termojądrowych przyszłości. Zasoby są wystarczające, aby zapewnić energię dla całej ludzkości na następne 3000 lat.

³¹ S. WEINBERG, *op. cyt.*, s. 125.

³² 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)³³.

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.

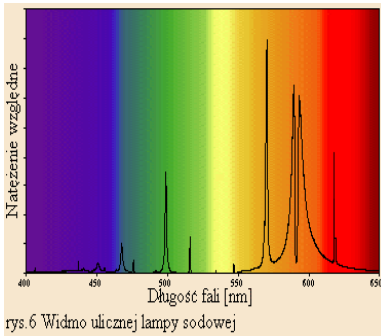
W momencie rozdzielenia światła i materii temperatura wszechświata wynosiła około 3000 K, co odpowiada dokładnie pomarańczo-

³³ 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 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 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?



rys. 6 Widmo ulicznej lampy sodowej



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

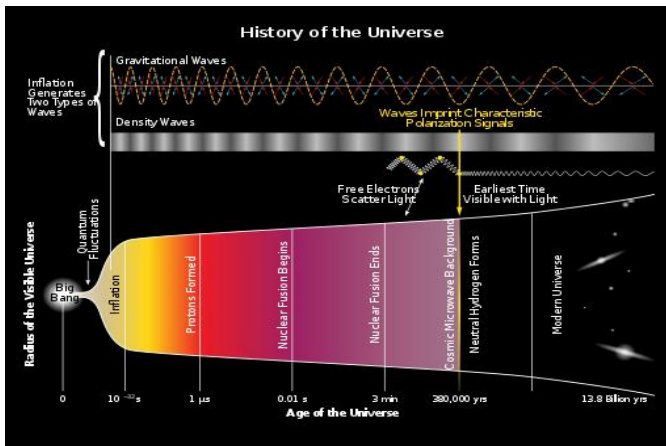
temperaturę odpowiadającą miliardom stopni. Oczywiście, jeśli chodzi o fizykę Galileusza – powtarzalne eksperymenty z poważnymi upadkami – Wielki Wybuch nie pasuje do kanonów weryfikowalnej teorii naukowej: nie możemy powtórzyć Wielkiego Wybuchu w swojej złożoności. Jednak wszyscy fizycy zgadzają się (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 ewoluować³⁴. 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 inflacji³⁵ 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.

³⁴ 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?

³⁵ "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))

Zwolennicy³⁶ początkowej inflacji Wszechświata uważają, że wszechświat eksplodował o współczynnik równy około 10^{26} w ciągu 10^{-32} sekund. Współczynnik 10^{26} oznacza, że wszechświat urosł z wielkości główki od szpilki³⁷ 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 przeskok skok 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"³⁸ (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.

³⁶ "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)).

³⁷ 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.

³⁸ 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).

Przyjaciół, 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 neutronami) 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 4×10^{14} km. Są też inne gwiazdy, ale zawsze kilka lat świetlnych stąd³⁹: 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/c²) w przeliczeniu na temperaturę (przy użyciu równoważności $E = kT$) odpowiada 2 bilionom (2×10^{15}) stopni Celsjusza. Czy jest sens mówić o temperaturze? Czy możemy zastosować te same prawa natury, które

³⁹ 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 fizyczne⁴⁰?

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...

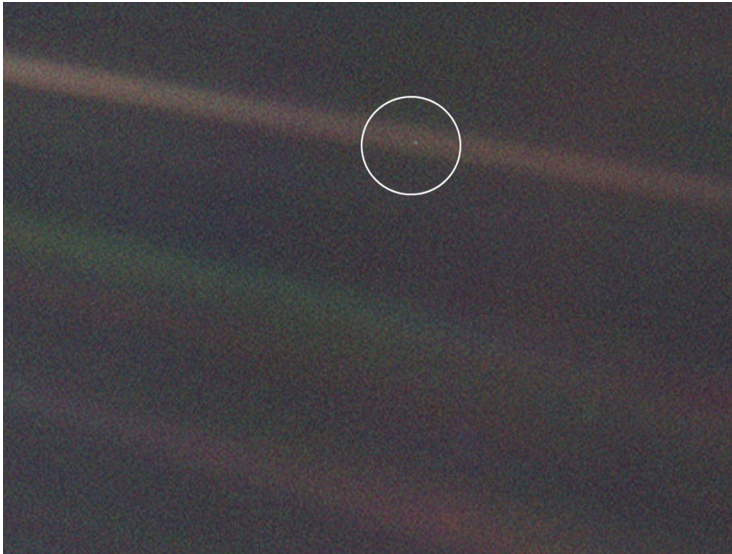
P.S. Krąży opinia, że wielu fizyków, w przeciwieństwie do niektórych innych naukowców, jest wierzących. Dlaczego? Fizycy wiedzą, że wszechświatem rządzą prawa matematyczne i rozumieją, że nic nie dzieje się przypadkowo. Wiedzą również, że prawa fizyki są bardzo złożone (co znajduje odzwierciedlenie w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

⁴⁰Dyskusja o stałych Natury została poświęcona omówieniu stałych fizyki przez słynnego fizyka teoretycznego z Cambridge, JOHNĄ BARROWĄ, *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 powiedział⁴¹:

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.

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

