

ZBIGNIEW OSIĄK

SZKIC ROZWOJU
ATOMISTYKI

ZBIGNIEW OSIAK

SZKIC ROZWOJU ATOMISTYKI

Praca magisterska
Uniwersytet Wrocławski 1970
Promotor: prof. dr Jan Nikliborc

W stosunku do oryginału zostały uaktualnione dane biograficzne oraz uzupełnione informacje bibliograficzne. Dodano indeksy nazwisk - alfabetyczny i chronologiczny.

SPIS TREŚCI

I. POWSTANIE I ROZWÓJ KONCEPCJI ATOMISTYCZNYCH 5

Część pierwsza – ROZWÓJ KONCEPCJI ATOMISTYCZNYCH NA GRUNCIE CHEMII 6

- § 1. Początki atomistyki 6
- § 2. Rozwój koncepcji atomistycznych na gruncie chemii 6
- § 3. Hipoteza Prouta 8
- § 4. Ewolucja poglądów dotyczących różnic między atomem i cząsteczką 9
- § 5. Układ okresowy pierwiastków 10

Część druga – KINETYCZNO-MOLEKULARNA TEORIA GAZÓW 12

- § 1. Prekursorzy teorii kinetyczno-molekularnej 12
- § 2. Kinetyczno-molekularna teoria gazów 13
- § 3. Statystyczna interpretacja drugiej zasady termodynamiki 17
- § 4. Krytyka atomistyki 19
- § 5. Prace Mariana Smoluchowskiego 20
 - A. Skok temperatury 20
 - B. Fluktuacje gęstości 21
 - C. Ruchy Browna 23
 - D. Granice ważności drugiej zasady termodynamiki 24
- § 6. Znaczenie prac Mariana Smoluchowskiego 25

II. SKŁADNIKI BUDOWY ATOMU 26

- § 1. Rozwój poglądów dotyczących atomowej struktury elektryczności 27
- § 2. Odkrycie elektronu 28
- § 3. Model atomu Thomsona 35
- § 4. Odkrycie promieniotwórczości 35
- § 5. Natura cząstek alfa 36
- § 6. Teoria rozpadu promieniotwórczego 38
- § 7. Odkrycie jądra atomowego 39
- § 8. Ładunek jądra atomowego 43
- § 9. Odkrycie izotopów pierwiastków promieniotwórczych 44
- § 10. Odkrycie izotopów zwykłych pierwiastków 45
- § 11. Pierwsza sztuczna przemiana jądra atomowego 48
- § 12. Protonowo-elektronowy model jądra atomowego 49
- § 13. Odkrycie neutronu. Protonowo-neutronowy model jądra atomowego 49
- § 14. Problem stabilności modelu atomu Rutherforda 51

III. FIZYKA KWANTOWA 52

Część pierwsza – STARSZA TEORIA KWANTÓW 53

- § 1. Odkrycie kwantów energii 53
- § 2. Koncepcja fotonów 55
- § 3. Model atomu Bohra 56

- § 4. Doświadczenie Francka-Hertza 60
- § 5. Dalszy rozwój modelu atomu Bohra 61
- § 6. Zasada Pauliego 66
- § 7. Zasada odpowiedniości i reguły wyboru 67
- § 8. Reguły wyboru Rubinowicza 67
- § 9. Trudności teorii Bohra 68

Część druga – MECHANIKA KWANTOWA 69

- § 1. Dualizm falowo-korpuskularny 69
- § 2. Hipoteza de Broglie'a 69
- § 3. Równanie falowe Schrödingera 70
- § 4. Zasada nieokreśloności 73
- § 5. Atom wodoru w mechanice kwantowej 73
- § 6. Inne atomy w mechanice kwantowej 74
- § 7. Równanie Diraca 74
- § 8. Cząstki elementarne 76

ZAKOŃCZENIE 82

SPIS LITERATURY 83

ALFABETYCZNY INDEKS NAZWISK 84

CHRONOLOGICZNY INDEKS NAZWISK 95

I. POWSTANIE I ROZWÓJ KONCEPCJI ATOMISTYCZNYCH

Rozważania nad strukturą materii sięgają czasów starożytnych, z tego też okresu pochodzi pojęcie i nazwa atom. W rozdziale tym zajmiemy się rozwojem atomistyki na gruncie chemii i kinetyczno-molekularnej teorii gazów.

Wprawdzie za pomocą koncepcji atomistycznych można było wytłumaczyć w prosty i poglądowy sposób wiele zjawisk, nie stanowiło to jednak dowodu na istnienie atomów, ponieważ wszystkie te zjawiska można było wytłumaczyć za pomocą koncepcji przeciwstawnych. Dopiero na początku XX wieku teoria kinetyczno-molekularna wskazała na zjawiska, dające możliwość wykonania *experimenta crucis* na korzyść atomistyki.

Część pierwsza – ROZWÓJ KONCEPCJI ATOMISTYCZNYCH NA GRUNCIE CHEMII

§ 1. Początki atomistyki

Początki atomistyki sięgają czasów starożytnych. Twórcą systemu atomizmu w filozofii starożytnej był **Leukippos (V wiek p.n.e.)**. Jego poglądy kontynuował i rozwinął **Demokryt (ok. 460-350 p.n.e.)**, nadając im głębokie ujęcie i rozgłos.

Według nauki **Leukipposa-Demokryta** wszystko na świecie składa się z próżni i wypełniającej ją atomów. Atomy nie powstają i nie ulegają zniszczeniu. Są one niezmiennie i niepodzielne. Atomy nie ulegają żadnym oddziaływaniom: nie nagrzewają się, ani nie stygną, nie stają się suche, ani wilgotne, ani czarne, ani białe. Są proste i jakościowo niezmiennie. Ale między nimi istnieją zasadnicze różnice, które są przyczyną drugorzędnych własności rzeczy. Są to: kształt, porządek i położenie. „A” różni się od „N” kształtem, „AN” od „NA” – porządkiem, „Z” od „F” – położeniem. Należy dodać jeszcze dwie różnice istniejące między atomami: różnice wielkości i ciężaru. **Demokryt** twierdził, że atomy znajdują się w ciągłym ruchu. Ruch atomów należy pojmować jako nie mający żadnego początku, lecz istniejący odwiecznie. Poglądy **Leukipposa-Demokryta** były tylko spekulacją myślową, jedną wśród szeregu innych. Należy jednak podziwiać genialną intuicję tych uczonych.

Rozwój fizyki i chemii przez prawie 2000 lat hamowały poglądy **Arystotelesa**. **Arystoteles (384-322 p.n.e.)** twierdził, że u podstaw wszystkich stanów bytu leży materia pierwsza. Są cztery rodzaje określenia najprostszej materii, odpowiadające jej czterem elementom:

1. ogień, który jest suchy i ciepły,
2. woda, która jest mokra i zimna,
3. powietrze, które jest ciepłe i wilgotne,
4. ziemia, która jest zimna i sucha.

(Pierwszym, który wprowadził te cztery elementy był **Empedokles (ok. 495-435 p.n.e.)**.)

Arystoteles uważał, że elementy mogą przechodzić jedne w drugie, ale takie przemiany nie są jednakowo możliwe. Najtrudniejsza jest przemiana tych elementów, które są bardziej oddalone jeden od drugiego, jak ogień i woda. Najszybsza i najłatwiejsza jest przemiana tych elementów, które posiadają wspólną jakość. Wzajemne przemiany elementów powstają stąd, że są one przejawem jednej i tej samej pramaterii.

§ 2. Rozwój koncepcji atomistycznych na gruncie chemii

Robert Boyle (1627-1691) jako pierwszy poddał krytyce poglądy Arystotelesa.

Robert Boyle:
The Sceptical Chymist.
(Sceptyczny chemik.)
[London, 1661]

"Czy tzw. cztery elementy nie są może złożonymi ciałami, składającymi się z bardzo małych ciał znajdujących się stale w ruchu. Istnienie czterech elementów nie zostało w żaden sposób udowodnione i póki to się nie stanie, nie można nazywać alchemicznej

nauki jako prawdziwej. Jedynie doświadczenie upoważnia do wyciągnięcia wniosków, natomiast nigdy nie upoważnia do tego gołosłowne nie udowodnione twierdzenie."

[wg 1]

Kontynuatorem idei badań doświadczalnych był **Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794)**.

Lavoisier:

Traité Élémentaire de Chimie, présenté dans un ordre nouveau, et d'après des découvertes modernes.

(Traktat podstawowy chemii: przedstawiony w nowym układzie i na podstawie nowoczesnych odkryć.)

[Paris, 1789]

"Nic nie jest stworzone od nowa ani w sztucznych, ani w naturalnych doświadczeniach. Można ustalić zasadę, że w każdym doświadczeniu ilość ciał przed i po doświadczeniu jest taka sama, że jakość pierwiastków jest jednakowa i że zachodzą jedynie zmiany i modyfikacje." [wg 1]

Powyższa zasada została nazwana prawem zachowania masy w reakcjach chemicznych. Prawo zachowania masy oraz zasada, która także pochodzi od **Lavoisiera**, że każdy związek składa się z niezmiennych, prostych substancji, stanowiły podstawę do dalszych badań.

Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) przeprowadzał badania nad stosunkami objętościowymi związków chemicznych. Na podstawie doświadczeń sformułował prawo, które mówi, że gazy łączą się zawsze w ściśle określonych prostych stosunkach objętościowych (1809).

Gay-Lussac:

Mémoire sur la combinaison des substances gazeuses, les unes avec les autres.

(Rozprawa o połączeniu ze sobą substancji gazowych.)

[Mémoires de la Société d'Arcueil 2 (1809) 207-234.]

John Dalton (1766-1844), przeprowadzając badania nad stosunkami wagowymi związków chemicznych odkrył, że pierwiastki, bo tak nazywał jednorodne substancje proste, nie łączą się ze sobą dowolnie, ale zawsze w ściśle określonych stosunkach wagowych.

John Dalton:

A new System of Chemical Philosophy (Part I).

(Nowy system filozofii chemicznej (Część I).)

[London, 1808]

John Dalton:

A new System of Chemical Philosophy (Part II).

(Nowy system filozofii chemicznej (Część II).)

[London, 1810]

Dalton wprowadził pojęcie względnego ciężaru pierwiastka. Przyjął ciężar wodoru jako ciężar jednostkowy. Na podstawie swojego prawa stosunków wagowych mógł wyznaczać względne ciężary pierwiastków. **Dalton** uważał, że względny ciężar ciała należy do definicji danego ciała.

Nagromadzony materiał doświadczalny w chemii **Dalton** starał się uzasadnić w sposób jakościowy, przyjął w tym celu atomową strukturę materii. Poglądy **Demokryta** musiały być znane wykształconym ludziom tego okresu, jedynie **Dalton** w sposób konsekwentny przetransponował je na nowy grunt.

"Chemiczna synteza i analiza nie sięgają głębiej niż do rozdzielenia atomów i ich ponownego łączenia. Ani tworzenie na nowo, ani zniszczenie materii nie leży w zasięgu działań chemicznych." [wg 1]

Poglądy atomistyczne Daltona można ująć w czterech tezach:

1. Każdy pierwiastek składa się z małych, niezniszczalnych i niepodzielnych cząstek, zwanych atomami, które są najmniejszymi cząstkami tego pierwiastka.
2. Każdy pierwiastek składa się z atomów określonego rodzaju. Rodzajów atomów istnieje tyle, ile jest pierwiastków.
3. Wszystkie atomy danego pierwiastka są takie same.
4. Atomy różnych pierwiastków mogą łączyć się ze sobą, tworząc związki.

Innym wielkim osiągnięciem tego okresu, z punktu widzenia atomistyki, była hipoteza postawiona przez **Amedeo Avogadro (1776-1856)**.

A. Avogadro:

Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons.

(O sposobie znajdowania względnych mas cząsteczek i proporcjach, w jakich się one łączą.)

[Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts **73** (Juillet an 1811) 58-76.]

"Gay-Lussac wykazał w swojej interesującej rozprawie (*Mémoires de la Société d'Arcueil*, tome II), że łączenie się gazów zachodzi zawsze na zasadzie bardzo prostych stosunków objętościowych. Jeżeli produkt reakcji jest gazem, to jego objętość znajduje się w bardzo prostym stosunku liczbowym do objętości produktów wyjściowych... Należy więc przyjąć, że tak samo proste stosunki istnieją między objętościami substancji gazowych a liczbą prostych lub złożonych cząsteczek tworzących te gazy. Hipotezą, która się w tej sprawie nasuwa i która wydaje się być jedynie możliwą, jest przypuszczenie, że liczba cząsteczek jakiegokolwiek gazu w tej samej objętości jest zawsze taka sama, albo że jest proporcjonalna do danej objętości." [wg 1]

Na pracę **Avogadro** nie zwrócono uwagi pomimo że, w 1814 niezależnie od niego ale w mniej jasnej formie, podobne poglądy wyraził słynny fizyk **André Marie Ampère (1775-1836)**.

§ 3. Hipoteza Prouta

W omawianym okresie czasu ciężary atomowe pierwiastków znane były tylko w przybliżeniu. W 1815 **William Prout (1785-1850)** wysunął hipotezę, że ciężary atomowe wszystkich pierwiastków są liczbami całkowitymi, stanowią one całkowite wielokrotności ciężaru atomowego wodoru. **Prout** wyciągnął stąd wniosek, że atomy wszystkich pierwiastków zbudowane są z atomów wodoru.

William Prout:

On the relation between the specific gravities of bodies in their gaseous state and the weights of their atoms.

(O stosunku ciężarów właściwych ciał w stanie gazowym do ciężarów ich atomów.)

[Annals of Philosophy **6** (1815) 321-330.]

William Prout:

Correction of a mistake in the essay on the relation between the specific gravities of bodies in their gaseous state and the weights of their atoms.

(Poprawienie błędu w eseju o stosunku ciężarów właściwych ciał w stanie gazowym do ciężarów ich atomów.)
[Annals of Philosophy **7** (1816) 111-13.]

Udoskonalenie metod wyznaczania ciężarów atomowych pierwiastków wykazało, że istnieją pierwiastki, których ciężary atomowe nie są liczbami całkowitymi. Hipoteza **Prouta** została więc zarzucona. Dopiero rozwój atomistyki w dwudziestym wieku (odkrycie izotopów, protonowo-elektronowy model jądra atomowego) przywrócił do życia hipotezę **Prouta**.

§ 4. Ewolucja poglądów dotyczących różnic między atomem i cząsteczką

Dalton używał określenia atomu jako najmniejszej cząstki pierwiastków i związków. Mówił na przykład o atomie wody. Określając różnice między pierwiastkiem a związkiem, mówił o prostym i złożonym atomie.

Dopiero **Stanislao Cannizzaro (1826-1912)** w swoich pracach wyraźnie rozróżnił pojęcia atomu i cząsteczki.

Stanislao Cannizzaro:
Sunto di un corso di filosofia chimica.
(Szkic kursu filozofii chemicznej.)
[Genova, 1858]

Stanislao Cannizzaro:
Scritti intorno alla teoria molecolare ed atomica ed alla notazione chimica.
(Pisma o teorii molekularnej i atomowej oraz notacji chemicznej.)
[Palermo, 1896]

Archibald Scott Couper (1831-1892) wprowadził graficzny sposób zapisu umożliwiający lokalizację atomów w cząsteczce. W tym celu między atomami umieszczał kreskę.

A. S. Couper:
Sur une nouvelle théorie chimique.
(O nowej teorii chemicznej.)
[Comptes Rendus **46** (14 June 1858) 1157-1160.]

A. S. Couper:
Sur une nouvelle théorie chimique.
[Annales de chimie et de physique, 3rd series, **53** (1858) 469-489.]

Archibald S. Couper:
On a new chemical theory.
(O nowej teorii chemicznej.)
[Philosophical Magazine, 4th series, **16** (1858) 104-116.]

Friedrich August Kekulé von Stradomitz (1829-1896) wprowadził pojęcie wartościowości. Przez wartościowość rozumiał zdolność atomu do przyłączenia określonej liczby innych atomów. Twierdził, że atomy łączą się w cząsteczki zgodnie z ich wartościowością.

August Kekulé:
Ueber die Constitution und die Metamorphosen der chemischen Verbindungen und über die chemische Natur des Kohlenstoffs.
(O budowie i metamorfozach związków chemicznych oraz o chemicznej naturze węgla.)
[Annalen der Chemie und Pharmacie **106**, 2 (1858) 129-159.]

Pojęcie wartościowości **Kekulé** daje się połączyć z graficznym sposobem zapisu **Coupera**, jeżeli przyjąć, że liczba kresek w atomie odpowiada jego wartościowości.

§ 5. Układ okresowy pierwiastków

Odkrywano nowe pierwiastki. Uczni, oprócz badania wielu własności pierwiastków potrafili wyznaczać względne ciężary atomowe. Powstało zagadnienie systematyzacji pierwiastków. Na okresowe powtarzanie się własności chemicznych pierwiastków po raz pierwszy zwrócił uwagę **Johann Wolfgang Döbereiner (1780-1849)**, który w 1829 ogłosił tezę, że istnieje kilka triad pierwiastków charakteryzujących się tym, że po uporządkowaniu ich w kolejności zwiększających się ciężarów atomowych, własności pierwiastka środkowego mają w przybliżeniu własności pośrednie między własnościami pierwiastków końcowych.

J. W. Döbereiner:

Versuch zu einer Gruppierung der elementaren Stoffe nach ihrer Analogie.

(Próba pogrupowania substancji elementarnych według ich analogii.)

[Annalen der Physik und Chemie **91/15**, 2 (1829) 301-307.]

W 1862 francuski uczoney **Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtois (1820-1886)** opracował bardzo skomplikowaną systematykę pierwiastków chemicznych.

Béguyer de Chancourtois:

Mémoire sur un classement naturel des corps simples ou radicaux appelé vis tellurique.

(Rozprawa na temat naturalnej klasyfikacji ciał prostych lub radykalnych zwanej śrubą telluryczną.)

[Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences **54**, 13 (1862) 757-761; **54**, 15 (1862) 840-843; **54**, 17 (1862) 967-971; **55**, 15 (1862) 600-601.]

Praca ta nie wzbudziła większego zainteresowania.

W 1864 **John Alexander Reina Newlands (1837-1898)** zauważył, że gdy pierwiastki zostaną uporządkowane według wzrastających mas atomowych, wówczas własności ósmego pierwiastka przypominają własności pierwszego, a dziewiątego – własności drugiego. Prawidłowość tą nazwał prawem oktav.

John A. R. Newlands:

On Relations Among the Equivalents.

(O relacjach między ekwiwalentami.)

[Chemical News **10** (20 August 1864) 94-95.]

John A. R. Newlands:

On the Law of Octaves.

(O prawie oktav.)

[Chemical News **12** (18 August 1865) 83.]

Najbardziej ciekawe koncepcje dotyczące prawa okresowości rozwinęli niezależnie od siebie **Julius Lothar Meyer (1830-1895)** i **Dmitrij Iwanowicz Mendelejew (1834-1907)**.

W 1864 **Meyer** ułożył niektóre pierwiastki w grupy, opierając się w swojej klasyfikacji na analogiach we własnościach chemicznych i fizycznych pierwiastków, zaobserwowanych wraz ze wzrostem mas atomowych.

Julius Lothar Meyer:

Die modernen Theorien der Chemie (1864).

(Nowoczesne teorie chemii (1864).

[Table on page 137.]

W 1870 opublikował rozszerzony układ 69 pierwiastków podzielonych na grupy i podgrupy.

Lothar Meyer:

Die Natur der chemischen Elemente als Function ihrer Atomgewichte.

(Charakter pierwiastków chemicznych jako funkcja ich masy atomowej.)

[Annalen der Chemie und Pharmacie. VII. Supplementbandes drittes Heft. (1870) 354-364.]

W 1869 **Mendelejew** po raz pierwszy jasno sformułował prawo okresowości.

D. Mendelejeff:

Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente.

(O zależności własności pierwiastków chemicznych od ich mas atomowych.)

[Zeitschrift für Chemie 12 (1869) 405-406.]

Własności pierwiastków chemicznych, jak również typ i własności powstałych z nich związków chemicznych nie są przypadkowe, lecz są okresową funkcją masy atomowej. W szeregu pierwiastków, uporządkowanych według wzrastających mas atomowych, ich własności chemiczne i fizyczne zmieniają się periodycznie.

Mendelejew podał tabelaryczny układ pierwiastków, zwany później układem okresowym lub układem **Mendelejewa**.

Za czasów **Mendelejewa** wiele pierwiastków nie było jeszcze znanych. **Mendelejew** pozostawił puste miejsca w swoim układzie, twierząc że zostaną odkryte nowe pierwiastki, które je zapełnią, przewidział także wiele ich własności. Za życia **Mendelejewa** odkryto niektóre z tych pierwiastków.

Dzisiaj wszystkie miejsca w układzie okresowym są zapełnione. Odkryto także pierwiastki mające miejsce poza uranem. Pierwiastki te, zwane transuranowcami, otrzymano sztucznie, nie występują one bowiem w przyrodzie. Jak zobaczymy w następnym rozdziale, za podstawę klasyfikacji pierwiastków przyjmuje się dzisiaj nie ich masy atomowe, lecz liczbę ładunków w jądrze.

Część druga – KINETYCZNO-MOLEKULARNA TEORIA GAZÓW

§ 1. Prekursorzy teorii kinetyczno-molekularnej

Do prekursorów teorii kinetyczno-molekularnej materii należeli tacy uczeni jak René Descartes (Kartezjusz) (1596-1650), Pierre Gassendi (1592-1655), Robert Boyle (1627-1691), Robert Hooke (1635-1703), Daniel Bernoulli (1700-1782), Michaił Wasiljewicz Łomonosow (1711-1765) i inni. Uczeni ci byli zwolennikami poglądu, że ciepło polega na ruchu cząstek danego ciała.

Około 1660 Boyle sformułował pierwsze prawo gazowe mówiące, że ciśnienie danego gazu jest odwrotnie proporcjonalne do jego objętości.

Robert Boyle:
The Sceptical Chymist.
(Sceptyczny chemik.)
[London 1661.]

Prawo to odkrył niezależnie Edme Mariotte (1620-1684) w 1679.

Edme Mariotte:
Second essai: De la nature de l'air.
(Drugi esej: O naturze powietrza.)
[Paris, 1679]

W 1738 została wydana przez Daniela Bernouliego *Hydrodynamika*.

Daniel Bernoulli:
Hydrodynamica, sive de Viribus et Motibus Fluidorum Commentarii.
(Hydrodynamika, czyli esej o siłach i ruchach płynów.)
[1738]

Bernoulli przedstawiał gaz jako zbiorowisko małych cząstek, które poruszają się w różnych kierunkach. Prawdłowo interpretował ciśnienie gazu na ścianki naczynia, jako rezultat zderzeń cząstek gazu ze ściankami naczynia. Jako pierwszy zinterpretował prawo Boyle'a, podał warunek, przy którym jest ono spełnione:

"Ciśnienie gazu zwiększa się nie tylko w wyniku zgęszczenia, ale także w wyniku wzrostu temperatury... Dla każdego gazu o dowolnej gęstości, ale o stałej temperaturze, ciśnienie jest odwrotnie proporcjonalne do objętości." [wg 3]

Wskazał także na przybliżony charakter tego prawa, wprowadził pojęcie gazu idealnego. Poglądy Bernouliego nie znalazły jednak kontynuatorów, wręcz zostały zapomniane.

Wyjątek stanowiły poglądy Łomonosowa. Był on zwolennikiem kinetyczno-molekularnej teorii gazów. Uważał, że atomy tworzące gaz poruszają się w różnych kierunkach, zderzając się ze sobą w czasie nie obserwowalnie krótkim. Łomonosow także podał interpretację prawa Boyle'a z punktu widzenia teorii kinetyczno-molekularnej.

§ 2. Kinetyczno-molekularna teoria gazów

Poglądy na ciepło jako rodzaj ruchu zostały wyparte przez przeciwstawną teorię cieplnego fluidu (cieplika). Dopiero w połowie XIX wieku, kiedy to **James Prescott Joule (1818-1890)** wykazał równoważność pracy i ciepła, teoria cieplika została obalona.

Prace eksperymentalne angielskiego fizyka, uwieńczone odkryciem równoważności pracy i ciepła, doprowadziły go do teoretycznych rozważań. Jeszcze w 1845 **Joule** wygłosił wykład, w którym przedstawił swoje poglądy na naturę ciepła i własności gazów. **Joule** zakładał, że ruch cząsteczek gazu jest ruchem drgającym.

Joule:

On the Mechanical Equivalent of Heat.

(O mechanicznym równoważniku ciepła.)

[Notices and Abstracts of Communications to the British Association for the Advancement of Science **15**. (1845).] [Odczytano przed Brytyjskim Stowarzyszeniem w Cambridge, czerwiec 1845.]

Zadanie, jak w oparciu o kinetyczno-molekularną teorię wyjaśnić prawa gazowe, podejmuje **August Karl Krönig (1822-1879)**.

A. Krönig:

Grundzüge einer Theorie der Gase.

(Podstawy teorii gazów.)

[Annalen der Physik **175/99**, 10 (1856) 315-322.]

W pracy **Grundzüge einer Theorie der Gase** **Krönig** określa ciśnienie gazu na ścianki naczynia. Zakładając, że naczynie ma kształt prostopadłościanu o krawędziach X, Y, Z, i że molekuly poruszają się równymi prędkościami w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, stwierdza, że pęd p' przekazany przez cząstkę ściance naczynia wynosi: [wg 3]

$$p' = mca,$$

gdzie

m – masa cząstki,

a – liczba zderzeń ze ścianką,

c – wartość prędkości.

Liczba zderzeń cząstki ze ścianką w jednostce czasu, dla cząstki poruszającej się wzdłuż krawędzi X wynosi $c/2X$. Stąd

$$p' = \frac{mc^2}{2X}.$$

Między każdą parą przeciwległych ścianek porusza się 1/3 wszystkich cząstek. Dla ścianki YZ

$$p' = \frac{1}{3} \frac{mc^2}{2X},$$

gdzie

n – liczba wszystkich cząstek w danej objętości.

Stąd ciśnienie p :

$$p = \frac{p'}{YZ} = \frac{nmc^2}{6XYZ}.$$

Ponieważ XYZ jest równe objętości naczynia V ,

$$p = \frac{nmc^2}{6V}$$

albo

$$pV = \frac{1}{6} nmc^2.$$

W 1857 [Rudolf Julius Emanuel Clausius \(1822-1888\)](#) przedstawił swoje poglądy dotyczące ciepła.

R. Clausius:

On the nature of the motion which we call heat.

(O rodzaju ruchu, który nazywamy ciepłem.)

[Philosophical Magazine (Series 4) **14**, 91 (1857) 108-127.]

R. Clausius:

Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen.

(O rodzaju ruchu, który nazywamy ciepłem.)

[Annalen der Physik **176/100**, 3 (1857) 353-380.]

R. Clausius:

Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen.

(O rodzaju ruchu, który nazywamy ciepłem.)

[W książce: Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie (Abt. II (1857) S. 229-260).]

"...nowa teoria gazów, zwana kinetyczną, zakłada, że cząsteczki gazów nie drgają wokół określonych położeń równowagi, ale poruszają się ruchem prostoliniowym ze stałą prędkością do momentu póki nie zderzą się z innymi cząsteczkami gazu albo ze ścianką naczynia." [wg 3]

[Clausius](#) pokazał, że współczynnik proporcjonalności w równaniu [Kröniga](#) powinien wynosić nie $1/6$ a $1/3$. Wskazał na błąd jaki popełnił [Krönig](#), który

"Przy określeniu ciśnienia przyjął w obliczeniach tylko jeden kierunek ruchu cząsteczek zderzających się ze ścianką i dla tego dla ciśnienia otrzymał tylko połowę tej wartości, jaką ma ono w rzeczywistości." [wg 3]

W pracy

R. Clausius:

Ueber die mittlere Länge der Wege, welche bei der Molekularbewegung gasförmiger Körper von den einzelnen Molekülen zurückgelegt werden; nebst einigen anderen Bemerkungen über die mechanische Wärmetheorie.

(O średniej długości dróg pokonywanych przez poszczególne cząsteczki w ruchu molekularnym ciał gazowych; z kilkoma innymi uwagami na temat mechanicznej teorii ciepła.)

[Annalen der Physik und Chemie **181/105**, 2 (1858) 239-258.]

autor wskazuje, że przy rozpatrywaniu takich zagadnień jak dyfuzja i przewodnictwo cieplne należy uwzględnić zderzenia między cząsteczkami gazu. Zakładając, że wszystkie cząsteczki poruszają się z jednakową prędkością, Clausius pokazuje, że średnia droga swobodna cząsteczki L , to jest droga jaką przebędzie cząsteczka między dwoma kolejnymi zderzeniami, wynosi: [wg 3]

$$L = \frac{3}{4} \frac{\lambda}{\pi s^2},$$

gdzie

λ – średnia odległość między dwoma sąsiednimi cząsteczkami,

s – promień sfery ich działania.

W 1860 James Clerk Maxwell (1831-1879) opublikował pracę:

J. Clerk Maxwell:

Illustrations of the Dynamical Theory of Gases. Part I. – On the Motions and Collisions of the Perfectly Elastic Spheres.

(Ilustracje dynamicznej teorii gazów. Część I. – O ruchach i zderzeniach doskonale elastycznych sfer.)

[Philosophical Magazine (Series 4) **19**, 124 (1860) 19-32.]

"W oparciu o prawa mechaniki wyprowadzę prawa ruchu dla nieokreślonej ilości małych sztywnych i idealnie sprężystych kul oddziałujących ze sobą tylko w czasie zderzenia. Jeżeli okaże się, że własności takiego układu ciał odpowiadają własnościom gazu, to zostanie stworzona ważna fizyczna analogia, która może doprowadzić do lepszego zrozumienia własności materii." [wg 3]

Clausius w swoich pracach zakładał, że cząsteczki posiadają stałą średnią prędkość. Maxwell postawił sobie zadanie określenia rozkładu prędkości cząsteczek.

"Określić średnią liczbę cząsteczek, których prędkości leżą w zadanym przedziale, po dużej liczbie zderzeń pomiędzy dużą liczbą jednakowych cząsteczek." [wg 3]

Zadane to Maxwell rozwiązał w następujący sposób:

Niech

N – liczba cząsteczek,

v_x, v_x, v_x – składowe prędkości każdej cząsteczki,

wtedy liczba cząsteczek, których prędkości leżą między:

$$v_x, v_x + dv_x; \quad v_y, v_y + dv_y; \quad v_z, v_z + dv_z$$

wynosi:

$$Nf(v_x)dv_x, \quad Nf(v_y)dv_y, \quad Nf(v_z)dv_z.$$

We wszystkich przypadkach f jest jedną i tą samą funkcją wymagającą określenia. Aby znaleźć postać funkcji f , **Maxwell** założył, że składowe prędkości są od siebie niezależne. Postać funkcji podanej przez **Maxwella** jest następująca:

$$f(v_x) = \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{v_x^2}{\alpha^2}\right],$$

gdzie

$$\alpha = \sqrt{\frac{2kT}{m}},$$

k – stała **Boltzmann**,

T – temperatura.

"Prędkości rozdzielają się między cząsteczkami według tego samego prawa, co błędy pomiarów w metodzie najmniejszych kwadratów. Prędkości leżą w przedziale od zera do nieskończoności, jednakże liczba cząsteczek mających duże prędkości jest stosunkowo mała." [wg 3]

Maxwell zajmował się w 1860 także dyfuzją gazów.

J. Clerk Maxwell:

Illustrations of the Dynamical Theory of Gases. Part II. – On the Process of Diffusion of two or more kinds of moving particles among one another.

(Ilustracje dynamicznej teorii gazów. Część druga. – O procesie wzajemnej dyfuzji dwóch lub więcej rodzajów poruszających się cząstek.)

[The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science

(Series 4) **20**, 130 (1860) 21-37.]

Jako pierwszy w ścisły sposób rozwinął kinetyczno-molekularną teorię zjawisk transportu. Określił współczynniki dyfuzji, przewodnictwa cieplnego i lepkości. [wg 3]

Rozkładem **Maxwella** zajmował się także **Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906)**. Postawił przed sobą zadanie dać ścisły dowód prawa rozkładu **Maxwella** i uogólnić je na bardziej złożone przypadki (gaz w polu sił, gaz wieloatomowy). [wg 3]

Ludwig Boltzmann:

Studien über das Gleichgewicht zwischen der lebendigen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten.

(Badania nad rozkładem energii pomiędzy poruszającymi się punktami materialnymi.)

[Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien – mathematisch-naturwissenschaftliche Classe **58** (1868) 517-560.] [Wiener Berichte **58** (1868) 517-560.]

W pracach z 1879 i 1882

J. Clerk Maxwell:

On Boltzmann's Theorem on the average distribution of energy in a system of material points.

(O twierdzeniu Boltzmann o średnim rozkładzie energii w układzie punktów materialnych.)

[Transactions of the Cambridge Philosophical Society **12**, Part III (1879) 547-570.]

J. Clerk Maxwell:

On Boltzmann's Theorem on the Average Distribution of Energy in a System of Material Points.

(O twierdzeniu Boltzmann'a o średnim rozkładzie energii w układzie punktów materialnych.)

[Philosophical Magazine (Series 5) **14**, 88 (1882) 299-312.]

Maxwell zastąpił termin **Boltzmann'a** "zmienne charakteryzujące położenie cząsteczki" terminem "liczba stopni swobody" (degrees of freedom). W tej samej pracy Maxwell podał prawo równomiernego rozkładu energii na poszczególne stopnie swobody, zwane zasadą ekwipartycji energii. [wg 3]

§ 3. Statystyczna interpretacja drugiej zasady termodynamiki

Clausius w 1865 pokazał, że istnieje funkcja stanu układu, która dla odizolowanego od otoczenia układu jest funkcją niemalejącą, osiągającą maksimum w stanie równowagi termodynamicznej układu. Funkcję tę **Clausius** nazwał entropią (entropie – znaczy zwrot).

R. Clausius:

Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie.

(O różnych postaciach głównych równań mechanicznej teorii ciepła, które są wygodne do zastosowania.)

[Annalen der Physik und Chemie **201/125**, 7 (1865) 353-400.]

Pracę zakończył stwierdzeniem:

- 1) Die Energie der Welt ist constant.
- 2) Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.
- 1) Energia Wszechświata jest stała.
- 2) Entropia Wszechświata dąży do wartości maksymalnej.

Druga zasada termodynamiki została nazwana zasadą wzrostu entropii.

Drugą zasadę termodynamiki starano się uzasadnić na drodze uogólnienia wariacyjnych zasad mechaniki tak, aby obejmowały one także procesy termodynamiczne.

Problemem ten rozpatrywał **Władysław Natanson (1864-1937)**. [wg 4]

Władysław Natanson:

O znaczeniu kinetycznym funkcji dysypacyjnej.

[Rozprawy Akademii Umiejętności. Wydział Matematyczno-Przyrodniczy Serya II. Tom IX. **29** (1894) 171-180.]

Władysław Natanson:

O prawach zjawisk nieodwracalnych.

[Rozprawy Akademii Umiejętności. Wydział Matematyczno-Przyrodniczy. Serya II. Tom X. **30** (1896) 309-336.]

W pracach wydanych w latach 1856, 1871 i 1872 **Boltzmann** zajmował się mechanistyczną interpretacją drugiej zasady termodynamiki na gruncie teorii kinetyczno-molekularnej. Jednakże poglądy **Boltzmann'a** nie miały zwolenników. Wynikało to stąd, że teoria kinetyczno-molekularna w owych czasach była rozpatrywana jako hipoteza nie mająca mocnej eksperymentalnej podbudowy. Były jednak i przyczyny innego rodzaju.

W 1876 i 1877 **Johann Josef Loschmidt (1821-1895)** poddał poglądy **Boltzmann** krytyce, znanej jako "**paradoks Loschmidta**". Paradoks polegał na tym, że za pomocą odwracalnych w czasie praw mechaniki **Boltzmann** tłumaczył nieodwracalne procesy termodynamiczne.

J. Loschmidt:

Über den Zustand des Wärmegleichgewichtes eines Systems von Körpern mit Rücksicht auf die Schwerkraft.
(O stanie równowagi termicznej układu ciała z uwzględnieniem grawitacji.)

[Wiener Berichte **73**, 1 (1876) 128-142; **73**, 3 (1876) 366-372; **75**, 2 (1877) 287-289; **76**, 7 (1877) 209-225.]

W pracy wydanej w **lutym** 1877

Ludwig Boltzmann:

Bemerkungen über einige Probleme der mechanische Wärmetheorie.

(Uwagi dotyczące wybranych zagadnień z mechanicznej teorii ciepła.)

[Wiener Berichte **75** (1877) 62-100.]

Boltzmann polemizuje z **Loschmidtem** twierdząc, że druga zasada termodynamiki jest prawem statystycznym i dlatego wyprowadzenie jej jedynie przy pomocy równań dynamiki jest niemożliwe.

Odpowiedź **Boltzmann** nie zadowoliła **Loschmidta** i innych fizyków.

W pracy z **października** 1877

Ludwig Boltzmann:

Über die Beziehung dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht.

(O związku między drugim głównym twierdzeniem mechanicznej teorii ciepła a teorią prawdopodobieństwa i twierdzeniami o bilansie cieplnym.)

[Wiener Berichte **76** (1877) 373-435.]

Boltzmann wprowadził pojęcie "prawdopodobieństwa stanu układu", teoria prawdopodobieństwa tworzyła teraz organiczną całość z teorią kinetyczno-molekularną. W pracy tej **Boltzmann** twierdził, że między entropią a prawdopodobieństwem stanu układu może istnieć proporcjonalna zależność. Ponieważ prawdopodobieństwo stanu układu ma statystyczny charakter, to stąd wynika, że i sama entropia ma statystyczny charakter.

Następne lata działalności naukowej poświęcił **Boltzmann** udoskonaleniu statystycznej teorii.

Ludwig Boltzmann:

Vorlesungen über Gastheorie. Vol I. Vol II.

(Wykłady z teorii gazów.)

[1896-1898]

Podaje tam między innymi związek między entropią a prawdopodobieństwem stanu układu:

$$S = k \ln \omega,$$

gdzie

k – stała **Boltzmann**,

ω – prawdopodobieństwo stanu układu.

§ 4. Krytyka atomistyki

W latach 1894-1895 na łamach angielskiego czasopisma „Nature” rozwinęła się dyskusja dotycząca prac Boltzmanna. Wielu europejskich fizyków występowało przeciw statystycznym koncepcjom Boltzmanna, powołując się na paradoks odwracalności Loschmidta.

Istniała także grupa uczonych i filozofów, której przewodzili Ostwald i Mach. Główne ostrze swej krytyki skierowali oni na fundament statystycznej teorii Boltzmanna – kinetyczno-molekularną teorię gazów.

W filozofii narastała fala koncepcji pozytywistycznych, które pod hasłem krytyki poznania głosiły sceptyczny stosunek do wszystkiego, co nie jest dane w bezpośrednim doświadczeniu. Szczególnie rozpowszechnił się kierunek zwany empiriokrytycyzmem. Twórcą tego kierunku był austriacki fizyk i filozof Ernst Mach (1838-1916). Uważał on, że fizyka powinna się ograniczać do ustalania związków między obserwowalnymi zjawiskami, że wobec tego w jej wzorach powinny występować tylko makroparametry dostępne pomiarowi. Wychodząc z tych założeń, Mach twierdził, że trzeba wyeliminować z nauki jako metafizykę całą koncepcję atomistyczną, w szczególności kinetyczną teorię gazów z jej niedostępnymi doświadczeniu mikroparametrami (liczba cząstek, liczba ich zderzeń, masy cząstek).

Przeciw atomistyce wystąpił również pokrewny machizmowi kierunek, zwany energetyzmem. Twórcą tego kierunku był niemiecki fizykochemik i filozof, laureat Nagrody Nobla z roku 1909, Wilhelm Friedrich Ostwald (1853-1932). W swoim odczycie Krytyka materializmu naukowego, wygłoszonym w 1897, stwierdził między innymi:

"Jeżeli wszystko co wiemy o świecie zewnętrznym stanowią stosunki energetyczne, to na jakiej zasadzie możemy w tym właśnie świecie zewnętrznym przypuszczać istnienie czegoś, czegośmy nigdy nie doświadczyli? Tak, odpowiecie mi na to, ale jednak energia jest tylko czymś pomyślanym, jest abstrakcją, gdy tymczasem materia jest rzeczywistością! Na to odpowiem: Przeciwnie! Materia jest płodem naszego umysłu, któryśmy sobie i to w dość niedoskonały sposób zbudowali, by przedstawić to, co jest trwałe w zmienności zjawisk... Materia jest niczym innym, jak tylko przestrzenią uporządkowaną grupą rozmaitych energii... Jeżeli więc rzeczywiście prawa zjawisk przyrody dają się sprowadzić do odnośnych rodzajów energii, to jaką stąd mamy korzyść? Przede wszystkim tę bardzo znaczną, że staje się możliwa przez to wiedza przyrodnicza wolna od hipotez. Nie ma już mowy o siłach niemożliwych do wykazania pomiędzy atomami, których obserwować nie możemy." [wg 5]

Ostwald występował przeciw atomistyce, dążył do usunięcia jej z nauki, gdyż na atomy nie było miejsca w jego energetycznym obrazie świata.

Wilhelm Ostwald:

Grundlinien der anorganischen Chemie.

(Podstawowe zasady chemii nieorganicznej.)

[Engelmann, Leipzig 1900.]

Tak oto pisał jeszcze w 1900:

"Leży przecież w interesie nauki, by pod tym względem zachowana była duża ostrożność i dla tego należy tu zwrócić wielką uwagę na to, by formy wyrażania hipotez atomistycznych były tak oszczędne, jak tylko mowa dzisiejsza na to pozwala." [wg 1]

Autorytet [Macha](#) i [Ostwalda](#) w kołach naukowych był wielki, tak że występowanie przeciwko nim było praktycznie niemożliwe.

§ 5. Prace Mariana Smoluchowskiego

A. Skok temperatury

[Marian Smoluchowski \(1872-1917\)](#), jako jeden z nielicznych fizyków, był zarazem świetnym teoretykiem i eksperymentatorem.

W 1898, pracując w Berlinie u [Warburga](#), wykonał pracę doświadczalną:

Ritter M. Smoluchowski von Smolan:

Über Wärmeleitung in verdünnten Gasen.

(O przewodnictwie cieplnym w rozrzedzonych gazach.)

[Annalen der Physik und Chemie **300/60**, 1 (1898) 101-130.]

Temat tej pracy zasugerował [Emil Gabriel Warburg \(1846-1931\)](#), chodziło mianowicie o sprawdzenie czy istnieje skok temperatury pomiędzy gazem przewodzącym ciepło a ściankami naczynia, w którym się on znajduje. Przyjęta w tym czasie teoria przewodnictwa zakładała, że temperatura gazu powinna w sposób ciągły przejść w temperaturę ścianki.

[Smoluchowski](#) w swojej pracy doświadczalnej wykazał istnienie skoku temperatury. Ustalił, że skok temperatury $\Delta\Theta$ jest proporcjonalny do gradientu temperatury $\frac{dT}{dx}$ wewnątrz gazu.

Zależność tę wyraża równanie:

$$\Delta\Theta = \gamma \frac{dT}{dx}$$

Współczynnik γ jest odwrotnie proporcjonalny do ciśnienia, nie zależy od kształtu naczynia i od temperatury, zależy natomiast od rodzaju gazu.

Teorię tego zjawiska podał [Smoluchowski](#) w pracy

M. Smoluchowski:

Über den Temperatursprung bei Wärmeleitung in Gasen.

(O skoku temperatury w zjawiskach przewodnictwa cieplnego w gazach).

[Sitzungsberichte / Akademie der Wissenschaften in Wien **107**, Ia (1898) 304-329.]

"Celem tej pracy jest wykazanie, że wyjaśnienie zaobserwowanych zjawisk wynika w bardzo prosty sposób z teorii kinetycznej gazów, podobnie wykazali [Kundt](#) i [Warburg](#) w odniesieniu do zjawiska poślizgu gazów. Będzie to, jak mi się wydaje, nowy dowód słuszności tej teorii." [wg 4]

Tym samym **Smoluchowski** określił swoje stanowisko w istniejącym sporze między dwoma poglądami na świat: termodynamiczno-energetycznym z jednej strony a atomistyczno-kinetycznym z drugiej.

B. Fluktuacje gęstości

Już **Boltzmann**, broniąc się przed zarzutami twierdził, że mogące istnieć odstępstwa od drugiej zasady termodynamiki są bardzo mało prawdopodobne, doświadczalnie nie do wykrycia.

Smoluchowski uważał, że **Boltzmann** nie zupełnie ma rację. Postawił sobie zadanie wyszukania takich zjawisk, gdzie odstępstwa od drugiej zasady termodynamiki wyraźnie dochodzą do głosu, dadzą stwierdzić się doświadczalnie.

W 1904 w zbiorowym tomie rozpraw wydanym dla uczczenia 60 rocznicy urodzin **Boltzmann**a (Boltzmann-Festschrift) ukazała się praca **Mariana Smoluchowskiego**

M. Smoluchowski:

Über Unregelmäßigkeiten in der Verteilung von Gasmolekülen und deren Einfluß auf Entropie und Zustandsgleichung.

(O nieregularnościach w rozkładzie cząsteczek gazu i ich wpływie na entropię i równanie stanu).

W pracy tej zawarte są rezultaty pierwszych badań **Smoluchowskiego** nad zjawiskami fluktuacji i granicami ważności drugiej zasady termodynamiki.

A oto rezultaty rozważań **Smoluchowskiego**:

"Przypuśćmy, że mamy do czynienia z gazem doskonałym. Z objętości V tego gazu wydzielmy w myśli pewną część v i zapytajmy jakie jest prawdopodobieństwo W_n tego, że z ogólnej liczby N cząstek gazu znajduje się w v pewna określona liczba n .

$$W_n = \frac{N!}{n!(N-n)!} \left(\frac{v}{V}\right)^n \left(\frac{V-v}{V}\right)^{N-n} \quad (1)$$

Prawdopodobieństwo wystąpienia zgęszczenia w przedziale $\delta, \delta + d\delta$,

gdzie

$$\delta = \frac{n-v}{v},$$

v – liczba cząsteczek w rozpatrywanej objętości przy równomiernym rozkładzie gęstości

$$W(\delta, \delta + d\delta) = \sqrt{\frac{v}{2\pi}} \exp\left[-\frac{v\delta^2}{2}\right] d\delta.$$

Przeciętne dodatnie albo ujemne odchylenie procentowe od gęstości normalnej wynosi:

$$\sqrt{\frac{v}{2\pi}} \int_0^{\infty} \delta \exp\left[-\frac{v\delta^2}{2}\right] d\delta = \sqrt{\frac{v}{2\pi v}}.$$

Przeciętne odchylenie przypadające na 1 cm^3 wyniesie zaledwie $0,5 \cdot 10^{-10}$ gęstości normalnej. Ale już dla wymiarów w skali mikroskopowej stanie się dostrzegalne." [wg 4]

W dalszej części pracy [Smoluchowski](#) rozpatrywał przypadek, w którym liczb n oraz v nie można traktować jako wielkich liczb (wielkimi liczbami są natomiast N i $N - n$). Wtedy wyrażenie (1) przyjmuje postać:

$$W_n = \frac{v^n e^{-v}}{n}. \quad (2)$$

W 1906 [Theodor Svedberg \(1884-1971\)](#) wykonał doświadczenie w celu sprawdzenia podanych przez [Smoluchowskiego](#) wzorów. Posługując się ultramikroskopem, obserwował pozostający w spoczynku koloidalny roztwór złota, w oznaczonych zaś przedziałach czasu (39 razy na minutę) notował liczbę ziarenek złota znajdujących się w danej chwili w polu widzenia mikroskopu. [Svedberg](#) otrzymał szereg obejmujący 517 pomiarów: 1200002001324123102111131125111022331...

Można stąd było policzyć względną częstość pojawiania się danej liczby cząstek, co dobrze zgadzało się ze względną częstością teoretyczną obliczona ze wzoru [Smoluchowskiego](#).

The Svedberg:

[Ueber die Eigenbewegung der Teilchen in kolloidalen Lösungen. I.](#)

(O ruchu właściwym cząstek w roztworach koloidalnych. I.)

[Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie **12** (1906) 853-860.]

The Svedberg:

[Ueber die Eigenbewegung der Teilchen in kolloidalen Lösungen. II.](#)

(O ruchu właściwym cząstek w roztworach koloidalnych. II.)

[Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie **12** (1906) 909-910.]

The Svedberg:

[Über die Bedeutung der Eigenbewegung der Teilchen in kolloidalen Lösungen für die Beurteilung der Gültigkeitsgrenzen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik.](#)

(O znaczeniu ruchu własnego cząstek w roztworach koloidalnych dla oceny granic ważności drugiej zasady termodynamiki.)

[Zeitschrift für Physikalische Chemie **59** (1907) 451-458.]

Zanim [Svedberg](#) potwierdził doświadczalnie teorię [Smoluchowskiego](#), on sam w pracy z 1907 podał wytłumaczenie zjawiska opalescencji jednorodnych gazów w pobliżu punktu krytycznego, zjawiska, które stanowiło zagadkę dla termodynamiki. [Smoluchowski](#) wykazał, że przyczyną opalescencji są fluktuacje gęstości. Tym samym dał dowód doświadczalny, że fluktuacje gęstości zachodzą.

M. Smoluchowski:

[Teoria kinetyczna opalescencji gazów w stanie krytycznym oraz innych zjawisk pokrewnych.](#)

[Rozprawy Wydziału matematyczno-przyrodniczego Akademii Umiejętności w Krakowie Tom 7/47, Serja A (1907) 179-198.]

C. Ruchy Browna

Angielski botanik [Robert Brown \(1773-1858\)](#) w 1827 odkrył, że zawieszona w cieczy drobne ciała nieorganiczne wykonują dość skomplikowane ruchy.

Robert Brown:

A brief account of microscopical observations made in the months of June, July and August 1827, on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies.

(Krótka relacja z obserwacji mikroskopowych przeprowadzonych w czerwcu, lipcu i sierpniu 1827 na cząstkach zawartych w pyłkach roślin; oraz o ogólnym istnieniu aktywnych cząsteczek w ciałach organicznych i nieorganicznych.)

[Philosophical Magazine (Series 2) **4**, 21 (1828) 161-173.]

Pojawiły się różne próby wyjaśnienia ruchów **Browna**, jednakże żadne z tych wyjaśnień nie wytrzymało próby czasu.

Lukasz Jan (Julian) Bodaszewski (1849-1908) jako pierwszy badał ruchy **Browna** cząsteczek dymu i innych zawiesin w gazach, tłumacząc je jako ruchy drobinowe. Wyniki swoich obserwacji opisał w 1882.

L. J. Bodaszewski:

Wyniki niektórych doświadczeń fizycznych: Ciała w stanie lotnym pod mikroskopem.

[Kosmos **7** (1882) 177-182.]

A oto fragmenty jego pracy:

"... Nowoczesna fizyka przyjmuje, że atomy i drobinny ciał pozostają w ciągłym ruchu, o którym tylko z pewnych zjawisk wnioskować można... Jeżeli przypatrzymy się za pomocą mikroskopu ciałom w stanie lotnym, mianowicie parom oraz dymom, to spostrzeżemy cząstki tych ciał w ruchu... Spostrzeżenia te pozwalają w surowym zarysie sprawdzić zewnętrzną budowę par i dymów, która dotychczas tylko domniemaną była, i okazują zarazem, że widome cząstki ciał w stanie lotnym się znajdujących poruszają się w przybliżeniu podobnie jak drobinny gazów i że ze wzrostem temperatury tych ciał wzrasta i ruch tych widzialnych, ciał lotnych tworzonych kuleczek, z których każda przedstawia grupę złożoną z bilionów drobin odpowiednich ciał składowych." [wg 4]

Teorię ruchów **Browna** podali **Albert Einstein (1879-1955)** w pracy opublikowanej w 1905 i **Marian Smoluchowski** w pracy wydanej w 1906.

A. Einstein:

Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen.

(O ruchu cząstek zawieszonych w spoczywającej cieczy, zgodnie z wymogami molekularno-kinetycznej teorii ciepła.)

[Annalen der Physik **322/17**, 8 (1905) 549-560.]

M. Smoluchowski:

Zarys kinetycznej teorii ruchów Browna i roztworów mętnych.

[Rozprawy Wydziału matematyczno-przyrodniczego Akademii Umiejętności w Krakowie Tom 46, Serja A (1906) 257-281.]

W pierwszej części swojej pracy **Smoluchowski** przeprowadza krytykę dotychczasowych poglądów na naturę ruchów **Browna**, oraz przytacza fakty doświadczalne, które przemawiają wyraźnie za kinetyczną interpretacją tych zjawisk.

W dalszej części pracy [Smoluchowski](#) rozpatruje ruchy [Browna](#) z punktu widzenia teorii kinetyczno-molekularnej. Ruchy [Browna](#) powstają wskutek przypadkowych uderzeń drobin cieczy nadających ciałkom odpowiednich prędkości w coraz to innych kierunkach.

Rezultat rozważań [Smoluchowskiego](#) jest prawie identyczny z rezultatem wyprowadzonym zupełnie odmiennymi metodami w pracy [Einsteina](#):

$$\overline{S}^2 = \frac{k\tau T}{3\pi \eta r},$$

gdzie

\overline{S}^2 – średni kwadrat przesunięcia w danym przedziale czasu τ ,

k – stała [Boltzmana](#),

T – temperatura,

η – współczynnik lepkości cieczy, w której pływa cząstka [Browna](#),

r – promień cząstki [Browna](#).

Różnica polega jedynie na współczynniku liczbowym.

W dalszej części pracy [Smoluchowski](#) wykazuje, że ruchy [Browna](#) powinny w myśl teorii kinetycznej występować także w gazach. Powołuje się na obserwacje [Bodaszewskiego](#).

Kończąc swoją pracę, [Smoluchowski](#) stwierdza:

"Według obecnego stanu naszych wiadomości jesteśmy niewątpliwie uprawnieni do zapatrywania się na ruchy [Browna](#), jako na dowód prawdziwości hipotez molekularno kinetycznych fizyki współczesnej." [wg 4]

Zasługą [Einsteina](#) i [Smoluchowskiego](#) było wskazanie na wielkość mierzalną w ruchach [Browna](#) – średni kwadrat przesunięcia w danym przedziale czasu.

W 1909 [Jean Baptiste Perrin \(1870-1942\)](#) wykazał, że wzór Einsteina-Smoluchowskiego zgadza się z doświadczeniem.

Jean Perrin:

Le Mouvement Brownien et la Réalité Moleculaire.

(Ruch Browna i rzeczywistość molekularna.)

[Annales de Chimie et de Physique, 8me Series, **18** (September, 1909) 5-114.]

D. Granice ważności drugiej zasady termodynamiki

W termodynamice drugą zasadę podniesiono do godności dogmatu obowiązującego bezwzględnie, ściśle i powszechnie.

[Smoluchowski](#) w pracy wydanej w 1914 rozstrzygnął spór między termodynamiką a teorią kinetyczno-molekularną odnośnie drugiej zasady termodynamiki.

M. Smoluchowski:

Gültigkeitsgrenzen des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie.

(Granice ważności drugiej zasady termodynamiki.)

[Vorträge über die kinetische Theorie der Materie und der Elektrizität, gehalten in Göttingen auf Einladung der Kommission der Wolfskehlstiftung (Leipzig; Berlin: B. G. Teubner, 1914), 87-121.]

"Z punktu widzenia statystyki molekularnej nie ma w ogóle żadnej różnicy pomiędzy stanami termodynamicznej równowagi i nierównowagi, czy też pomiędzy zjawiskami odwracalnymi i nieodwracalnymi... Statystyka molekularna obdarzyła nas trzema wielkościami, którymi są: średnia fluktuacja około stanu normalnego, średnie odchylenie maksymalne, jakiego należy się spodziewać w określonym czasie i wreszcie czas powrotu stanów anormalnych... W praktyce błędy te wchodzą w grę tylko w takich procesach, przy których średnia fluktuacja jest wielkością fizycznie dostrzegalną, gdy tym czasem w pozostałych przypadkach praktyczne znaczenie termodynamiki zachowuje się całkowicie. Nie może być oczywiście mowy o tym, aby tak ważną dla fizyki współczesnej ekonomiczną zasadę wyjaśniającą, jak druga zasada, po prostu obalić." [wg 4]

Wobec tego jak ją sformułować?

"Ze stanowiska statystyki molekularnej poprawne jest twierdzenie, że niemożliwe jest *perpetuum mobile* drugiego rodzaju, czyli silnik cieplny zamieniający całkowicie na pracę ciepło pobierane z otoczenia. [wg 4]

§ 6. Znaczenie prac Mariana Smoluchowskiego

W walce jaka toczyła się pomiędzy dwoma poglądami na świat (termodynamiczno-energetycznym z jednej strony i atomistyczno-kinetycznym z drugiej) odegrał [Marian Smoluchowski](#) wybitną rolę. Jego działalność naukowa zgrupowana była wokół zagadnienia słuszności koncepcji atomistycznych. W okresie, w którym powstawały prace [Mariana Smoluchowskiego](#), atomistyka przeżywała ciężki kryzys, atakowana przez fizyków i filozofów. Aby występować w tym czasie w obronie atomistyki, trzeba było powołać się na zjawiska, których interpretacja wymagałaby przyjęcia założeń właściwych tylko atomistyce. Badania dotyczące ruchów [Browna](#), zjawisk opalescencji, fluktuacji gęstości, służące jako *experimenta crucis*, rozstrzygnęły spór na korzyść kinetyki molekularnej.

Polskie Towarzystwo Fizyczne wybiło medal [Mariana Smoluchowskiego](#) przyznawany za wybitne osiągnięcia naukowe w dziedzinie fizyki. Po raz pierwszy medal ten przyznano w roku 1967 na zjeździe fizyków w Lublinie. Otrzymał go znany polski fizyk teoretyk [Wojciech Sylwester Piotr Rubinowicz \(1889-1974\)](#).

II. SKŁADNIKI BUDOWY ATOMU

O jakichkolwiek koncepcjach budowy atomu jest sens mówić dopiero po odkryciu jego części składowych. Widzieliśmy wyżej z jakimi oporami przyjmowała się w fizyce koncepcja atomowej struktury materii. Tym czasem trwały badania, które doprowadziły do odkrycia elektronu, części składowej atomu.

Odkrycie elektronów zbiegło się z odkryciem promieniotwórczości, a model atomu podany przez [Thomsona](#) – z teorią rozpadu promieniotwórczego [Rutherforda](#) i [Soddy'ego](#).

Odkrycie jądra atomowego stanowiło doniosły krok w dziedzinie badań nad strukturą materii. Powiązanie liczby ładunków w jądrze z liczbą porządkową wskazywało, że wielkość ładunku jądra, a co za tym idzie – liczba elektronów w atomie, odgrywa istotną rolę.

Po odkryciu izotopów okazało się, że ich ciężary atomowe są liczbami całkowitymi. Przywróciło to do życia hipotezę [Prouta](#).

Początkowo przypuszczano, że jądro atomowe zbudowane jest z protonów i elektronów. Po odkryciu nowej cząstki zwanej neutronem, okazało się, że jądra zbudowane są z protonów i neutronów. Jednakże próby stworzenia przy pomocy fizyki klasycznej stabilnego modelu atomu zbudowanego z jądra i elektronów okazały się bezowocne.

§ 1. Rozwój poglądów dotyczących atomowej struktury elektryczności

Już w 1834 **Michael Faraday (1791-1867)**, przeprowadzając ilościowe badania elektrolizy sugerował, że jego prawa można uzasadnić w oparciu o atomowy charakter elektryczności.

Michael Faraday:

On Electrical Decomposition.

(O rozkładzie elektrycznym.)

[Philosophical Transactions of the Royal Society **124** (1834) 77-122.]

Zwolennikiem atomowej struktury elektryczności był **Gustav Theodor Fechner (1801-1887)**.

G. Th. Fechner:

Ueber die Verknüpfung der Faraday'schen Inductions-Erscheinungen mit den Ampèreschen elektrodynamischen Erscheinungen.

(O związku zjawisk indukcji Faradaya ze zjawiskami elektrodynamicznymi Ampère'a.)

[Annalen der Physik **140/64** (1845) 337-345.]

Mechanizm przewodzenia prądu elektrycznego wydawał mu się tylko w ten sposób zrozumiały, pisał on:

"Idealne założenie... w sposób ciągły i jednorodny rozłożonych substancji... obu elektrycznych fluidów... wydaje się niedopuszczalne." [wg 6]

Pisał również o "cząstkach dodatniego i ujemnego elektrycznego fluidu" i przypisywał im nie tylko określony ładunek elektryczny, lecz również określoną masę (bezwładność).

Myśl, że elektryczność posiada strukturę, spotykamy później u **Maxwella** w związku z jego rozważaniami dotyczącymi elektrolizy.

J. C. Maxwell:

A treatise on electricity and magnetism.

(Traktat o elektryczności i magnetyzmie.)

[Oxford at the Clarendon Press 1873.]

Pisał on:

"To też jest niezwykle naturalnym przyjąć, że prądy jonów stanowią prądy konwekcyjne i w szczególności, że każdy kation ma określoną ilość dodatniej elektryczności, która jest jednakowa dla molekuł wszystkich kationów i że każdy anion ma taką samą ilość ujemnej elektryczności...
... Tę określoną ilość elektryczności będziemy nazywać ładunkiem molekularnym, gdyby ona była znana, stanowiłaby naturalną jednostkę elektryczności." [wg 6]

Na zjeździe w Belfaście w 1874 **George Johnstone Stoney (1826-1911)** zreferował pracę **On the physical units of nature** (O fizycznych jednostkach natury), w której stwierdził, że każdy ładunek elektryczny składa się z podstawowych, elementarnych ładunków, podkreślał on doniosłość dowodu jakim była elektroliza. Zaproponował także metodę określenia wielkości ładunku elementarnego, wystarczyło podzielić stałą **Faradaya** przez stałą **Avogadro**.

G. Johnstone Stoney:

On the physical units of nature.

(O fizycznych jednostkach natury.)

[The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (Series 5) **11**, 69 (1881) 381-390.]

Praca **Stoneya** została opublikowana dopiero w 1881, kiedy to **Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894)** w swej mowie ku czci **Faradaya**, wygłoszonej w Londynie, powiedział:

"Najbardziej zdumiewającą konsekwencją prawa Faradaya jest bodaj następująca: Jeżeli przyjmemy hipotezę, że pierwiastki składają się z atomów, to nieunikniony jest wniosek, że również elektryczność, zarówno dodatnia jak i ujemna składa się z określonych elementarnych części, będącymi jak gdyby atomami elektryczności."
[wg 6]

Dla określenia nośników ujemnego ładunku elementarnego **Stoney** zaproponował nazwę elektron.

G. Johnstone Stoney:

Of the "electron," or atom of electricity.

(O „elektronie” lub atomie elektryczności.)

[The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (Series 5) **38**, 233 (1894) 418-420.]

§ 2. Odkrycie elektronu

Odkrycie elektronu związane jest z badaniami przepływu prądu elektrycznego przez gaz znajdujący się pod stosunkowo niskim ciśnieniem. Rozwój tych badań możliwy był dzięki postępowi w dziedzinie budowy pomp próżniowych.

W 1858 **Julius Plücker (1801-1868)** odkrył promienie katodowe.

Plücker:

Ueber die Einwirkung des Magneten auf die elektrischen Entladungen in verdünnten Gasen.

(O działaniu magnesu na wyładowania elektryczne w rozrzedzonych gazach.)

[Annalen der Physik und Chemie **179/103**, 1 (1858) 88-106.]

Plücker:

Nachtrag zu der Abhandlungen von Plücker.

(Uzupełnienie do traktatów Plückera.)

[Annalen der Physik und Chemie **179/103**, 1 (1858) 151-157.]

Plücker:

Fortgesetzte Beobachtungen über die elektrische Entladung durch gasverdünnte Räume.

(Dalsze obserwacje dotyczące wyładowań elektrycznych w przestrzeniach gazowych.)

Annalen der Physik und Chemie **180/104**, 1 (1858) 113-128.

Plücker:

On the action of the magnet upon the electrical discharge in rarefied gases.

(O działaniu magnesu na wyładowania elektryczne w rozrzedzonych gazach.)

[The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (Series 4) **16**, 105 (1858) 119-135.]

W 1869 uczeń Plücker'a **Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914)** stwierdził, że promienie katodowe odchylają się w polu magnetycznym i że rozchodzą się po liniach prostych.

J. W. Hittorf, J. Plücker:

On the spectra of ignited gases and vapours with especial regard to the same elementary gaseous substance.
(O widmach zapalonych gazów i par ze szczególnym uwzględnieniem tej samej elementarnej substancji gazowej.)

[Philosophical Transactions of the Royal Society of London **155** (1865) 1.]

Wilhelm Hittorf:

Ueber die Elektrizitätsleitung der Gase. Erste Mittheilung.

(O przewodnictwie elektrycznym gazów. Pierwsze doniesienie.)

[Annalen der Physik und Chemie **212/136**, 1 (1869) 1-31.]

Wilhelm Hittorf:

Ueber die Elektrizitätsleitung der Gase. Zweite Mittheilung.

(Schluss von S. 31.)

(O przewodnictwie elektrycznym gazów. Drugie doniesienie.)

Annalen der Physik und Chemie **212/136**, 2 (1869) 197-234.

Z faktu, że promienie katodowe odchylają się w polu magnetycznym **Cromwell Fleetwood Varley (1828-1883)** wynioskował w 1871, że promienie katodowe mogą składać się z cząsteczek ujemnie naładowanej materii.

Cromwell Fleetwood Varley:

Polarization of Metallic Surfaces in Aqueous Solutions, a New Method of Obtaining Electricity from Mechanical Force, and Certain Relations between Electrostatic Induction and the Decomposition of Water.

(Polaryzacja powierzchni metalowych w roztworach wodnych, nowa metoda uzyskiwania elektryczności z siły mechanicznej oraz pewne relacje między indukcją elektrostatyczną a rozkładem wody.)

[Proceedings of the Royal Society of London **19** (1870-1871) 243-246.]

Z doświadczeń, które przeprowadził **Eugen Goldstein (1850-1930)**, wynikało, że promienie katodowe emitowane są prostopadle do katody, że własności ich nie zależą od materiału katody, oraz że mogą wywoływać reakcje chemiczne.

E. Goldstein:

Über eine noch nicht untersuchte Strahlungsform an der Kathode inducirter Entladungen.

(O nie zbadanej jeszcze postaci promieniowania wyładowań indukowanych na katodzie.)

[Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (1886) 691-699.]

E. Goldstein:

Ueber eine noch nicht untersuchte Strahlungsform an der Kathode inducirter Entladungen.

(O nie zbadanej jeszcze postaci promieniowania wyładowań indukowanych na katodzie.)

[Annalen der Physik **300/64**, 1 (1898) 38-48.]

W 1879 **William Crookes (1832-1919)** odkrył, że promienie katodowe mogą przenosić energię oraz pęd. **Crookes** był zwolennikiem korpuskularnego charakteru promieni katodowych.

William Crookes:

On Radiant Matter.

(O promieniującej materii.)

[A lecture delivered before the British Association for the Advancement of Science, at Sheffield, Friday, August 22, 1879.]

[Popular Science Monthly Volume 16 (November 1879) 13-24.]

Na początku lat dziewięćdziesiątych XIX wieku istniały poważne kontrowersje co do natury promieni katodowych. W Anglii i Francji przeważał pogląd o korpuskularnym charakterze promieni katodowych. W Niemczech sądzono, że jest to nowa postać fal.

Dowody w jednakowym stopniu przemawiały za jednym i za drugim poglądem. Zwolennicy korpuskularnej natury promieni katodowych potrafili wytłumaczyć wszystkie powyżej omówione własności promieni katodowych. Zwolennicy falowej natury promieni katodowych, odchylenie ich w polu magnetycznym tłumaczyli tym, że pole magnetyczne może w taki sposób zdeformować eter, aby następowało odchylenie promieni katodowych bez zmiany kierunku zwyczajnych promieni świetlnych, a fakt, że są emitowane prostopadle do katody, tłumaczyli specyficznymi warunkami ich powstawania. Pozostałe własności promieni katodowych można było wytłumaczyć przy pomocy obu przeciwstawnych koncepcji. Fakt ten wymagał podania bardziej przekonujących dowodów przemawiających za słuszością jednej z tych koncepcji.

W 1892 **Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894)** odkrył, że promienie katodowe mogą przenikać przez cienkie warstwy metalu.

H. Hertz:

Über den Durchgang der Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten.

(O przejściu promieni katodowych przez cienkie warstwy metalu.)

[Annalen der Physik **280**, 10 (1892) 301-305.]

W 1893 uczeń Herta **Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947)** wypuścił promienie katodowe z rury do wyładowań na zewnątrz poprzez niewielki otwór przesłonięty cienką folią aluminiową. **Lenard** stwierdził, promienie przebyły w powietrzu drogę około jednego centymetra. Pomimo, że "okienko **Lenarda**" nie posiadało dziur, promienie katodowe przeszły przez nie, nie uszkadzając go i nie powodując pogorszenia próżni. Trudno to było wytłumaczyć, przyjmując korpuskularny charakter tych promieni, nie brano pod uwagę możliwości istnienia czegoś mniejszego niż atom.

P. Lenard:

Ueber Kathodenstrahlen in Gasen von atmosphärischem Druck und im äussersten Vacuum.

(O promieniach katodowych w gazach pod ciśnieniem atmosferycznym i w skrajnej próżni.)

[Annalen der Physik **287/51**, 2 (1894) 225-267.]

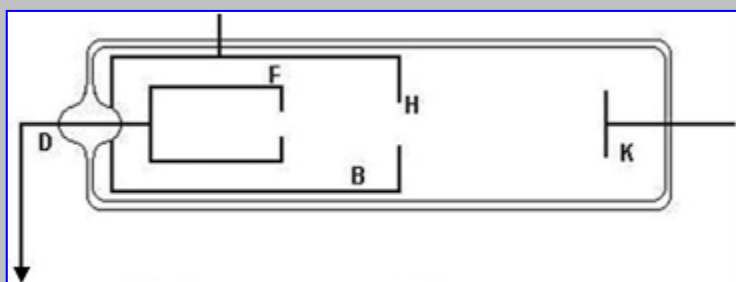
W 1895 francuski fizyk **Jean Baptiste Perrin (1870-1942)** wykazał doświadczalnie, że promienie katodowe przenoszą ujemny ładunek.

Jean Perrin:

Nouvelles propriétés des rayons cathodiques.

(Nowe właściwości promieni katodowych.)

[Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences **121**, 27 (1895) 1130-1134.]



Rys. 1. Urządzenie, przy pomocy którego Perrin wykazał, że promienie katodowe mają ładunek ujemny. [wg 7]

K – katoda; **B** – anoda umocowana na izolującym wsporniku **D**; **H** – otwór w anodzie; **F** – kolektor ładunku w wolnym od pola obszarze wewnątrz anody

Schemat jego urządzenia przedstawia rysunek 1. Promienie katodowe wpadają przez otwór **H** do anody **B**, część z nich trafiała do kolektora **F**. Perrin stwierdził, że kolektor ładuje się ujemnie. Gdy Perrin odchyłał promienie katodowe polem magnetycznym tak, aby nie trafiały do otworu **H**, kolektor pozostawał obojętny.

W 1894 angielski fizyk Joseph John Thomson (1870-1940) usiłował zmierzyć prędkość promieni katodowych. Z doświadczeń Thomsona wynikało, że promienie katodowe poruszają się z prędkością około 200000 metrów na sekundę.

J. J. Thomson:

On the velocity of the cathode-rays.

(O prędkości promieni katodowych.)

[The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (Series 5) **38**, 233 (1894) 358-365.]

Niedokładność swoich pomiarów wykazał sam Thomson, kiedy w 1897 zajmował się wyznaczaniem stosunku ładunku do masy dla promieni katodowych.

J. J. Thomson:

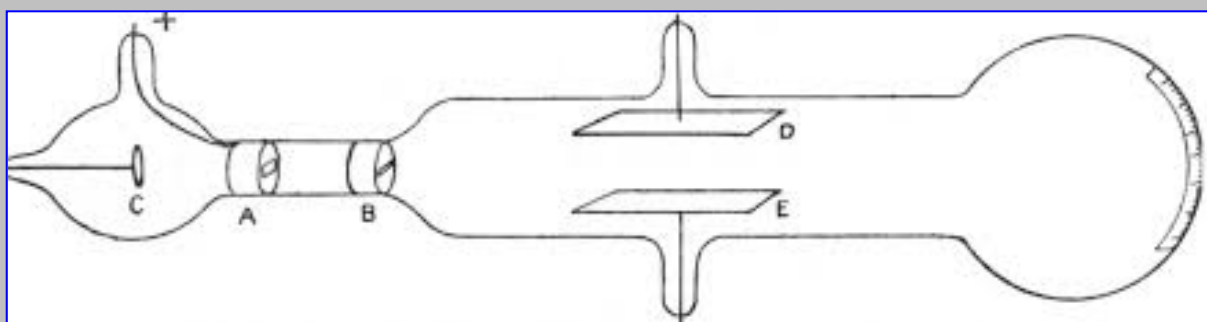
Cathode Rays.

(Promienie katodowe.)

[The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (Series 5) **44**, 269 (1897) 293-316.]

[Philosophical Magazine **44**, 1269 (1897) 293-316.]

Thomson dla wyznaczenia stosunku q/m przepuszczał wiązkę promieni katodowych jednocześnie przez pole magnetyczne i prostopadłe do niego pole elektryczne. Urządzenie stosowane w metodzie Thomsona przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Urządzenie, przy pomocy którego Thomson wyznaczył stosunek q/m dla promieni katodowych. [wg 7]

A – anoda,

B – metalowa szczelina,

C – katoda,

D, E – płytki odchylenia elektrycznego

Magnesu i jego biegunów N, S nie zaznaczono na rysunku.

Na ładunek elektryczny q , poruszający się w polu magnetycznym o indukcji \vec{B} działa siła Lorentza:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) .$$

Siła Lorentza nie wykonuje pracy, ponieważ jest prostopadła do wektora prędkości \vec{v} . Cząstka naładowana, w jednorodnym polu magnetycznym prostopadłym do jej prędkości pod wpływem działania siły Lorentza, porusza się po okręgu o promieniu r w płaszczyźnie prostopadłej do wektora \vec{B} . Siła Lorentza jest w tym przypadku siłą dośrodkową. Stąd mamy:

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{rB}$$

W miejscu padania na ekran fluoryzujący wiązka promieni katodowych powoduje świecenie. Przy włączonym polu magnetycznym promienie katodowe będą poruszać się po łuku okręgu i plamka świecąca przesunie się na przykład w dół ekranu. Z wielkości tego przesunięcia, znając geometrię urządzenia, można policzyć r . Można też wyznaczyć indukcję pola magnetycznego \vec{B} . Aby określić wartość prędkości v , Thomson zrównoważył działanie pola magnetycznego prostopadłym do niego polem elektrycznym. Wielkość pola elektrycznego dobiera się tak, aby wiązka promieni katodowych nie ulegała odchyleniu. Będzie to spełnione, gdy:

$$qE = qvB ,$$

gdzie

E – wartość natężenia pola elektrycznego,

qE – wartość siły elektrycznej,

qvB – wartość siły Lorentza.

Stąd mamy:

$$v = \frac{E}{B}$$

oraz

$$\frac{q}{m} = \frac{E}{rB^2} .$$

Średnia wartość stosunku q/m , otrzymana tą metodą przez Thomsona wynosiła

$$\frac{q}{m} = 0,77 \cdot 10^{-11} \frac{C}{kg} .$$

Thomson wykazał, że stosunek q/m dla promieni katodowych pozostaje stały niezależnie od rodzaju gazu i materiału katody. Stosunek q/m dla promieni katodowych był około 1000 razy większy niż stosunek, który na podstawie elektrolizy znalazł dla wodoru Faraday.

Po 1897, dzięki doświadczeniom **Perrina** i **Thomsona**, korpuskularny charakter promieni katodowych został powszechnie przyjęty, zaczęto nazywać je elektronami.

Rzeczywista rola elektronów mogła być zrozumiana i powszechnie uznana dopiero po połączeniu wyników badań prowadzonych w kilku innych kierunkach, głównie na polu analizy widmowej i promieniotwórczości.

W 1896 holenderski fizyk **Pieter Zeeman (1865-1943)** odkrył, że pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego zachodzi rozszczepienie linii widmowych.

P. Zeeman:

Over de invloed eener magnetisatie op den aard van het door een stof uitgezonden licht.

(O wpływie magnetyzmu na rodzaj światła emitowanego przez substancję.)

(On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance.)

[Verslagen van de Gewone Vergaderingen der Wis- en Natuurkundige Afdeeling (Koninklijk Akademie van Wetenschappen te Amsterdam) **5** (1896) 181-184 and 242-248.]

[Reports of the Ordinary Sessions of the Mathematical and Physical Section (Royal Academy of Sciences in Amsterdam) **5** (1896) 181-184 and 242-248.]

Teorię efektu Zeemana podał w 1897 **Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928)** w oparciu o swoją teorię elektronową.

H. A. Lorentz:

Ueber den Einfluss magnetischer Kräfte auf die Emission des Lichtes.

(O wpływie sił magnetycznych na emisję światła.)

[Annalen der Physik **299/63** (1897) 278-284.]

H. A. Lorentz:

Zur Theorie des Zeemaneffektes.

(O teorii efektu Zeemana.)

[Physikalische Zeitschrift **1** (1899) 39-41.]

Lorentz był twórcą teorii elektryczności, w której pojęcie ładunku elementarnego odgrywało dużą rolę. Używał on słowa elektron, które w 1894 wprowadził **George Johnstone Stoney (1826-1911)**. Przyjmując, że źródłem światła są naładowane cząstki znajdujące się wewnątrz atomów, mógł **Lorentz** na podstawie obserwacji **Zeemana** obliczyć stosunek q/m dla tych cząstek, który okazał się w przybliżeniu taki sam, jak stosunek q/m dla promieni katodowych. Z kierunku zewnętrznego pola magnetycznego i rodzaju polaryzacji światła wynikało, że cząstki emitujące światło z wnętrza atomów posiadają ujemny ładunek.

W 1887 **H. Hertz**, w doświadczeniu potwierdzającym istnienie fal elektromagnetycznych, odkrył zjawisko fotoelektryczne.

H. Hertz:

Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung.

(O wpływie światła ultrafioletowego na wyładowanie elektryczne.)

[Annalen der Physik **267**, 8 (1887) 983-1000.]

W 1900 **Antoine Henri Becquerel (1852-1908)** wyznaczył stosunek q/m dla ujemnie naładowanych cząstek, tzw. promieni beta, emitowanych przez niektóre substancje promieniotwórcze.

Henri Becquerel:

Sur la dispersion du rayonnement du radium dans un champ magnétique.

(O dyspersji promieniowania radu w polu magnetycznym.)
[Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences **130**, 7 (1900) 372-376.]

Henri Becquerel:

Déviation du rayonnement du radium dans un champ électrique.

(Odchylenie promieniowania radu w polu elektrycznym.)

[Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences **130**, 13 (1900) 809-815.]

We wszystkich tych przypadkach stosunek q/m był w przybliżeniu taki sam jak stosunek q/m dla promieni katodowych. Powyższe doświadczenia były dowodem na to, że elektrony stanowią powszechny składnik materii.

Pozostał problem wyznaczenia ładunku elektronu. Rząd wielkości tego ładunku był znany, można było określić go metodą zaproponowaną jeszcze przez [G. J. Stoneya](#) Wystarczyło podzielić stałą [Faradaya](#) przez stałą [Avogadro](#).

Bezpośrednie metody wyznaczania wielkości podstawowej jednostki ładunku elektrycznego opracowali [wg 7]: [John Sealy Edward Townsend \(1886-1957\)](#), [J. J. Thomson \(1897\)](#) oraz [Harold Albert Wilson \(1874-1964\)](#).

J. S. Townsend:

On the Electricity in Gases and the formation of Clouds in Charged Gases.

(O elektryczności w gazach i tworzeniu się chmur w naładowanych gazach.)

[Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Mathematical and physical sciences **9** (1897) 243-244; **9** (Feb. 8, 1897) 244-258.]

Harold A. Wilson:

A determination of the charge on the ions produced in air by Röntgen rays.

(Określenie ładunku jonów wytwarzanych w powietrzu przez promienie Röntgena.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **5**, 28 (1903) 429-441.]

Wszystkie te metody pozwalały zmierzyć tylko średni ładunek wielu elektronów. Rozwinięciem i udoskonaleniem tych metod była metoda, którą podał amerykański fizyk [Robert Andrews Millikan \(1868-1953\)](#).

R. A. Millikan:

A new modification of the cloud method of determining the elementary electrical charge and the most probable value of that charge.

(Nowa modyfikacja metody chmurowej wyznaczania elementarnego ładunku elektrycznego i jego najbardziej prawdopodobnej wartości).

[Philosophical Magazine (Series 6) **19**, 110 (1910) 209-228.]

Stosował on w swoim doświadczeniu kropelki oleju. Kropelki oleju wytwarzane przez rozpylacz wpadały przez niewielki otwór do obszaru między płytami ustawionego poziomo kondensatora płaskiego. Zmianę ładunku kropelek oleju osiągał [Millikan](#), naświetlając obszar między płytami kondensatora promieniami X, które jonizowały krople dodatnio, wytrącając z nich elektrony w zjawisku fotoelektrycznym. Badając ruch kropelek w polu elektrycznym, mógł on wyznaczyć ładunek elektryczny przenoszony przez kropelkę oleju. Z doświadczeń [Millikana](#) wynikało, że wszystkie ładunki występujące w przyrodzie są całkowitymi wielokrotnościami ładunku elementarnego.

§ 3. Model atomu Thomsona

J. J. Thomson uważał odkryty przez siebie elektron za uniwersalny składnik materii. Stworzył pierwszy model budowy atomu, tzw. model "ciasta z rodzynkami" (1898-1904). Według Thomsona atom składa się z pewnej liczby elektronów znajdujących się w kuli o równomiernie rozłożonym ładunku dodatnim. Dzięki wzajemnemu odpychaniu elektrony układają się w szereg koncentrycznych powłok.

Stopniową zmianę własności pierwiastków chemicznych, jaką obserwujemy, przechodząc kolejno wzdłuż poziomych szeregów układu okresowego pierwiastków, tłumaczył Thomson własnościami ugrupowań elektronów w atomie. Za pomocą tego modelu można było wytłumaczyć w sposób jakościowy emisję światła przez atomy. W atomie znajdującym się w swoim najniższym stanie energetycznym, elektrony znajdują się w swoich ustalonych położeniach równowagi. W atomach wzbudzonych elektrony wykonywałyby drgania dookoła swych położeniach równowagi. Obliczone widmo promieniowania, które byłoby w ten sposób emitowane, nie prowadziło jednak do ilościowej zgodności z doświadczalnie obserwowanymi widmami.

Podanie modelu atomu przez Thomsona zbiegło się w czasie (jak później zobaczymy) z teorią rozpadu promieniotwórczego. Pomimo swoich wad model Thomsona odegrał istotną rolę w badaniach nad strukturą materii. Pojęcie atomu jako niepodzielnej cząstki zostało mocno podważone.

§ 4. Odkrycie promieniotwórczości

W 1895 Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), przeprowadzając badania nad promieniami katodowymi, odkrył promienie X.

W. C. Röntgen:

Ueber eine neue Art von Strahlen. (Vorläufige Mittheilung.)

(O nowym rodzaju promieni. (Wstępne doniesienie.))

[Sitzungsberichte der Physikalische-medizinischen Gesellschaft zu Würzburg 9 (28 December 1895) 132-41.]

W 1896 Antoine Henri Becquerel zajął się badaniem powiązania między fluorescencją a wytwarzaniem promieni X. Postawiona hipoteza okazała się niesłuszna, ale dzięki podwójnemu przypadkowi Becquerel odkrył zjawisko promieniotwórczości.

Henri Becquerel:

Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents.

(O niewidzialnych promieniowaniu emitowanym przez ciała fosforyzujące.)

[Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, Paris 122, 9 (1896) 501-503.]

Henri Becquerel:

Émission des radiations nouvelles par l'uranium métallique.

(Emisja nowego promieniowania przez metaliczny uran.)

[Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, Paris 122, 9 (1896) 501-503.]

"Wszystkie sole uranowe, fosforyzujące pod wpływem światła lub też nie fosforyzujące, krystaliczne czy też stopione lub rozpuszczone, wykazują aktywność porównywalną: doprowadziło mnie to do wniosku, że efekt przypisać należy obecności

uranu w tych solach i że sam metal powinien być bardziej aktywny niż jego związki."
[wg 8]

W 1898 **Maria Skłodowska-Curie (1867-1934)**, niezależnie od **Gerharda Carla Schmidta (1865-1949)**, odkryła radioaktywność toru.

Skłodowska Curie:

Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium.

(Promienie emitowane przez związki uranu i toru.)

(Seance du mardi **12 Avril** 1898.)

[Comptes rendus de l'Académie des Sciences **126**, 15 (1898) 1101-1103.]

G. C. Schmidt:

Über die von den Thorverbindungen und einigen anderen Substanzen ausgehende Strahlung.

(O promieniowaniu emitowanym przez związki toru i niektóre inne substancje.)

(Eingegangen **24. März** 1898.)

[Annalen der Physik und Chemie **301/65**, 5 (1898) 141-151.]

W tym samym roku 1898 **Maria Skłodowska-Curie** i **Pierre Curie (1859-1906)** odkryli wspólnie nowy pierwiastek promieniotwórczy, który nazwali polonem.

P. Curie et S. Curie:

Sur une substance nouvelle radioactive, contenue dans la pechblendie.

(O nowej substancji radioaktywnej zawartej w pechblendzie.)

[Comptes rendus de l'Académie des Sciences **127**, 3 (1898) 175-178.]

Termin radioaktywność, wprowadzony przez małżonków Curie, przyjął się powszechnie. (W języku polskim używa się zamiennie także terminu promieniotwórczość.)

W grudniu 1898 małżonkowie **Curie** i **Gustave Bémont (1857-1937)** opublikowali doniesienie o odkryciu radu.

P. Curie, M^{me} P. Curie et G. Bémont:

Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblendie.

(O nowej substancji radioaktywnej zawartej w pechblendzie.)

[Comptes rendus de l'Académie des Sciences **127**, 26 (1898) 1215-1217.]

A oto co na temat wytłumaczenia zjawiska promieniotwórczości pisała **Maria Skłodowska-Curie** w swojej pierwszej publikacji o promieniotwórczości [Comptes rendus de l'Académie des Sciences **126**, 15 (1898) 1101-1103].

"Dla interpretacji spontanicznego promieniowania uranu i toru można sobie wyobrazić, że cała przestrzeń jest wciąż przeszywana przez promienie analogiczne do promieni Röntgena, lecz daleko bardziej od nich przenikliwe i absorbowane wyłącznie przez niektóre pierwiastki o dużym ciężarze atomowym, takie jak uran i tor." [wg 8]

§ 5. Natura cząstek alfa

W 1899 **Ernest Rutherford (1871-1937)** przeprowadzał badania nad zmniejszaniem się zdolności jonizacyjnych promieniowania emitowanego przez substancje promieniotwórcze wskutek przejścia przez cienkie blaszki aluminiowe. Według uzyskanych wyników podzielił

promieniowanie radioaktywne, według jego absorpcji, na dwie składowe. Promienie o krótkim zasięgu nazwał promieniami alfa, promienie o dużym zasięgu – promieniami beta.

E. Rutherford:

Uranium radiation and the electrical conduction produced by it.

(Promieniowanie uranu i wytwarzane przez nie przewodnictwo elektryczne.)

[Philosophical Magazine (Series 5) **47**, 284 (1899) 109-163.]

W 1900 **Paul Ulrich Villard (1860-1934)** stwierdził istnienie trzeciego typu promieni emitowanych przez substancje radioaktywne. Nazwano je promieniami gamma.

P. Villard:

Sur le rayonnement du radium.

(O promieniowaniu radu.)

[Comptes rendus de l'Académie des sciences **130**, 18 (30 Avril 1900) 1178-1179.]

Nazwę (promienie) promieniowanie gamma zaproponował **E. Rutherford** na 177 stronie pracy:

E. Rutherford:

The magnetic and electric deviation of the easily absorbed rays from radium.

(Magnetyczne i elektryczne odchylenie łatwo absorbowanych promieni z radu.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **5**, 26 (1903) 177-187.]

Stosunek q/m dla promieni beta wyznaczył w 1900 **H. Becquerel**, był on w przybliżeniu taki sam jak stosunek q/m dla elektronów.

Henri Becquerel:

Sur la dispersion du rayonnement du radium dans un champ magnétique.

(O dyspersji promieniowania radu w polu magnetycznym.)

[Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences **130**, 7 (1900) 372-376.]

Henri Becquerel:

Déviations du rayonnement du radium dans un champ électrique.

(Odchylenie promieniowania radu w polu elektrycznym.)

[Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences **130**, 13 (1900) 809-815.]

W 1903 **E. Rutherfordowi** udało się odchylić promienie alfa w bardzo silnym polu magnetycznym.

E. Rutherford:

Die magnetische und elektrische Ablenkung der leicht absorbierbaren Radiumstrahlen.

(Magnetyczne i elektryczne ugięcie łatwo absorbowanych promieni radowych.)

[Physikalische Zeitschrift **4**, 8 (1903) 235-240.]

E. Rutherford:

The magnetic and electric deviation of the easily absorbed rays from radium.

(Magnetyczne i elektryczne odchylenie łatwo absorbowanych promieni z radu.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **5**, 26 (1903) 177-187.]

E. Rutherford:

Some remarks on radioactivity.

(Kilka uwag o promieniotwórczości.)

[To the editors of the Philosophical Magazine]

[Philosophical Magazine (Series 6) **5**, 28 (1903) 481-485.]

Pierwsze pomiary stosunku q/m dla cząstek alfa wykonał w 1903 Rutherford i niezależnie Theodor des Coudres (1862-1926).

Rutherford twierdził, że cząstki alfa są przypuszczalnie dwukrotnie zjonizowanymi atomami helu. Częściowe potwierdzenie tego poglądu uzyskał Rutherford i Johannes (Hans) Wilhelm Geiger (1882-1945), wyznaczając za pomocą elektrometru sumaryczny ładunek cząstek alfa wysyłanych przez dane źródło promieniowania. Po obliczeniu liczby cząstek można było wyznaczyć ładunek związany z jedną cząstką. Uzyskano około $9,6 \cdot 10^{-11}$ JES. Ponieważ jest to wartość dwukrotnie większa od ładunku elementarnego, cząstka alfa musi posiadać dwa ładunki elementarne. Z drugiej strony stosunek q/m dla cząstek alfa jest dwa razy mniejszy od stosunku q/m dla wodoru, wynika stąd, że masa cząstki alfa musi być cztery razy większa od masy atomu wodoru. Jedyną cząstką o takiej masie jest jon He^{++} .

Ernest Rutherford and H. Geiger:

The charge and nature of the α -particle.

(Ładunek i natura cząstki α .)

[Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences

81, 546 (1908) 162-173.]

W 1909 Rutherford i Thomas Royds (1884-1955) wykazali doświadczalnie, że cząstki alfa są dwukrotnie zjonizowanymi atomami helu.

E. Rutherford & T. Royds:

The nature of the α particle from radioactive substances.

(Charakter cząstki α pochodzącej z substancji radioaktywnych.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **17**, 98 (1909) 281-286.]

Umieścili oni substancję promieniotwórczą, emitującą cząstki alfa, w cienkościennej szklanej rurce, którą umieszczono w rurze do wyładowań. Cząstki alfa przenikały przez ścianki rurki i gromadziły się w rurze do wyładowań. Po upływie szeregu dni, wytwarzając wyładowanie, uzyskali wyraźne widmo helu. [wg 8]

§ 6. Teoria rozpadu promieniotwórczego

Zajmiemy się teraz poglądami dotyczącymi wytłumaczenia zjawiska promieniotwórczości. Wprawdzie Maria Skłodowska-Curie skłaniała się ku przypuszczeniu o możliwości rozpadu pierwiastków promieniotwórczych, ale odnosiła się do tej teorii z dużą powściągliwością.

Opracowanie teorii rozpadu pierwiastków promieniotwórczych podali E. Rutherford i Frederick Soddy (1877-1956). [wg 9]

E. Rutherford & F. Soddy:

The cause and nature of radioactivity. – Part I.

(Przyczyna i natura promieniotwórczości. – Część I.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **4**, 21 (1902) 370-396.]

E. Rutherford & F. Soddy:

The cause and nature of radioactivity. – Part II.

(Przyczyna i natura promieniotwórczości. – Część II.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **4**, 23 (1902) 569-585.]

E. Rutherford & F. Soddy:

Condensation of the radioactive emanations.

(Kondensacja emanacji promieniotwórczych.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **5**, 29 (1903) 561-576.]

E. Rutherford & F. Soddy:

Radioactive Change.

(Zmiany radioaktywne.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **5**, 29 (1903) 576-591.]

Według ich teorii, po rozpadzie atomu i wyrzuceniu cząstki naładowanej, powstaje nowy układ, lżejszy i posiadający zupełnie odmienne właściwości fizyczne i chemiczne od pierwiastka z którego się wytworzył. Ponieważ promieniotwórczość jest zjawiskiem atomowym, w którym powstają nowe rodzaje materii, przemiany muszą odbywać się wewnątrz atomów.

Uzyskane dotychczas wyniki wskazywały, że szybkość przemian nie zależy od czynników zewnętrznych, a zatem przemiany te mają charakter zupełnie odmienny od wszelkich przemian z jakimi dotąd spotykano się w chemii. Rutherford i Soddy uważali promieniotwórczość za objaw przemiany subatomowej.

Zwrócili oni uwagę na to, że we wszystkich zbadanych przypadkach aktywność preparatu malała w postępie geometrycznym. Podali ilościowe ujęcie tego prawa:

$$N_t = N_0 \exp(-\lambda t)$$

gdzie

N_0 – liczba atomów promieniotwórczych w chwili początkowej,

N_t – liczba atomów promieniotwórczych po czasie t ,

λ – stała radioaktywna (obecnie nazywana stałą rozpadu).

Wielu fizyków i chemików ustosunkowało się negatywnie do tej teorii, kolidowała ona bowiem z ustalonymi poglądami o miezniszczalności i niezmienności atomów.

§ 7. Odkrycie jądra atomowego

Cząstki alfa okazały się doskonałym narzędziem do badania struktury materii. W 1906 E. Rutherford zauważył, że cząstki alfa po przejściu przez cienką folię dają na płycie fotograficznej, zamiast przewidywanego śladu o wyraźnych krawędziach, ślad nieostry i rozmyty.

Szczegółowe badania nad rozpraszaniem cząstek alfa przeprowadzili H. Geiger i Ernest Marsden (1889-1970) w 1909. [wg 10]

H. Geiger and E. Marsden:

On a Diffuse Reflection of the α -Particles.

(O rozproszonym odbiciu cząstek α).

[Proceedings of the Royal Society, Series A, **82** (1909) 495-500.]

Źródłem cząstek alfa w ich doświadczeniu był rad. Materiałami, na których cząstki alfa ulegały rozpraszaniu były cienkie warstwy takich metali jak Pb, Au, Ag, Sn, Cu, Fe, Al. Ostrzeliwując cząstkami alfa np. folię złota o grubości około 0,00004 cm stwierdzili, że około jedna na 8000 cząstek ulegała odchyleniu pod kątem większym niż 90° od kierunku cząstek padających.

Według modelu atomu [Thomsona](#) tłumaczono rozpraszanie wiązki promieni alfa, przechodzącej przez cienką warstwę danego materiału, wynikiem nakładania się małych rozprożeń pochodzących od atomów penetrowanego materiału. Przyjęta struktura atomu [Thomsona](#) nie pozwalała na duże odchylenie cząstki alfa przez pojedynczy atom. Rozkład cząstek alfa, odchylonych pod różnymi kątami, dla dużych odchyień, nie zgadzał się z rozkładem oczekiwanym przy założeniu, że duże odchylenia są wynikiem dodawania się bardzo wielu małych odchyień.

W pracy wydanej w 1911 [Rutherford](#) założył, że całkowity ładunek dodatni atomu i cała jego masa, pomijając masę elektronów, skupiona jest w małym obszarze w środku atomu. [wg 10]

E. Rutherford:

[The Scattering of \$\alpha\$ and \$\beta\$ Particles by Matter and the Structure of the Atom.](#)

(Rozpraszanie cząstek alfa i beta przez materię i struktura atomu.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **21**, 125 (1911) 669-688.]

Tę dodatnio naładowaną, centralną część atomu skupiającą całą masę, nazwał później [Rutherford](#) jądrem.

Co dawało takie założeni? Wiadomo, że pole elektryczne pochodzące od ładunku elektrycznego rozłożonego równomiernie w kuli, działa na zewnątrz tak, jak gdyby cały ładunek znajdował się w środku geometrycznym kuli. Zaś pole wewnątrz kuli jest wprost proporcjonalne do odległości od środka kuli. Na powierzchni kuli pole jest największe. Im mniejszy jest obszar zajmowany przez ładunek, tym silniejsze jest wytworzone przez nie pole. Innymi słowy [Rutherford](#) założył, że w środku atomu istnieje silne pole elektryczne i dlatego właśnie cząstki alfa mogą ulegać tak dużym odchyleniom przy pojedynczym zderzeniu.

Rozważmy atom o ładunku $+Ne$ zawartym w jego środku, otoczonym ładunkiem $-Ne$ rozłożonym z założenia równomiernie w kuli o promieniu R . R jest rzędu promienia atomu, czyli rzędu 10^{-8} cm, e jest ładunkiem elementarnym.

Założmy, że cząstka alfa o masie m , prędkości \vec{v} oraz ładunku $2e$ porusza się akurat w kierunku jądra (zderzenie centralne). Zostanie ona całkowicie zahamowana w odległości b od środka określonej wzorem:

$$\frac{1}{2}mv^2 = k \cdot \frac{2Ne^2}{b}, \quad k = 8,9875 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2} = 8,9875 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{C}^{-2}$$

poczym będzie się poruszać w kierunku przeciwnym, czyli zostanie odchylona o 180° od kierunku pierwotnego.

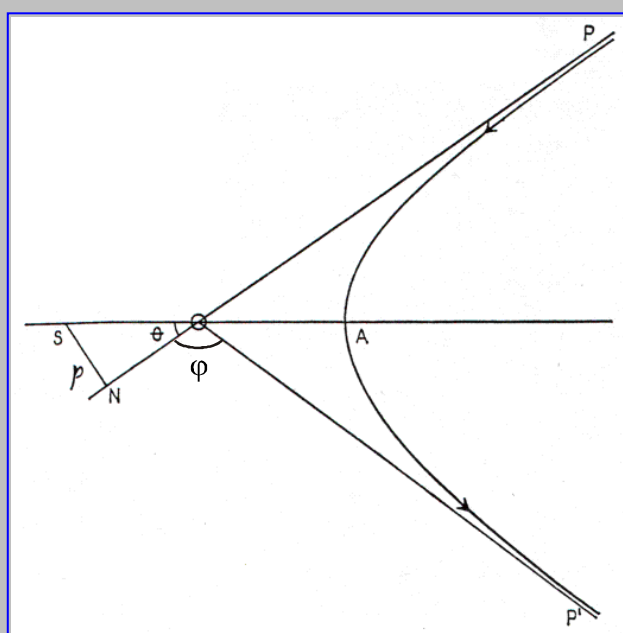
Wielkość

$$b = k \cdot \frac{4Ne^2}{mv^2}$$

określa więc najmniejszą możliwą odległość na jaką może się zbliżyć cząstka alfa o określonej energii do jądra.

Promień jądra jest oczywiście mniejszy niż b . Wstępne oszacowania dały, że promień jądra jest rzędu $10^{-12} \text{ cm} \div 10^{-13} \text{ cm}$.

Rozważmy teraz przejście cząstki alfa w pobliżu nieruchomego jądra. Jeżeli przyjmiemy, że prędkość cząstki alfa nie zmienia się znacznie podczas przechodzenia przez atom, to torem cząstki, na którą działa siła odpychająca odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości, będzie hiperbola o ognisku zewnętrznym w środku atomu.



Rys. 3. Tor cząstki alfa przy niecentralnym zderzeniu z jądrem. [wg 10]

S – jądro,

A – wierzchołek hiperboli,

$p = SN$,

p – parametr zderzenia, najmniejsza odległość od jądra w jakiej przeszłaby cząstka alfa gdyby nie ulegała odchyleniu przez jądro,

PO – początkowy kierunek ruchu cząstki alfa,

OP' – kierunek ruchu cząstki alfa po wyjściu z atomu,

SA – najmniejsza odległość na jaką cząstka alfa może zbliżyć się do jądra,

$\varphi = (\pi - 2\Phi)$,

φ – kąt odchylenia cząstki alfa

Z rysunku wynika, że:

$$(SA) = p \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\Phi}{2} \right).$$

(1)

Niech \vec{V} będzie prędkością cząstki alfa przy wkraczaniu w obszar atomu, a \vec{v} – jej prędkością w punkcie A, wtedy z zasady zachowania momentu pędu mamy:

$$pV = (SA)v. \quad (2)$$

Z prawa zachowania energii otrzymujemy:

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + k \cdot \frac{2Ne^2}{(SA)},$$

stąd

$$v^2 = V^2 \left[1 - k \cdot \frac{4Ne^2}{m(SA)V^2} \right] = V^2 \left[1 - \frac{b}{(SA)} \right]. \quad (3)$$

Z układu równań (2) i (3), uwzględniając (1), dostajemy:

$$p^2 = (SA)^2 - (SA)b = p^2 \cdot \text{ctg}^2\left(\frac{\Theta}{2}\right) - pb \cdot \text{ctg}\left(\frac{\Theta}{2}\right).$$

Stąd mamy:

$$p = \frac{1}{2} b \cdot \text{tg}(\Theta).$$

Kąt odchylenia φ cząstki alfa równy jest $(\pi - 2\Theta)$, dlatego otrzymujemy:

$$p = \frac{1}{2} b \cdot \text{ctg}\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (4)$$

Policzymy teraz prawdopodobieństwo pojedynczego odchylenia pod dowolnym kątem.

Przypuśćmy, że wiązka cząstek alfa pada prostopadle na cienki ekran z pewnego materiału o grubości t . Prawdopodobieństwo wniknięcia cząstki alfa do wnętrza atomu na odległość p od środka atomu jest dane wzorem:

$$m = \pi p^2 n t,$$

gdzie

n – liczba atomów w jednostce objętości materiału rozpraszającego.

Prawdopodobieństwo dm trafienia w granicach między p i $p + dp$ wynosi:

$$dm = 2\pi p n t dp,$$

uwzględniając (4) otrzymujemy:

$$dm = \frac{1}{4} \pi b^2 n t \cdot \text{ctg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \text{cosec}^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) d\varphi. \quad (5)$$

Wartość dm daje ułamek ogólnej liczby cząstek, które zostają odchyłone o kąt zawarty między φ a $\varphi + d\varphi$.

W przypadku cząstek alfa liczy się liczby scyntylacji pojawiających się na stałej powierzchni ekranu z siarczku cynku, dla różnych kątów w stosunku do kierunku wiązki padającej.

W celu porównania z wynikami doświadczeń, wygodniej jest przedstawić równanie (5) w innej postaci.

$$dm' = \frac{Q \, dm}{2\pi r^2 \sin \varphi \, d\varphi} = \frac{Q b^2 n t \cdot \operatorname{cosec}^4\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{16r^2}, \quad (6)$$

gdzie

dm' – liczba cząstek alfa padających na jednostkę powierzchni, które ulegają odchyleniu pod kątem zawartym między φ a $\varphi + d\varphi$,

n – liczba atomów w jednostce objętości materiału rozpraszającego,

r – odległość ekranu od folii,

Q – całkowita liczba cząstek alfa padających na folię,

$$b = k \cdot \frac{4Ne^2}{mV^2}.$$

Widzimy z tego równania, że liczba scyntytacji cząstek alfa obserwowanych na jednostce powierzchni ekranu, przy danej odległości ekranu od folii, jest proporcjonalna do:

1. $\operatorname{cosec}^4\left(\frac{\varphi}{2}\right)$ lub $\frac{1}{\varphi^4}$, gdy φ jest małe,
2. grubości materiału rozpraszającego t , pod warunkiem, że jest ona niewielka,
3. wielkości ładunku w środku atomu Ne,
4. jest odwrotnie proporcjonalna do $(mV^2)^2$ lub do czwartej potęgi prędkości, gdy m jest stałe.

Badania przeprowadzone przez **Geigera**, które dotyczyły rozkładu kąтового cząstek alfa rozpraszanych przez cienką złotą folię o kąty od 30° do 150° , potwierdziły teorię

Rutherforda pojedynczego rozpraszania.

H. Geiger:

On the Scattering of the α -Particles by Matter.

(O rozpraszaniu cząstek α przez materię.)

[Proceedings of the Royal Society (Series A) **81**, 546 (Aug. 27, 1908) 174-177.]

Hans Geiger:

The scattering of α -particles by matter.

(Rozpraszanie cząstek α przez materię.)

[Proceedings of the Royal Society (Series A) **83**, 565 (14 April 1910) 492-504.]

§ 8. Ładunek jądra atomowego

W 1911 **Charles Glover Barkla (1877-1944)**, w wyniku doświadczeń nad rozpraszaniem promieni X, doszedł do wniosku, że liczba elektronów w atomie, a tym samym wielkość ładunku jądra, jest w przybliżeniu równa połowie jego masy atomowej.

Charles G. Barkla:

The spectra of the fluorescent Röntgen radiations.

(Widma fluorescencyjnego promieniowania Röntgena.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **22**, 129 (1911) 396-412.]

W 1913 holenderski fizyk **Antonius Johannes van den Broek (1870-1926)**, wysunął hipotezę, że liczba ładunków dodatnich w jądrze każdego atomu równa jest jego liczbie porządkowej.

A. van den Broek:

Die Radioelemente, das periodische System und die Konstitution der Atome.

(Pierwiastki promieniotwórcze, układ okresowy i budowa atomu.)

[Physikalische Zeitschrift **14** (Jan. 1913) 32-41.]

Następny doniosły krok naprzód, w związku z wyznaczaniem ładunku jądra, uczynił **Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915)**.

H. G. J. Moseley:

The high-frequency spectra of the elements.

(Widma wysokoczęstotliwościowe pierwiastków.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **26**, 156 (1913) 1024-1034.]

H. G. J. Moseley:

The high-frequency spectra of the elements. Part II.

(Widma wysokoczęstotliwościowe pierwiastków. Część druga.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **27**, 160 (1914) 703-713.]

Badał on charakterystyczne widma rentgenowskie szeregu pierwiastków. Do wyznaczania długości fali widma charakterystycznego wykorzystał fakt, że kryształ może zachowywać się jak siatka dyfrakcyjna w stosunku do promieni X. **Moseley** stwierdził, że pierwiastek kwadratowy z częstości drgań w każdej serii widma charakterystycznego jest proporcjonalny do numeru porządkowego danego pierwiastka w układzie okresowym:

$$\sqrt{\nu} = a(Z-b),$$

gdzie

a, b – stałe zależne od rozpatrywanej linii rentgenowskiej, a nie pierwiastka.

Moseley doszedł do wniosku, że liczba ładunków w jądrze jest równa kolejnemu numerowi miejsca zajmowanego przez dany pierwiastek w układzie okresowym. Liczbę Z **Moseley** nazwał liczbą atomową, wynosi ona dla wodoru 1, dla helu 2, ...

Powiązanie liczby ładunków w jądrze z liczbą porządkową wskazywało, że wielkość ładunku jądra, a co za tym idzie – liczba elektronów w atomie, odgrywa istotną rolę.

Okazało się bowiem, że o własnościach pierwiastków chemicznych decyduje nie masa atomowa, lecz liczba ładunków w jądrze. Ładunek jądra stanowi podstawę uszeregowania pierwiastków w układzie okresowym.

§ 9. Odkrycie izotopów pierwiastków promieniotwórczych

W 1908 **Bertram Borden Boltwood (1870-1927)** odkrył nowy pierwiastek promieniotwórczy, który nazwał jonem (ionium). Stwierdził on, że nie można rozdzielić na drodze chemicznej mieszaniny analogicznych związków jonu i toru.

Bertram B. Boltwood:

Ionium, a new radio-active element.

(Ionium, nowy pierwiastek radioaktywny.)

[American Journal of Science (Series 4) **25**, 149 (May 1908) 365-381.]

W 1912 **Henry Norris Russell (1877-1957)** i **R. Rossi** stwierdzili, że widmo jonu i toru są identyczne.

A. S. Russell and R. Rossi:

An investigation of the spectrum of Ionium.

(Badanie widma jonu.)

[Proceedings of the Royal Society A **87**, 598 (1912) 478-484.]

A. S. Russell and R. Rossi:

An investigation of the spectrum of ionium.

(Badanie widma jonu.)

Nature **90**, 2249 (1912) 400-403.

Pierwiastki promieniotwórcze ulegając rozpadowi tworzą tzw. rodziny promieniotwórcze (szeregi promieniotwórcze). Znano trzy rodziny promieniotwórcze: uranowo-radową, torową i aktywno-uranową. Końcowe produkty rozpadu powyższych rodzin RaG, ThD i AcD okazały się ostatecznie identyczne z ołowiem, pomimo swych różnych mas atomowych.

W 1913 **Frederick Soddy (1877-1956)**, który pierwszy dostrzegł istnienie odmian pierwiastków chemicznych wśród produktów rozpadu promieniotwórczego, zaproponował aby pierwiastki posiadające te same własności chemiczne, czyli zajmujące to samo miejsce w układzie okresowym, nazwać izotopami.

Frederic Soddy:

Intra-atomic Charge.

(Ładunek wewnątrz-atomowy.)

[Nature **92** (1913) 399-400]

Istnienie izotopowych odmian pierwiastków stanowiło potwierdzenie faktu, że ładunek jądra atomowego jest równy liczbie porządkowej. Bowiem o własnościach chemicznych atomu rozstrzyga ładunek jądra, a nie jego masa.

§ 10. Odkrycie izotopów zwykłych pierwiastków

W 1886 **Eugen Goldstein (1850-1930)** odkrył promienie kanalikowe. [wg 11]

E. Goldstein:

Über eine noch nicht untersuchte Strahlungsform an der Kathode inducirter Entladungen.

(O nie zbadanej jeszcze postaci promieniowania wyładowań indukowanych na katodzie.)

[Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (1886) 691-699.]

W 1897 **Wilhelm Wien (1864-1928)** stwierdził, że promienie kanalikowe są dodatnio naładowane oraz wyznaczył dla nich stosunek q/m . Rząd wielkości q/m dla promieni kanalikowych był zgodny z wielkością q/m dla jonów elektrolitycznych, jaką otrzymuje się na podstawie praw **Faradaya**. [wg 11]

Willy Wien:

Die electrostatischen Eigenschaften der Kathodenstrahlen.

(Właściwości elektrostatyczne promieni katodowych.)

[Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zu Berlin **16** (1897) 165-172.]

W 1913 **Joseph John Thomson (J.J. Thomson) (1870-1940)** podał metodę pomiaru stosunku q/m w przypadku, gdy w wiązce promieni kanalikowych znajduje się więcej niż jeden rodzaj jonów. [wg 11]

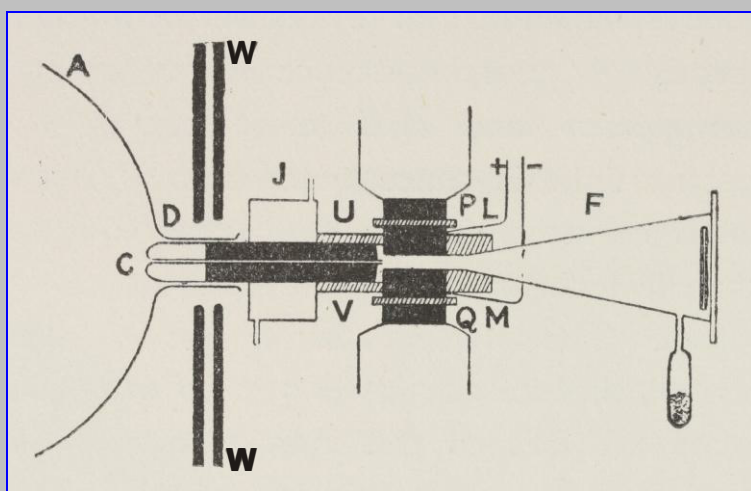
J. J. Thomson:

Rays of positive electricity.

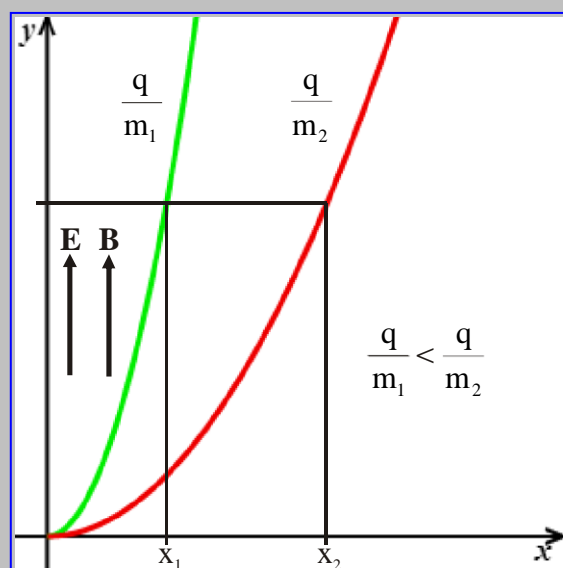
(Promienie dodatniej elektryczności.)

[Proceedings of the Royal Society A **89**, 607 (01 August 1913) 1-20.]

Metoda **Thomsona**, zwana metodą parabol, polegała na zastosowaniu równoległych pól elektrycznego i magnetycznego. Schemat urządzenia stosowanego w tej metodzie przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Urządzenie **Thomsona** do pomiaru stosunku q/m dla promieni kanalikowych. [wg 11] (**A** – zbiornik gazu, **C** – katoda, **D** – anoda, **W** – ekran z miękkiego żelaza, **J** – chłodzenie wodne, **U, V** – izolacja mikowa (ebonitowa), **P, Q** – bieguny elektromagnesu, **L, M** – nabiegunniki z miękkiego żelaza służące jednocześnie jako okładki kondensatora, **F** – komora odpompowana do niskiego ciśnienia)



Rys. 5. Dwie parabole odpowiadające dwóm różnym stosunkom q/m .

Niech płaszczyzna XY na rysunku 5 przedstawia płaszczyznę ekranu. Załóżmy, że cząstka o ładunku q leci z prędkością \vec{v} prostopadle do płaszczyzny rysunku i pada w punkcie 0 (środek ekranu).

Pod wpływem działania pola elektrycznego cząstka odchyli się o

$$y = k_1 \left(\frac{q}{m} \right) \frac{1}{v^2}, \quad (1)$$

a pod wpływem działania pola magnetycznego odchyli się o

$$x = k_2 \left(\frac{q}{m} \right) \frac{1}{v}, \quad (2)$$

gdzie k_1 i k_2 zależą od geometrii urządzenia.

Z (1) i (2) otrzymujemy:

$$y = \frac{k_1}{k_2^2} \left(\frac{m}{q} \right) x^2. \quad (3)$$

Jest to równanie paraboli.

Dla $q/m = \text{const}$ mamy $y = \text{const } x^2$, dla cząstek o tym samym stosunku q/m ale o różnych prędkościach, otrzymujemy szereg punktów tworzących parabolę. Dla cząstek o innym stosunku q/m otrzymamy inną parabolę. Dla dwóch różnych parabol odpowiadających dwóm różnym stosunkom q/m_1 i q/m_2 (wartość ładunku w obu przypadkach jest taka sama) otrzymujemy na podstawie (3)

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{m_2}{m_1}. \quad (4)$$

W ten sposób można porównywać masy. Stosując jako wzorzec parabolę odnosząca się do substancji o znanej masie, można w oparciu o (4) obliczyć masę danego jonu.

Thomson, badając neon, stwierdził, że parabolę odpowiadającą masie neonu ^{20}Ne , występuje parabola odpowiadająca masie atomowej 22. **Thomson** przypuszczał początkowo, że ma do czynienia ze związkiem neonu NeH_2 lub nieznanym pierwiastkiem nie wyszczególnionym w układzie **Mendelejewa**.

Uczeń Thomsona **Aston** wykazał, że widma neonu i nowego gazu o masie atomowej 22 są identyczne. Gaz ten stanowi izotop neonu.

Odkrycie izotopu neonu dowiodło, że istnienie izotopów nie jest wyłącznie cechą pierwiastków promieniotwórczych, jak poprzednio przypuszczano.

W 1919 **Francis William Aston (1877-1945)** skonstruował urządzenie zwane spektrografem masowym. [wg 11]

F. W. Aston:

A positive ray spectrograph.

(Spektrograf dodatnich promieni.)

[The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science

(Series 6) **38**, 228 (1919) 707-714.]

W urządzeniu tym prostopadłe pola elektryczne umożliwiały zogniskowanie jonów o tym samym stosunku q/m wzdłuż krótkich odcinków będących obrazami szczeliny wejściowej. **Aston** podobnie jak **Thomson** do detekcji jonów używał klisz fotograficznych, na których uzyskiwał zaczerwienienia w postaci krótkich odcinków. Każdemu odcinkowi na kliszy odpowiadał określony stosunek q/m . jonów nawet wtedy, gdy prędkości jonów były różne i zawarte w pewnym niezbyt szerokim przedziale.

Aston zbadał w swym spektrografie masowym szereg pierwiastków i stwierdził, że wiele z nich składa się z dwóch lub więcej izotopów o wartościach mas zbliżonych do liczb całkowitych. Wyniki te doprowadziły **Astona** do sformułowania prawa liczb całkowitych.

Według tego prawa wszystkie masy atomowe izotopów są bardzo bliskie liczb całkowitych, a ułamkowe masy atomowe pierwiastków wyznaczone na drodze chemicznej wynikają z obecności dwóch lub więcej izotopów, z których każdy ma masę atomową wyrażającą się w przybliżeniu liczbą całkowitą. [wg 11]

§ 11. Pierwsza sztuczna przemiana jądra atomowego

W 1919 **E. Rutherford** dokonał po raz pierwszy rozbicia jądra pierwiastka niepromieniotwórczego, bombardując azot cząstkami alfa.

E. Rutherford:

Collision of α particles with light atoms I. Hydrogen.

(Zderzenie cząstek α z lekkimi atomami I. Wodór.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **37**, 222 (1919) 537-561.]

E. Rutherford:

Collision of α particles with light atoms II. Velocity of the hydrogen atom.

(Zderzenie cząstek α z lekkimi atomami II. Prędkość atomu wodoru.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **37**, 222 (1919) 562-571.]

E. Rutherford:

Collision of α particles with light atoms III. Nitrogen and oxygen atoms.

(Zderzenie cząstek α z lekkimi atomami III. Atomy azotu i tlenu.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **37**, 222 (1919) 571-580.]

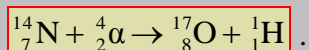
E. Rutherford:

Collision of α particles with light atoms. IV. An anomalous effect in nitrogen.

(Zderzenie cząstek α z lekkimi atomami. IV. Anomalny efekt w azocie.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **37**, 222 (1919) 581-587.]

Cząstki alfa wybijały protony z jąder azotu. Reakcję tę można zapisać wzorem



Istnienie izotopów pierwiastków promieniotwórczych i niepromieniotwórczych, których masy atomowe były wielokrotnościami masy atomowej wodoru, fakt że pierwiastki ulegają przemianom, oraz rozbitcie jądra atomowego dowiodło, że atomy zbudowane są ze wspólnych składników i że mogą przekształcać się jedne w drugie.

§ 12. Protonowo-elektronowy model jądra atomowego

Najlżejszą zaobserwowaną cząstką o jednostkowym ładunku dodatnim był jon wodoru. W 1920 **Rutherford** zaproponował, aby wodoropodobnej jednostce ładunku dodatniego nadać nazwę proton.

E. Rutherford:

Bakerian Lecture: Nuclear constitution of atoms.

(Bakerian Lecture: Budowa jądra atomów.)

[Proceedings of the Royal Society A **97**, 686 (1920) 374-400.]

Masa protonu w skali mas atomowych równa się w przybliżeniu jedności. Gdyby w jądrze znajdowało się Z protonów, to otrzymane w ten sposób masy atomowe nie zgadzałyby się z masami atomowymi rzeczywistych atomów. Zaproponowano więc, że w jądrze znajduje się $A-Z$ dodatkowych protonów i $A-Z$ elektronów, które równoważą ładunek tych dodatkowych protonów.

Protonowo-elektronowy model jądra atomowego obowiązywał do 1932, kiedy to odkryto neutron.

§ 13. Odkrycie neutronu. Protonowo-neutronowy model jądra atomowego

W 1920 pojawiły się poglądy, że ważnym elementem budowy atomu może być cząstka zupełnie nowa, dotychczas nieznaną. **Rutherford** na odczycie wygłoszonym w Royal Society w 1920 sugerował istnienie cząstki będącej połączeniem protonu i elektronu.

W 1925 **George Eugene Uhlenbeck (1900-1988)** i **Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978)** na podstawie badań doświadczalnych, a w 1928 **Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984)** na podstawie rozważań teoretycznych wysnuli hipotezę, że elektrony posiadają moment magnetyczny.

G. E. Uhlenbeck & S. Goudsmit:

Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons.

(Zastąpienie hipotezy niemechanicznego ograniczenia przez wymaganie dotyczące wewnętrznego zachowania każdego pojedynczego elektronu.)

[Naturwissenschaften **13** (1925) 953-954.]

P. A. M. Dirac:

The quantum theory of the electron.

(Kwantowa teoria elektronu.)

[Proceedings of the Royal Society (Series A) **117**, 778 (1928) 610-624.]

P. A. M. Dirac:

The quantum theory of the Electron. Part II.

(Kwantowa teoria elektronu. Część II.)

[Proceedings of the Royal Society (Series A) **118**, 779 (1928) 351-361.]

Jeżeli elektrony rzeczywiście byłyby składnikami jąder, to moment magnetyczny jądra powinien być co do rzędu wielkości równy momentowi magnetycznemu elektronu. Przeprowadzone w tym zakresie pomiary wykazały, że momenty magnetyczne jąder są przeważnie o trzy rzędy wielkości mniejsze od momentu magnetycznego elektronu.

W 1930 **Walther Wilhelm Georg Bothe (1891-1957)** i **Richard Becker (1887-1955)**, bombardując beryl cząstkami alfa, wykryli emisję nowego rodzaju promieniowania. Promieniowanie to było bardzo przenikliwe i nie przenosiło ładunku elektrycznego. Początkowo sądzono, że są to wysokoenergetyczne promienie gamma.

W. Bothe, H. Becker:

Künstliche Erregung von Kern- γ -Strahlen.

(Sztuczne wzbudzenie promieniowania jądrowego γ .)

[Zeitschrift für Physik **66**, 5-6 (1930) 289-306.]

Małżonkowie **Irène Joliot-Curie (1897-1956)** i **Jean Frédéric Joliot-Curie (1900-1958)** postanowili zbadać to promieniowanie. W ich doświadczeniu źródłem badanego promieniowania była mieszanina berylu i polonu, polon stanowił poprostu źródło cząstek alfa. Na drodze badanego promieniowania badacze ci umieścili gruby ekran ołowiany, który zatrzymywał cząstki alfa i ewentualnie promieniowanie gamma. Przez ekran przenikały tylko badane promienie, które następnie wpadały do komory **Wilsona**. Promienie te były w komorze **Wilsona** niewidoczne, ponieważ nie posiadały ładunku. **Joliotowie** umieścili więc w komorze **Wilsona** na drodze tych promieni ekran z parafiny, substancji zawierającej wodór. Stwierdzili oni, że badane promienie wytrącały z parafiny protony. Ślad protonu jest już w komorze **Wilsona** widoczny, ponieważ cząstka ta posiada ładunek. Rezultat swoich badań małżonkowie **Joliot-Curie** opublikowali 18 stycznia 1932.

Irène Curie et F. Joliot:

Émission de protons de grande vitesse par les substances hydrogénées sous l'influence des rayons gamma très pénétrants.

(Emisja protonów o dużej prędkości przez substancje uwodornione pod wpływem silnie przenikliwego promieniowania gamma.)

[Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences **194** (1932) 273-275.]

W tym samym 1932 roku angielski fizyk **James Chadwick (1891-1974)** stwierdził, że promienie emitowane przez beryl, bombardowany cząstkami alfa, stanowi strumień neutralnych cząstek o masie nieznacznie większej od masy protonu. Cząstki te nazwano neutronami.

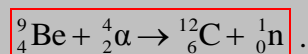
J. Chadwick:

Possible Existence of a Neutron.

(Możliwe istnienie neutronu.)

[Nature **129** (1932) 312-]

Reakcję wytwarzania neutronów można zapisać w następujący sposób:



W 1932 niebawem po odkryciu neutronu **Dmitrij Dmitrijewicz Iwanienko (1904-1994)** oraz niezależnie **Werner Karl Heisenberg (1901-1976)** wysunęli hipotezę, że jądro nie zawiera elektronów, lecz składa się wyłącznie z protonów i neutronów. Protonowo-neutronowy model jądra atomowego tłumaczył w zupełności wszystkie bez wyjątku zgromadzone fakty doświadczalne.

D. Iwanenko:

The Neutron Hypothesis.

(Hipoteza neutronowa.)

[Nature **129**, 3265 (1932) 798-798. (Published: 28 May 1932)]

W. Heisenberg:

Über den Bau der Atomkerne. I.

(O budowie jądra atomowego. I.)

[Zeitschrift für Physik volume **77**, 1-2 (1932) 1-11. (Published: January 1932)]

W. Heisenberg:

Über den Bau der Atomkerne. II.

(O budowie jądra atomowego. II.)

[Zeitschrift für Physik volume **78**, 3-4 (1932) 156-164. (Published: March 1932)]

W. Heisenberg:

Über den Bau der Atomkerne. III.

(O budowie jądra atomowego. III.)

[Zeitschrift für Physik volume **80**, 9-10 (1933) 587-596. (Published: September 1933)]

§ 14. Problem stabilności modelu atomu Rutherforda

Gdyby elektrony w atomie pozostawały nieruchome, to pod wpływem działania przyciągających sił **Coulomba** spadłyby na jądro, promień atomu byłby wtedy rzędu promienia jądra. Z doświadczenia wiemy, że promień atomu jest o cztery rzędy większy od promienia jądra.

Przeniesienie analogii z układu planetarnego też niewiele zmienia. Gdyby zastąpić Słońce jądrem, a planety elektronami, to siły **Coulomba** równoważone byłyby siłami odśrodkowymi. Ale cząstki wchodzące w skład atomu posiadają ładunki elektryczne, a jak wiemy z klasycznej elektrodynamiki – wszystkie przyspieszane naładowane ciała wypromieniowują energie w postaci fal elektromagnetycznych.

Elektron wysyłałby fale elektromagnetyczne kosztem energii mechanicznej i poruszając się po spirali spadłby na jądro. Atom skurczyłby się do rozmiarów jądra. Ponadto powstałe w ten sposób widmo promieniowania byłoby ciągłe. Z doświadczenia wiemy jednak, że widma atomów są dyskretne.

Model atomu **Rutherforda**, według fizyki klasycznej, nie mógł być układem stabilnym. Problem ten rozwiązał w 1913 **Niels Henrik David Bohr (1885-1962)**, którego teorię omówimy w następnym rozdziale.

III. FIZYKA KWANTOWA

Wielkim osiągnięciem starszej teorii kwantów, bo tak nazwano teorię, której początek dała rewolucyjna hipoteza o kwantach energii, było zbudowanie stabilnego modelu atomu wodoru. Starsza teoria kwantów nie była jednak teorią wolną od zarzutów, była przede wszystkim teorią wewnętrznym sprzeczną.

Niektóre trudności, z którymi nie mogła się uporać starsza teoria kwantów, rozwiązała mechanika kwantowa. Mechanikę kwantową odkryli niezależnie od siebie Heisenberg, wychodząc z zasady odpowiedniości i Schrodinger, opierając się na koncepcji de Broglie'a. Mechanika kwantowa jest teorią stosującą się do opisu zjawisk mikroświata, jest między innymi współczesną teorią budowy atomów.

Część pierwsza – STARSZA TEORIA KWANTÓW

§ 1. Odkrycie kwantów energii

Fizyka klasyczna, przy wytłumaczeniu rozkładu energii w widmie promieniowania ciała doskonale czarnego, napotkała na trudności nie do przewyciężenia.

Willy Wien:

Ueber die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers.

(O rozkładzie energii w widmie emisyjnym ciała doskonale czarnego.)

[Annalen der Physik **294/58**, 8 (1896) 662-669.]

Willy Wien:

On the division of energy in the emission-spectrum of a black body.

(O podziale energii w widmie emisyjnym ciała doskonale czarnego.)

[Philosophical Magazine (Series 5) **43**, 262 (1897) 214-220.]

Wzór podany przez **Wilhelma Wiena (1864-1928)**

$$\rho_T(\lambda) = \frac{a}{\lambda^5 \exp\left(\frac{b}{\lambda T}\right)},$$

gdzie

a, b – stałe określone przez porównanie wzoru teoretycznego z danymi doświadczalnymi,
 $\rho_T(\lambda)$ – stosunek energii zawartej w 1 cm^3 w przedziale długości fal od λ do $\lambda + d\lambda$ do przedziału długości fali $d\lambda$,

był słuszny dla fal krótkich, ale nie zgadzał się z doświadczeniem dla fal długich.

Zastosowanie zasady ekwipartycji energii, przy obliczaniu tego rozkładu, prowadzi do wzoru otrzymanego przez **Johna Williama Rayleigha (1842-1919)** i **Jamesa Jeansa (1877-1946)**.

Lord Rayleigh:

Remarks upon the law of complete radiation.

(Uwagi dotyczące prawa całkowitego promieniowania.)

[Philosophical Magazine (Series 5) **49**, 301 (1900) 539-540.]

J. H. Jeans:

On the partition of energy between matter and Aether.

(O podziale energii między materię a eter.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **10**, 55 (1905) 91-98.]

$$\rho_T(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^4} kT,$$

gdzie

k – stała **Boltzmana**.

Dla długich fal widmo **Rayleigha-Jeansa** zgadzało się z wynikami doświadczalnymi, dla fal krótkich prowadziło do tzw. "ultrafioletowej katastrofy".

W październiku 1900 **Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947)** podał empiryczny wzór, który był zmodyfikowanym wzorem **Wiena**.

M. Planck:

Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung.

(O ulepszeniu równania spektralnego Wiena.)

[Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft **2**, 13 (1900) 202-204.]

[Vorgetragen in der Sitzung vom 19. October 1900.]

$$\rho_T(\lambda) = \frac{a}{\lambda^5 \exp\left(\frac{b}{\lambda T}\right) - 1}$$

Nowy wzór **Plancka** doskonale sprawdzał się z doświadczeniem, nie miał jednak żadnego teoretycznego uzasadnienia.

W grudniu 1900 **Max Planck**, aby teoretycznie uzasadnić rozkład energii w widmie ciała doskonale czarnego w różnych temperaturach, założył, że emisja i absorpcja promieniowania przez atomy, rozpatrywane przez niego jako liniowe oscylatory harmoniczne, zachodzi nie w sposób ciągły, lecz dyskretny – oscylatory harmoniczne emitują i absorbują oddzielne porcje energii, kwanty energii. Energia oscylatora harmonicznego może być równa tylko całkowitym wielokrotnościom kwantu energii $h\nu$.

M. Planck:

Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum.

(O teorii prawa rozkładu energii w widmie normalnym.)

[Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft **2**, 17 (1900) 237-245.]

[Vorgetragen in der Sitzung vom 14. December 1900.]

$$E = nh\nu,$$

gdzie

h – elementarny kwant działania, zwany stałą **Plancka**,

ν – częstotliwość,

$n = 1, 2, 3, \dots$

Założenie $E = nh\nu$ jest sprzeczne z fizyką klasyczną, wg której oscylator harmoniczny może przebywać w stanach o dowolnej energii.

Założenie **Plancka** prowadzi do następującego wyrażenia na średnią energię oscylatora harmonicznego o częstotliwości ν :

$$\bar{E} = \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

Jak widać założenie **Plancka** prowadzi do sprzeczności z zasadą ekwipartycji energii, obowiązująca w klasycznej mechanice statystycznej, wg której średnia energia oscylatora wynosi kT – nie zależy więc od częstości.

Jeżeli we wzorze **Rayleigha-Jeana** zastąpimy średnią energią oscylatora harmonicznego $E = kT$ przez

$$\bar{E} = \frac{hc}{\lambda \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1},$$

otrzymamy słynny wzór **Plancka** na rozkład energii w widmie ciała doskonale czarnego:

$$\rho_T(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^5} \frac{hc}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}.$$

Hipoteza **Plancka** stanowiła rewolucyjny krok w rozwoju fizyki. Pojęcie kwantów energii stało się bardzo owocne w zrozumieniu zjawisk zachodzących w skali atomowej. Idee **Plancka** stworzyły podstawy współczesnej fizyki kwantowej.

§ 2. Koncepcja fotonów

Innym problemem nie do rozwiązania fizyki klasycznej było zjawisko fotoelektryczne. Według klasycznej teorii światła, energia fotoelektronów powinna być proporcjonalna do natężenia światła padającego na element światłoczuły, a czas akumulacji energii ze względu na pracę wyjścia powinien być stosunkowo duży. Pozostawało to w sprzeczności z faktami doświadczalnymi.

W 1905 **Albert Einstein (1879-1955)** w pracy

Albert Einstein:

Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.

(O pewnym heurystycznym punkcie widzenia dotyczącym wytwarzania i przetwarzania światła.)

[Annalen der Physik **322**, 6 (1905) 132-148.]

podał zgodną z doświadczeniem teorię zjawiska fotoelektrycznego, stanowiącą *experimentum crucis* dla postawionej przez niego hipotezy, że promieniowanie ma charakter nieciągły i rozprzestrzenia się w postaci kwantów energii zlokalizowanych w małej objętości przestrzeni.

Energia kwantu energii dana jest zależnością:

$$E = h\nu.$$

Te kwanty energii noszą nazwę fotonów, nazwę foton zaproponował w 1926 **Gilbert Newton Lewis (1875-1946)**.

Gilbert N. Lewis:

The Conservation of Photons. (Niezmienność fotonów.)

[Nature **118**, 2981 (1926) 874-875.]

§ 3. Model atomu Bohra

Dalszy krok w tym kierunku postawił **Niels Henrik David Bohr (1885-1962)**, który wytłumaczył w jaki sposób zachodzi emisja i absorpcja promieniowania w atomie.

N. Bohr:

On the Constitution of Atoms and Molecules.

(O składzie atomów i cząsteczek.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **26**, 151 (July 1913) 1-25.]

Zanim przejdziemy do omawiania teorii **Bohra**, zajmiemy się faktami doświadczalnymi nagromadzonymi w nauce o widmach.

W 1885 **Johan Jacob Balmer (1825-1898)** odkrył zależność między długościami fal znanych wtedy czterech linii widma atomu wodoru.

J. J. Balmer:

Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffs.

(Uwagi dotyczące linii widmowych wodoru.)

[Annalen der Physik und Chemie **261/25**, 5 (1885) 80-87.]

$$\lambda = C \frac{n^2}{n^2 - 4},$$

gdzie

$n = 3, 4, 5, 6.$

C – stała.

Johannes Robert Rydberg (1854-1919) zauważył, że wygodniej jest określać położenie linii widmowych przy pomocy liczby falowej

$$k = \frac{1}{\lambda}.$$

J. R. Rydberg:

On the structure of the line-spectra of the chemical elements.

(O strukturze liniowych widm pierwiastków chemicznych.)

[Philosophical Magazine (Series 5) **29**, 179 (1890) 331-337.]

Wzór **Balmerna** przyjmuje wtedy postać:

$$k = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

gdzie

$n = 3, 4, 5, 6.$

R_H – stała **Rydberga** dla wodoru.

Stala **Rydberga** jest jedną z najdokładniej zmierzonych stałych fizyki.

Po odkryciu innych serii widmowych okazało się, że odpowiednie wzory dla poszczególnych serii widmowych mają tę samą postać, co wzór **Balmera** dla serii w obszarze widzialnym. Liczby falowe wszystkich serii można objąć wzorem:

$$k = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

gdzie: $n = m + 1, m + 2, m + 3, \dots$

Dla serii leżącej w dalekim nadfiolecie, odkrytej przez **Lymana** w 1906, $m = 1, n = 2, 3, 4, \dots$

Theodore Lyman:

The Spectrum of Hydrogen in the Region of Extremely Short Wave-Length.

(Widmo wodoru w rejonie ekstremalnie krótkich fal.)

[The Astrophysical Journal **23**, 3 (1906) 181-211.]

Dla serii leżącej w podczerwieni, odkrytej przez **Paschena** w 1908, $m = 3, n = 4, 5, 6, \dots$

F. Paschen:

Zur Kenntnis ultraroter Linienspektra. I. (Normalwellenlängen bis 27000 Å.-E.).

(Informacje dotyczące podczerwonych linii widmowych.)

[Annalen der Physik **332/27**, 13 (1908) 537-570.]

W 1908 **Walter (Walther) Heinrich Wilhelm Ritz (1878-1909)** podał tak zwaną zasadę kombinacyjną, którą można sformułować w następujący sposób: różnica dwu termów widmowych danego pierwiastka daje liczbę falową pewnej linii widmowej tego pierwiastka.

W. Ritz:

On a new law of series spectra.

(O nowym prawie widm szeregowych.)

[Astrophysical Journal **28**, 3 (1908) 237-243.]

Term widmowy dla wodoru jest określony następująco:

$$T_n = -\frac{R_H}{n^2}.$$

Nagromadzone fakty doświadczalne zostały wyjaśnione przez powstałą teorię **Bohra**. **Niels Bohr** przedstawił teorię, która bardzo dokładnie wyjaśniła pełne widmo wodoru i dała fizyczny model trwałej struktury atomu.

N. Bohr:

On the Constitution of Atoms and Molecules.

(O składzie atomów i cząsteczek.)

[The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (Series 6) **26**, 151 (July 1913) 1-25.]

Teoria budowy atomu wodoru **Bohra** opiera się na następujących postulatach:

1. Atom może znajdować się jedynie w niektórych ściśle określonych stanach kwantowych zwanych stacjonarnymi o całkowitej energii E_1, E_2, E_3, \dots

Atom, znajdując się w stanie stacjonarnym, nie promieniuje.

2. Stany stacjonarne wyznaczone są przez następujący warunek kwantowy: moment pędu elektronu jest całkowitą wielokrotnością stałej **Plancka**:

$$mvr = n\hbar,$$

gdzie

m – masa elektronu,

v – wartość prędkości elektronu,

r – promień orbity kołowej,

n – główna liczba kwantowa przybierająca wartości 1, 2, 3, ...

3. Przejście atomu z danego początkowego stanu stacjonarnego o energii E_n do danego końcowego stanu stacjonarnego o energii mniejszej E_m związane jest z emisją promieniowania monochromatycznego, w postaci kwantu energii (fotonu), o częstotliwości

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h}.$$

Ostatni postulat zwany jest warunkiem częstotliwości **Bohra**. Podczas absorpcji promieniowania przez atom warunek częstotliwości także musi być spełniony.

Teoria **Bohra** stosuje się do atomu wodoru i tzw. atomów wodoropodobnych ($Z - 1$ krotnie zjonizowanych) posiadających tylko jeden elektron.

Niech elektron o ładunku e porusza się dookoła nieruchomego jądra o ładunku Ze po okręgu o promieniu r .

Wtedy:

$$\frac{kZe^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}. \quad (1)$$

Z założenia:

$$mvr = n\hbar. \quad (2)$$

Z (1) i (2) otrzymujemy:

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e kZe^2}. \quad (3)$$

Całkowita energia elektronu w atomie wynosi:

$$E = E_p + E_k = -\frac{kZe^2}{r} + \frac{m_e v^2}{r} = -\frac{kZe^2}{2r}. \quad (4)$$

Podstawiając (3) do (4) mamy:

$$E_n = -\frac{k^2 Z^2 e^4 m_e}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}. \quad (5)$$

Całkowita energia elektryczna na n-tej orbicie jest ujemna. Wynika to stąd, że ujemna energia potencjalna przeważa nad dodatnią energią kinetyczną. Zakłada się, że energia potencjalna przy r dążącym do nieskończoności dąży do zera. Ze wzrostem n całkowita energia rośnie, gdy n dąży do nieskończoności energia dąży do zera.

Ponieważ wszystkie dozwolone wartości energii są ujemne, najmniejszą energię atomu otrzymujemy dla $n = 1$. Stan o najmniejszej energii, a więc najbardziej trwały, nazywamy stanem podstawowym.

Ponieważ z założenia:

$$E_n - E_m = h\nu,$$

uwzględniając (5), otrzymujemy:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{hc} (E_n - E_m) = \frac{k^2 Z^2 e^4 m_e}{4\pi\hbar^3 c} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right). \quad (6)$$

Uwzględniając poprawkę na skończoną masę jądra, należy masę elektronu zastąpić masą zredukowaną:

$$\mu = \frac{m_e M}{m_e + M},$$

gdzie

m_e – masa elektronu,

M – masa jądra.

Wyrażenie (6) możemy wtedy przepisać następująco:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{k^2 Z^2 e^4 \mu}{4\pi\hbar^3 c} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right). \quad (7)$$

Dla atomu wodoru $Z = 1$, promień r orbity elektronu w stanie podstawowym, czyli dla $n = 1$, według (3) wynosi $r = 0,528 \text{ \AA}$, co dobrze się zgadza z promieniem atomu wodoru oszacowanym na podstawie rozważań kinetycznej teorii gazów.

Wzór (7) jest identyczny ze wzorem **Balmera** dla wodoru, gdy przyjąć, że stała **Rydberga**

$$R_H = \frac{k^2 e^4 \mu}{4\pi \hbar^3 c}.$$

Teoretycznie wyznaczona wartość stałej **Rydberga** doskonale się zgadza z wartością tej stałej wyznaczoną doświadczalnie. Teoria **Bohra** nadaje też sens fizyczny zasadzie kombinacyjnej **Ritza**.

Na podstawie warunku częstości **Bohra**:

$$\nu_{n,m} = \frac{E_n - E_m}{h}$$

mamy

$$\left(\frac{1}{\lambda}\right)_{n,m} = \frac{E_n}{hc} - \frac{E_m}{hc}.$$

Wobec tego termy widmowe przyjmują postać:

$$T_n = -\frac{E_n}{hc}, \quad T_m = -\frac{E_m}{hc}.$$

Dla $T_1 > T_2 > T_3$, dostajemy:

$$\left(\frac{1}{\lambda}\right)_{1,2} = T_1 - T_2, \quad \left(\frac{1}{\lambda}\right)_{2,3} = T_2 - T_3, \quad \left(\frac{1}{\lambda}\right)_{1,3} = T_1 - T_3.$$

Jak już wspominaliśmy, stan o najniższej energii nazywa się stanem podstawowym. Po absorpcji kwantu energii, przy spełnieniu warunku częstości **Bohra**, atom może przejść do stanu o wyższej energii, stan taki nazywamy wzbudzonym. Atom wysła światło o tych samych częstościach fal, które absorbuje. Wobec tego widma emisyjne i absorpcyjne powinny być podobne, co pozostaje w zgodności z faktami doświadczalnymi.

§ 4. Doświadczenie Francka-Hertza

Istnienie stanów wzbudzonych wykazali **James Franck (1882-1964)** i **Gustav Ludwig Hertz (1887-1975)** w 1914, przeprowadzając doświadczenia nad zderzeniami elektronów o określonej energii z atomami rtęci.

J. Franck und G. Hertz:

Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben.

(O zderzeniach między elektronami i cząsteczkami pary rtęci i ich napięciu jonizacji.)

[Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft **16** (1914) 457-467.]

Gdyby istniały w atomie stany wzbudzone, to zderzenia elektronów z atomami byłyby dwojakiego rodzaju: sprężyste, dla energii kinetycznej elektronów mniejszej od energii koniecznej do wzbudzenia atomu, i niesprężyste, dla energii kinetycznej elektronów równej lub przekraczającej energię konieczną do wzbudzenia atomu, nadmiar energii elektrony zachowywałyby w postaci energii kinetycznej.

Franck i Hertz stwierdzili, że zderzenia niesprężyste elektronów z atomami rtęci zachodzą przy energii elektronów równej 4,9 eV, 9,8 eV, ... Wynikało stąd, że w atomie rtęci pierwszy poziom wzbudzony ma energię o 4,9 eV wyższą od poziomu podstawowego.

Ponadto **Franck i Hertz** stwierdzili, że atomy rtęci wzbudzone elektronami o energii kinetycznej 4,9 eV wysyłają linię widmową odpowiadającą przejściu z pierwszego stanu wzbudzonego do stanu podstawowego.

Doświadczenie **Francka-Hertza** stanowiło bezpośrednie potwierdzenie istnienia stanów wzbudzonych. Znaczenie tego doświadczenia polegało na tym, że energia potrzebna do wzbudzenia atomów rtęci dostarczana była kosztem energii kinetycznej elektronów, oraz że energię wzbudzenia mierzono metodą elektryczną.

§ 5. Dalszy rozwój modelu atomu Bohra

W modelu atomu **Bohra** elektrony poruszały się po płaskich orbitach kołowych. Energia w stanie stacjonarnym oraz promień orbity scharakteryzowane były jedną liczbą kwantową, tzw. główną liczbą kwantową n . Płaski ruch po okręgu można opisać za pomocą jednej współrzędnej uogólnionej, ponieważ jest to ruch o jednym stopniu swobody.

W 1916 **Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951)** uogólnił reguły kwantowania na układy mechaniczne o kilku stopniach swobody.

A. Sommerfeld:

Zur Quantentheorie der Spektrallinien.

(O kwantowej teorii linii widmowych.)

[Annalen der Physik **356/51** 17 (1916) 1-94.]

Stany stacjonarne atomu powinny spełniać następujące warunki kwantowe:

$$\oint p_i dq_i = n_i h, \quad (8)$$

gdzie

q_i – współrzędne uogólnione,

p_i – pędy uogólnione sprzężone kanonicznie z tymi współrzędnymi,

n_i – liczby kwantowe przybierające wartości całkowite.

Całkowanie rozciąga się na cały obszar zmienności odpowiedniej zmiennej. Dla płaskiej orbity kołowej warunek kwantowy (8) jest identyczny z warunkiem **Bohra** $m_e v r = n \hbar$.

Jeżeli orbitą elektronu jest płaska elipsa, w jednym z ognisk której znajduje się jądro, to ruch ten posiada dwa stopnie swobody. W układzie współrzędnych biegunowych, ruch po elipsie można opisać przy pomocy dwu współrzędnych uogólnionych r i φ .

Warunki kwantowe w tym przypadku mają postać:

$$\int_0^{2\pi} p_\varphi d\varphi = n_\varphi h, \quad \oint p_r dr = n_r h,$$

gdzie

n_φ – azymutalna liczba kwantowa,

n_r – radialna liczba kwantowa,

$$n_\varphi + n_r = n,$$

n – główna liczba kwantowa,

$$n \geq n_\varphi \geq 1.$$

n_φ może przyjmować wartości $n_\varphi = 1, 2, 3, \dots, n$.

Dla $n_\varphi = 0$ tor elektronu byłby prostą przechodzącą przez jądro, dlatego też wyklucza się wartość zero dla azymutalnej liczby kwantowej. W mechanice kwantowej azymutalna liczba kwantowa ulega modyfikacji, oznaczana tam przez $l = n_\varphi - 1$, może przyjmować wartość równą zero.

Mała i wielka półoś elipsy określone są następującymi wzorami:

$$a_n = n^2 \frac{\hbar^2}{m_e k Z e^2}, \quad b_{n,n_\varphi} = n n_\varphi \frac{\hbar^2}{m_e k Z e^2}, \quad \frac{b_{n,n_\varphi}}{a_n} = \frac{n_\varphi}{n},$$

gdzie

b_{n,n_φ} – mała półoś elipsy,

a_n – wielka półoś elipsy.

W przypadku

$$n_\varphi = n, \quad b_{n,n_\varphi} = a_n$$

tor elektronu jest okręgiem.

Energia w stanie stacjonarnym określona jest następującym wzorem:

$$E_n = -\frac{m_e k^2 Z^2 e^4}{2n^2 \hbar^2}. \quad (9)$$

Wzór (9) jest identyczny ze wzorem Bohra dla energii orbit kołowych.

Wnioski wyciągnięte z teorii Bohra odnośnie widm wodoru są identyczne z wnioskami wynikającymi z uogólnionej przez Sommerfelda teorii wprowadzającej orbity eliptyczne.

Co jednak daje wprowadzenie orbit eliptycznych? Każdemu stanowi stacjonarnemu określone głównej liczbą kwantową n , odpowiada n różnych orbit, różniących się między sobą wielkością malej pólki.

Zakłócenie wywołane przez zewnętrzne pole magnetyczne lub elektryczne wywołuje niewielkie zmiany energii różne dla różnych orbit należących pierwotnie do tego samego poziomu energetycznego. W wyniku tego poziom energetyczny ulega rozszczepieniu, ma to oczywiście wpływ na widmo.

Pozwoliło to na interpretację zjawiska Zeemana, którą podał A. Sommerfeld w 1916, oraz zjawiska odkrytego przez Johannes Stark (1874-1957) w 1914, polegającego na rozszczepieniu linii widmowych wodoru w polu elektrycznym, którą podali niezależnie od siebie Karl Schwarzschild (1873-1916) w 1914 i Paul Epstein (1871-1939) w 1916.

P. Zeeman:

The Effect of Magnetisation on the Nature of Light Emitted by a Substance.

(Wpływ namagnesowania na charakter światła emitowanego przez substancję.)

[Nature **55**, 1424 (1897) 347.]

P. Zeeman:

On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance.

(O wpływie magnetyzmu na rodzaj światła emitowanego przez substancję.)

[Philosophical Magazine (Series 5) **43**, 262 (1897) 226-239.]

P. Zeeman:

Doublets and triplets in the spectrum produced by external magnetic forces.

(Dublety i tryplety w widmie wytwarzane przez zewnętrzne siły magnetyczne.)

[Philosophical Magazine (Series 5) **44**, 266 (1897) 55-60.]

J. Stark:

Beobachtungen über den Effekt des elektrischen Feldes auf Spektrallinien I. Quereffekt.

(Obserwacje wpływu pola elektrycznego na linie widmowe I. Efekt poprzeczny.)

[Annalen der Physik **348/43** 7 (1914) 965-982.]

J. Stark und G. Wendt:

Beobachtungen über den Effekt des elektrischen Feldes auf Spektrallinien. II. Längseffekt.

(Obserwacje wpływu pola elektrycznego na linie widmowe. II. Efekt podłużny.)

[Annalen der Physik **348/43**, 7 (1914) 983-990.]

J. Stark und H. Kirschbaum:

Beobachtungen über den Effekt des elektrischen Feldes auf Spektrallinien. III. Abhängigkeit von der Feldstärke.

(Obserwacje wpływu pola elektrycznego na linie widmowe. III. Zależność od natężenia pola.)

[Annalen der Physik **348/43**, 7 (1914) 991-1016.]

J. Stark und H. Kirschbaum:

Beobachtungen über den Effekt des elektrischen Feldes auf Spektrallinien. IV. Linienarten, Verbreiterung.

(Obserwacje wpływu pola elektrycznego na linie widmowe. IV Rodzaje linii, poszerzenie.)

[Annalen der Physik **348/43**, 7 (1914) 1017-1047.]

J. Stark:

Beobachtungen über den Effekt des elektrischen Feldes auf Spektrallinien. V. Feinzerlegung der Wasserstoffserie.

(Obserwacje wpływu pola elektrycznego na linie widmowe. V. Dekompozycja szeregu wodorowego.)
[Annalen der Physik **353/48**, 18 (1915) 193-209.]

Karl Schwarzschild:

Bemerkung zur Aufspaltung der Spektrallinien im elektrischen Feld.

(Uwaga o rozszczepieniu linii widmowych w polu elektrycznym.)
[Deutsche Physikalische Gesellschaft. Verhandlungen **16** (1914) 24-40.]

Paul S. Epstein:

Zur Theorie des Starkeffektes.

(O teorii efektu Starka.)
[Physikalische Zeitschrift **17** (1916) 148-150.]

Paul S. Epstein:

Zur Theorie des Starkeffektes.

(O teorii efektu Starka.)
[Annalen der Physik **355/50**, 13 (1916) 489-520.]

Louis Karl Heinrich Friedrich Paschen (1865-1947), badając widma atomu wodoru i jonów helu, odkrył, że wszystkie linie widmowe uważane początkowo za pojedyncze, przy użyciu spektroskopu o dużej zdolności rozdzielczej wykazują strukturę subtelną (są rozszczepione).

F. Paschen, E. Back:

Normale und anomale Zeemaneffekte.

(Normalne i anomalne efekty Zeemana.)
[Annalen der Physik **344/39**, 15 (1912) 897-932.]

F. Paschen, E. Back:

Normale und anomale Zeemaneffekte. Nachtrag.

(Normalne i anomalne efekty Zeemana. Uzupełnienie.)
[Annalen der Physik **345/40**, 5 (1913) 960-970.]

F. Paschen, E. Back:

Liniengruppen magnetisch vervollständigt.

(Grupy linii rozszczepione magnetycznie.)
[Physica **1** (1921) 261-273.]

W 1916 **A. Sommerfeld**, aby wytłumaczyć subtelną strukturę linii widmowych wodoru, zastosował mechanikę relatywistyczną do kwantyzacji atomu o jednym elektronie.

Energia relatywistycznego stanu kwantowego zależy od dwu liczb kwantowych głównej i azymutalnej:

$$E_{n,n_\phi} = m_0 \left[1 + \frac{\alpha^2 Z^2}{\left(n - n_\phi + \sqrt{n_\phi^2 - \alpha^2 Z^2} \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

gdzie

m_0 – spoczynkowa masa elektronu,

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \text{ – stała bezwymiarowa zwana stałą struktury subtelnej.}$$

Jak wiadomo z mechaniki relatywistycznej, [zależność masy od prędkości](#)

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

powoduje precesję orbity eliptycznej, ponieważ prędkość elektronu na torze eliptycznym nie jest stała. Precesja orbity eliptycznej powoduje, że dla ustalonej wartości głównej liczby kwantowej n różnym elipsom, których stopień spłaszczenia określa azymutalna liczba kwantowa n_φ , odpowiadają wg (10) różne wartości energii.

Aby określić położenie orbity w przestrzeni należy mieć wyróżniony kierunek odniesienia. Zewnętrzne pole magnetyczne zakłóca orbity eliptyczne, które przestają być płaskie (ruch elektronów w tym przypadku posiada trzy stopnie swobody), a jednocześnie mamy do dyspozycji wyróżniony kierunek, kierunek pola magnetycznego.

Gdy natężenie zewnętrznego pola magnetycznego zdąża do zera, zaburzenie zdąża do zera, orbitę możemy uważać za płaską, pozostaje jednak wyróżniony kierunek.

Można określić rzut wektora momentu pędu elektronu na wyróżniony kierunek. Kwantowa teoria prowadzi do tzw. kwantowania przestrzennego. Rzut wektora momentu pędu na wyróżniony kierunek jest równy $m\hbar$,
gdzie
 m – magnetyczna liczba kwantowa,

$$m = -n_\varphi, -(n_\varphi - 1), \dots, 0, 1, \dots, n_\varphi.$$

Innymi słowy, rzut wektora momentu pędu elektronu na wyróżniony kierunek jest całkowitą wielokrotnością \hbar .

Z ruchem elektronu po orbicie związany jest orbitalny moment magnetyczny. Orbitalny moment magnetyczny elektronu jest antyrównoległy do orbitalnego momentu pędu elektronu.

Teoria kwantowa prowadzi do wniosku, że moment magnetyczny elektronu μ związany z ruchem orbitalnym jest całkowitą wielokrotnością elementarnego momentu magnetycznego, zwanego [magnetonem Bohra](#).

$$\mu = n_\varphi \mu_B,$$

gdzie

$$\mu_B = \frac{eh}{2m_e} \text{ – magneton Bohra.}$$

W 1922 **Otto Stern (1888-1969)** i **Walther Gerlach (1889-1979)** potwierdzili doświadczalnie istnienie kwantyzacji przestrzennej. Ponadto dostarczyli metody pomiaru wielkości magnetonu **Bohra**, która pozostawała w granicach błędu pomiarowego w zgodności z wartością wyznaczoną teoretycznie.

W. Gerlach, O. Stern:

Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms.

(Eksperymentalny dowód momentu magnetycznego atomu srebra.)

[Zeitschrift für Physik **8**, 1 (1922) 110-111.]

W. Gerlach, O. Stern:

Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld.

(Eksperymentalny dowód kwantyzacji kierunkowej w polu magnetycznym.)

[Zeitschrift für Physik **9**, 1 (1922) 349-352.]

W. Gerlach, O. Stern:

Das magnetische Moment des Silberatoms.

(Moment magnetyczny atomu srebra.)

[Zeitschrift für Physik **9**, 1 (1922) 353-355.]

Jak się okazało, struktura subtelna linii widmowych wynika nie tylko z **relatywistycznej zależności masy od prędkości**.

W 1925 **George Eugene Uhlenbeck (1900-1988)** i **Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978)**, aby wytłumaczyć subtelną strukturę linii widmowych, wysunęli hipotezę, że elektron posiada spin, własny moment pędu o wielkości $\frac{1}{2}\hbar$, oraz moment magnetyczny wielkości jednego magnetonu **Bohra**. Wprowadzenie spinu związane jest z wprowadzeniem nowej liczby kwantowej zwanej spinową, która może przyjmować dwie wartości $+\frac{1}{2}$ i $-\frac{1}{2}$ (w jednostkach \hbar).

G. E. Uhlenbeck & S. Goudsmit:

Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons.

(Zastąpienie hipotezy niemechanicznego ograniczenia przez wymaganie dotyczące wewnętrznego zachowania każdego pojedynczego elektronu.)

[Naturwissenschaften **13** (1925) 953-954.]

§ 6. Zasada Pauliego

W wyniku analizy nagromadzonych faktów doświadczalnych dotyczących poziomów energetycznych atomów, **Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958)** w 1925 wypowiedział zasadę, zwaną regułą zakazu lub zasadą **Pauliego**.

W. Pauli:

Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren.

(O związku między zakończeniem grup elektronowych w atomie a złożoną strukturą widm.)

[Zeitschrift für Physik **31**, 1 (1925) 765-783.]

Zasada **Pauliego** mówi, że żadne dwa elektrony tego samego atomu nie mogą mieć wszystkich czterech liczb kwantowych odpowiednio równych. **Pauli** oparł swoją zasadę wyłącznie na danych doświadczalnych i dotąd nie ma ona żadnego teoretycznego uzasadnienia.

Z zasady tej wynika bardzo ważny wniosek, w atomie na danym poziomie energetycznym, określonym główną liczbą kwantową n , może znajdować się nie więcej niż $2n^2$ elektronów. Zasada **Pauliego** stanowiła klucz do wyjaśnienia budowy układu okresowego pierwiastków.

§ 7. Zasada odpowiedniości i reguły wyboru

W 1918 **N. Bohr** sformułował zasadę odpowiedniości.

N. Bohr:

On the Quantum Theory of Line Spectra.

(O kwantowej teorii widm liniowych.)

[København (Kopenhaga) 1918.]

Zasadę odpowiedniości, zwana też zasadą korespondencji stanowi, że dla dużych głównych liczb kwantowych n i n' oraz niewielkiej różnicy $n - n'$, częstości kwantowe dążą asymptotycznie do częstości klasycznych. Wychodząc z tego założenia, **Bohr** założył, że nieznanne jeszcze wówczas prawa kwantowe rządzące natężeniem i polaryzacją linii widmowych dla wielkich wartości n i n' oraz małych ich różnic zbliżają się asymptotycznie do odpowiednich praw fizyki klasycznej.

Przejście między dwoma stanami kwantowymi jest możliwe, jeżeli liczby kwantowe tych stanów spełniają pewne warunki, zawarte w tak zwanych regułach wyboru.

Bohr na podstawie zasady odpowiedniości doszedł do reguł wyboru. Jeżeli dla pewnej częstości drgań klasycznie policzone natężenie promieniowania jest równe zero, oznacza to w języku teorii kwantów, że odpowiednie przejście kwantowe jest wzbronione.

§ 8. Reguły wyboru Rubinowicza

W tymże roku 1918 została opublikowana praca **Wojciecha Sylwestera Piotra Rubinowicza (1889-1974)** do tycząca reguł wyboru.

Rubinowicz:

Bohrsche Frequenzbedingung und Erhaltung des Impulsmomentes. I. Teil.

(Warunek częstości Bohra i zachowanie momentu pędu. I. Część.)

[Physikalische Zeitschrift **19**, 20 (1918) 441-445.]

Rubinowicz:

Bohrsche Frequenzbedingung und Erhaltung des Impulsmomentes II. Teil.

(Warunek częstości Bohra i zachowanie momentu pędu. II. Część.)

[Physikalische Zeitschrift **19**, 21 (1918) 465-474.]

W pracy tej **Rubinowicz** niezależnie od **Bohra** sformułował tzw. reguły wyboru dla azymutalnych i magnetycznych liczb kwantowych.

Warunek częstości **Bohra** jest warunkiem na to, aby spełniona była zasada zachowania energii przy przemianie energii atomu na energię fotonu. Zasugerowało to **Rubinowiczowi**, że powinna być spełniona także zasada zachowania momentu pędu w układzie złożonym z atomu i wypromieniowanego pola elektromagnetycznego. Doprowadziło go to do następujących reguł wyboru.

Azymutalna liczba kwantowa l określająca całkowity moment pędu atomu zmienia się przejściami kwantowych o jeden lub pozostaje stała:

$$l = \pm 1, 0 .$$

Przy przejściach kwantowych w polu zewnętrznym o symetrii osiowej **magnetyczna liczba kwantowa** m zmienia się o jedność lub pozostaje stała:

$$m = \pm 1, 0 .$$

§ 9. Trudności teorii Bohra

Z rozpatrzonego w poprzednim rozdziale problemu stabilności jądrowego modelu atomu wynikało, że elektrodynamika klasyczna w zastosowaniu do tego modelu prowadzi do sprzeczności z doświadczeniem. Ale ponieważ atomy istnieją, **Bohr** nie zwracając uwagi na elektrodynamikę, zapostulował istnienie stanów stacjonarnych atomu. Mógł oczywiście założyć istnienie continuum takich stanów, tak jak by to wynikało z mechaniki klasycznej, ale atomy oprócz tego, że istnieją, posiadają dyskretne widma. Aby w tym przypadku zachowana była zgodność z doświadczeniem, należało przyjąć, że tylko pewne ściśle określone stany są możliwe.

Teoria **Bohra** była dość dziwnym tworem, postulaty na których się opierała były sprzeczne z mechaniką i elektrodynamiką, natomiast wnioski wyciągnięte z tych postulatów opierały się na rachunkach, w których posługiwano się elektrodynamiką i mechaniką. Teoria **Bohra** była więc teorią wewnętrźnie sprzeczną, ale o dziwo zgodną z doświadczeniem.

Teoria **Bohra** nie potrafiła odpowiedzieć na pytanie w ciągu jakiego czasu atom znajduje się w stanie wzbudzonym, oraz co się dzieje z elektronem przy przejściu z jednego stanu kwantowego do drugiego.

Atom wzbudzony na przykład do stanu $n = 5$ może bezpośrednio przejść do stanu podstawowego $n = 1$, bądź pośrednio przez stany $n = 4$, $n = 3$, $n = 2$. Teoria **Bohra** nie potrafiła przewidzieć względnych prawdopodobieństw tych różnych procesów. Nie mogła więc określić względnych natężeń różnych linii widmowych odpowiadających przejściom z tego samego poziomu. Odwoływanie się do zasady odpowiedniości nie rozwiązywało tego zagadnienia.

Teoria **Bohra** nie potrafiła wytłumaczyć istnienia spinu elektronu przyjętego dla wytłumaczenia subtelnej struktury linii widmowych. Pomimo usilnych prób zastosowania tego modelu do budowy atomów innych niż wodór, nie udało się osiągnąć celu. Okazało się, że już dla $Z = 2$, czyli dla helu, nie można zbudować stabilnego modelu, z którego wynikałyby własności zgodne z doświadczeniem. Dla jeszcze cięższych atomów trudności oczywiście się potęgują.

Część druga – MECHANIKA KWANTOWA

§ 1. Dualizm falowo-korpuskularny

Odkrycie fotonów przez **Einsteina** doprowadziło do swoistego paradoksu. Otóż w pewnych zjawiskach światło zachowuje się jak fala, w innych jak korpuskuła (cząstka). Istnienie fotonów ujawniło się także w innym zjawisku, które w 1923 odkrył **Arthur Holly Compton** (1892-1962).

Arthur H. Compton:

The Spectrum of Scattered X-Rays.

(Widmo rozproszonych promieni X.)

[Physical Review **22**, 5 (1923) 409-413.]

Praca **Comptona** dała dowód, że fotony mają nie tylko określoną energię, ale także ściśle określony pęd:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

§ 2. Hipoteza de Broglie'a

W 1924 **Louis Victor Pierre Raymond de Broglie** (1882-1987) bronił na Sorbonie rozprawy pod tytułem **Recherches sur la théorie des quanta** (Badania nad teorią kwantów).

Louis de Broglie:

A Tentative Theory of Light Quanta.

(Wstępna teoria kwantów światła.)

[Philosophical Magazine (Series 6) **47**, 278 (February 1924) 446-458.]

Louis de Broglie:

Recherches sur la théorie des quanta.

(Badania nad teorią kwantów.)

[Annales de Physique (10 Série), **3** (1925) 22-128.]

[Praca doktorska, Paryż 1924.]

Postulował on istnienie tak zwanych fal materii, każdemu poruszającemu się punktowi materialnemu przyporządkował falę o długości określonej następującym wzorem:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Już w 1921 **Clinton Joseph Davisson** (1891-1960) i **Charles Henry Kunsman** (1890-1970), badając rozproszenie elektronów padających na polikrystaliczną płytę niklu, stwierdzili występowanie maksimów rozpraszania dla pewnych kierunków.

C. Davisson and C. H. Kunsman:

The Scattering of Electrons by Nickel.

(Rozpraszanie elektronów przez nikiel.)

[Science **54**, 1404 (25 Nov 1921) 522-524.]

C. Davisson and C. H. Kunsman:

The Scattering of Electrons by Nickel.

(Rozpraszanie elektronów przez nikiel.)

[Physical Review **19**, 3 (1922) 253.]

C. Davisson and C. H. Kunsman:

The scattering of low speed electrons by platinum and magnesium.

(Rozpraszanie powolnych elektronów przez platynę i magnez.)

[Physical Review **22**, 3 (1923) 242-258.]

W 1925 **Walter Maurice Elsasser (1904-1991)** zwrócił uwagę, że jeżeli hipoteza **de Broglie** jest słuszna, to wiązka elektronów powinna ulegać dyfrakcji przy odbiciu od kryształu.

Walter Elsasser:

Bemerkungen zur Quantenmechanik freier Elektronen.

(Uwagi dotyczące mechaniki kwantowej swobodnych elektronów.)

[Naturwissenschaften **13** (1925) 711.]

Clinton Joseph Davisson (1891-1960) i **Lester Halbert Germer (1896-1971)** wykonali w 1927 doświadczenia, które potwierdziły ostatecznie istnienie fal elektronowych.

C. Davisson and L. H. Germer:

Diffraction of Electrons by a Crystal of Nickel.

(Dyfrakcja elektronów na kryształach niklu.)

[Physical Review **30**, 6 (1927) 705-740 (741).]

W fizyce zaistniała paradoksalna sytuacja, fale zachowują się jak cząstki, a cząstki – jak fale.

§ 3. Równanie falowe Schrödingera

W 1926 **Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961)** uogólnił, wprowadzone przez **de Broglie**'a pojęcie związanych z cząstkami fal, postulując równanie, znane pod nazwą falowego równania **Schrödingera**.

E. Schrödinger:

Quantisierung als Eigenwertproblem. (Erste Mitteilung.)

(Kwantyzacja jako zagadnienie własne.)

[Annalen der Physik **384/79**, 4 (1926) 361-376.]

E. Schrödinger:

Quantisierung als Eigenwertproblem. (Zweite Mitteilung.)

(Kwantyzacja jako zagadnienie własne.)

[Annalen der Physik **384/79**, 6 (1926) 489-527.]

E. Schrödinger:

Quantisierung als Eigenwertproblem. (Dritte Mitteilung.)

(Kwantyzacja jako zagadnienie własne.)

[Annalen der Physik **385/80**, 13 (1926) 437-490.]

E. Schrödinger:

Quantisierung als Eigenwertproblem. (Vierte Mitteilung.)

(Kwantyzacja jako zagadnienie własne.)

[Annalen der Physik **386/81**, 18 (1926) 109-139.]

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi = \frac{2m}{\hbar^2} [E - U(x, y, z)] \Psi ,$$

gdzie

U – energia potencjalna cząstki,

m – masa cząstki,

Ψ – funkcja falowa.

Różne funkcje $U(x, y, z)$ określają różne zagadnienia fizyczne.

Aby rozwiązać równanie różniczkowe, jakim jest równanie **Schrödingera**, należy obrać stosownie do zagadnienia odpowiednie warunki brzegowe. Dla takich zagadnień jak budowa atomu (ruch elektronu w kulombowskim polu jądra atomowego), warunki brzegowe przyjmują postać:

$$\Psi \rightarrow 0 \quad \text{gdy} \quad r \rightarrow \infty .$$

Dla powyższych warunków brzegowych rozwiązania równania **Schrödingera**, zwane funkcjami własnymi, istnieją tylko dla pewnych wartości E należących do nieciągłego zbioru wartości

$$E_1, E_1, E_1, \dots, E_n ,$$

które noszą nazwę wartości własnych.

Wartości własne są doświadczalnie obserwowalnymi wartościami energii. Widzimy więc, że nałożenie odpowiednich warunków brzegowych prowadzi w sposób naturalny do kwantowania energii. Warunek brzegowy, który nie żąda aby funkcja falowa zniknęła w nieskończoności, nie nakłada żadnych ograniczeń na E .

Ponadto zakłada się, że:

1. funkcje falowe oraz ich pierwsze pochodne powinny być wszędzie ciągłe,
2. funkcje falowe w każdym punkcie przestrzeni powinny mieć tylko jedną wartość, czyli powinny być jednoznacznie określone.

Tylko funkcje spełniające powyższe warunki mają znaczenie fizyczne.

Statystyczną interpretację funkcji falowej podał **Max Born (1882-1970)**.

Max Born:

Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. [Vorläufige Mitteilung.]

(O mechanice kwantowej procesów zderzeniowych.) [Wstępne zawiadomienie.]

[Zeitschrift für Physik **37**, 12 (1926) 863-867.]

Max Born:

Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge.

(O mechanice kwantowej procesów zderzeniowych.)

[Zeitschrift für Physik **38**, 11-12 (1926) 803-827.]

Sens fizyczny ma kwadrat modułu tej funkcji $|\Psi|^2$.

Iloczyn $|\Psi|^2 dV$ przedstawia prawdopodobieństwo tego, że cząstka znajduje się w danym elemencie objętości dV w chwili t .

Równania **Schrödingera** nie wyprowadza się, lecz zakłada. Kryterium przyjęcia tego równania stanowi zgodność przewidywań opartych na tym równaniu z doświadczeniem.

Równanie **Schrödingera**, podobnie jak równanie **Newtona**, jest równaniem dynamiki układu. Jednakże mechanika klasyczna zbudowana w oparciu o równanie **Newtona** jest różna od mechaniki falowej zbudowanej w oparciu o równanie **Schrödingera**. Mechanika falowa stosuje się do opisu zjawisk zachodzących w skali mikroskopowej.

W mechanice kwantowej nie istnieje pojęcie toru cząstki. Zamiast dokładnego zlokalizowania cząstki, możemy jedynie podać prawdopodobieństwo tego, że cząstka znajduje się w danym miejscu. Klasyczne pojęcie cząstki w mechanice kwantowej traci sens.

Funkcje własne są unormowane w ten sposób, aby prawdopodobieństwo znajdowania się cząstki w całej przestrzeni było równe jedności:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi|^2 dV = 1 .$$

W 1925 **Werner Karl Heisenberg (1901-1976)**, prowadząc badania w związku z nagromadzonymi w tym czasie faktami doświadczalnymi dotyczącymi widm atomowych, odkrył sposób opisywania tych faktów w ujęciu teorii nazywanej mechaniką macierzową.

W. Heisenberg:

Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

(O kwantowej teoretycznej reinterpretacji zależności kinematycznych i mechanicznych.)

[Zeitschrift für Physik **33**, 1 (1925) 879-893.]

M. Born, P. Jordan:

Zur Quantenmechanik.

(O mechanice kwantowej.)

[Zeitschrift für Physik **34**, 1 (1925) 858-888.]

M. Born, W. Heisenberg, P. Jordan:

Zur Quantenmechanik. II.

(O mechanice kwantowej. II.)

[Zeitschrift für Physik **35**, 8-9 (1926) 557-615.]

Równoważność obu sformułowań mechaniki kwantowej w postaci falowej i macierzowej wykazał w 1926 sam **Schrödinger**.

Schrödinger:

Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen.

(O związku mechaniki kwantowej Heisenberga-Born-Jordana z moim.)

[Annalen der Physik **384**, 13 (1926) 734-756.]

§ 4. Zasada nieokreśloności

Statystyczna interpretacja funkcji falowej zgadza się z zasadą podaną przez [Heisenberga](#) w 1927, zwaną zasadą nieokreśloności lub nieoznaczoności.

W. Heisenberg:

Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.

(O opisowej zawartości teoretycznej kinematyki i mechaniki kwantowej.)

[Zeitschrift für Physik **43**, 3-4 (1927) 172-198.]

Zasada ta orzeka, że nie można jednocześnie dokładnie określić współrzędnej cząstki oraz składowej pędu związanej z tą współrzędną:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar,$$

gdzie

Δx – niepewność określenia współrzędnej,

Δp_x – niepewność określenia składowej pędu.

Zasada nieoznaczoności nie ma nic wspólnego z niedokładnością pomiarów związaną z niedokładnością przyrządów, czy też niedoskonałością naszych zmysłów. Zasada ta określa naturalne granice możliwości jednoczesnego określenia współrzędnej i pędu cząstki, nie oznacza to bynajmniej niepoznawalności mikroświata. Zasada nieokreśloności wskazuje na ograniczoną stosowalność pojęć fizyki klasycznej w obszarze mikroświata. Pojęcie cząstki nie może być przeniesione bez ograniczeń z dużych wymiarów na małe.

Zasada [Heisenberga](#) zachodzi dla każdej pary wielkości sprzężonych kanonicznie, na przykład dla energii i czasu:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar.$$

§ 5. Atom wodoru w mechanice kwantowej

Aby zrozumieć jak mechanika kwantowa opisuje atom, należy wyjść z podstawowego równania mechaniki kwantowej, równania [Schrödingera](#). W przypadku atomu wodoru energia potencjalna elektronu wynosi:

$$U = -\frac{ke^2}{r}.$$

Jeżeli to wyrażenie podstawimy do równania [Schrödingera](#), wówczas otrzymamy równanie różniczkowe, które posiada rozwiązania tylko dla tych wartości własnych E , dla których:

$$E_n = -\frac{k^2 e^4 m_e}{2\hbar^2}.$$

Możemy teraz wyznaczyć postać funkcji własnej odpowiadającej danej wartości własnej. Na podstawie znajomości funkcji własnej możemy policzyć prawdopodobieństwo znajdowania się elektronu w odległości r a $r + dr$ od jądra w dowolnym kierunku.

Odległość, na której prawdopodobieństwo osiąga wartość maksymalną, wynosi:

$$r_n^{\max} = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e k e^2} .$$

Sztucznie wprowadzone założenia w starszej teorii kwantów prowadziły, jak widać, do tych samych wyników, co rozważania oparte na równaniu [Schrödingera](#). Sztucznie wprowadzone w starszej teorii kwantów reguły kwantowania energii wynikają w mechanice kwantowej w sposób naturalny jako wartości własne. Promienie orbit stacjonarnych w starszej teorii kwantów odpowiadają w mechanice kwantowej, dla rozwiązań o symetrii kulistej, odległościom od jądra, na których prawdopodobieństwo znalezienia elektronu osiąga wartość maksymalną. Pojęcie toru nie ma odpowiednika w mechanice kwantowej.

§ 6. Inne atomy w mechanice kwantowej

Za pomocą mechaniki kwantowej można rozwiązać w sposób stosunkowo prosty atomy z jednym elektronem. Atomy dwuelektronowe można rozwiązać, stosując metody tak zwanego rachunku zaburzeń.

W stosunku do stanów zawierających więcej niż dwa elektrony należy stosować metody przybliżone. Do metod tych należą metoda pola samouzgodnionego [Hartree-Focka](#), oraz metoda statystyczna zaproponowana przez [Thomasa](#) i [Fermiego](#).

Metody powyższe nie będą tu szczegółowo omawiane.

[Douglas Rayner Hartree \(1897-1958\)](#)

[Władimir Aleksandrowicz Fock \(1898-1974\)](#)

[Llewellyn Hilleth Thomas \(1903-1992\)](#)

[Enrico Fermi \(1901-1954\)](#)

§ 7. Równanie Diraca

Teorie [Schrödingera](#) i [Heisenberga](#) były teoriami nierelatywistycznymi. Relatywistycznie współzmiennicze równanie falowe elektronu podał [Paul Adrien Maurice Dirac \(1902-1984\)](#) w 1928.

P. A. M. Dirac:

[The quantum theory of the electron.](#)

(Kwantowa teoria elektronu.)

[Proceedings of the Royal Society (Series A) **117**, 778 (1928) 610-624.]

P. A. M. Dirac:

[The quantum theory of the Electron. Part II.](#)

(Kwantowa teoria elektronu. Część II.)

[Proceedings of the Royal Society (Series A) **118**, 779 (1928) 351-361.]

Z teorii elektronu Diraca wynikało:

1. Elektron ma własny moment pędu – spin o wartości $\frac{1}{2} \hbar$.
2. Elektron ma własny moment magnetyczny.
3. Istnienie antycząstki elektronu, tj. cząstki o masie równej elektronowi, lecz o ładunku i momencie magnetycznym różniącymi się tylko znakiem od odpowiednich wartości dla elektronu.
4. Istnienie zjawiska kreacji par.
5. Istnienie zjawiska anihilacji.

Pozyton, bo tak nazwano antycząstkę elektronu, odkrył w 1932 **Carl David Anderson (1905-1991)**.

Carl D. Anderson:

The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives.

(Pozorne istnienie łatwo odchylających się pozytonów.)

[Science **76**, 1967 (Friday, September 9, 1932) 238-239.]

W 1933 małżonkowie **Joliot-Curie** oraz niezależnie **Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974)** i **Giuseppe Paolo Stanislao "Beppo" Occhialini (1907-1993)** zaobserwowali istnienie procesu nazywanego kreacją pary elektron-pozyton. W procesie tym promieniowanie w postaci kwantów gamma o energii $\geq 2m_0c^2$ (gdzie m_0 jest spoczynkową masą elektronu) w polu jądra powoduje powstanie pary elektron-pozyton.

Irène Curie et **Frédéric** Joliot

Contribution à l'étude des électrons positifs.

(Wkład w badanie dodatnich elektronów.)

[Comptes rendus des Séances de l'Academie des Sciences **196** (1933) 1105-1107.]

I. Curie and **F.** Joliot:

Sur l'origine des électrons positifs.

(O pochodzeniu dodatnich elektronów.)

[Comptes rendus des Séances de l'Academie des Sciences **196** (1933) 1581-1583.]

I. Curie et **F.** Joliot:

Électrons de matérialisation et de transmutation.

(Elektrony materializacji i transmutacji.)

[Journal de Physique et le Radium **4**, 8 (1933) 494-500.]

P. M. S. Blackett and G. Occhialini:

Photography of Penetrating Corpuscular Radiation.

(Fotografia Przenikliwego Promieniowania Korpuskularnego.)

[Nature **130**, 3279 (1932) 363-363.]

Patrick Maynard Stuart Blackett and Giuseppe Paolo Stanislao Occhialini:

Some photographs of the tracks of penetrating radiation.

(Kilka fotografii śladów przenikliwego promieniowania.)

[Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences **139**, 839 (1933) 699-727.]

W 1933 **Frédéric Joliot** i niezależnie **Theodor Fritz Heiting (1908-1991)** zaobserwowali także zjawisko przeciwne. Pozyton i elektron, łącząc się ulegają anihilacji, przy czym wytwarzają się kwanty gamma.

F Joliot:

Preuve expérimentale de l'annihilation des électrons positifs.

(Eksperymentalny dowód anihilacji elektronów dodatnich.)

[Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences **197**, 25 (1933) 1622-1625.]

F Joliot:

Preuve expérimentale de l'annihilation des électrons positifs.

(Eksperymentalny dowód anihilacji elektronów dodatnich.)

[Journal de Physique et le Radium **5**, 7 (1934) 299-303.]

F Joliot:

Sur la dématérialisation de paires d'électrons.

(O dematerializacji par elektronów.)

[Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences **198**, 26 (1934) 81-83.]

T. Heiting:

Kernanregung durch harte γ -Strahlen.

(Wzbudzenie jądrowe przez twarde promieniowanie γ .)

[Naturwissenschaften **21**, 37 (1933) 674.]

T. Heiting:

Zur Kern- γ -Absorption.

(O absorpcji jądrowej γ .)

[Naturwissenschaften **21**, 45 (1933) 800.]

T. Heiting:

Untersuchung über die durch harte γ -Strahlung hervorgerufene Sekundärstrahlung.

(Badanie promieniowania wtórnego spowodowanego twardym promieniowaniem γ .)

[Zeitschrift für Physik **87**, 1-2 (1934) 127-138.]

§ 8. Cząstki elementarne

Dzisiejsze znaczenie słowa atom jest niezgodne z jego etymologią. Wiemy, że atomy zbudowane są z prostszych składników, zwanych cząstkami elementarnymi.

Kiedy znano tylko cztery cząstki elementarne, elektron, proton, neutron i foton, uważano, że pierwsze trzy są trwałe i niezniszczalne, natomiast fotony mogą powstawać lub ginąć, mogą być absorbowane i emitowane przez atomy.

Odkrycie zjawisk anihilacji i kreacji par dowiodło, że elektrony mogą powstawać i ginąć. W 1955 stwierdzono, że także proton ma swoją antycząstkę, oraz że zachodzi kreacja i anihilacja pary złożonej z protonu i antyprotonu. W 1956 odkryto antycząstkę neutronu. Antycząstka neutronu nie posiada ładunku elektrycznego. Fizycy przypuszczają, że każdy fermion, czyli cząstka o spinie połówkowym (w jednostkach \hbar) ma swoją antycząstkę.

W poprzednim rozdziale mówiliśmy, że jądra pierwiastków promieniotwórczych ulegają rozpadowi, emitują cząstki alfa, beta i gamma.

Cechą charakterystyczną promieniowania beta jest to, że cząstki beta pochodzące z dowolnego pierwiastka promieniotwórczego tworzą ciągle widmo energii. Energia zmienia się od wartości bliskiej zeru do pewnej wartości maksymalnej, charakterystycznej dla danego pierwiastka promieniotwórczego. W widmie energii występuje wyraźne maksimum dla energii cząstek wynoszącej w przybliżeniu 1/3 energii maksymalnej.

Istnieją dwa rodzaje rozpadu beta, ujemny i dodatni. W ujemnym rozpadzie beta emitowane są elektrony, w dodatnim rozpadzie beta, występującym w przypadku niektórych sztucznie promieniotwórczych jąder, emitowane są pozytony.

Aby wytłumaczyć ciągłość widm energetycznych przy rozpadzie beta, Pauli w 1930 wysunął hipotezę, że podczas rozpadu beta, oprócz elektronu bądź pozytonu, emitowana jest nowa – nieznana dotychczas cząstka – którą nazwano neutrino.

Neutrino powinno być cząstką bardzo przenikliwą, elektrycznie obojętną, o masie bardzo małej bądź równej zeru, posiadającą spin połówkowy.

Podczas przemiany minus beta neutron rozpada się na proton, elektron i neutrino. Podczas przemiany plus beta proton rozpada się na neutron, pozyton i antyneutrino. Podczas rozpadu beta energia rozdziela się pomiędzy elektrony i neutrina. Suma energii obu tych cząstek jest stała dla danego pierwiastka promieniotwórczego. Jednakże energia może być rozdzielana w różny sposób pomiędzy elektron i neutrino, stąd ciągły rozkład energii emitowanych elektronów.

W 1956 amerykańscy fizycy Clyde Lorrain Cowan (1919-1974) i Frederick Reines (1918-1998) wykazali doświadczalnie istnienie neutrino.

C. L. Cowan, Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, A. D. McGuire:
Detection of the Free Neutrino: a Confirmation.
 (Detekcja wolnego neutrino: Potwierdzenie.)
 [Science **124**, 3212 (20 July 1956) 103-104.]

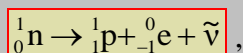
C. L. Cowan, F. B. Harrison, L. M. Langer, F. Reines:
A Test of neutrino anti-neutrino identity.
 (Test identyczności neutrino-antineutrino.)
 [Nuovo Cimento (Series 10) **3** (1956) 649-651.]

Frederick Reines, Clyde L. Cowan:
The neutrino.
 (Neutrino.)
 [Nature **178** (1956) 446-449.]

Clyde L. Cowan, Jr. and Frederick Reines:
Test of Neutrino-Antineutrino Identity.
 (Test identyczności neutrino-antineutrino.)
 [Physical Review **106**, 4 (15 May 1957) 825-826.]

Elektron, proton, foton, neutrino oraz jego antycząstka są cząstkami trwałymi w tym znaczeniu, że gdy są swobodne (tzn. nie oddziałują z innymi cząstkami) nie ulegają żadnym przemianom.

Neutron może być trwały tylko wewnątrz jądra atomowego. Swobodny neutron rozpada się z okresem połowicznego zaniku wynoszącym 12 minut. Rozpad neutronu przebiega następująco:



gdzie

${}^1_0\text{n}$ – neutron,

${}^1_1\text{p}$ – proton,

${}^0_{-1}\text{e}$ – elektron,

$\tilde{\nu}$ – antyneutrino.

Neutron i inne nowo odkryte cząstki są nietrwałe i rozpadają się na inne lżejsze cząstki. Wiemy już, że jądra atomowe zbudowane są z protonów i neutronów. Występowanie w przyrodzie trwałych jąder wskazuje na występowanie sił działających między nukleonami (tak nazywa się protony i neutrony) i wiążących je w jądro. Siły te noszą nazwę sił jądrowych. Natura sił jądrowych nie jest dotychczas znana. Nie została jeszcze stworzona teoria, która by tłumaczyła wszystkie nagromadzone fakty doświadczalne odnośnie jądra atomowego.

W fizyce przyjęła się teoria, którą podał w 1935 japoński fizyk **Hideki Yukawa (1907-1981)**.

Hideki Yukawa:

On the Interaction of Elementary Particles.

(O oddziaływaniu cząstek elementarnych.)

[Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan (3rd Series) **17** (1935) 48-57.]

Yukawa wysunął hipotezę, że siły działające między nukleonami polegają na wymianie kwantów pola sił jądrowych, zwanych mezonami. Krótko zasięgowy charakter sił jądrowych **Yukawa** tłumaczył skończoną masą spoczynkową mezonów. Mezony powinny mieć masę ok. $200 \div 300$ razy większą od masy elektronu. Aby wytworzyć obserwowalny mezon o masie różnej od zera, należałoby dostarczyć nukleonowi energii nie mniejszej niż

$$\Delta E = m_{\pi}c^2,$$

gdzie

m_{π} – masa spoczynkowa mezonu.

Mezony **Yukawy** były mezonami wirtualnymi (nieobserwowalnymi), tzn. czas życia takiego mezonu Δt oraz jego energia spoczynkowa $\Delta E = m_{\pi}c^2$ powinny wg zasady nieokreśloności spełniać warunek:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar.$$

Powstanie takiego mezonu nie koliduje z zasadą zachowania energii jeżeli traktujemy czas życia mezonu Δt jako nieokreśloność czasu w ciągu którego następuje oddziaływanie między nukleonami, oraz ΔE jako nieokreśloność energii w procesie emisji mezonu.

Seth Henry Neddermeyer (1907-1988) i **Carl David Anderson (1905-1991)** oraz niezależnie **Jabez Curry Street** i **E. C. Stevenson** odkryli w 1937 w promieniach kosmicznych, posługując się komorą **Wilsona**, cząstkę o masie $206,77 \pm 0,02$ razy większej niż masa elektronu.

Seth H. Neddermeyer and Carl D. Anderson:

Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles.

(Uwaga o naturze cząstek promieniowania kosmicznego.)

[Physical Review **51**, 10 (May 1937) 884-886.]

J. C. Street and E. C. Stevenson:

New Evidence for the Existence of a Particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron.

(Nowe dowody na istnienie cząstki o masie pośredniej między protonem a elektronem.)

[Physical Review **52**, 9 (1 November 1937) 1003-1004.]

Cząstkę tę nazwano mezonem μ . Mezon μ występuje z ładunkiem $+$ i $-$. Mezony μ^+ i μ^- są nawzajem dla siebie antycząstkami. Początkowo przypuszczano, że jest to cząstka przewidziana teoretycznie przez **Yukawę**. Mezony **Yukawy** powinny silnie oddziaływać z jądrami każdej substancji, przez którą przechodzą. Mezony μ nie spełniały tego warunku.

Dopiero w 1947 **C. M. G. Lattes**, **H. Muirhead**, **G. P. S. Occhialini** i **C. F. Powell** odkryli cząstkę, spełniającą wszystkie warunki przepowiedziane przez **Yukawę** dla cząstek biorących udział w oddziaływaniach między nukleonami. Cząstkę tę nazwano mezonem π .

C. M. G. Lattes, H. Muirhead, G. P. S. Occhialini, & C. F. Powell:

Processes involving charged mesons.

(Procesy z udziałem naładowanych mezonów.)

[Nature **159**, 4047 (24 May 1947) 694-697.]

C. M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini, C. F. Powell:

A determination of the ratio of the masses of pi-meson and mu-meson by the method of grain-counting.

(Wyznaczanie stosunku mas mezonu π i mezonu μ metodą liczenia ziaren.)

[Proceedings of the Physical Society **61**, 2 (1948) 173-183.]

Kolejne doświadczenia wykazały, że mezony π występują z ładunkiem $+$, $-$, lub 0 . Mezony π^+ i π^- są dla siebie nawzajem antycząstkami. Mezon π^0 jest własną antycząstką. Masa mezonów π wynosi około 270 mas elektronowych.

Odkryto także mezony K plus K^+ , K zero K^0 , eta zero η^0 oraz ich antycząstki. Mezony są cząstkami nietrwałymi.

Istnieje także grupa cząstek nietrwałych zwanych hiperonami. Są to cząstki o masach znacznie większych od masy nukleonu. Pierwszy hiperon został odkryty w 1947 przez **Rochestera** i **Butlera**.

G. D. Rochester & C. C. Butler:

Evidence for the Existence of New Unstable Elementary Particles.

(Dowód na istnienie nowych niestabilnych cząstek elementarnych.)

[Nature **160**, 4077 (1947) 855-857.]

Cząstka ta została nazwana hiperonem Λ^0 . Hiperon ten występuje tylko w postaci neutralnej.

Znane są następujące hiperony, które wymienimy w kolejności ich wzrastających mas (wg stanu badań do 1966):

lambda Λ^0 ,

sigma plus Σ^+ ,

sigma zero Σ^0 ,
sigma minus Σ^- ,
ksi zero Ξ^0 ,
ksi minus Ξ^- ,
omega minus Ω^- ,
oraz ich antycząstki.

Polscy fizycy **Marian Danysz (1909-1983)** i **Jerzy Pniewski (1913-1989)** odkryli w 1952, że hiperony mogą zastępować nukleony w jądrze.

M. Danysz, J. Pniewski:

Delayed Disintegration of a Heavy Fragment Emitted in Nuclear Explosion.

(Opóźniony rozpad ciężkiego fragmentu emitowanego podczas eksplozji jądrowej.)

[Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences (Classe 3) **1**, 1-2 (1953) 42-44.]

M. Danysz, J. Pniewski:

Delayed Disintegration of a Heavy Nuclear Fragment: I.

(Opóźniony rozpad ciężkiego fragmentu jądrowego: I.)

[Philosophical Magazine (Series 7) **44**, 350 (1953) 348-350.]

D. A. Tidman, G. Davis, A. J. Herz and R. M. Tennent:

Delayed disintegration of a heavy nuclear fragment: II.

(Opóźniony rozpad ciężkiego fragmentu jądrowego: II.)

[The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (Series 7) **44**, 350 (1953) 350-352.]

Jądro zawierające hiperon nazywane jest hiperjądrem lub hiperfragmentem. Hiperony są nietrwałe, rozpadają się więc, a wyzwolona przy tym energia powoduje eksplozję hiperjądra po czasie ok. 10^{-10} s od chwili jego powstania.

Istnieje także grupa cząstek zwanych cząstkami rezonansowymi lub krótko rezonansami. Czas życia tych cząstek jest rzędu 10^{-23} s, za krótki na to aby je można było bezpośrednio obserwować. O istnieniu tych cząstek wnioskuje się na podstawie produktów ich rozpadu.

Amerykański fizyk **Martin Deutsch (1917-2002)** odkrył w 1951, że pozyton i elektron mogą razem tworzyć stan związany zwany pozytronium.

Martin Deutsch:

Evidence for the Formation of Positronium in Gases.

(Dowody na tworzenie się pozytronium w gazach.)

[Physical Review **82**, 3 (1951) 455-456.]

Martin Deutsch:

Three-Quantum Decay of Positronium.

(Trój-kwantowy rozpad pozytronium.)

[Physical Review **83**, 4 (1951) 866-867.]

W pozytronium elektron i pozyton krążą wokół ich wspólnego środka mas. Pozytronium podobne jest pod względem elektrycznym do atomu wodoru. W pozytronium miejsce protonu zajmuje pozyton. Pozytronium jest nietrwałe, po pewnym czasie elektron i pozyton ulegają anihilacji, przy czym powstają dwa lub trzy kwanty gamma. Istnieją dwie odmiany

pozytronium: para-pozytronium, o średnim czasie życia $1,4 \cdot 10^{-7}$ s, przy którego rozpadzie powstają dwa fotony, oraz orto-pozytronium o średnim czasie życia $1,25 \cdot 10^{-10}$ s, przy którego rozpadzie powstają trzy fotony. W orto-pozytronium spiny elektronu i pozytonu są skierowane równolegle, a w para-pozytronium – antyrównolegle.

Oprócz pozytronium istnieją także atomy mezonowe. Jeżeli w atomie zastąpić elektron ujemnym mezonem, to powstanie układ zwany atomem mezonowym.

Najważniejszymi cechami cząstek elementarnych są: masa, ładunek i spin. W zależności od masy cząstki elementarne dzielą się na trzy klasy: leptony, mezony i bariony.

W zależności od ładunku cząstki elementarne dzielą się na cząstki naładowane dodatnio, ujemnie oraz cząstki obojętne elektrycznie.

Ze względu na spin cząstki dzielą się na fermiony, czyli cząstki o spinie połówkowym, podlegające statystyce [Fermiego-Diraca](#), oraz na bozony, czyli cząstki o spinie całkowitym, podlegające statystyce [Bosego-Einsteina](#).

Dane dotyczące cząstek elementarnych pochodzą z:

Cząstki elementarne – D. H. Frisch, A. M. Thorndike – PWN, 1956.

ZAKOŃCZENIE

Na zakończenie chciałbym jeszcze raz zwrócić uwagę na poszczególne etapy rozwoju atomistyki. Hipoteza atomistyczna zrodziła się jako spekulacja myślowa w umysłach starożytnych filozofów. W celu pogładowej interpretacji faktów doświadczalnych nagromadzonych w chemii wygodnie było przyjąć istnienie atomów. Atomy uważano za najmniejsze, niepodzielne i niezniszczalne cząstki pierwiastków chemicznych. Atomistyka znalazła także poparcie w fizyce ze strony kinetyczno-molekularnej teorii gazów. Atomy traktowano tu jako sprężyste kulki, ruch których podlegał prawom mechaniki klasycznej. Mankamentem atomistyki w tym okresie było to, że nie potrafiła ona wskazać na zjawiska jej tylko właściwe – nie istniały podstawy doświadczalne, które przemawiałyby na jej korzyść.

Dopiero prace Mariana Smoluchowskiego przyczyniły się do bezapelacyjnego zwycięstwa atomistyki. Koncepcja atomistyczna została powszechnie przyjęta, ale samo pojęcie atomu, w sensie nadanym mu przez Demokryta i Daltona, niebawem uległo gruntownej rewizji.

Okazało się, że nie tylko materia, ale także elektryczność ma charakter nieciągły. Odkrycie elektronu stanowiło pierwszy doniosły krok w dziedzinie poglądów na strukturę atomu. Następnym wielkim krokiem było odkrycie jądra atomowego. Okazało się jednak, że przy pomocy fizyki klasycznej nie można zbudować stabilnego modelu atomu.

Pomoc przyszła ze strony fizyki kwantowej. Mechanika kwantowa – szczytowe osiągnięcie fizyki kwantowej (jak dotychczas) zerwała w sposób konsekwentny z pojęciami fizyki klasycznej. Stanowi ona płodną, jeżeli chodzi o przewidywanie i tłumaczenie faktów doświadczalnych, teorię fizyczną nadającą się do opisu zjawisk w mikroświecie.

W dalszym rozwoju fizyki okazało się, że także cząstki elementarne, z których zbudowane są atomy, są nietrwałe i że mogą ulegać przemianom. Oprócz cząstek elementarnych, których istnienie konieczne jest dla wytłumaczenia budowy atomu, istnieje cała masa innych cząstek elementarnych, które jak na razie sprawiają fizykom wiele kłopotów.

SPIS LITERATURY

1. „Historia rozwoju chemii” – H.E. Fierz-David – PWN, 1958.
2. „Tri aspekta atomistyki” – B.N. Kiedrow – Moskwa, 1969.
3. „Istoria i metodologia termodynamiki i statistycznej fizyki” – M. Gielfer – Moskwa, 1969.
4. „Wkład polskich uczonych do fizyki statystyczno-molekularnej” – praca źródłowa – ZNIO, Wrocław-Warszawa-Kraków, 1962.
5. „Główne zagadnienia filozofii – ontologia” – praca źródłowa – PWN, 1967.
6. „Hb. d. Exp. Phys.” – Vol. Elektrische Entl. in Gasen.
7. „Odkrycie elektronu” – David L. Anderson – PWN, 1968.
8. „Studia poświęcone Marii Skłodowskiej-Curie i Marianowi Smoluchowskiemu” – praca zbiorowa – ZNIO, Wrocław-Warszawa-Kraków, 1968.
9. „Wstęp do fizyki jądrowej” – David Halliday – PWN, 1967.
10. „Mechanika” – Charles Kittel i inni – PWN, 1969.
11. „Spektroskopia masowa” – Włodzimierz Żuk – PWN, 1956.
12. „Niels Bohr – życie i twórczość” – zbiór artykułów – Moskwa, 1967.
13. „Wkład Polaków do nauki” – praca zbiorowa – PWN, 1967.
14. „Cząstki elementarne” – D.H. Frisch, A.M. Thorndike – PWN, 1956.
15. „Na tropach cząstek” – praca zbiorowa – PWN, 1967.
16. „Autobiografia” – Maria Skłodowska-Curie – PWN, 1959.
17. „Marian Smoluchowski – życie i twórczość” – Armin Teske – PWN, 1955.
18. „Historia fizyki” – Max von Laue – PWN, 1960.
19. „Kwantowa teoria atomu” – Wojciech Rubinowicz – PWN, 1957.
20. „Mechanika kwantowa” – A.S. Dawydow – PWN, 1967.

ALFABETYCZNY INDEKS NAZWISK

Kolorem **żółtym** zaznaczono nazwiska laureatów Nagrody Nobla z fizyki lub chemii.

Ampère: 8

Ampère: André Marie Ampère (1775-1836), francuski fizyk i matematyk

Anderson: 75, 78

Anderson: Carl David Anderson (1905-1991), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1936

Arystoteles: 6

Arystoteles (384-322 p.n.e.)

Aston: 47, 48

Aston: Francis William Aston (1877-1945), angielski chemik i fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1922

Avogadro: 8, 27, 34

Avogadro: Amedeo Avogadro (1776-1856), włoski fizyk

Back: 64

Back: Ernst Emil Alexander Back (1881-1959), niemiecki fizyk

Balmer: 56, 57, 60

Balmer: Johann Jacob Balmer (1825-1898), szwajcarski matematyk i fizyk

Barkla: 43

Barkla: Charles Glover Barkla (1877-1944), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1917

Becker: 50

Becker: Richard Becker (1887-1955), niemiecki fizyk teoretyk

Becquerel: 33, 34, 35, 37

Becquerel: Antoine Henri Becquerel (1852-1908), francuski chemik i fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1903

Bémont: 36

Bémont: Gustave Bémont (1857-1937), francuski chemik

Bernoulli: 12

Bernoulli: Daniel Bernoulli (1700-1782), szwajcarski matematyk i fizyk

Blackett: 75

Blackett: Patrick Maynard Stuart Blackett, Baron Blackett (1897-1974), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1948

Bodaszewski: 23, 24

Bodaszewski: Łukasz Jan (Julian) Bodaszewski (1849-1908), polski fizyk i architekt

Bohr: 51, 56, 57, 58, 60, 61, 63, 65, 67, 68

Bohr: Niels Henrik David Bohr (1885-1962), duński fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1922

Boltwood: 44

Boltwood: Bertram Borden Boltwood (1870-1927), amerykański chemik

Boltzmann: 16, 17, 18, 19, 21, 53

Boltzmann: Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), austriacki fizyk

Born: 71, 72

Born: Max Born (1882-1970), niemiecki fizyk teoretyk i matematyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1954

Bose: 81

Bose: Satyendra Nath Bose (1894-1974), indyjski matematyk i fizyk teoretyk

Bothe: 50

Bothe: Walther Wilhelm Georg Bothe (1891-1957), niemiecki fizyk, matematyk i chemik, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1954

Boyle: 6, 12

Boyle: Robert Boyle (1627-1691), brytyjski chemik i fizyk

Broek: 44

Broek: Antonius Johannes van den Broek (1870-1926), holenderski fizyk (amator)

Broglie: 52, 69, 70

Broglie: Louis Victor Pierre Raymond de Broglie, 7ème duc de Broglie (1882-1987), francuski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1929

Brown: 22, 23, 24, 25

Brown: Robert Brown (1773-1858), szkocki botanik

Butler: 79

Butler: Sir Clifford Charles Butler (1922-1999), angielski fizyk

Cannizzaro: 9

Cannizzaro: Stanislao Cannizzaro (1826-1912), włoski chemik

Chadwick: 50

Chadwick: Sir James Chadwick (1891-1974), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1935

Chancourtois: 10

Chancourtois: Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtois (1820-1886), francuski chemik, mineralog i geolog

Clausius: 14, 15, 17

Clausius: Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888), niemiecki fizyk

Compton: 69

Compton: Arthur Holly Compton (1892-1962), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1927

Coudres: 38

Coudres: Theodor des Coudres (1862-1926), niemiecki fizyk

Coulomb: 51

Coulomb: Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), francuski fizyk

Couper: 9, 10

Couper: Archibald Scott Couper (1831-1892), szkocki chemik

Cowan: 77

Cowan: Clyde Lorrain Cowan (1919-1974), amerykański fizyk

Crookes: 29

Crookes: William Crookes (1832-1919), angielski fizyk i chemik

Curie, P.: 36

Curie: Pierre Curie (1859-1906), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1903

Curie, I.: 50, 75

Curie: Irène Curie (1897-1956), francuska fizykochemiczka, laureatka Nagrody Nobla z chemii w 1935

Dalton: 7, 9

Dalton: John Dalton (1766-1844), angielski fizyk, chemik i meteorolog

Danysz: 80

Danysz: Marian Danysz (1909-1983), polski fizyk

Davis: 80

Davis: G. Davis

Davisson: 69, 70

Davisson: Clinton Joseph Davisson (1891-1960), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1937

Demokryt: 6, 7

Demokryt (ok. 460-350 p.n.e.)

Descartes: 12

Descartes: René Descartes (Kartezjusz) (1596-1650), francuski fizyk, matematyk i filozof

Deutsch: 80

Deutsch: Martin Deutsch (1917-2002), amerykański fizyk

Dirac: 49, 50, 74, 81

Dirac: Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), angielski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1933

Döbereiner: 10

Döbereiner: Johann Wolfgang Döbereiner (1780-1849), niemiecki chemik

Einstein: 23, 24, 55, 69, 81

Einstein: Albert Einstein (1879-1955), niemiecki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1921

Elsasser: 70

Elsasser: Walter Maurice Elsasser (1904-1991), amerykański fizyk

Empedokles: 6

Empedokles (ok. 495-435 p.n.e.)

Epstein: 63, 64

Epstein: Paul Epstein (1871-1939), niemiecki matematyk

Faraday: 27, 32, 34

Faraday: Michael Faraday (1791-1867), angielski fizyk i chemik

Fechner: 27

Fechner: Gustav Theodor Fechner (1801-1887), niemiecki fizyk, filozof i psycholog

Fermi: 74, 81

Fermi: Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938

Fok/Fock: 74

Fok: Władimir Aleksandrowicz Fok (Владимир Александрович Фок) (Vladimir Alexandrovich Fock) (Władimir Alexandrowitsch Fock) (1898-1974), radziecki (rosyjski) fizyk teoretyk

Franck: 60, 61

Franck: James Franck (1882-1964), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1925

Frisch: 81

Frisch: David Henry Frisch (1918-1991), amerykański fizyk

Frisch: Otto Robert Frisch (1904-1979), austriacko-brytyjski fizyk jądrowy

Gassendi: 12

Gassendi: Pierre Gassendi (1592-1655), francuski filozof, astronom i matematyk

Gay-Lussac: 7, 8

Gay-Lussac: Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850), francuski chemik i fizyk

Geiger: 38, 39, 43

Geiger: Johannes (Hans) Wilhelm Geiger (1882-1945), niemiecki fizyk

Gerlach: 66

Gerlach: Walther Gerlach (1889-1979), niemiecki fizyk

Germer: 70

Germer: Lester Halbert Germer (1896-1971), amerykański fizyk

Goldstein: 29, 45, 49

Goldstein: Eugen Goldstein (1850-1930), niemiecki fizyk

Goudsmit: 66

Goudsmit: Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978), holendersko-amerykański fizyk teoretyk

Harrison: 77

Harrison: F. B. Harrison

Hartree: 74

Hartree: Douglas Rayner Hartree (1897-1958), angielski matematyk i fizyk teoretyk

Heisenberg: 51, 52, 72, 73

Heisenberg: Werner Karl Heisenberg (1901-1976), niemiecki fizyk teoretyk i filozof nauki, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1932

Heiting: 74, 75, 76

Heiting: Theodor Fritz Heiting (1908-1991), niemiecki fizyk

Helmholtz: 28

Helmholtz: Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894), niemiecki lekarz, fizyk, fizjolog i filozof

Hertz, Gustav Ludwig: 60, 61

Hertz: Gustav Ludwig Hertz (1887-1959), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1925 (był bratankiem Heinricha Rudolfa Hertza)

Hertz, Heinrich Rudolf: 30, 33

Hertz: Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), niemiecki fizyk

Herz: 80

Herz: A. J. Herz

Hittorf: 29

Hittorf: Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914), niemiecki fizyk i chemik

Hooke: 12

Hooke: Robert Hooke (1635-1703), angielski przyrodnik

Iwanienko: 51

Iwanienko: Dmitrij Dmitrijewicz Iwanienko (1904-1994), rosyjski fizyk teoretyk

Jeans: 53, 54, 55

Jeans: Sir James Hopwood Jeans (1877-1946), angielski fizyk, astronom i matematyk

Joliot: 50, 75, 76

Joliot: Jean Frédéric Joliot (1900-1958), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1935

Joliot-Curie, Irène: 50

Joliot-Curie: Irène Joliot-Curie (1897-1956), francuska fizykochemiczka, laureatka Nagrody Nobla z chemii w 1935

Joliot-Curie: Jean Frédéric: 50

Joliot-Curie: Jean Frédéric Joliot-Curie, początkowo Jean Frédéric Joliot (1900-1958), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1935

Jordan: 72

Jordan: Ernst Pascual Jordan (1902-1980), niemiecki fizyk teoretyk

Joule: 13

Joule: James Prescott Joule (1818-1890), angielski fizyk i matematyk

Kekulé: 9, 10

Kekulé: Friedrich August Kekulé von Stradonitz (1829-1896), niemiecki chemik

Kirschbaum: 63

Kirschbaum: H. Kirschbaum

Krönig: 13, 14

Krönig: August Karl Krönig (1822-1879), niemiecki chemik i fizyk

Kruse: 77

Kruse: H. W. Kruse

Kundt: 20

Kundt: August Adolph Eduard Eberhard Kundt (1839-1894), niemiecki fizyk

Kunsman: 69, 70

Kunsman: Charles Henry Kunsman (1890-1970), amerykański fizyk

Langer: 77

Langer: L. M. Langer

Lattes: 79

Lattes: Cesare Mansueto Giulio Lattes (1924-2005), brazylijski fizyk

Lavoisier: 7

Lavoisier: Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), francuski fizyk i chemik

Lenard: 30

Lenard: Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1905

Leukippos: 6

Leukippos (V wiek p.n.e.)

Lewis: 55

Lewis: Gilbert Newton Lewis (1875-1946), amerykański fizykochemik

Lorentz: 32, 33

Lorentz: Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), holenderski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1902

Loschmidt: 18, 19

Loschmidt: Johann Josef Loschmidt (1821-1895), austriacki fizyk i chemik

Lyman: 57

Lyman: Theodore Lyman (1874-1954), amerykański fizyk

Łomonosow: 12

Łomonosow: Michaił Wasiljewicz Łomonosow (1711-1765), rosyjski uczony

Mach: 19, 20

Mach: Ernst Mach (1838-1916), austriacki uczony: fizyk, filozof i historyk nauki

Mariotte: 12

Mariotte: Edme Mariotte (1620-1684), francuski chemik, fizyk i botanik

Marsden: 39

Marsden: Ernest Marsden (1889-1970), nowozelandzki fizyk

Maxwell: 15, 16, 17, 27

Maxwell: James Clerk Maxwell (1831-1879), szkocki fizyk i matematyk

McGuire: 77

McGuire: A. D. McGuire

Mendelejew: 10, 11, 47

Mendelejew: Dmitrij Iwanowicz Mendelejew (1834-1907), rosyjski chemik

Meyer: 10, 11

Meyer: Julius Lothar Meyer (1830-1895), niemiecki chemik

Millikan: 34

Millikan: Robert Andrews Millikan (1868-1953), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1923

Moseley: 44

Moseley: Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915), angielski fizyk

Muirhead: 79

Muirhead: Hugh Muirhead (1925-2007), brytyjski fizyk

Natanson: 17

Natanson: Władysław Natanson (1864-1937), polski fizyk

Neddermeyer: 78

Neddermeyer: Seth Henry Neddermeyer (1907-1988), amerykański fizyk

Newlands: 10

Newlands: John Alexander Reina Newlands (1837-1898), angielski chemik

Newton: 72

Newton: Isaac Newton (1643-1777), angielski uczony

Occhialini: 75, 79

Occhialini: Giuseppe Paolo Stanislao "Beppo" Occhialini (1907-1993), włoski fizyk

Ostwald: 19, 20

Ostwald: Wilhelm Friedrich Ostwald (1853-1932), niemiecki chemik i filozof przyrody, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1909

Paschen: 57, 64

Paschen: Louis Karl Heinrich Friedrich Paschen (1865-1947), niemiecki fizyk

Pauli: 66, 67, 77

Pauli: Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958), szwajcarski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1945

Perrin: 24, 30, 31, 33

Perrin: Jean Baptiste Perrin (1870-1942), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1926

Planck: 54, 55, 58

Planck: Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), niemiecki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1918

Plücker: 28, 29

Plücker: Julius Plücker (1801-1868), niemiecki matematyk i fizyk

Pniewski: 80

Pniewski: Jerzy Pniewski (1913-1989), polski fizyk

Powell: 79

Powell: Cecil Frank Powell (1903-1969), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1950

Prout: 8, 9, 10, 26

Prout: William Prout (1785-1850), angielski chemik i lekarz

Rayleigh: 53, 54, 55

Rayleigh: John William Strutt, 3. baron Rayleigh, Lord Rayleigh (1842-1919), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1904

Reines: 77

Reines: Frederick Reines (1918-1998), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1995

Ritz: 57, 60

Ritz: Walter (Walther) Heinrich Wilhelm Ritz (1878-1909), szwajcarski fizyk teoretyk

Rochester: 79

Rochester: George Dixon Rochester (1908-2001), brytyjski fizyk

Röntgen: 35

Röntgen: Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1901

Rossi: 45

Rossi: R. Rossi

Royds: 38

Royds: Thomas Royds (1884-1955), angielski fizyk

Rubinowicz: 25, 67

Rubinowicz: Wojciech Sylwester Piotr Rubinowicz (1889-1974), polski fizyk teoretyk

Russell: 45

Russell: Henry Norris Russell (1877-1957), amerykański astronom

Rutherford: 26, 36, 37, 38, 39, 40, 43, 48, 49, 51

Rutherford: Ernest Rutherford, 1st Baron Rutherford of Nelson (1871-1937), brytyjski (nowozelandzki) fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908

Rydberg: 56, 60

Rydberg: Johannes Robert Rydberg (1854-1919), szwedzki fizyk

Schmidt: 36

Schmidt: Gerhard Carl Schmidt (1865-1949), niemiecki chemik

Schrödinger: 52, 70, 71, 72, 73, 74

Schrödinger: Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961), austriacki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1933

Schwarzschild: 63, 64

Schwarzschild: Karl Schwarzschild (1873-1916), niemiecki astronom i fizyk

Skłodowska-Curie: 36, 38

Skłodowska-Curie: Maria Skłodowska-Curie (1867-1934), polsko-francuska fizyczką i chemiczką, laureatka Nagrody Nobla z fizyki w 1903 oraz laureatka Nagrody Nobla z chemii w 1911

Smoluchowski: 20, 21, 22, 23, 24, 25

Smoluchowski: Marian Smoluchowski (Marian Ritter von Smolan Smoluchowski) (1872-1917), polski fizyk teoretyk

Soddy: 26, 38, 39, 45

Soddy: Frederick Soddy (1877-1956), angielski chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1921

Sommerfeld: 61, 63, 64

Sommerfeld: Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951), niemiecki fizyk teoretyk

Stark: 63, 64

Stark: Johannes Stark (1874-1957), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1919

Stern: 66

Stern: Otto Stern (1888-1969), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1943

Stevenson: 79

Stevenson: E. C. Stevenson

Stoney: 27, 28, 33, 34

Stoney: George Johnstone Stoney (1826-1911), irlandzki fizyk i astronom

Street: 79

Street: Jabez Curry Street (1906-1989), amerykański fizyk

Svedberg: 22

Svedberg: Theodor Svedberg (The Svedberg) (1884-1971), szwedzki chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1926

Tennent: 80

Tennent: R. M. Tennent

Thomas: 74

Thomas: Llewellyn Hilleth Thomas (1903-1992), brytyjsko-amerykański fizyk teoretyk i matematyk

Thomson, Joseph John: 26, 31, 32, 33, 34, 35, 40, 46, 47, 48

Thomson: Joseph John Thomson (J.J. Thomson) (1870-1940), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1906

Thorndike: 81

Thorndike: Alan M. Thorndike

Tidman: 80

Tidman: D. A. Tidman

Townsend: 34

Townsend: Sir John Sealy Edward Townsend (1886-1957), irlandzki fizyk i matematyk

Uhlenbeck: 49, 66

Uhlenbeck: George Eugene Uhlenbeck (1900-1988), holendersko-amerykański fizyk teoretyk

Varley: 29

Varley: Cromwell Fleetwood Varley (1828-1883), angielski inżynier

Villard: 37

Villard: Paul Ulrich Villard (1860-1934), francuski chemik i fizyk

Warburg: 20

Warburg: Emil Gabriel Warburg (1846-1931), niemiecki fizyk

Wendt: 63

Wendt: G. Wendt

Wien: 45, 53

Wien: Wilhelm Wien (1864-1928), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1911

Wilson, Charles Thomson Rees:

Wilson: Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959), szkocki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1927

Wilson, Harold Albert: 34, 50

Wilson: Harold Albert Wilson (1874-1964), angielski fizyk

Yukawa: 78, 79

Yukawa: Hideki Yukawa (1907-1981), japoński fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1949

Zeeman: 33, 63

Zeeman: Pieter Zeeman (1865-1943), holenderski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1902

CHRONOLOGICZNY INDEKS NAZWISK

Leukippos (V wiek p.n.e.) 500-401

Empedokles (ok. 495-435 p.n.e.)

Demokryt (ok. 460-350 p.n.e.)

Arystoteles (384-322 p.n.e.)

(1592-1655): Pierre Gassendi (1592-1655), francuski filozof, astronom i matematyk

(1596-1650): René Descartes (Kartezjusz) (1596-1650), francuski fizyk, matematyk i filozof

(1620-1684): Edme Mariotte (1620-1684), francuski chemik, fizyk i botanik

(1627-1691): Robert Boyle (1627-1691), brytyjski chemik i fizyk

(1635-1703): Robert Hooke (1635-1703), angielski przyrodnik

(1643-1777): Isaac Newton (1643-1777), angielski uczony

(1700-1782): Daniel Bernoulli (1700-1782), szwajcarski matematyk i fizyk

(1711-1765): Michaił Wasiljewicz Łomonosow (1711-1765), rosyjski uczony

(1736-1806): Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), francuski fizyk

(1743-1794): Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), francuski fizyk i chemik

(1766-1844): John Dalton (1766-1844), angielski fizyk, chemik i meteorolog

(1773-1858): Robert Brown (1773-1858), szkocki botanik

(1775-1836): André Marie Ampère (1775-1836), francuski fizyk i matematyk

(1776-1856): Amedeo Avogadro (1776-1856), włoski fizyk

(1778-1850): Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850), francuski chemik i fizyk

(1780-1849): Johann Wolfgang Döbereiner (1780-1849), niemiecki chemik

(1785-1850): William Prout (1785-1850), angielski chemik i lekarz

(1791-1867): Michael Faraday (1791-1867), angielski fizyk i chemik

(1801-1887): Gustav Theodor Fechner (1801-1887), niemiecki fizyk, filozof i psycholog

(1801-1868): Julius Plücker (1801-1868), niemiecki matematyk i fizyk

(1818-1890): James Prescott Joule (1818-1890), angielski fizyk i matematyk

(1820-1886): Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtois (1820-1886), francuski chemik, mineralog i geolog

(1821-1894): Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894), niemiecki lekarz, fizyk, fizjolog i filozof

(1821-1895): Johann Josef Loschmidt (1821-1895), austriacki fizyk i chemik

(1822-1879): August Karl Krönig (1822-1879), niemiecki chemik i fizyk

(1822-1888): Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-1888), niemiecki fizyk

(1824-1914): Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914), niemiecki fizyk i chemik

(1825-1898): Johann Jacob Balmer (1825-1898), szwajcarski matematyk i fizyk

(1826-1911): George Johnstone Stoney (1826-1911), irlandzki fizyk i astronom

(1826-1912): Stanislao Cannizzaro (1826-1912), włoski chemik

(1828-1883): Cromwell Fleetwood Varley (1828-1883), angielski inżynier

(1829-1896): Friedrich August Kekulé von Stradonitz (1829-1896), niemiecki chemik

(1830-1895): Julius Lothar Meyer (1830-1895), niemiecki chemik

(1831-1879): James Clerk Maxwell (1831-1879), szkocki fizyk i matematyk

(1831-1892): Archibald Scott Couper (1831-1892), szkocki chemik

(1832-1919): William Crookes (1832-1919), angielski fizyk i chemik

(1834-1907): Dmitrij Iwanowicz Mendelejew (1834-1907), rosyjski chemik

(1837-1898): John Alexander Reina Newlands (1837-1898), angielski chemik

(1838-1916): Ernst Mach (1838-1916), austriacki uczyony: fizyk, filozof i historyk nauki

(1839-1894): August Adolph Eduard Eberhard Kundt (1839-1894), niemiecki fizyk

(1842-1919): John William Strutt, 3. baron Rayleigh, Lord **Rayleigh** (1842-1919), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1904

(1844-1906): Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), austriacki fizyk

(1845-1923): Wilhelm Conrad **Röntgen** (1845-1923), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1901

- (1846-1931): Emil Gabriel Warburg (1846-1931), niemiecki fizyk
- (1849-1908): Łukasz Jan (Julian) Bodaszewski (1849-1908), polski fizyk i architekt
- (1850-1930): Eugen Goldstein (1850-1930), niemiecki fizyk
- (1852-1908): Antoine Henri Becquerel (1852-1908), francuski chemik i fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1903
- (1853-1928): Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), holenderski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1902
- (1853-1932): Wilhelm Friedrich Ostwald (1853-1932), niemiecki chemik i filozof przyrody, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1909
- (1854-1919): Johannes Robert Rydberg (1854-1919), szwedzki fizyk
- (1857-1894): Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), niemiecki fizyk
- (1857-1937): Gustave Bémont (1857-1937), francuski chemik
- (1858-1947): Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), niemiecki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1918
- (1859-1906): Pierre Curie (1859-1906), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1903
- (1860-1934): Paul Ulrich Villard (1860-1934), francuski chemik i fizyk
- (1862-1926): Theodor des Coudres (1862-1926), niemiecki fizyk
- (1862-1947): Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1905
- (1864-1928): Wilhelm Wien (1864-1928), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1911
- (1864-1937): Władysław Natanson (1864-1937), polski fizyk
- (1865-1943): Pieter Zeeman (1865-1943), holenderski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1902
- (1865-1947): Louis Karl Heinrich Friedrich Paschen (1865-1947), niemiecki fizyk
- (1865-1949): Gerhard Carl Schmidt (1865-1949), niemiecki chemik
- (1867-1934): Maria Skłodowska-Curie (1867-1934), polsko-francuska fizyczka i chemiczka, laureatka Nagrody Nobla z fizyki w 1903 oraz laureatka Nagrody Nobla z chemii w 1911
- (1868-1951): Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951), niemiecki fizyk teoretyk

(1868-1953): Robert Andrews **Millikan** (1868-1953), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1923

(1869-1959): Charles Thomson Rees **Wilson** (1869-1959), szkocki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1927

(1870-1926): Antonius Johannes van den Broek (1870-1926), holenderski fizyk (amator)

(1870-1927): Bertram Borden Boltwood (1870-1927), amerykański chemik

(1870-1940): Joseph John **Thomson** (J.J. Thomson) (1870-1940), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1906

(1870-1942): Jean Baptiste **Perrin** (1870-1942), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1926

(1871-1937): Ernest **Rutherford**, 1st Baron Rutherford of Nelson (1871-1937), brytyjski (nowo-zelandzki) fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1908

(1871-1939): Paul Epstein (1871-1939), niemiecki matematyk

(1872-1917): Marian Smoluchowski (Marian Ritter von Smolan Smoluchowski) (1872-1917), polski fizyk teoretyk

(1873-1916): Karl Schwarzschild (1873-1916), niemiecki astronom i fizyk

(1874-1954): Theodore Lyman (1874-1954), amerykański fizyk

(1874-1957): Johannes **Stark** (1874-1957), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1919

(1874-1964): Harold Albert Wilson (1874-1964), angielski fizyk

(1875-1946): Gilbert Newton Lewis (1875-1946), amerykański fizykochemik (Nazwa foton 1926)

(1877-1944): Charles Glover **Barkla** (1877-1944), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1917

(1877-1945): Francis William **Aston** (1877-1945), angielski chemik i fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1922

(1877-1946): Sir James Hopwood Jeans (1877-1946), angielski fizyk, astronom i matematyk

(1877-1956): Frederick **Soddy** (1877-1956), angielski chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1921

(1877-1957): Henry Norris Russell (1877-1957), amerykański astronom

(1878-1909) Walter (Walther) Heinrich Wilhelm Ritz (1878-1909), szwajcarski fizyk teoretyk

(1879-1955): Albert **Einstein** (1879-1955), niemiecki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1921

(1881-1959): Ernst Emil Alexander Back (1881-1959), niemiecki fizyk

(1882-1945): Johannes (Hans) Wilhelm Geiger (1882-1945), niemiecki fizyk

(1882-1964): James **Franck** (1882-1964), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1925

(1882-1970): Max **Born** (1882-1970), niemiecki fizyk teoretyk i matematyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1954

(1882-1987): Louis Victor Pierre Raymond de **Broglie**, 7ème duc de Broglie (1882-1987), francuski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1929

(1884-1955): Thomas Royds (1884-1955), angielski fizyk

(1884-1971): Theodor **Svedberg** (The Svedberg) (1884-1971), szwedzki chemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1926

(1885-1962): Niels Henrik David **Bohr** (1885-1962), duński fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1922

(1886-1957): Sir John Sealy Edward Townsend (1886-1957), irlandzki fizyk i matematyk

(1887-1915): Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915), angielski fizyk

(1887-1955): Richard Becker (1887-1955), niemiecki fizyk teoretyk

(1887-1961): Erwin Rudolf Josef Alexander **Schrödinger** (1887-1961), austriacki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1933

(1887-1975): Gustav Ludwig **Hertz** (1887-1975), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1925 (był bratankiem Heinricha Rudolfa Hertza)

(1888-1969): Otto **Stern** (1888-1969), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1943

(1889-1970): Ernest Marsden (1889-1970), nowozelandzki fizyk

(1889-1974): Wojciech Sylwester Piotr Rubinowicz (1889-1974), polski fizyk teoretyk

(1889-1979): Walther Gerlach (1889-1979), niemiecki fizyk

(1890-1970): Charles Henry Kunsman (1890-1970), amerykański fizyk

(1891-1957): Walther Wilhelm Georg **Bothe** (1891-1957), niemiecki fizyk, matematyk i chemik, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1954

(1891-1960): Clinton Joseph **Davisson** (1891-1960), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1937

(1891-1974): Sir James **Chadwick** (1891-1974), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1935

(1892-1962): Arthur Holly **Compton** (1892-1962), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1927

(1894-1974): Satyendra Nath Bose (1894-1974), indyjski matematyk i fizyk teoretyk

(1896-1971): Lester Halbert Germer (1896-1971), amerykański fizyk

(1897-1956): Irène **Joliot-Curie** (1897-1956), francuska fizykochemiczka, laureatka Nagrody Nobla z chemii w 1935

(1897-1958): Douglas Rayner Hartree (1897-1958), angielski matematyk i fizyk teoretyk

(1897-1974): Patrick Maynard Stuart **Blackett**, Baron Blackett (1897-1974), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1948

(1898-1974): Władimir Aleksandrowicz Fok (Владимир Александрович Фок) (Vladimir Alexandrovich Fock) (Wladimir Alexandrowitsch Fock) (1898-1974), radziecki (rosyjski) fizyk teoretyk

(1900-1958): Jean **Frédéric Joliot-Curie**, początkowo Jean **Frédéric** Joliot (1900-1958), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1935

(1900-1958): Wolfgang Ernst **Pauli** (1900-1958), szwajcarski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1945

(1900-1988): George Eugene Uhlenbeck (1900-1988), holendersko-amerykański fizyk teoretyk

(1901-1954): Enrico **Fermi** (1901-1954), włoski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938

(1901-1976): Werner Karl **Heisenberg** (1901-1976), niemiecki fizyk teoretyk i filozof nauki, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1932

(1902-1984): Paul Adrien Maurice **Dirac** (1902-1984), angielski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1933

(1902-1978): Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978), holendersko-amerykański fizyk teoretyk

(1902-1980): Ernst Pascual Jordan (1902-1980), niemiecki fizyk teoretyk

(1903-1969): Cecil Frank Powell (1903-1969), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1950

(1903-1992): Llewellyn Hilleth Thomas (1903-1992), brytyjsko-amerykański fizyk teoretyk i matematyk

(1904-1991): Walter Maurice Elsasser (1904-1991), amerykański fizyk

(1904-1979): Otto Robert Frisch (1904-1979), austriacko-brytyjski fizyk jądrowy

(1904-1994): Dmitrij Dmitrijewicz Iwanienko (1904-1994), rosyjski fizyk teoretyk

(1905-1991): Carl David Anderson (1905-1991), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1936

(1906-1989): Jabez Curry Street (1906-1989), amerykański fizyk

(1907-1981): Hideki Yukawa (1907-1981), japoński fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1949

(1907-1988): Seth Henry Neddermeyer (1907-1988), amerykański fizyk

(1907-1993): Giuseppe Paolo Stanislao "Beppo" Occhialini (1907-1993), włoski fizyk

(1908-1991): Theodor Fritz Heiting (1908-1991), niemiecki fizyk

(1908-2001): George Dixon Rochester (1908-2001), brytyjski fizyk

(1909-1983): Marian Danysz (1909-1983), polski fizyk

(1911-2011): Maurice Goldhaber (1911-2011), amerykański fizyk

(1913-1989): Jerzy Pniewski (1913-1989), polski fizyk

(1917-2002): Martin Deutsch (1917-2002), amerykański fizyk

(1918-1991): David Henry Frisch (1918-1991), amerykański fizyk

(1918-1998): Frederick Reines (1918-1998), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1995

(1919-1974): Clyde Lorrain Cowan (1919-1974), amerykański fizyk

(1922-1999): Sir Clifford Charles Butler (1922-1999), angielski fizyk

(1924-2005): Lattes: Cesare Mansueto Giulio Lattes (1924-2005), brazylijski fizyk

(1925-2007): Hugh Muirhead (1925-2007), brytyjski fizyk