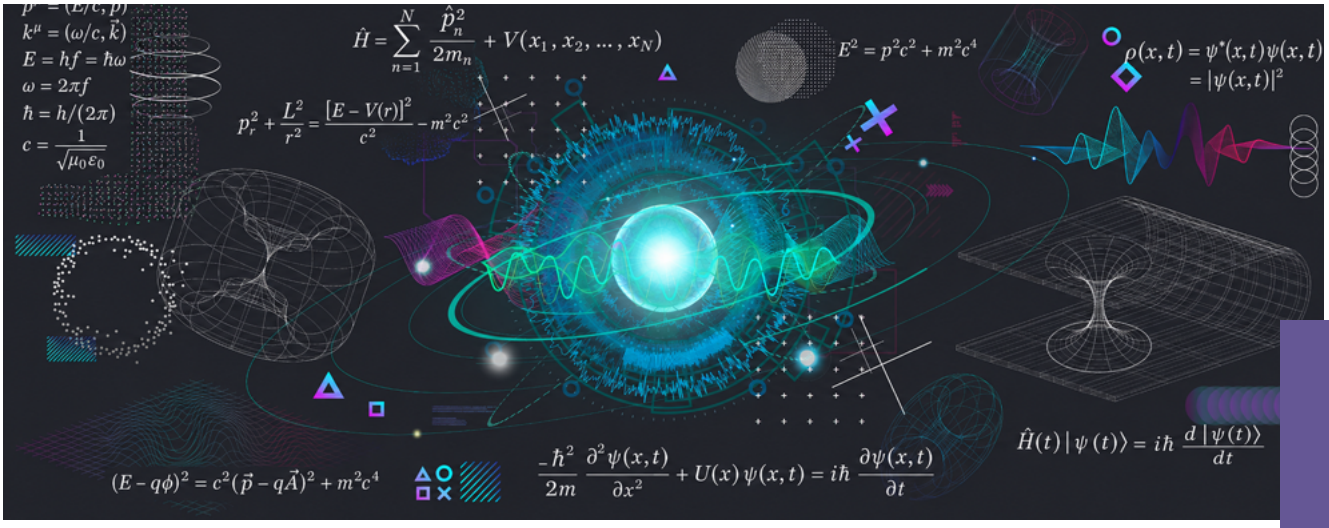


STANISŁAW K. HOFFMANN (INSTYTUT FIZYKI MOLEKULARNEJ PAN)

STAŁE FUNDAMENTALNE: α=1/137 I INNE

Stała struktury subtelnej α = 1/137 jest bezwymiarową wielkością charakteryzującą siłę oddziaływania elektromagnetycznego. Pojawiła się w spektroskopii atomu wodoru, ale dziś jest stałą uniwersalną nowoczesnej fizyki. Jej precyzyjne pomiary stanowią test współczesnych kwantowych teorii pola. Teorie te wiążą stałą α z fluktuacjami pola kwantowego próżni.

Oprócz praw podstawowych i zasad zachowania energii, pędu, momentu pędu i ładunku, matematyczny opis przyrody zawiera również stałe fizyczne. Jest kilkadziesiąt stałych fizycznych poczynając od stałej Higgsa opisującej cząstki elementarne aż do stałej kosmologicznej Einsteina. Ich listę i wartości podaje CODATA [1]. Niektóre z nich można przyjąć jako podstawowe, np. siedem stałych fizycznych służących do definiowania siedmiu jednostek podstawowych SI. W teoriach fizycznych występują też stałe fundamentalne, takie jak stała Plancka *h*, stanowiąca granicę pomiędzy mikroświatem (mechanika kwantowa) a światem makroskopowym, w którym decyduje stała grawitacji *G*, i ładunek elementarny *e* (fizyka klasyczna). W świecie wielkich prędkości fundamentalną wielkością jest prędkość światła *c* (teoria względności).

Większość stałych fizycznych to liczby mianowane (wymiarowe), a ich wartości zależą od wyboru jednostek podstawowych. Jedną z bezwymiarowych stałych fizycznych jest liczba nazywana stałą struktury subtelnej $\alpha \approx 1/137$. Pojawiła się przy interpretacji widm atomowych, ale szybko zaczęła być uważana za liczbę tajemniczą i „magiczną", bo niewynikającą z podstawowych praw fizyki klasycznej. Wyjaśnienie jej wartości (że bezwymiarowa to oczywiste, ale dlaczego akurat 137?) stało się obsesją niektórych fizyków XX wieku. Gdy przed śmiercią w 1958 r. Wolfgang Pauli trafił do szpitala w Zurychu, chciał ponoć leżeć w pokoju nr 137 i mówił, że gdyby diabeł pozwolił mu zadać jedno pytanie, zapytałby, skąd wzięła się liczba 137.

Stała α pojawiła się jako parametr eksperymentalny, a dzisiaj uważamy ją za fundamentalną stałą fizyczną określającą siłę oddziaływania elektromagnetycznego.

1 CODATA Committee on Data for Science and Technology, gromadzi, udostępnia i rekomenduje wartości stałych fizycznych. Ostatnia aktualizacja: rok 2024.

STRUKTURA SUBTELNA I STAŁA α

Struktura subtelna to rozszczepienie głównych linii widmowych. W spektroskopii atomowej jest to rozszczepienie na kilka linii składowych odpowiadających przejściom między poziomami energetycznymi opisanymi główną liczbą kwantową n. Strukturę subtelną w postaci rozszczepienia linii emisyjnej na dublet zmierzono w 1916 roku dla linii H_α serii Balmera atomu wodoru. Wyjaśnienie tego rozszczepienia przedstawił Arnold Sommerfeld [2] jako efekt ruchu elektronu wokół jądra atomowego po orbitach eliptycznych o tej samej energii, ale o różnym momencie pędu p. Stosunek momentu pędu na pierwszej orbicie eliptycznej do momentu pędu na orbicie podstawowej (kołowej) nazwał Sommerfeld stałą struktury subtelnej $\alpha \equiv p_1/p_0$. Stąd rozszczepienie dubletu jest proporcjonalne do energii E linii, a stała α jest współczynnikiem proporcjonalności $\Delta \propto \alpha^2 E$.

Wielkość rozszczepienia dubletu, obliczona na podstawie równania Schrödingera dla wodoru i atomów wodoropodobnych o liczbie atomowej Z wynosi:

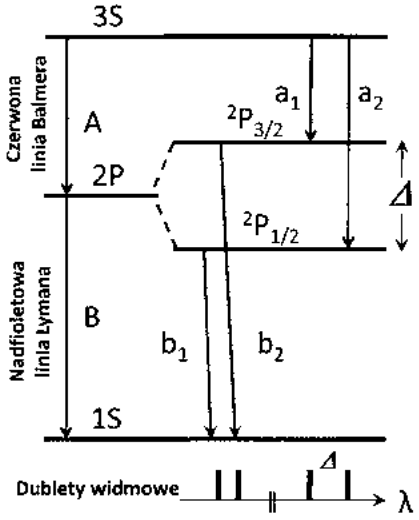
$$\Delta E = E_n \frac{Z\alpha^2}{n^2}\left(\frac{n}{l+\frac{1}{2}} - \frac{3}{4}\right), \qquad (1a)$$

gdzie

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}. \qquad (1b)$$

Liczby n i l to główna i poboczna liczba kwantowa, numerujące odpowiednio orbity kołowe i eliptyczne elektronu. Poziomy energetyczne atomu wodoru i przejścia między nimi przedstawia rys. 1, gdzie symbole poziomów podane są według ich współczesnej klasyfikacji. Eksperymentalna wartość rozszczepienia $\Delta = 4{,}5 \times 10^{-6}\,\mathrm{eV} = 0{,}365\ \ \mathrm{cm}^{-1}$ była zgodna z wartością wyliczoną ze wzoru (1) dla $\alpha = 1/137$.

2 A. Sommerfeld, „Zur Quantentheorie der Spektrallinien", Annalen der Physik 51, 1–94 i 125–167 (1916)



Rys. 1. Poziomy energetyczne atomu wodoru w teorii Sommerfelda. Eksperymentalna energia przejść: czerwona linia Balmera H_α odpowiada przejściu A = 656,112 nm = 1,89 eV (a1 = 656,102 nm, a2 = 656,117 nm). Nadfioletowa linia Lymana $Ly_{-\alpha}$ odpowiada przejściu B = 121,5 nm = 10,2 eV (b1 = 121,502 nm, b2 = 121,503 nm). Rozszczepienie struktury subtelnej Δ = 45 μeV = 0.365 cm^{-1}.

Mimo sukcesu, model Sommerfelda się zdezaktualizował, gdy wykryto, że elektron posiada spin S oraz związany z nim moment magnetyczny. Należało zatem wziąć pod uwagę sprzężenie spin–orbita ($\lambda \mathrm{L}\cdot\mathrm{S}$ – dla atomu wodoru λ = 1,94 cm) oraz uwzględnić relatywistyczne przesunięcia poziomów energetycznych. Efekty spinowe i relatywistyczne zawarte są w równaniu Diraca. Jego rozwiązanie [3] daje energię atomu wodoropodobnego o liczbie atomowej Z w postaci szeregu potęgowego:

$$\mathrm{E} = \mathrm{mc}^2\left[1 - \frac{\mathrm{z}^2\alpha^2}{2\mathrm{n}^2} - \frac{\mathrm{z}^4\alpha^4}{2\mathrm{n}^4}\left(\frac{3}{8} - \frac{1}{2\mathrm{j}+1}\right) + \ldots\right], \quad (2)$$

gdzie n jest główną liczbą kwantową, l jest liczbą orbitalną a $\mathrm{j} = \mathrm{l} + \mathrm{s}$ zawiera spinową liczbę kwantową $\mathrm{s} = 1/2$. Pierwszy wyraz to energia spoczynkowa, drugi to energia elektronu w polu kulombowskim (energia wiązania), a trzeci wyraz to pierwsza poprawka relatywistyczna. Rozszczepienie struktury subtelnej wynosi:

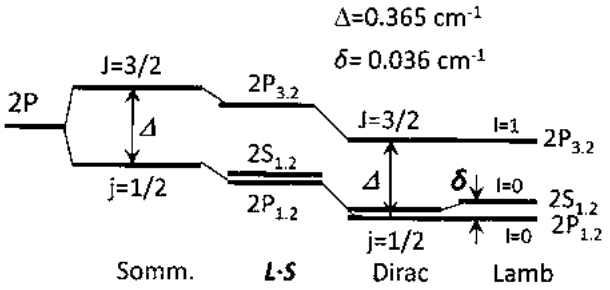
$$\Delta = \mathrm{E}(2\mathrm{p}_{2/3}) - \mathrm{E}(2\mathrm{p}_{1/2}) = \frac{4\mathrm{Z}^2\alpha^2}{2\mathrm{n}} = 4{,}528 \times 10^{-5} \quad \mathrm{eV} \qquad (3)$$

i jest zgodne z wynikami pomiarów oraz z rezultatem modelu Sommerfelda. Dla $\mathrm{n} = 1$ nie ma rozszczepienia, a dla atomu wodoru największe jest dla $\mathrm{n} = 2$. Dlatego badana była głównie czerwona linia H_α serii widmowej Balmera występująca w obszarze światła widzialnego.

Jednak teoria Diraca nie przewiduje niewielkiego, wykrytego eksperymentalnie rozszczepienia zdegenerowanego dubletu linii z $\mathrm{l} = 0$ (rys. 2) zwanego przesunięciem Lamba. Wielkość tego przesunięcia to tylko $\delta = 4{,}372 \times 10^{-6}$ eV $= 0{,}0353$ $\mathrm{cm}^{-1} = 1058$ MHz, tzn. przejście pomiędzy liniami dubletu Lamba leży w zakresie mikrofal, przy długości fali λ = 28,37 cm.

Efektu tego nie wyjaśnia ani klasyczna elektrodynamika, ani relatywistyczne równanie Diraca, gdyż efekt ten pochodzi od oddziaływania cząstek rzeczywistych z cząstkami wirtualnymi. Cząstki wirtualne to powstające i szybko znikające cząstki o czasie życia ograniczonym zasadą nieoznaczoności. Wymiana fotonów wirtualnych między protonem a elektronem odpowiada za wiązanie między nimi, opisane drugim wyrazem w równaniu (2). „Chmurka" cząstek wirtualnych wpływa również na własności samych elektronów

3 Davydov A. S., Kwantowaja miechanika, GIFML, Moskwa, 1963, rozdz. 72, tłum. polskie PWN Warszawa 1967.



Rys. 2. Poziomy struktury subtelnej linii Hα atomu wodoru: od modelu Sommerfelda (Som) poprzez uwzględnienie sprzężenia spin–orbita (L·S), po rozwiązanie równania Diraca prowadzące do rozszczepienia Lamba. Rozszczepienie Δ = 4,5 × 10^{-5} eV = 0,365 cm^{-1}, rozszczepienie ð Lamba jest dziesięciokrotnie mniejsze

i protonów. Elektron otoczony jest przez wirtualne pary elektron–pozyton oraz wirtualne fotony powodujące zauważalne zmiany jego ładunku, masy i momentu magnetycznego. Nazywa się to polaryzacją próżni lub fluktuacjami pola kwantowego próżni [4]. Są to efekty małe, dające poprawki do głównej wartości stałej struktury subtelnej. Są one mierzalne eksperymentalnie i obliczalne metodami kwantowej teorii pola. Tak obliczone przesunięcie Lamba jest największe dla poziomów z orbitalną liczbą kwantową $\mathrm{l} = 0$ i wynosi [5]:

$$\delta = \alpha^5\mathrm{mc}^2\frac{\mathrm{k}(\mathrm{n},0)}{4\mathrm{n}^2} = 4{,}35152 \times 10^{-6}\mathrm{eV}, \qquad (4)$$

gdzie k to współczynnik o wartości około 13 słabo zależny od liczb kwantowych n i l.

Silna zależność przesunięcia Lamba od stałej struktury subtelnej sprawiła, że jego pomiary umożliwiły dokładniejsze wyznaczanie wartości α. Wraz z rozwojem technik eksperymentalnych i metod obliczeniowych coraz większą precyzję zaczęły jednak zapewniać inne zjawiska. Obecnie najdokładniejszą wartość α uzyskuje się na podstawie pomiarów momentu magnetycznego elektronu i jego opisu w ramach elektrodynamiki kwantowej, a porównanie tego wyniku z niezależnymi pomiarami stanowi jeden z najczulszych testów tej teorii. Elektron w atomie ma magnetyczny moment spinowy $\mu_\mathrm{S} = g_\mathrm{S}\mathrm{S}\mu_\mathrm{B}/\hbar$ i moment orbitalny $\mu_\mathrm{L} = g_\mathrm{L}\mathrm{L}\mu_\mathrm{B}/\hbar$ gdzie $g_\mathrm{L} = 1$, $g_\mathrm{S} = 2$ a μ_B to magneton Bohra. W kwantowej teorii pola uwzględniającej polaryzację próżni i efekty radiacyjne momenty te są nieco większe i zależne od stałej α: $g_\mathrm{S} = 2 + \alpha/\pi$, $g_\mathrm{L} = \alpha\mathrm{b}/3\pi$, gdzie b zależy od transferu pędu między elektronem a fotonem. Zatem giromagnetyczny współczynnik spinowy elektronu nie wynosi 2, ale $g_\mathrm{S} = 2{,}00226030436$ co daje istotny efekt w widmach elektronowego rezonansu paramagnetycznego wolnych rodników. Najdokładniejszego wyznaczenia spinowego momentu magnetycznego elektronu, a stąd i stałej α, dokonano, mierząc częstotliwość cyklotronową elektronu $\nu_\mathrm{c} = \mathrm{eB}/2\pi\mathrm{m}$ i stąd obliczając częstość spinową $\nu_\mathrm{s} = g\nu_\mathrm{c}/2$ oraz $\mu_\mathrm{g}/\mu_\mathrm{B} = \nu_\mathrm{s}/\nu_\mathrm{c} = 1{,}00115965216039(13)$. Teoretyczną wartość stałej α, zgodną z wynikami eksperymentu, obliczono metodami kwantowej teorii pola jako szereg potęgowy:

$$\frac{g}{2} = 1 + \mathrm{C}_2\left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + \mathrm{C}_4\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + \mathrm{C}_6\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + \\ + \mathrm{C}_8\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 + \mathrm{C}_{10}\left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^5 + \ldots, \qquad (5)$$

gdzie pierwszy wyraz wynika z teorii Diraca, a pozostałe obliczono metodami kwantowej teorii pola [6]. Zawierają

4 Białynicki-Birula I., Białynicka-Birula Z., Elektrodynamika kwantowa, PWN, Warszawa 1974, rozdz. 28 i 29.

5 Weinberg S., The Quantum Theory of Fields, University of Cambridge, 1995, tłum. polskie: Teoria pól kwantowych, PWN, Warszawa, 2012, rozdz. 14.

6 Fan X., Myers T. G., Sukra B. A. D., Gabrielse G., „Measurements of the electron magnetic moment" Phys. Rev. Lett. 130, 071801 (2023).

one przyczynki od wielkości ładunku i rozmiarów jądra atomowego, odrzutu jądra przy absorpcji fotonu przez atom, efektów dwufotonowych, oddziaływań hadronowych, mionowych, tachionowych i słabych. Stąd otrzymano wartość α^{-1} =137,035999166(15). Podobny wynik uzyskano metodą interferometrii falowej, mierząc prędkość odrzutu atomu rubidu podczas absorpcji fotonu[7]. CODATA rekomenduje obecnie α^{-1} =137,035999177(21).

Zgodność teorii z wynikami eksperymentów jest imponująca (11 miejsc znaczących), a kwantowa teoria pola jest obecnie najdokładniejszą teorią fizyczną. Jak pokazuje nieskończony szereg we wzorze (5), nie jest to ostatnie słowo teorii w opisie kwantowych fluktuacji próżni.

STAŁA STRUKTURY SUBTELNEJ α = STAŁA ELEKTROMAGNETYCZNA

Znaczenie stałej α jest znacznie szersze, niż sugeruje to jej nazwa jako współczynnika w spektroskopii atomowej. Pojawia się ona przy opisie oddziaływań zarówno między ładunkami, jak i między ładunkami a promieniowaniem. Już drugi wyraz we wzorze (2) pokazuje, że jest ona miarą oddziaływania elektrostatycznego między elektronem a protonem. Nie ma jej w równaniach Maxwella ani w innych równaniach elektrodynamiki klasycznej. Można by oczekiwać, że jest ukryta w prawie Coulomba bezpośrednio opisującym siłę działającą między dwoma ładunkami elementarnymi $F = e^2/4\pi\varepsilon_0 r^2$. Jest to prawo zapisane w układzie jednostek SI. W układzie jednostek CGS współczynnik przed e^2/r^2 znika, więc może istnieje układ jednostek, w którym stała α się ujawnia. Układy SI i CGS oparte są na arbitralnie wybranych wielkościach jednostek podstawowych (np. metra czy sekundy). Istnieją jednak „naturalne" układy jednostek. Jednym z nich jest układ jednostek Plancka, wygodny do stosowania w opisie procesów wysokoenergetycznych, które panowały w czasie 10^{-43} s po Wielkim Wybuchu (tzw. era lub skala Plancka). W układzie jednostek Plancka stałe G, c, ħ, k_B przyjmują wartość 1. Wielkości fizyczne w skali Plancka, takie jak długość, czas czy energia to wartości graniczne, poza którymi znana nam fizyka nie działa. Ładunek jednostkowy Plancka wynosi $q_{Planck} = \sqrt{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$. Porównajmy siłę oddziaływania między dwoma ładunkami Plancka z siłą oddziaływania kulombowskiego między dwoma ładunkami elementarnymi e:

siła Plancka: $F_{Planck} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_{Planck}^2}{r^2} = \frac{\hbar c}{r^2}$,

siła Coulomba: $F_{Coulomb} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}$,

a ponieważ $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$, wynika stąd, że

$$F_{Coulomb} = \alpha F_{Planck}, \qquad (6)$$

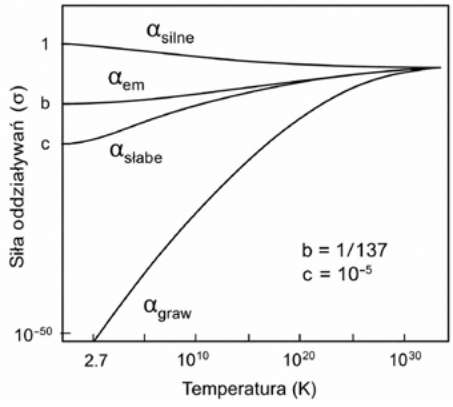
czyli stała α skaluje siłę oddziaływań elektrostatycznych. Obecnie, przy niskich energiach mamy α = 1/137 i prawo Coulomba, ale w epoce Plancka, po Wielkim Wybuchu przy energiach rzędu 10^{19} GeV miała miejsce unifikacja oddziaływań, a teorie Wielkiej Unifikacji (GUT) przewidują, że stała α będzie wówczas wynosiła 1/50–1/60. To rodzi pytanie: czy stała α, a może i inne stałe fizyczne, zmieniają się w czasie lub zależą od odległości międzygalaktycznych rozszerzającego się Wszechświata? Pomiary widm odległych galaktyk wykonane za pomocą teleskopu Webba nie wykazały zmienności α w granicach niepewności pomiarowej dla badanego zakresu przesunięć ku czerwieni [8].

We wzorze (6) siła kulombowska działa między protonem a elektronem w atomie wodoru. W atomie wieloelektronowym $ZF_{Coulomb} = Z\alpha F_{Planck}$, gdzie Z jest liczbą atomową, siła kulombowska osiągnie wartość krytyczną (tj. siłę Plancka) dla $Z = 137$. Oznacza to, że atomy o liczbie atomowej $Z > 137$ nie mogą istnieć, a stała struktury subtelnej jest miarą stabilności atomów. Jednak do takiego rozpadu atomów nie dojdzie, bo wcześniej rozpadną się jądra atomowe w wyniku oddziaływania między protonami. Już od $Z = 83$, tj. od bizmutu $^{209}_{83}Bi$ atomy zaczynają być niestabilne (promieniotwórcze) a od $Z = 95$ (ameryk $^{241}_{95}Am$) stają się nietrwałe. Najcięższym znanym atomem jest oganeson $^{294}_{116}Og$ o $Z = 118$ i czasie życia zaledwie 0,7 ms.

Stała α zamiast tradycyjnej nazwy „stała struktury subtelnej" zasługuje na nazwę „stała elektromagnetyczna". Teorie unifikacji oddziaływań wymagają istnienia podobnych stałych określających siłę oddziaływań. Stałe takie istnieją dla oddziaływań silnych $\alpha_{silne} = 1$, dla oddziaływań elektromagnetycznych $\alpha_{em} \approx 1/137$ i dla oddziaływań słabych $\alpha_{słabe} \approx 10^{-5}$. Podobna stała bezwymiarowa α_{graw} powinna istnieć również dla oddziaływań grawitacyjnych, ale jej nie ma, gdyż nie ma kwantowej teorii grawitacji. Zaproponowano tutaj jako parametr bezwymiarowy współczynnik skalujący stałą grawitacji, gdzie dla protonów o masie m_p stała skalowania wynosi $\alpha_G = 5{,}9 \times 10^{-39}$. Dla elektronów jest ona 6 rzędów wielkości mniejsza. Nie jest to stała uniwersalna, bo zależy od masy rozpatrywanych cząstek.

Istnienie stałych fundamentalnych α wskazuje, że struktura logiczna teorii opisujących oddziaływania podstawowe jest podobna. Daje to podstawy do poszukiwania jednolitej teorii unifikacji wszystkich oddziaływań. Znaleziono już teorię łączącą oddziaływania elektromagnetyczne i słabe. Istnienie stałych fundamentalnych wskazuje również, że ich istnienie może mieć takie samo źródło. Mogą nim być fluktuacje pola kwantowego próżni. Oznaczałoby to, że stałe fundamentalne mogą być raczej parametrami próżni, a nie materii.

Podawane wartości stałych α to ich przybliżenie niskoenergetyczne. Faktycznie zależą one od skali energii, w której zachodzi oddziaływanie. Przy dużych energiach, osiągalnych we współczesnych akceleratorach, oddziaływania zaczynają tracić swoją indywidualność i „zlewać" w jedno oddziaływanie pierwotne, jakie istniało po Wielkim Wybuchu. Schematycznie przedstawia to rys. 3.



Rys. 3. Hipotetyczna zależność stałych fundamentalnych od temperatury. Obecnie temperatura mikrofalowego promieniowania tła to 2,7 K.

7 Morel L., Yao Z., Clade P., Guellati-Khelifa S., „Determination of the fine-structure constant with an accuracy of 81 parts per trillion", Nature, 588, 61-65 (2020).

8 L. Jiang i in., „Constraints on the Variation of the Fine-Structure Constant at 3 < z < 10 with JWST Emission-Line Galaxies", The Astrophysical Journal 980, 93 (2025)

STAŁA STRUKTURY SUBTELNEJ α – NUMEROLOGIA

Ponieważ stała α jest liczbą niemianowaną, to łatwo ją wyrazić za pomocą innych liczb. Numerologia proponuje tutaj bardzo wiele powiązań [9]. Oto kilka przykładów.

- Zauważono, że wielkość α^{-1} jest rozwiązaniem równania $x^4 - 136x^3 - 136x^2 - 818x + 1 = 0$.
- Liczba 137 to pitagorejska liczba pierwsza, bo $137 = 4^2 + 11^2 = (2^2 - 1) + (2^3 - 1) + (2^7 - 1)$.
- Znaleziono powiązania pomiędzy wartościami stałych α: $\alpha_{silne} = 4 \times 10^{14} \alpha^2_{słabe} \cdot \alpha^2_{em} \cdot \alpha_G \cdot N_A^2$, gdzie N_A to liczba Avogadry.

Można to uznać za numeryczną unifikację oddziaływań fundamentalnych. Nie należy tego jednak traktować na serio, bo numerologia pozwala obliczać, ale niczego nie wyjaśnia.

***

Stała struktury subtelnej α ≈ 1/137 awansowała ze współczynnika spektroskopii atomowej do jednej z fundamentalnych stałych fizyki. Jest to stała elektromagnetyczna określająca wielkość oddziaływania między ładunkami elektrycznymi i fotonami. „Tajemnicza" liczba 137 (tylko w przybliżeniu 137) nie ma „czystego" pochodzenia, gdyż posiada przyczynki od cząstek wirtualnych tworzących fluktuującą próżnię kwantową. Stała α jest pomostem łączącym świat materialny ze światem „duchów" kwantowych.

Można ją uważać za parametr określający stabilność atomów. Atomy o Z > 137 nie mogą istnieć. Stała α to stała graniczna fizyki, gdyż po unifikacji oddziaływań fundamentalnych, przy ogromnych energiach, znana fizyka przestanie obowiązywać i pojawi się nieznany stan „piany kwantowej". Ma zatem ona taki sens graniczny jak stała Plancka, która oddziela światy możliwe od świata realnego.

Stała struktury subtelnej wciąż owiana jest mgiełką tajemnicy i cieszy się zainteresowaniem nie tylko fizyków. Sztuczna inteligencja dokonała przeglądu stanu wiedzy o stałej struktury subtelnej [10]. Starano się powiązać jej wartość z hipotetyczną strukturą wewnętrzną elektronu [11], z zachowaniem fotonów w objętości ciała doskonale czarnego oraz z energią jonizacji atomów [12].

AUTOR

Prof. dr hab. **Stanisław K. Hoffmann** (ORCID: 0009-0009-3705-7645) jest fizykiem związanym z Instytutem Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu oraz byłym wiceprezesem Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Jego zainteresowania naukowe obejmują rezonanse magnetyczne, w szczególności elektronowy rezonans paramagnetyczny, radiospektroskopię, relaksację spinową oraz badania struktury i dynamiki układów molekularnych i ciał stałych.

9 Pellis S., „Unity formulas for the coupling constants and the dimensionless physical constants", J. High Energy Physics, Gravitation and Cosmology, 9, 245–294 (2023).

10 Open MedScience, „The Fine-Structure Constant: Decoding the Strength of Electromagnetic Interactions", https://openmedscience.com/the-fine-structure-constant-decoding-the-strength-of-electromagnetic-interactions/ (dostęp: 3 września 2026 r.)

11 Sardin G., „Primordial physical origin of the fine-structure constant and some of its applications", International J. Phys. 13, 55–61 (2026).

12 Perkovac M., „Fine-structure constant derive from the structural constant of all atoms", J. Appl. Mat. Phys. 14, 480–498 (2026)

W SKRÓCIE

W fizyce istnieją stałe, które określają najważniejsze granice opisu świata. Prędkość światła wyznacza związek między przestrzenią i czasem, stała Plancka wskazuje skalę zjawisk kwantowych, a stała grawitacji opisuje oddziaływanie mas. W tym gronie szczególne miejsce zajmuje stała struktury subtelnej, oznaczana literą α, której wartość wynosi około 1/137.

Stała ta pojawiła się w spektroskopii atomowej, czyli w badaniu światła emitowanego i pochłanianego przez atomy. Linie widmowe wodoru, które początkowo wydawały się pojedyncze, przy dokładniejszych pomiarach okazały się rozszczepione na bardzo blisko położone składowe. To drobne rozszczepienie nazwano strukturą subtelną. Jego wyjaśnienie wymagało uwzględnienia poprawek relatywistycznych oraz spinu elektronu, a więc efektów wykraczających poza prosty model atomu Bohra.

Z czasem okazało się, że α ma znaczenie znacznie szersze niż opis szczegółu w widmach atomowych. Jest bezwymiarową miarą siły oddziaływań elektromagnetycznych. Informuje o tym, jak silnie cząstki naładowane oddziałują z polem elektromagnetycznym. Dlatego pojawia się w elektrodynamice kwantowej — teorii opisującej oddziaływania elektronów, fotonów i innych cząstek naładowanych.

Szczególne znaczenie α wynika z tego, że nie zależy ona od wyboru jednostek. Metr, sekunda czy kulomb są związane z przyjętymi definicjami, natomiast liczba bezwymiarowa ma charakter bardziej podstawowy. Gdyby prawa elektromagnetyzmu zapisano w innym układzie jednostek, wartość α pozostałaby taka sama. Pytanie, dlaczego ma ona właśnie taką wartość, należy więc do głębszych pytań fizyki fundamentalnej.

W XX wieku liczba 137 fascynowała wielu fizyków. Nie chodziło jednak o numerologię, lecz o nadzieję, że jej wartość da się wyprowadzić z bardziej podstawowej teorii. Dziś prosta odpowiedź nadal nie jest znana. Wiadomo natomiast, że α jest związana z całą strukturą oddziaływań kwantowych, a jej wartość można niezwykle precyzyjnie wyznaczać, między innymi z pomiarów momentu magnetycznego elektronu.

Stała α ma też znaczenie dla stabilności materii. Gdyby oddziaływania elektromagnetyczne miały inną siłę, zmieniłyby się rozmiary atomów, energie wiązań chemicznych i własności promieniowania. Inna byłaby więc nie tylko struktura atomu wodoru, ale cała chemia znanego nam świata.