

FRANK CLOSE

ŁADUNEK

**Siła przyciągania
i zagadka równowagi
Wszechświata**

Tytuł oryginału: CHARGE: Why Does Gravity Rule?

Tłumaczenie: Amata-Jo Papaj

Projekt okładki: Maciej Grzegorek

ISBN: 978-83-289-3732-1

© Frank Close 2024

CHARGE: Why Does Gravity Rule? was originally published in English in 2024. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. Helion S.A. is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

Polish edition copyright © 2026 by Helion S.A.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiejkolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Wszystkie znaki występujące w tekście są zastrzeżonymi znakami firmowymi bądź towarowymi ich właścicieli.

Autor oraz wydawca dołożyli wszelkich starań, by zawarte w tej książce informacje były kompletne i rzetelne. Nie biorą jednak żadnej odpowiedzialności ani za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne naruszenie praw patentowych lub autorskich. Autor oraz wydawca nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Drogi Czytelniku!

Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres

helion.pl/user/opinie/ladsil

Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

Helion S.A.

ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice

tel. 32 230 98 63

e-mail: helion@helion.pl

WWW: helion.pl (księgarnia internetowa, katalog książek)

Printed in Poland.

- [Kup książkę](#)
- [Poleć książkę](#)
- [Oceń książkę](#)

- [Księgarnia internetowa](#)
- [Lubię to! » Nasza społeczność](#)

Spis treści

1. DWUIPÓŁTYSIĄCLETNIA TAJEMNICA	9
2. ATOM JĄDROWY	31
3. SIŁA ELEKTROMAGNETYCZNA	49
4. NOWE METODY	67
5. KWARKI	87
6. KOLOROWY ŚWIAT KWARKÓW	105
7. KWARKI O DWÓCH OBLICZACH	123
8. TAJEMNICE MATERII	145
9. FIZYKA PODZIEMNA	167
10. TAJEMNICE ŁADUNKÓW	181

DWUIPÓŁTYSIĄCLETNIA TAJEMNICA

Gdybyśmy powiększyli atom niewyobrażalną liczbę razy, w pierwszej kolejności ujrzelibyśmy rój maleńkich naładowanych elektrycznie cząstek. To elektrony. Elektron wydaje się być jedną z podstawowych liter w alfabecie natury — jeśli w jego wnętrzu kryją się jeszcze bardziej fundamentalne składniki, nie znaleźliśmy dotąd żadnych ich śladów. Każdy elektron jest identyczny pod względem kształtu, rozmiaru i masy, a także niesie tę samą niewielką ilość ujemnego ładunku elektrycznego.

O ile jednostki masy, długości i czasu są nam dobrze znane — gramy i kilogramy, metry i kilometry, sekundy i lata — o tyle z miarą ładunku elektrycznego jesteśmy oswojeni trochę mniej. Jednostką ładunku jest kulomb, którego symbolem jest wielka litera C.

Ładunek jednego elektronu jest znikomy. Potrzeba ponad sześciu bilionów elektronów, żeby uzyskać jeden mikrokulomb

— czyli 0,000001 kulomba — mniej więcej tyle ładunku, ile można poczuć jako lekkie ukłucie elektryczności statycznej. Jednak nawet w drobinie kurzu jest więcej atomów niż wszystkich gwiazd w naszej galaktyce, a każdy z tych atomów zawiera kilka elektronów. Choć ładunek jednego elektronu jest nieistotny, wynik pomnożenia tej małej wielkości niezliczoną ilość razy może być zdumiewający.

Na przykład z każdym oddechem wchłaniasz około dziesięciu miliardów bilionów atomów tlenu, z których każdy zawiera kilka ujemnie naładowanych elektronów. W sumie daje to około 15 000 kulombów ładunku elektrycznego — wystarczająco dużo, by wywołać wyładowanie tysiąca piorunów. A jednak nic nie czujesz. Włosy nie stają Ci dęba, nie sypią się z Ciebie iskry ani nie doświadczasz porażenia prądem. A co to by było za porażenie! Jeśli oddychasz miarowo, ten przepływ odpowiada prądowi elektrycznemu o natężeniu około 3000 amperów — wystarczającemu, by Cię zabić, a dodatkowo oszczędzić spadkobiercom kosztów kremacji. Mimo to wszyscy jakoś pozostajemy przy życiu. Nie odczuwamy żadnych oznak tej potężnej elektryczności ukrytej głęboko w naszych wnętrzach. Dlaczego tak się dzieje, pozostaje tajemnicą¹.

Teorii próbujących wyjaśnić to zjawisko jest mnóstwo, a częściowe odpowiedzi już nawet znaleziono. Jednak u samych podstaw tej zagwozдки leży jedno z najbardziej fundamentalnych nierozwiązanych pytań nauki.

¹ Wyprowadzenie tych liczb znajduje się w podrozdziale „Dodatek. Porażenie prądem”.

Elektrony mogą wydawać się dziwaczными cząstkami ukrytymi w atomach, bez większego znaczenia dla codziennego życia, w rzeczywistości są jednak bramą do współczesnego świata. To najbardziej podstawowe i łatwo dostępne nośniki ładunku elektrycznego. Gdy ładujesz baterię w laptopie, telefonie czy nawet samochodzie elektrycznym, gromadzisz elektrony do późniejszego wykorzystania.

Taki przepływ może zachodzić w układach scalonych komputerów, wzdłuż włókien układu nerwowego, który przesyła sygnały z mózgu do mięśni, w przewodach trakcyjnych lub trzeciej szynie zasilającej pociągi elektryczne, a także odgrywać podstawową rolę w niezliczonych zastosowaniach współczesnej elektroenergetyki. Na ruchu elektronów opiera się w gruncie rzeczy znaczna część nowoczesnej technologii. Prąd o natężeniu jednego ampera definiuje się jako przepływ jednego kulomba ładunku w ciągu sekundy. Odpowiada to przejściu przez jeden punkt około 6,24 miliarda miliardów elektronów w czasie jednego uderzenia serca.

Te ogromne liczby elektronów w ruchu sprawiają, że nawet niewielkie natężenia prądu mogą być śmiertelne. Tradycyjnie przy ocenie wpływu prądu elektrycznego na ludzkie ciało posługujemy się miliamperami — czyli tysięcznymi częściami ampera. Już 10 miliamperów może wywołać bolesne porażenie, natomiast prąd o natężeniu między 100 a 200 miliamperów jest zabójczy. Jeśli dotkniesz przewodu, przez który płynie prąd o natężeniu wyższym niż 10 miliamperów, Twoje mięśnie zaczną

kurczyć się tak silnie, że nie będziesz w stanie puścić drutu, który Cię razi — mięśnie kontrolujące płuca zostaną sparaliżowane i w krótkim czasie utracisz zdolność oddychania. Przy mniej więcej 100 miliamperach zostaje zaatakowany mięsień sercowy — komory serca zaczynają niekontrolowane migotać, co prowadzi do śmierci. Powyżej 200 miliamperów szanse przeżycia paradoksalnie rosną, ponieważ mięśnie serca chwyta tak silny skurcz, że zapobiega to migotaniu komór. Mogą jednak wystąpić poważne oparzenia.

Fizjologia porażenia prądem to złożony temat, lecz powyższe dramatyczne fakty wystarczą, by uwypuklić nasz paradoks. Prąd o natężeniu 100 miliamperów może zabić, większe natężenia przypalają tkanki i organy, a mimo to wdychanie 15 000 kulombów z każdym oddechem odpowiada przyjęciu 3000 amperów w ciągu paru sekund — a robimy to przecież bez przerwy. Jeden piorun może przynieść śmierć, a Ty właśnie wchłonałeś równowartość tysiąca piorunów. Jak to możliwe, że nadal żyjesz? Dlaczego wokół Twojej głowy nie latają iskry, nadając Ci wygląd szalonej postaci z kreskówki, podczas gdy Ty ulegasz zwęgleniu?

Odpowiedź tkwi w fakcie, że w każdym atomie, w centrum tego roju ujemnych ładunków, znajduje się masywna — kilka tysięcy razy cięższa od jednego elektronu — gęsta bryłka o ładunku dodatnim: jądro atomowe. Elektryczne przyciąganie przeciwnych ładunków więzi ujemnie naładowane elektrony w odległym roju wokół tego zwartego, dodatnio naładowanego jądra.

W przeciwieństwie do elektronu, który wydaje się być cząstką elementarną, jądro to skomplikowana bestia — skupisko dwóch

rodzajów cząstek, niemal bliźniaczych. Jedna z nich, neutron, jest elektrycznie obojętna i około 2000 razy cięższa od elektronu. Druga, proton, jest niemal identyczna jak neutron, z wyjątkiem jednej zasadniczej różnicy: proton jest naładowany dodatnio. Liczba protonów w jądrze określa jego całkowity ładunek elektryczny i miejsce w układzie okresowym pierwiastków — na przykład hel, pierwiastek numer dwa, zawiera dwa protony, azot, siódmy, zawiera siedem i tak dalej.

Dodatnio naładowane jądro jest źródłem pól elektrycznych, które kształtują strukturę materii. Najbardziej niezwykły jest fakt, że wielkość dodatniego ładunku protonu dokładnie odpowiada wielkości ujemnego ładunku elektronu. Jakakolwiek potencjalna różnica między tymi zrównoważonymi ładunkami jest zbyt mała, byśmy mogli ją kiedykolwiek zmierzyć — są identyczne z dokładnością lepszą niż jedna część na miliard bilionów. Najprawdopodobniej są po prostu takie same.

Ta równowaga jest tak doskonała, że 15 000 kulombów ujemnego ładunku w elektronach niezliczonych atomów zostaje całkowicie zneutralizowane. Przyciąganie przeciwnych ładunków i odpychanie ładunków jednoimiennych rządzi budową cząstek, kryształów i kształtów niemal wszystkiego wokół nas — nie wyłączając nas samych. Te przeciwstawne siły, zakorzenione w binarnych źródłach ładunku elektrycznego — dodatnim i ujemnym — znoszą się tak precyzyjnie, że w wielkich skalach to grawitacja rządzi ruchem planet i galaktyk gwiazd. Gdyby jednak ta równowaga została zaburzona choćby o jedną część na miliard bilionów, siły elektryczne zdominowałyby grawitację, a Wszechświat przestałby istnieć.

Dzięki tej elektrycznej symetrii istnienie ogromnych ilości ładunku elektrycznego pozostaje skutecznie ukryte w materii, z której się składamy. Jednak poza ładunkiem elektrycznym elektrony i protony są zupełnie różne. Nośnik ujemnego ładunku, elektron, nie ma mierzalnych rozmiarów i wydaje się być jedną z podstawowych liter alfabetu natury. Nośnik ładunku dodatniego, proton, ma natomiast wymierną wielkość. Odkryty nieco ponad sto lat temu, szybko okazał się tak mały, że dopiero 10 000 protonów ułożonych obok siebie dorównałoby rozmiarowi atomu wodoru. Protony są więc maleńkie, a jednocześnie każdy z nich jest co najmniej 1000 razy większy od elektronu. Co więcej, potrzeba prawie 2000 elektronów, by zrównoważyć masę jednego ciężkiego protonu. Czy nie jest zatem dziwne, że dwa tak różne składniki są tak doskonale symetryczne w odzwierciedlaniu swoich ładunków elektrycznych?

Przenieśmy się o pół wieku wstecz, do roku 1968, a zagadka jeszcze się pogłębi. Masa i rozmiar protonu w porównaniu z elementarnym elektronem sugerowały badaczom, że proton nie leży u podstaw struktur natury. Narastające podejrzenie, że sam proton kryje w sobie labirynt wewnętrznej struktury, potwierdziło się wraz z odkryciem, iż protony są złożonymi obiektami zbudowanymi z mniejszych elementów zwanych kwarkami. Podobnie jak elektron, który wydaje się być prawdziwie elementarną cząstką — najlżejszą ze wszystkich naładowanych elektrycznie cząstek zwanych leptonami — tak i kwarki wyglądają na lekkie cząstki elementarne, które tworzą proton, neutron i całą gamę innych ulotnych, dziwnych, powabnych, a czasem pięknych cząstek, zwanych zbiorczo hadronami.

Leptony i kwarki wykazują pod wieloma względami uderzające podobieństwa. Natomiast zbiorowe układy kwarków — hadrony — są całkowicie niepodobne do jakichkolwiek leptonów. Hadrony odczuwają silne oddziaływanie jądrowe, dlatego protony i neutrony znajdują się razem w jądrze atomowym, mimo że dodatnie protony wzajemnie się odpychają. Leptony przebywają w odległych zewnętrznych rejonach atomu, ślepe na oddziaływanie silne. Najczęstsze i najbardziej stabilne przykłady tych dwóch rodzin — elektron i proton — są więc fundamentalnie bardzo różne. Dlaczego zatem tak dobrze współpracują, tworząc Wszechświat, którego jesteśmy częścią? Jak to możliwe, że protony i elektrony są tak doskonale powiązane elektrycznie?

Do dziś, 2500 lat po odkryciu magnetyzmu i ładunku elektrycznego, przyczyna neutralności materii pozostaje zagadką. Gdyby ta równowaga była doskonale zachowana w każdym atomie, niezwykle trudno byłoby odkryć, że w samej materii ukryte jest elektryczno-magnetyczne „spoiwo”, nadające jej kształt i strukturę. Natura pogrzebała swoje sekrety głęboko — lecz nie ukryła ich całkowicie. By zerwać elektryczne wiązanie utrzymujące elektrony wokół masywnego jądra atomowego, wystarczy temperatura rzędu kilku tysięcy stopni. Jeden lub dwa elektrony mogą się uwolnić nawet pod wpływem temperatury pokojowej. To właśnie łatwość, z jaką elektrony przechodzą z jednego atomu do drugiego, stanowi fundament chemii, biologii i życia.

Odkrycia te dojrzały dopiero pod koniec XIX wieku, ale świadomość istnienia ładunku elektrycznego i magnetyzmu jest tak stara jak sama nauka. Choć atomowe zarodki materii są

elektrycznie zrównoważone, wskazówki dotyczące architektury atomu i jego głębokiej struktury elektrycznej są wszędzie. Trzeba je tylko rozpoznać, a potem zinterpretować, co to wszystko oznacza.

Wewnętrzna siła

Magnetyzm jest przejawem elektryczności i vice versa. Elektryczność i magnetyzm są wpisane w naturę rzeczywistości od zarania dziejów. Pięć miliardów lat temu, gdy nowo narodzoną Ziemię stanowiła gorąca plazma wirujących prądów elektrycznych, przepływy te wytwarzały pola magnetyczne. W miarę jak magma stygła, tworząc to, co dziś stanowi stałą zewnętrzną skorupę planety, magnetyzm został „zamrożony” w minerałach zawierających żelazo, takich jak magnetyt.

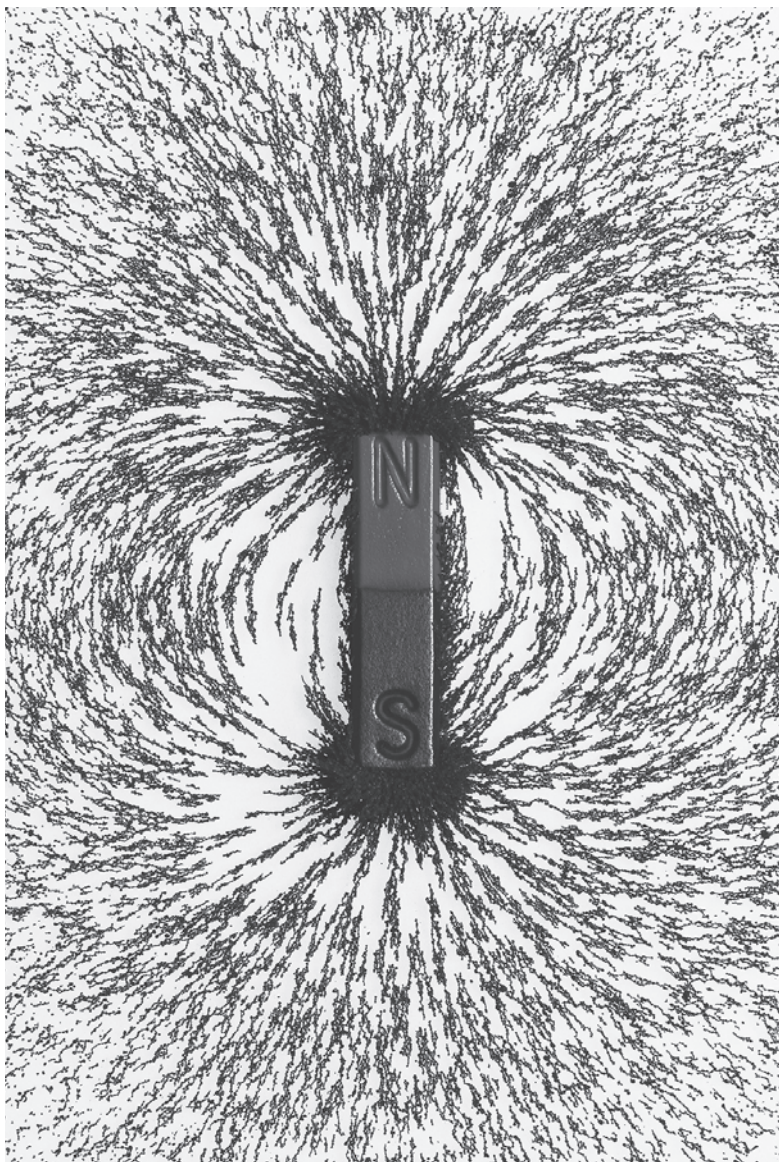
Dziś ciekłe jądro Ziemi wciąż jest roztańczonym wirem prądów elektrycznych, które generują pole magnetyczne. Sięga ono atmosfery i rozciąga się daleko poza nią, niewykrywalne dla naszych zmysłów. Zanim jednak dotrze ku niebu, przenika ziemską skorupę — i to właśnie tam pozostawia materialny ślad, świadectwo istnienia siły potężniejszej niż grawitacja, działającej we wnętrzu planety i sięgającej bardzo daleko poza nią.

We wczesnym prekambrze, cztery miliardy lat temu, gdy powierzchnia Ziemi stygła, pierwiastki chemiczne gromadziły się w warstwach skalnych. Najbardziej stabilny z nich, żelazo, jest dziś jednym z najobficiej występujących pierwiastków w skorupie. Skały magmowe powstały z wulkanicznej lawy i mają tę właściwość, że w obecności pola magnetycznego zawarte

w nich atomy żelaza zachowują się jak żołnierze na defiladzie — same ulegają namagnesowaniu i ustawiają się zgodnie z narzuconym porządkiem. Wykorzystuje się to w popularnych pokazach, podczas których można uczynić pole magnetyczne magnesu sztabkowego widzialnym (rysunek 1.). Najpierw na powierzchni stołu rozsypuje się drobne opiłki żelaza, a następnie ostrożnie umieszcza się wśród nich magnes. Jego pole magnetyczne indukuje magnetyzm w opiłkach, zamieniając je w tysiące miniaturowych magnesów. Każdy z nich ustawia się zgodnie z lokalnym kierunkiem pola, ujawniając lokalne zmiany kierunku pola magnetycznego.

Magnes sztabkowy stanowi prosty model reprezentujący magnetyzm Ziemi. Jej północny i południowy biegun magnetyczny odpowiadają biegunom magnesu, a ziemskie pole magnetyczne rozciąga się daleko w przestrzeń kosmiczną. W przestrzeni nie ma żelaznych opiłków, lecz na Ziemi występują ogromne złoża rud żelaza — we wzgórzach, klifach i pasmach górskich. W niektórych miejscach skupiska minerałów magnetycznych są wyjątkowo rozległe, jak na włoskiej wyspie Elbie czy na górze Idzie w Azji Mniejszej, gdzie ogromne odkrywki skalne zachowały naturalne właściwości magnetyczne skał znanych od starożytności jako kamień magnetyczny, dziś określanych mianem magnetytu.

Z tym minerałem wiąże się legenda sprzed tysięcy lat. W starożytnej Grecji pasterz noszący skórzane sandały podbite żelaznymi gwoździami miał się potknąć, gdy silne oddziaływanie magnetyczne przyciągnęło gwoździe w jego obuwiu. Niezależnie od tego, czy pasterz o imieniu Magnes rzeczywiście odkrył skałę,



Rysunek 1. Pole magnetyczne. Magnes sztabkowy indukuje magnetyzm w opilkach żelaza, co pozwala zaobserwować jego rozciągające się między biegunami pole magnetyczne

od której wzięła się jej nazwa, i czy stało się to w Magnezji na północ od Aten, na górze Ida w Azji Mniejszej, czy może na jakiejś innej górze Ida na Krecie, można przypuszczać, że podobne — choć zapewne mniej dramatyczne — sytuacje zdarzały się w różnych miejscach i epokach.

Oddziaływanie magnetyczne z pewnością musiało być zauważalne już w epoce żelaza. Piorun to potężne wyładowanie elektryczne, które wytwarza silne pole magnetyczne i może namagnesować skały zawierające żelazo. Również wytapianie czystego metalu z rud ujawniało ich właściwości przyciągające. Można więc przypuszczać, że zjawisko to znane jest od około 3000 lat. Podobnie jak odkrycie ognia, wiedza o magnetyzmie mogła pojawić się niezależnie w różnych miejscach, wszędzie tam, gdzie zetknięto się z naturalnie namagnesowanymi skałami.

Skały magnetyczne występują bowiem powszechnie. W XVI wieku podróżnicy opisywali najokazalsze okazy z Indii Wschodnich i wybrzeży Chin: „Bardzo masywna i ciężka, [skała] potrafi przyciągnąć lub unieść kawałek żelaza czy stali o ciężarze równym własnemu”². Wraz z upowszechnianiem się wiedzy — od mitu w języku greckim, przez łacinę, aż po języki współczesne — nazwy ewoluowały: od „Magnesowej skały” do „magnesu”.

Bursztynowy nektar

O ile magnetyzm pozostawiał po sobie wyraźny ślad, ładunek elektryczny ujawniał swoją obecność jedynie pośrednio. W wielu

² Robert Norman, *The Newe Attractive*, 1581.

źródłach można przeczytać, że starożytni Grecy odkryli, iż pocieranie bursztynu futrem lub jedwabiem powoduje przyciąganie kawałków suchych piór. Złocisty, słoneczny kolor bursztynu skłonił starożytnych Greków do użycia słowa *elektor* — „lśniący” — na jego określenie. Z czasem przekształciło się ono w „elektron”, który to termin w 1881 roku Johnstone Stoney zaproponował jako nazwę podstawowej jednostki ładunku. Po odkryciu składnika atomu niosącego ładunek ujemny słowo „elektron” stało się nazwą tej elementarnej naładowanej elektrycznie cząstki atomu. Świadczy to o znaczeniu bursztynu w historii ładunku elektrycznego, ale rodzi pytania: czym jest bursztyn i dlaczego starożytni pocierali go tkaniną?

Przez miliony lat, zanim pojawili się ludzie, rozległe obszary globu były pokryte lasami iglastymi. Skamieniała żywica z tych drzew wygląda jak zastygły złocisty miód. Połysk bursztynu sprawił, że już w epoce kamienia, około 13 000 lat temu, powszechnie używano go do wyrobu biżuterii. Bursztyn po wypolerowaniu nabiera blasku, a ludzie prehistoryczni uzyskiwali ten efekt, pocierając go o futra upolowanych zwierząt. Nikt nie przypuszczał, że to przypadkowe zestawienie — bursztynu potartego futrem — odsłoni coś na kształt naturalnej magii: zdolność bursztynu do przyciągania drobnych skrawków skóry, piórek czy suchych liści, unoszenia ich z podłoża, a nawet wprawiania w taniec w powietrzu.

Skłonność bursztynu do przyciągania kurzu musiała być dla dawnych polerników źródłem nieustannej irytacji: po energicznym pocieraniu odsuwali się, by podziwiać efekt — tylko po to, by się przekonać, że ich wysiłek psują drobinki kurzu i brudu.

Polerowali więc jeszcze zawzięciej, aż w końcu udawało się im wydobyć właściwy połysk — zapewne dopiero wtedy, gdy do polerowania dodawali odrobinę śliny. Dziś wiemy, że podobną właściwość wykazują niektóre tworzywa sztuczne oraz skóra, zwłaszcza przy energicznym szczotkowaniu — stąd wzięło się angielskie określenie *spit and polish*, oznaczające staranne pucowanie butów przed szczególnymi okazjami. Z czasem „plucie i polerowanie” stało się wręcz zasadą przy nadawaniu połysku klejnotom.

Ta „magiczna” właściwość była znana już w Syrii, gdzie tkacze używali bursztynu jako zakończenia wrzeciona. Gdy wprowadzone w ruch wirowało, przelatujący przez powietrze bursztyn elektryzował się i przyciągał skrawki tkaniny. Tkacze nazwali go „chwytaczem”. Nie jest to zresztą cecha zastrzeżona dla bursztynu — podobnie zachowują się szkło i gagat (sprasowany węgiel), które po potarciu również wykazują zdolność przywierania do drobnych przedmiotów, a lekkie kulki rdzeniowe mają wyjątkową zdolność gromadzenia ładunku elektrycznego.

W dzisiejszym świecie częściej niż bursztynu używamy grzebieni z plastiku: wystarczy przeciągnąć taki grzebień przez włosy, by zaobserwować, jak przyciąga drobne skrawki papieru. W suchy dzień szybkie czesanie może nawet wywołać iskry, widoczne w zaciemnionym pomieszczeniu. To zaledwie miniaturowy odpowiednik błyskawicy — tyle że pozbawiony efektów dźwiękowych — dlatego powiązanie tych dwóch zjawisk wymagało naprawdę dużego skoku myślowego. Przez ponad 1000 lat nikomu się to nie udało.

Czym jest ładunek elektryczny?

Wiele lat temu, jeszcze w czasach szkolnych, kupiłem XIX-wieczną książkę zatytułowaną *The Reason Why — in Science* („Powód, dla którego... Wyjaśnienie w nauce”)³. Zawierała ona 1258 pytań, na które odpowiedzi zmieściły się na 274 stronach. Zaczynała się od pytań: „Czym jest światło?”, „Czym jest ciepło?” i „Jakie są właściwości ciepła?”. Następne było pytanie numer cztery: „Czym jest elektryczność?”. Odpowiedź brzmiała: „Elektryczność jest właściwością siły, która tkwi we wszelkiej materii i nieustannie dąży do osiągnięcia równowagi. Czym naprawdę jest elektryczność, nie zostało jeszcze odkryte”.

Dziś można by odpowiedzieć, że elektryczność to przepływ ładunku elektrycznego, co z kolei rodzi pytanie: „Czym jest ładunek elektryczny?”.

Szczerze: tak naprawdę nie wiemy. Maksyma Świętego Mateusza „po owocach ich poznać”⁴ jest chyba najbliższa temu, co obecnie jesteśmy w stanie stwierdzić. Ładunek elektryczny to pojęcie wymyślone, aby wyjaśnić szeroki zakres tego, co nazywamy zjawiskami elektrycznymi.

Historycznie pierwszym systematycznym badaniem tych osobliwych efektów była obserwacja, że kulka wykonana z rdzenia bzu, dotknięta szklaną pałeczką wcześniej potartą jedwabiem, oddalała się od pałeczki z zadziwiająco dużą siłą. Zjawisko było niewątpliwie rzeczywiste, dlatego przyjęto, że kulka została

³ J. Scott, M.A. (red.), *The Reason Why—in Science*, Sisley’s Ltd, Makers of Beautiful Books (b.d.).

⁴ Mt 7:16.

naelektryzowana dodatnio. W języku potocznym mówiono po prostu, że otrzymała dodatni ładunek elektryczny. Wielkość tego ładunku można było następnie określić, mierząc siłę obserwowanego (odpychającego) oddziaływania.

Podobnie odkryto, że jeśli laskę ebonitową potrze się kocim futrem, kulka z rdzenia bzu będzie do niej *przyciągana*. Zjawisko poddania kulki nowemu, silnemu oddziaływaniu wydawało się takie samo jak poprzednio, z tą różnicą, że odpychanie zamieniło się w przyciąganie. Ta zmiana zachowania doprowadziła do koncepcji, że kulka otrzymała *ujemny* ładunek elektryczny. Jednoznacznym zjawiskiem jest to, że kulkę z rdzenia bzu można wprowadzić w jeden z tych dwóch stanów. Kwestią *definicji* jest stwierdzenie, że otrzymała ona pewną ilość dodatniego lub ujemnego ładunku elektrycznego.

Wszelkie rozważania o zjawiskach elektrycznych, w szczególności o ładunku elektrycznym, zaczynają się od tych dwóch prostych obserwacji. Nadanie dodatniego lub ujemnego ładunku dwóm kulkom z rdzenia bzu doprowadziło do odkrycia, że kulki naładowane tym samym znakiem ładunku — niezależnie od tego, czy dodatnim, czy ujemnym — odpychają się wzajemnie, natomiast gdy jedna jest naładowana dodatnio, a druga ujemnie, przyciągają się. To właśnie to zjawisko doprowadziło do powstania reguły, że ładunki jednoimienne się odpychają, a różnoimienne przyciągają. Dlaczego tak jest? Ostatecznie nie wiemy. Taki jest charakter tych zjawisk; reguła przyciągania i odpychania elektrycznego w kategoriach ładunków dodatnich i ujemnych jest obserwacją empiryczną.

Im energiczniej pocieramy pałeczki, tym większa jest siła elektryczna między kulkami. To odkrycie naturalnie pasowało

do koncepcji, że pocieranie wytwarza ładunek elektryczny, a większa energia powoduje powstanie większej ilości ładunku, co prowadzi do zwiększonej siły elektrycznej. Ustalono regułę, że siła między dwiema kulkami jest proporcjonalna do iloczynu ładunków w każdej z nich i maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości między nimi. Jako pierwszy ustalił to francuski uczony Charles Augustin de Coulomb w 1785 roku. To właśnie na cześć Coulomba nazwano jednostkę ładunku elektrycznego.

Zjawiska te były znane na długo przed ustaleniem pojęć atomów czy elektronów. Naturalnie nasuwało się pytanie, czy istnieje minimalna ilość ładunku elektrycznego, jaką można przypisać ciału. To właśnie ta koncepcja zainspirowała amerykańskiego fizyka Roberta Millikana w 1909 roku.

Zamiast kulki z rdzenia bzu Millikan użył najmniejszego możliwego kulistego ciała, które zachowywałoby swoją masę, tak aby po uwolnieniu odczuwało stałą siłę grawitacji. W słynnym eksperymencie Millikana rolę kulki z rdzenia bzu odgrywały kropelki oleju o średnicy około 1 mikrometra, rozpylane z atomizera. Tarcie podczas rozpylania nadawało kroplom ładunek elektryczny. Millikan utrzymywał je w stabilnej atmosferze, bez prądów konwekcyjnych. W nieobecności pola elektrycznego krople opadały pod wpływem grawitacji, ale jako że były bardzo małe i podlegały lepkiemu oporowi powietrza, spadały stosunkowo wolno, co umożliwiało obserwację i pomiar ich właściwości.

Dwie metalowe płytki — jedna podłączona do bieguna dodatniego, druga do ujemnego bieguna baterii — wytwarzały pole

elektryczne, które można było włączać i wyłączać za pomocą przełącznika. Pole przebiegało bezpośrednio od jednej płytki do drugiej, a siła działała na naładowane cząstki w kierunku pola. Podczas zamiany bieguna dodatniego na ujemny i odwrotnie zmieniał się ogólny kierunek pola, a tym samym kierunek siły działającej na kroplę. Siła elektryczna przyspieszała lub spowalniała krople w zależności od kierunku pola elektrycznego i wielkości ładunku kropli. Po wyłączeniu pola krople opadały na dolną płytkę i ulegały unicestwieniu, ale włączenie pola zatrzymywało niektóre krople w locie, a nawet powodowało ich unoszenie się ku przeciwnie naładowanej płytce. Powtarzając tę procedurę wielokrotnie, Millikan był w stanie usunąć niemal wszystkie krople, aż mógł skupić się na jednej, dla której siły grawitacji i elektryczna równoważyły się na tyle, że kropla utrzymywała się w zawieszeniu.

Pomysł polegał teraz na zmianie wielkości ładunku na kropli i naświetlaniu jej promieniowaniem nadfioletowym lub poddaniu działaniu radioaktywności radu. Kropla poruszała się wówczas pod działaniem siły elektrycznej z prędkością proporcjonalną do wielkości tego ładunku. Millikan odkrył, że gdy ilość ładunku się zmieniała, prędkość kropli zawsze stanowiła dwu-, trzy- lub inną całkowitą wielokrotność pewnego minimum — nigdy zaś nie była jej ułamkiem. Prędkości te występują więc w dyskretnych porcjach, czyli kwantach, ponieważ ładunek elektryczny jest skwantowany i może przyjmować jedynie określone, nieciągłe wartości, mające pewną elementarną wielkość.

W 1923 roku, za zmierzenie fundamentalnej wielkości ładunku elektrycznego, Millikan otrzymał Nagrodę Nobla. W przemó-

wieniu wygłoszonym przed Fundacją Noblowską w 1924 roku podsumował doniosłe znaczenie tego eksperymentu. Stwierdził, że dosłownie „zobaczył” elektron — rozumiany jako podstawowy kwant ładunku elektrycznego — mierząc (w kategoriach prędkości) „najmniejszą z sił elektrycznych, jaką dane pole elektryczne wywiera na kulkę z rdzenia bzu, na której pracuje i której ruch definiuje sam ładunek elektryczny”. Ponadto „coś, co zdecydowaliśmy się nazywać ładunkiem elektrycznym, może być dodawane lub usuwane z kulki z rdzenia bzu tylko w ilościach, które powodują, że siła na nią działająca wzrasta o określone całkowite wielokrotności najmniejszej zaobserwowanej siły”⁵.

Poprzez pomiar tysięcy kropelek z różnych substancji i o różnych rozmiarach i przepuszczanie ich przez gazy o znanej lepkości i ciśnieniu udało się zmierzyć ładunek elektryczny nie w kategoriach prędkości nadawanej danej kropelce oleju, lecz w bezwzględnych jednostkach elektrostatycznych — we współczesnym języku: w kulombach. Millikan odpowiedział następująco na pytanie, czym jest ładunek elektryczny:

Elektrony, zarówno dodatnie, jak i ujemne, są po prostu obserwowanymi centrami siły elektrycznej.

Przez „elektrony” rozumiał on podstawową jednostkę ładunku elektrycznego. Uważał ładunki ujemny i dodatni za komple-

⁵ Robert A. Millikan, *The electron and the light-quant [sic] from the experimental point of view*, wykład noblowski, 23 maja 1924, <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/millikan-lecture.pdf>.

mentarne, a tym samym równe co do wartości bezwzględnej. Dla niego tajemnicza asymetria przejawiała się w sposobie, w jaki te dwa rodzaje ładunku manifestują się w cząstkach elementarnych (przypomnijmy, że w 1924 roku, gdy wygłaszał swoje przemówienie, jedynymi znanymi naładowanymi cząstkami elementarnymi były elektron i proton). Millikan powiedział zgromadzonym na ceremonii noblowskiej:

Wymiary elektronów można zasadniczo pominąć, to znaczy oba można dla celów praktycznych traktować jako ładunki punktowe, choć — jak powszechnie wiadomo — dodatni ma masę 1845 razy większą od ujemnego. Dlaczego tak jest, nikt nie wie. To kolejny fakt doświadczalny.

Przenikanie się znaczeń słowa „elektron” jako jednostki ładunku elektrycznego i jako cząstki niosącej ujemną postać tego ładunku może być mylące dla współczesnego czytelnika. Jasne jest jednak, że Millikan dostrzegał głęboką asymetrię. I właśnie w niej tkwi podstawowa zagadka, przed którą stoimy.

Millikan był świadomy pojawienia się zastrzeżeń wobec jego odkrycia i zastanawiał się:

Czy kiedykolwiek odkryjemy, że elektrony dodatnie lub ujemne są podzielne?

Nie jest jasne, czy mówiąc „podzielne”, Millikan miał na myśli możliwość, że fizyczny elektron i proton zbudowane są z mniejszych składników, czy też że równe kwanty ujemnego

i dodatniego ładunku elektrycznego są wielokrotnościami jakiegoś jeszcze mniejszego kwantu. Jeśli chodzi o odpowiedź na własne pytanie, stwierdził:

Jeśli elektron kiedykolwiek zostanie podzielony, stanie się to prawdopodobnie dlatego, że człowiek, dysponując nowymi narzędziami tak różnymi od promieni X i promieniotwórczości, jak te różnią się od sił chemicznych, otworzy kolejne pole badań, gdzie elektrony będą mogły zostać rozdzielone bez utraty żadnych z unitarnych właściwości, które — jak dotąd ustalono — posiadają w relacjach, w jakich je do tej pory badaliśmy.

W stulecie hipotezy Millikana ta książka pokazuje, w jakim stopniu udało się na nią odpowiedzieć.

Dodatek. Porażenie prądem

Najmniejsza wartość zmierzona przez Millikana odpowiadała ładunkowi elektrycznemu niesionemu przez pojedynczy elektron — od tej pory słowo „elektron” odnosi się do cząstki o tej nazwie. Wynosi on około $1,6 \cdot 10^{-19}$ kulomba. Korzystając z tej liczby, pozwolę sobie na krótką dygresję, by zweryfikować szokujące twierdzenia z pierwszych akapitów. Możesz też przyjąć je na wiarę i pominąć ten krótki dodatek.

Oto jak je obliczyłem. Poszczególne liczby możesz sprawdzić w wiarygodnym źródle internetowym lub podręczniku do fizyki. Ich połączenie to już tylko arytmetyka.

Równe objętości gazów w tej samej temperaturze i przy tym samym ciśnieniu zawierają tę samą liczbę cząsteczek. Jako pierwszy sformułował to Włoch Amadeo Avogadro na początku XIX wieku. Obliczył on tak zwaną liczbę Avogadra, czyli liczbę cząsteczek gazu potrzebną, by jego masa równała się masie cząsteczkowej wyrażonej w gramach — wielkość tę nazywamy molem. Na przykład dla gazu wodorowego o wzorze chemicznym H_2 byłyby to 2 gramy, dla tlenu O_2 — 16 gramów, a dla pary wodnej H_2O — 18 gramów. Liczba Avogadra jest ogromna: $6 \cdot 10^{23}$, a w temperaturze pokojowej i przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym te masy różnych gazów zajmowałyby objętość 22,4 litra. Jeden oddech ma objętość około 0,5 litra, czyli mniej więcej 1/50 z 22,4 litra potrzebnych do uzyskania liczby Avogadra. Zatem pół litra powietrza zawiera około 1/50 z $6 \cdot 10^{23}$, co odpowiada $1,2 \cdot 10^{22}$ atomu.

Powietrze składa się głównie z azotu i tlenu w proporcji mniej więcej 4:1. Każdy atom azotu zawiera 7 elektronów, a atom tlenu — 8. Tak więc 0,5 litra mieszaniny tlenu i azotu zawiera około $9 \cdot 10^{22}$ elektronów. Choć każdy elektron niesie znikomy ładunek elektryczny — około $1,6 \cdot 10^{-19}$ kulomba — to właśnie ich ogromna liczba daje łączną sumę 15 000 kulombów. Przeciętny piorun przenosi około 15 kulombów. Zatem ilość ujemnego ładunku, którą właśnie wciągnąłeś z powietrzem, wystarczyłaby do wywołania tysiąca błyskawic. Podobnie jak głęboki, spowodowany niedowierzaniem wdech, który być może właśnie bierzesz.

PROGRAM PARTNERSKI

— GRUPY HELION —



1. ZAREJESTRUJ SIĘ
2. PREZENTUJ KSIĄŻKI
3. ZBIERAJ PROWIZJĘ

Zmień swoją stronę WWW w działający bankomat!

Dowiedz się więcej i dołącz już dzisiaj!

<http://program-partnerski.helion.pl>

GRUPA
Helion 

NIEWIDZIALNA RÓWNOWAGA WSZECHŚWIATA

Dlaczego ładunki elektronu i protonu są nie tylko przeciwne, ale też dokładnie równe, dzięki czemu atomy pozostają obojętne, a grawitacja może kształtować Wszechświat w największych skalach? Zagadka elektrycznej neutralności materii należy do najgłębszych problemów współczesnej fizyki — to pozornie proste pytanie kryje w sobie klucz do zrozumienia fundamentalnej struktury rzeczywistości. Frank Close, wybitny fizyk teoretyczny z Oksfordu, zabiera nas na **spotkanie z cząstkami elementarnymi** i odkrywa przed nami **tajemnice budowy atomu i sił, które rządzą Wszechświatem**.

Autor prowadzi nas przez fascynujący świat kwarków, leptonów i bozonów, objaśniając, jak odkrycie struktury atomu doprowadziło do zrozumienia oddziaływań elektromagnetycznych. Przedstawia teorie wielkiej unifikacji, które mogą wyjaśnić, dlaczego ładunki idealnie się równoważą, a także opisuje ambitne eksperymenty — często prowadzone w podziemnych laboratoriach — które testują najbardziej śmiałe hipotezy fizyki, w tym możliwość rozpadu protonu. Close przybliża również model standardowy i pisze o znaczeniu odkrycia bozonu Higgsa.

To opowieść o tym, jak pozornie abstrakcyjne pytanie o równowagę ładunków staje się kluczem do zrozumienia stabilności materii, istnienia gwiazd, galaktyk i życia.

FRANK CLOSE

emerytowany profesor fizyki teoretycznej na Uniwersytecie Oksfordzkim i były pracownik naukowy Exeter College, jeden z najwybitniejszych popularyzatorów nauki. Autor bestsellerowych książek, w tym *Nieuchwytniej cząstki* o bozonie Higgsa, laureat Nagrody Michaela Faradaya przyznawanej za popularyzację nauki, członek Towarzystwa Królewskiego.

Helion 

ISBN 978-83-289-3732-1



9 788328 937321

cena: 54,90 zł