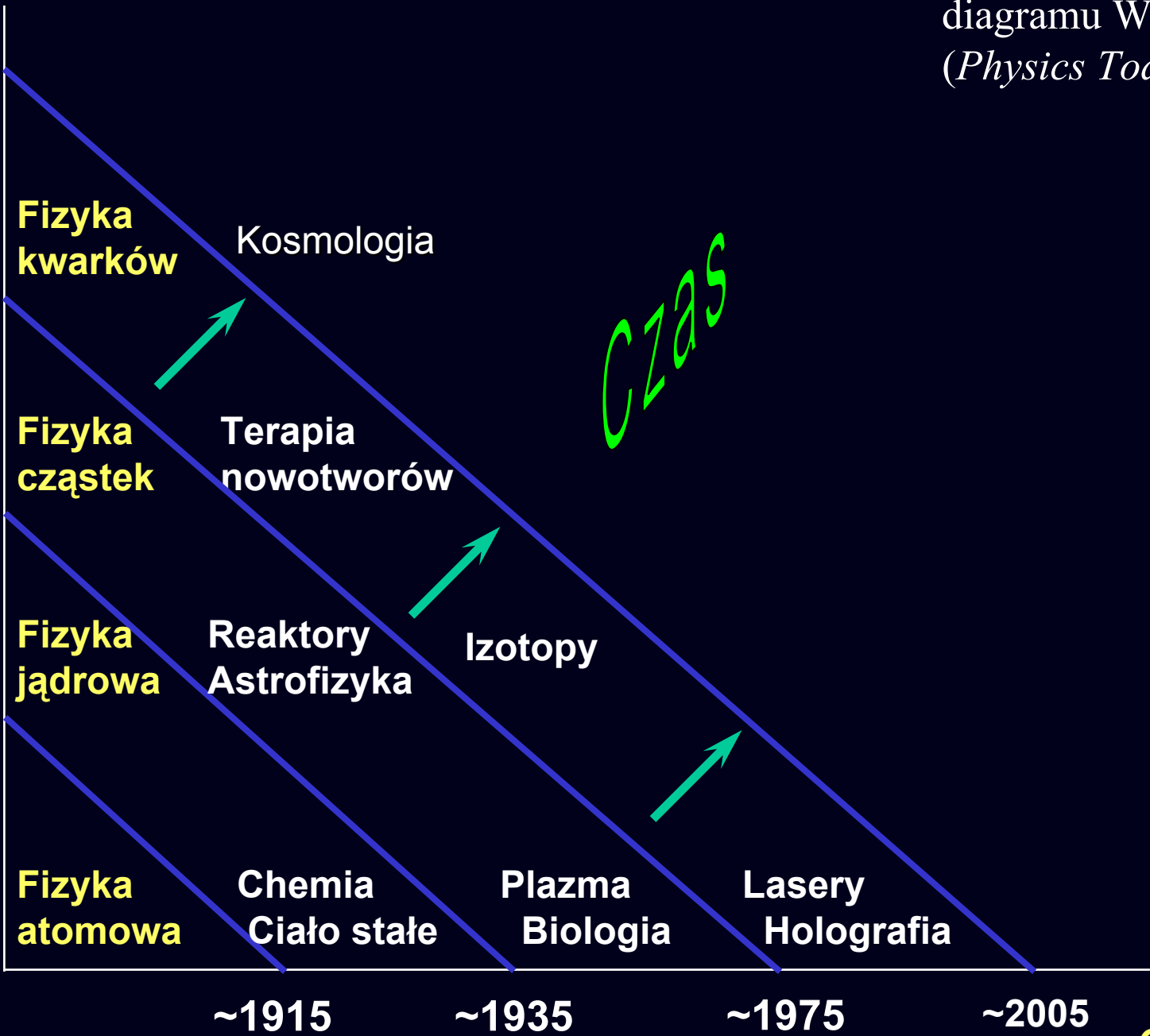


# Fizyka XX wieku

# INTENSYWNOŚĆ

Rozszerzona i uzupełniona wersja  
diagramu Weisskopfa  
(*Physics Today*, 1967)



Czas

Fizyka kwarków

Kosmologia

Fizyka cząstek

Terapia nowotworów

Fizyka jądrowa

Reaktory  
Astrofizyka

Izotopy

Fizyka atomowa

Chemia  
Ciało stałe

Plazma  
Biologia

Lasery  
Holografia

~1915

~1935

~1975

~2005

# OBSZERNOŚĆ

# Część 1

## Fizyka atomu i droga

do mechaniki kwantowej

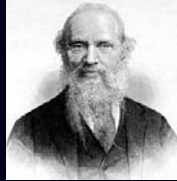
# Pierwsze modele atomu

1901 **Jean Perrin**



atomy mogą wyglądać jak  
miniaturowe układy planetarne

1902 **Kelvin**

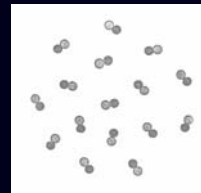


ujemne elektrony w atomach  
tworzą grupy wewnątrz chmury  
ładunku dodatniego

1903 **Philipp Lenard**



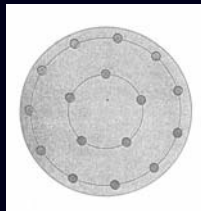
atomy złożone z „dynamid”,  
par ładunków elektrycznych



1904 **J. J. Thomson**



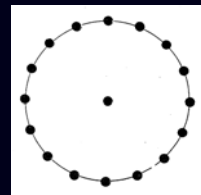
opracowanie jakościowego  
modelu Kelvina  
(„plum pudding model”)



1904 **Hantaro Nagaoka**



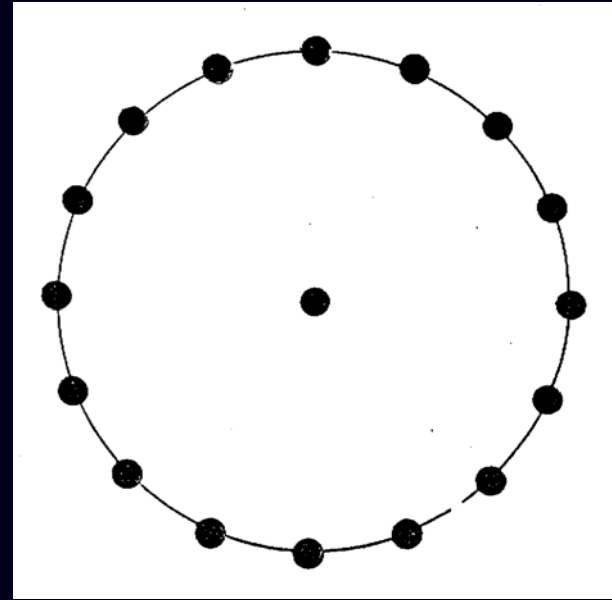
„saturnopodobny”  
model atomu



# Model atomu Nagaoki z 1904 r.



Hantaro Nagaoka

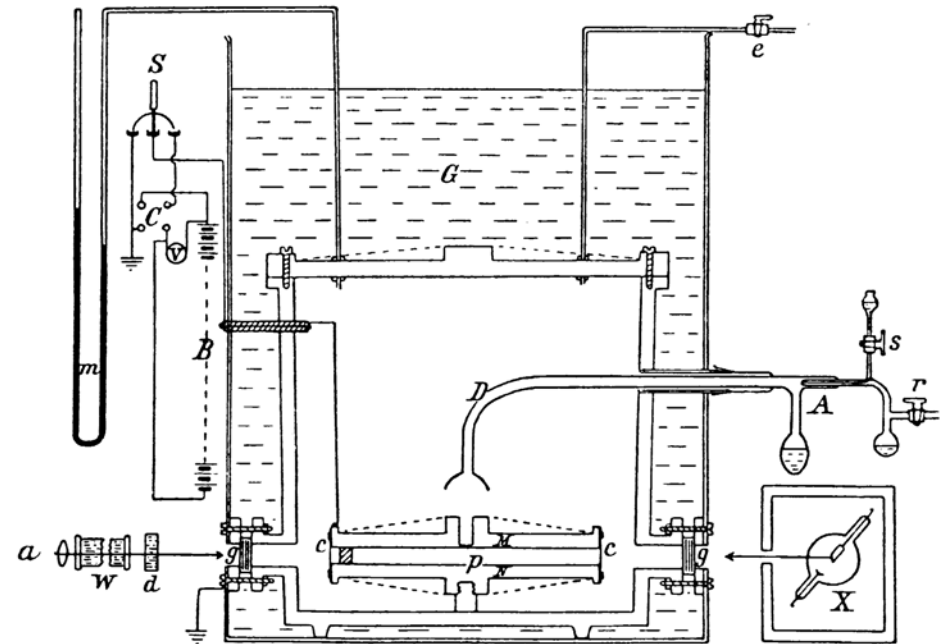
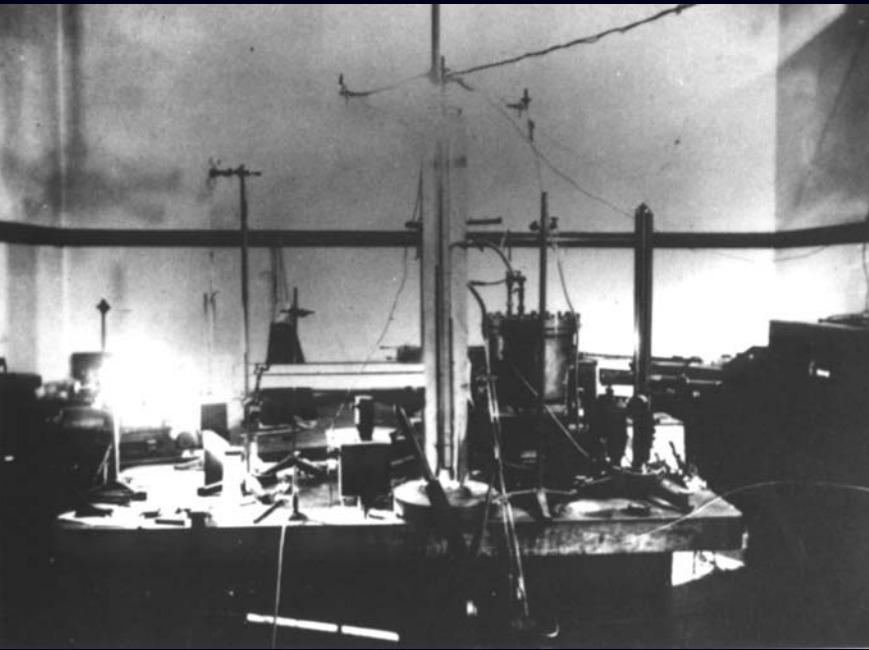


Oscylacje prostopadłe do płaszczyzny pierścienia elektronów dają widmo o strukturze pasmowej, natomiast oscylacje w płaszczyźnie pierścienia - widmo liniowe. Emisja promieni  $\alpha$  i  $\beta$  występuje, kiedy pierścień elektronów i jądro atomu rozpadają się wskutek bardzo dużych zaburzeń.

*Phil. Mag.* 7, 445 (1904)



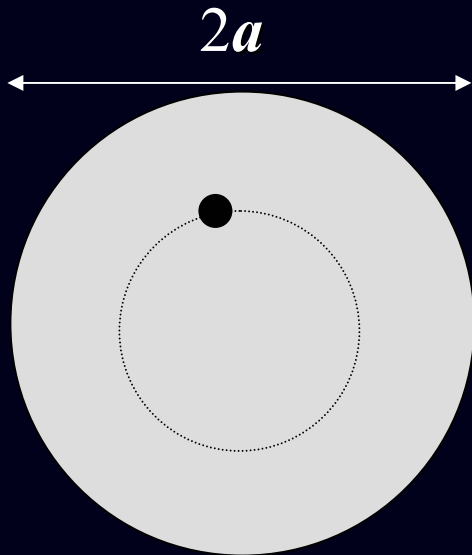
## Robert Millikan (1868-1953)



Ładunek elementarny  $e = 4,65 \times 10^{-10}$  jednostek elektrostatycznych  
wyznaczony metodą obserwacji naładowanych kropelek oliwy  
w polu elektrycznym [*Phil. Mag.* 19, 209 (1910)]

- 1906 **Barkla - odkrycie charakterystycznego promieniowania X**
- 1910 Haas - pierwszy model atomu zawierający stałą Plancka  $h$
- 1911 Rutherford - jądrowy model atomu
- 1912 **Laue, Friedrich, Knipping - dyfrakcja promieni X w kryształach**
- 1913 Bohr - planetarny model atomu
- 1913 **W. H. Bragg & W. L. Bragg - odbicie promieni X od kryształów**
- 1913 **Moseley - odkrycie regularności w charakterystycznym promieniowaniu X**
- 1913 Geiger, Marsden - wyniki badań rozpraszania cząstek  $\alpha$  potwierdzające model Rutherforda
- 1913 Van den Broek - liczba porządkowa pierwiastka w układzie periodycznym = ładunek dodatni jądra atomu
- 1913 Eksperyment Francka-Hertza,
- 1916 Sommerfeld - rozszerzenie relatywistyczne modelu Bohra
- 1921 Eksperyment Sterna-Gerlacha
- 1922 Zjawisko Comptona - rozpraszanie kwantów  $\gamma$  na swobodnych elektronach
- 1923 L. De Broglie - fale materii

## Model atomu Arthura Haasa (1910)



Elektron porusza się po orbicie kołowej o promieniu  $r$  wewnątrz kuli o promieniu  $a$  naładowanej jednorodnie ładunkiem dodatnim. Działa nań siła  $e^2r/a^3$ . Maksymalna energia elektronu poruszającego się po orbicie o promieniu  $a$  równa się granicznej częstotliwości  $\nu^*$  widma Balmera pomnożonej przez  $h$

$$h\nu^* = e^2/a$$

Jeżeli  $\nu^*$  równa się także częstotliwości obiegu elektronu na tej orbicie, to z warunku równowagi przyciągania kulombowskiego  $e^2/a^2$  i siły odśrodkowej  $4\pi^2\nu^{*2}m_e a$  wynika równanie

$$h = 2\pi |e| \sqrt{m_e a}$$

które okazuje się być numerycznie spełnione.

[Pomysł Haasa nazwano w Wiedniu „żartem karnawałowym”]



**John William Nicholson (1911):** atomy składają się z małych kulistych ładunków ujemnych, które tworzą pierścień obracający się wokół jeszcze mniejszej kuli ładunku dodatniego, stanowiącego jądro atomu. Suma wektorowa przyspieszeń wszystkich elektronów w rotującym pierścieniu wynosi zero. Najprostsze atomy **pierwotne** to:

Koronium Co	masa 0.51282	2 elektrony
Wodór H	masa 1.008	3 elektrony
Nebulium Nu	masa 1.6281	4 elektrony
Protofluor Pf	masa 2.3615	5 elektronów

Wszystkie znane atomy chemiczne są zbudowane z tych atomów pierwotnych, na przykład:

Hel He = NuPf

Uran =  $8 \{ \text{Nu}_2(\text{Pf H})_3 \} 4 \{ \text{He}_2\text{Nu}_2(\text{Pf H})_3 \}$

Nicholson stwierdził świetną zgodność zmierzonych mas atomowych z wartościami obliczonymi w tym modelu.

W wyniku bardzo skomplikowanego rozumowania Nicholson doszedł do wniosku, że we wszystkich atomach pierwotnych moment pędu przyjmuje wartości będące wielokrotnościami  $h/2\pi$ . W atomie protofluoru stosunek  $(5m_e a^2 2\pi v^2)/v$  energii potencjalnej pierścienia elektronów do częstości rotacyjnej  $v$  równa się  $\approx 25 h$ , i ten stosunek odpowiada iloczynowi  $2\pi$  i wartości momentu pędu pierścienia elektronów.

„Jeśli zatem, jak sugerował Sommerfeld, stała Plancka  $h$  ma znaczenie w świecie atomów, to może znaczyć, iż moment pędu atomu może się zwiększać, lub zmniejszać tylko o dyskretne wartości, kiedy elektrony opuszczają atom, lub do niego wracają. Łatwo zauważyć, że ten pogląd przedstawia mniej trudności, niż bardziej zwykła interpretacja, w której zakłada się atomową strukturę samej energii.”

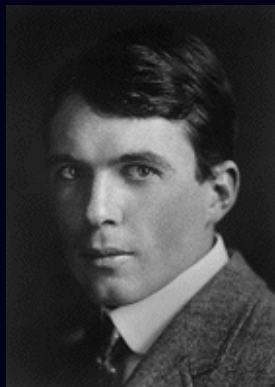
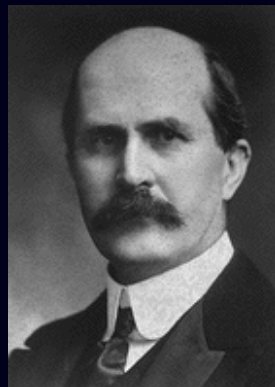
Nicholson (1912)



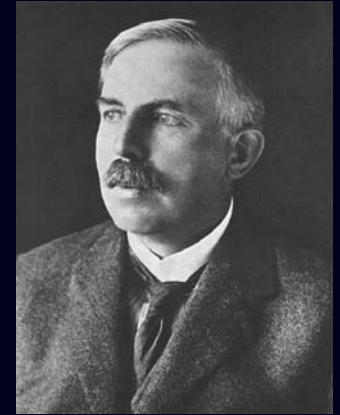
Charles Glover Barkla (1877-1944) odkrył charakterystyczne (dla każdego pierwiastka) promieniowanie X



Max von Laue (1879-1960) oraz Walter Friedrich i Paul Knipping odkryli dyfrakcję promieni X w kryształach

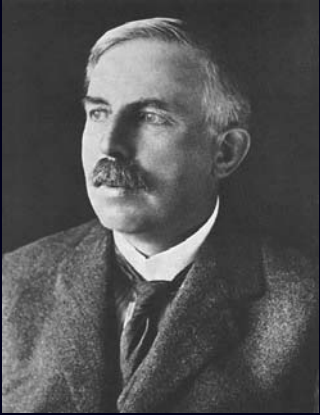


William Henry Bragg (1862-1942)  
William Lawrence Bragg (1890-1971)  
zapoczątkowali analizę struktury kryształów przy użyciu promieni X (warunek Bragga odbicia od kryształu)



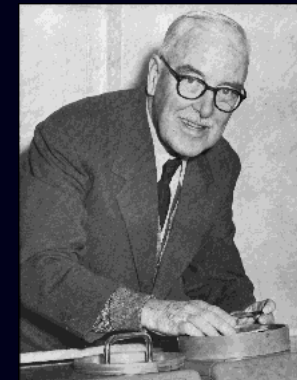
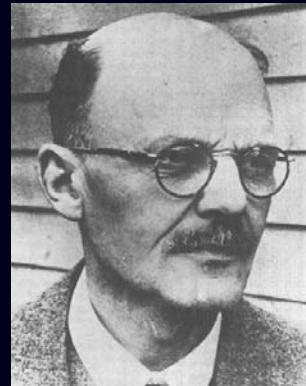
„... niestabilność centralnego jądra i niestabilność rozkładu elektronów. Pierwsza niestabilność powoduje wyrzucenie cząstki  $\alpha$ , a druga - pojawienie się promieni  $\beta$  i  $\gamma$ ...”

*Phil. Mag.* **24**, 453 (sierpień 1912)



„Profesor Rutherford niedawno opracował teorię opisującą rozpraszanie cząstek  $\alpha$  pod dużymi kątami, przy założeniu, że jest ono wynikiem bliskiego kontaktu między cząstką  $\alpha$  i pojedynczym atomem przebywanej materii. W tej teorii przyjmuje się, iż atom składa się z dużego dodatniego lub ujemnego ładunku skupionego w kuli o promieniu mniejszym niż  $3 \cdot 10^{-12}$  cm i otoczonego elektrycznością przeciwnego znaku, rozmieszczoną w pozostałej części atomu o promieniu około  $10^{-8}$  cm.”

Hans Geiger, Ernest Marsden,  
*Phil. Mag.* **25**, 604 (1913)



„Pewnego dnia przyszedł do mnie Geiger i powiedział: *Czy nie sądzi pan, że młody Marsden, którego uczę promieniotwórczości, powinien zacząć jakieś samodzielne badania?* Też tak sądziłem, więc odrzekłem: *Może pozwólmy mu sprawdzić czy jakieś cząstki alfa mogą ulegać rozpraszaniu pod dużym kątem?* Wynik okazał się zupełnie niespodziewany.”

Rutherford (1936)

„Rutherford zawsze oświadczał, że był to najbardziej zdumiewający wynik jaki znał i nawet wymyślił obrazowy przykład, który często powtarzał: *To było tak jakbyś wystrzelił piętnastocalowy pocisk do kawałka bibułki, a ten pocisk odbił się od bibułki i uderzył w ciebie.*”

D. Wilson w biografii Rutherforda

## Ewolucja poglądów Rutherforda o ładunku jądra atomu

„Zaczynam sądzić, że centralny rdzeń [atomu] jest naładowany ujemnie, ponieważ w przeciwnym wypadku prawo absorpcji promieni beta byłoby inne od tego, które obserwujemy.”

Rutherford w liście do W.H. Bragga, 9 II 1911 r.

„...atom składa się z centralnego punktowego ładunku elektrycznego...otoczonego przez równy co do wielkości ładunek przeciwnego znaku rozłożony równomiernie wewnątrz sfery...”

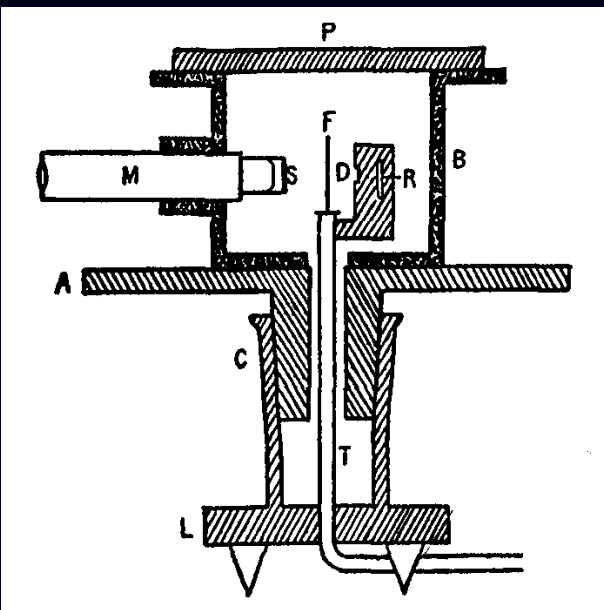
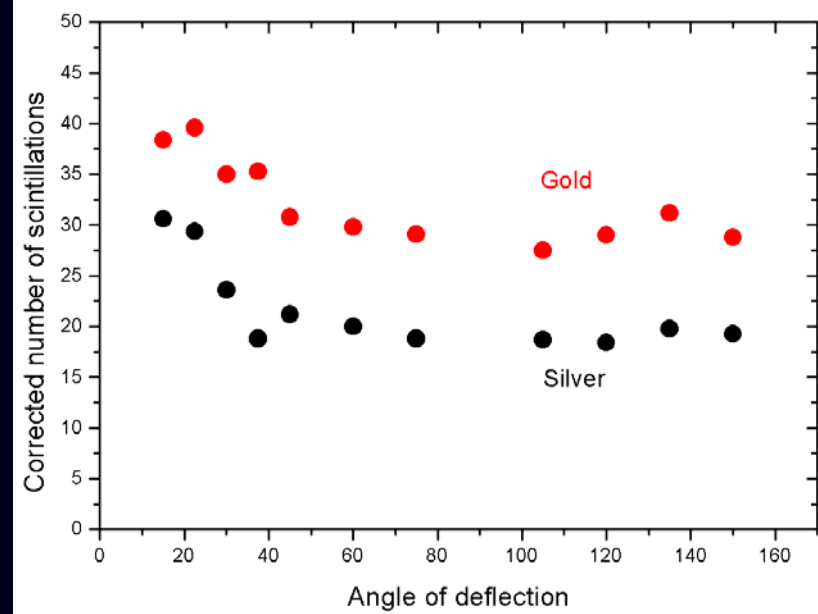
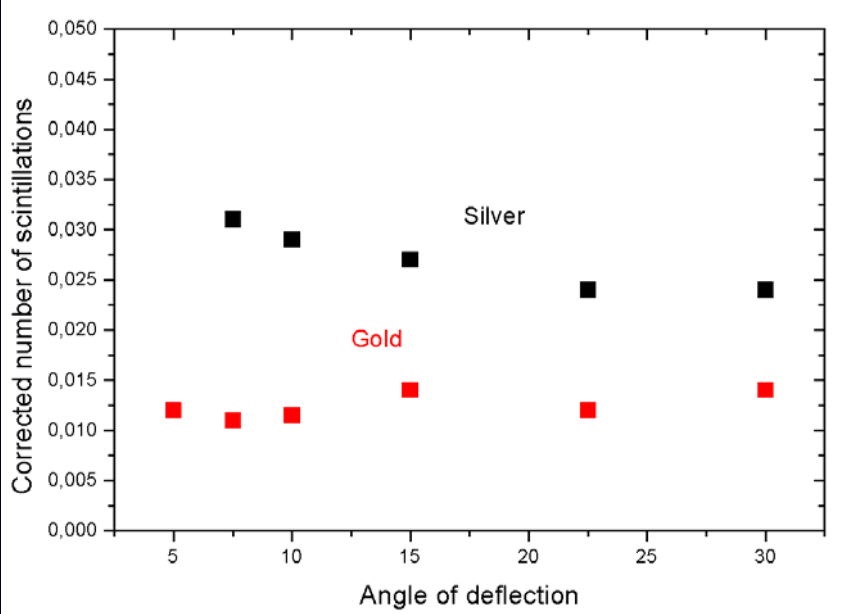
Abstrakt artykułu, 7 III 1911 r.

„...atom zawiera w środku ładunek  $\pm Ne$  otoczony ładunkiem  $\mp Ne$  rozłożonym równomiernie wewnątrz sfery o promieniu  $R$ ...”

Publikacja w Phil. Mag. 21, 669 (Maj 1911 r.)

„Zakładam, że atom składa się z dodatnio naładowanego jądra o małych rozmiarach.... Jądro jest otoczone przez elektrony, aby atom był jako całość obojętny elektrycznie...”

Publikacja w Phil. Mag. 27, 488 (Marzec 1914 r.)

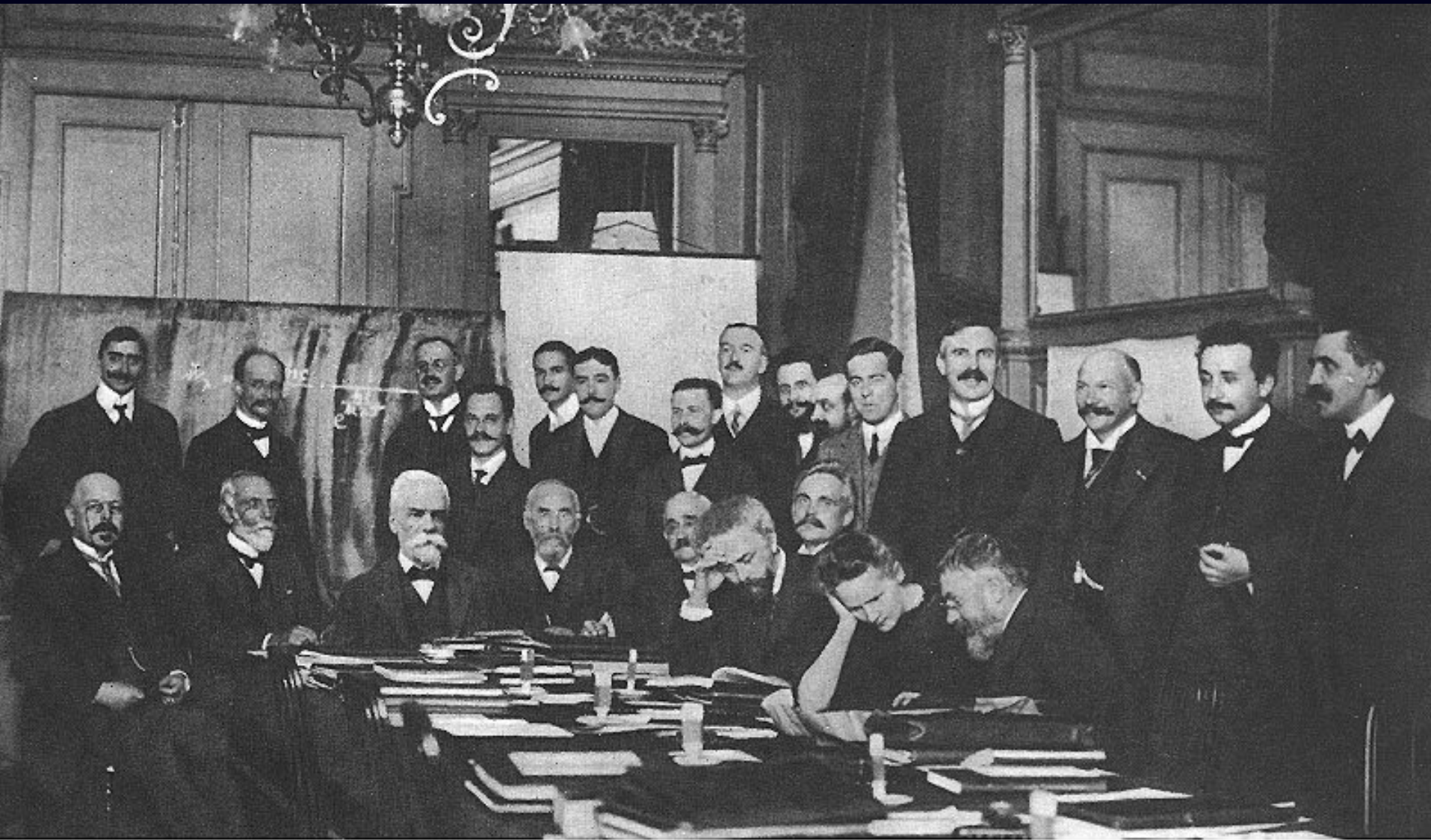


„...biorąc pod uwagę bardzo wielkie zmiany liczby rozpraszanych cząstek, od 1 do 250000, można uznać, że odchylenia od stałości stosunku są w granicach błędu doświadczalnego. Tak więc, eksperyment dowodzi, że liczba cząstek  $\alpha$  rozproszonych pod określonym kątem zmienia się jak  $\text{cosec}^4 \varphi/2$ .”

H. Geiger, E. Marsden, *Phil. Mag.* **25**, 604 (1913)



# Solvay Congress 1911



GOLDSCHMIDT  
NERNST

PLANCK  
BRILLOUIN

RUBENS  
SOMMERFELD  
SOLVAY

LINDEMANN  
M. DE BROGLIE  
LORENTZ

HASENOHRL  
HOSTELET  
KNUDSEN  
WARBURG  
PERRIN

HERZEN  
WIEN  
Madame CURIE

JEANS  
RUTHERFORD  
POINCARÉ

KAMERLINGH ONNES

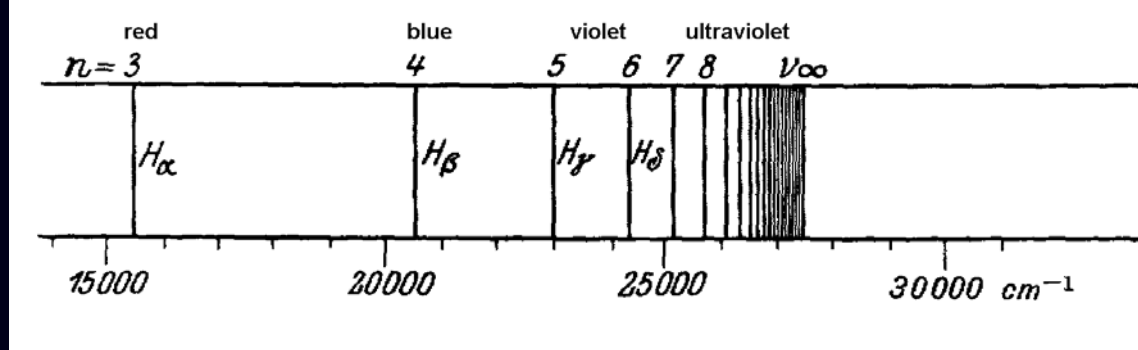
EINSTEIN

LANGEVIN

$$\lambda = bm^2/(m^2 - n^2)$$

$$n = 2, m = 3, 4, 5...$$

$$b = 3645,6$$



## Wzór Balmera (1885)

„Długości fali czterech pierwszych linii wodoru otrzymuje się mnożąc podstawową liczbę  $b = 3645,6$  kolejno przez współczynniki  $9/5$ ,  $4/3$ ,  $25/21$  i  $9/8$ . Na pierwszy rzut oka nie widać w tych współczynnikach regularności, ale jeśli się pomnoży licznik i mianownik w drugim i czwartym przez 4 to regularność stanie się oczywista i współczynniki będą miały mianowniki  $3^2$ ,  $4^2$ ,  $5^2$ ,  $6^2$ , a w mianowniku liczbę mniejszą o 4 od licznika...

Ostatecznie doszedłem do wzoru na współczynniki w bardziej ogólnej postaci:  $m^2/(m^2 - n^2)$ , gdzie  $m$  i  $n$  są liczbami całkowitymi.”



**Johann Balmer**

Ze wzoru	Pomiar	Różnica
H <sub>α</sub> 6562,08	6562,10	+0,02
H <sub>β</sub> 4860,8	4860,74	-0,06
H <sub>γ</sub> 4340	4340,1	+0,1
H <sub>δ</sub> 4101,3	4101,2	-0,1

Balmer, *Ann.d. Phys. u. Chem.* (1885)

LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN  
PHILOSOPHICAL MAGAZINE  
AND  
JOURNAL OF SCIENCE.

[SIXTH SERIES.]

JULY 1913.

I. *On the Constitution of Atoms and Molecules.*  
By N. BOHR, Dr. phil. Copenhagen\*.

*Introduction.*

IN order to explain the results of experiments on scattering of  $\alpha$  rays by matter Prof. Rutherford† has given a theory of the structure of atoms. According to this theory, the atoms consist of a positively charged nucleus surrounded by a system of electrons kept together by attractive forces from the nucleus; the total negative charge of the electrons is equal to the positive charge of the nucleus. Further, the nucleus is assumed to be the seat of the essential part of the mass of the atom, and to have linear dimensions exceedingly small compared with the linear dimensions of the whole atom. The number of electrons in an atom is deduced to be approximately equal to half the atomic weight. Great interest is to be attributed to this atom-model; for, as Rutherford has shown, the assumption of the existence of nuclei, as those in question, seems to be necessary in order to account for the results of the experiments on large angle scattering of the  $\alpha$  rays‡.

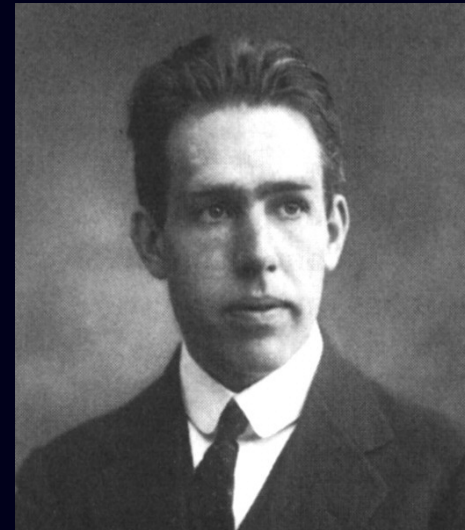
In an attempt to explain some of the properties of matter on the basis of this atom-model we meet, however, with difficulties of a serious nature arising from the apparent

\* Communicated by Prof. E. Rutherford, F.R.S.

† E. Rutherford, *Phil. Mag.* xxi. p. 669 (1911).

‡ See also Geiger and Marsden, *Phil. Mag.* April 1913.

# Planetary model atomu Bohra



Niels Bohr w 1917 roku

Bohr znalazł wzór bardzo dobrze opisujący serię Balmera,

$$\lambda = hm^2/(m^2 - n^2) \quad n = 2, m = 3, 4, 5\dots$$

serię Paschena,

$$\lambda = hm^2/(m^2 - n^2) \quad n = 3, m = 4, 5, 6\dots$$

i przewidział istnienie serii leżącej w nadfiolecie,

$$\lambda = hm^2/(m^2 - n^2) \quad n = 1, m = 2, 3, 4,\dots$$

którą znalazł w 1914 r. Theodore Lyman

Bohr wyjaśnił także serię linii widmowych obserwowanych w widmie gwiazdy  $\zeta$  Puppis udowadniając, że pochodzi od zjonizowanego helu

„Do najnowszych, zdaje się, czasów wszyscy, którzy śledzili rozwój teorii elektronowej, przyjmowali milcząco, że masa atomu jest sumą mas zawartych w nim elektronów, że więc liczba  $P$  elektronów w atomie wyraża się przez  $P = AM/m$ , gdzie  $M$  jest masą atomu wodoru,  $A$  ciężarem atomowym rozważanego pierwiastka,  $m$  zaś masą elektronu...

Przy obecnym stanie wiedzy naszej nie można osiągnąć żadnego określonego wyniku co do liczby wszystkich elektronów zawartych w jakimkolwiek atomie, lecz przypuszczenie, że ...masa atomu jest sumą mas zawartych w nim elektronów, tyle ma uroku, iż w braku stanowczych dowodów przeciwnych warto - zdaniem naszym - przyjąć je choćby prowizorycznie...”

Norman R. Campbell, *Spółczesna teoria elektryczności*, Warszawa 1913  
(oryginał angielski z 1907 r.)

# Układ periodyczny według Rydberga (1906)

Die Ordnungszahlen der Grundstoffe.

	O	I	II	III
1	2 He = 4  10 Ne = 20	1 H = 1,008  3 Li = 7,03  11 Na = 23,05	4 B = 9,1  12 Mg = 24,36	5 Be = 11  13 Al = 27,1
2	18 A = 39,9  27 Ni = 58,7	19 K = 39,15  29 Cu = 63,6	20 Ca = 40,1  30 Zn = 65,4	21 Sc = 44,1  31 Ga = 70
3	36 Kr = 81,8  45 Rh = 103,0	37 Rb = 85,5  47 Ag = 107,88	38 Sr = 87,6  48 Cd = 112,4	39 Y = 89,0  49 In = 115
4	54 X = 128  63 ---	55 Cs = 132,9  65 ---	56 Ba = 137,4  66 ---	57 La = 138,9  67 ---
5	72 ---  81 Ir = 193,0	73 ---  83 Au = 197,2	74 ---  84 Hg = 200,0	75 ---  85 Tl = 204,1
6	90 ---	91 ---	92 Ra = 225	93 ---

IV	V	VI	VII	VIII
6 C = 12,00  14 Si = 28,4	7 N = 14,04  15 P = 31,0	8 O = 16,00  16 S = 32,06	9 F = 19  17 Cl = 35,45	
22 Ti = 48,1  32 Ge = 72,5	23 V = 51,2  33 As = 75,0	24 Cr = 52,1  34 Se = 79,2	25 Mn = 55,0  35 Br = 79,96	26 Fe = 55,9
40 Zr = 90,6  50 Sn = 119,0	41 Nb = 94  51 Sb = 120,2	42 Mo = 96,0  52 Te = 127,6	43 ---  53 J = 129,97	44 Ru = 101,7
58 Ce = 140,25  68 ---	59 ---  69 ---	60 ---  70 ---	61 ---  71 ---	62 ---
76 ---  86 Pb = 206,9	77 Ta = 183  87 Bi = 208,5	78 W = 184,0  88 ---	79 ---  89 ---	80 Os = 191
94 Th = 232,5	95 ---	96 U = 238,5	---	---

# „Alfowy” układ periodyczny pierwiastków Van den Broeka (1907)

	VII	0	I	II	III	IV	V	VI
1	2 (α)	4 He 4	6 Li 7,03	8 Be 9,1	10 B 11	12 C 12	14 N 14,04	16 O 16
2	18 F 19	20 Ne 20	22 Na 23,05	24 Mg 24,36	26 Al 27,1	28 Si 28,4	30 P 31	32 S 32,06
3	34 Cl 35,45	36 Ar 39,9	38 K 39,15	40 Ca 40,1	42 Sc 44,1	44 Ti 48,1	46 V 51,2	48 Cr 52,1
4	50 Mn 55	52	54	56 Fe 55,9	58 Co 59	60 Ni 58,7	62	64
5	66	68	70 Cu 68,6	72 Zn 65,5	74 Ga 70	76 Ge 72,5	78 As 75	80 Se 79,2
6	82 Br 79,96	84 Kr 81,8	86 Rb 85,5	88 Sr 87,6	90 Y 89	92 Zr 90,6	94 Nb 94	96 Mo 96
7	98	100	102	104 Ru 101,7	106 Rh 108	108 Pd 106,5	110	112
8	114	116	118 Ag 107,98	120 Cd 112,4	122 Jn 115	124 Sn 119	126 Sb 120,2	128 Te 127,6
9	130 J 126,97	132 Xe 128	134 Cs 132,9	136 Ba 137,4	138 La 138,9	140 Ce 140,25	142 Nd 143,6	144 Pr 140,5
10	146	148	150 Sa 150,8	152	154 Gd 156	156	158 Tb 160	160
11	162	164	166 Er 166	168 Tu 171	170 Yb 173	172	174 Ta 183	176 W 184
12	178	180	182	184 Os 191	186 Ir 193	188 Pt 194,8	190	192
13	194	196	198 Au 197,2	200 Hg 200	202 Tl 204,1	204 Pb 206,9	206 Bi 208,5	208
14	210	212	214	216	218	220	222	224
15	226	228	230	232 Ra 225	234	236 Th 232,5	238	240 U 238,5

2	<i>He</i>	4	4
3	<i>Li</i>	7	6,9
4	<i>Be</i>	8	9,1
5	<i>B</i>	11	11,0
6	<i>C</i>	12	12,0
7	<i>N</i>	15	14,0
8	<i>O</i>	16	16,0
9	<i>F</i>	19	19,0
10	<i>Ne</i>	20	20,2
11	<i>Na</i>	23	23,0
12	<i>Mg</i>	24	24,3
13	<i>Al</i>	27	27,1
14	<i>Si</i>	28	28,3
15	<i>P</i>	31	31,0
16	<i>S</i>	32	32,1
17	<i>Cl</i>	35	35,5
18	—	(36)	—
19	<i>Ar</i>	39	39,9
20	<i>K</i>	40	39,1
21	<i>Ca</i>	43	40,1
22	<i>Sc</i>	44	44,1
23	—	(47)	—
24	<i>Ti</i>	48	48,1
25	<i>V</i>	51	51,0

26	<i>Cr</i>	52	52,0
27	<i>Mn</i>	55	54,9
28	<i>Fe</i>	56	55,8
29	<i>Co</i>	59	59,0
30	<i>Ni</i>	60	58,7
31	<i>Cu</i>	63	63,6
32	<i>Zn</i>	64	65,4
33	<i>Ga</i>	67	69,9
34	<i>Ge</i>	68	72,5
35	<i>As</i>	71	75,0
36	<i>Se</i>	72	79,2
37	<i>Br</i>	75	79,9
38	—	(76)	—
39	—	(79)	—
40	—	(80)	—
41	—	(83)	—
42	<i>Kr</i>	84	82,9
43	<i>Rb</i>	87	85,45
44	<i>Sr</i>	88	87,6
45	<i>Y</i>	91	89,0
46	—	(92)	—
47	<i>Zr</i>	95	90,6
48	<i>Nb</i>	96	93,5

49	<i>Mo</i>	99	96,0
50	—	(100)	—
51	<i>Ru</i>	103	101,7
52	<i>Rh</i>	104	102,9
53	<i>Pd</i>	107	106,7
54	<i>Ag</i>	108	107,9
55	<i>Cd</i>	111	112,4
56	<i>In</i>	112	114,8
57	<i>Sn</i>	115	119,0
58	<i>Sb</i>	116	120,2
59	<i>Te</i>	119	127,5
60	<i>I</i>	120	126,9
61	—	(123)	—
62	—	(124)	—
63	—	(127)	—
64	—	(128)	—
65	<i>Xe</i>	131	130,2
66	<i>Cs</i>	132	132,8
67	<i>Ba</i>	135	137,4
68	26 seltene Erden		
93	u. El. d. akt. Reihe		
94	<i>Ta</i>	188	181,5
95	<i>W</i>	191	184,0
96	—	(192)	—

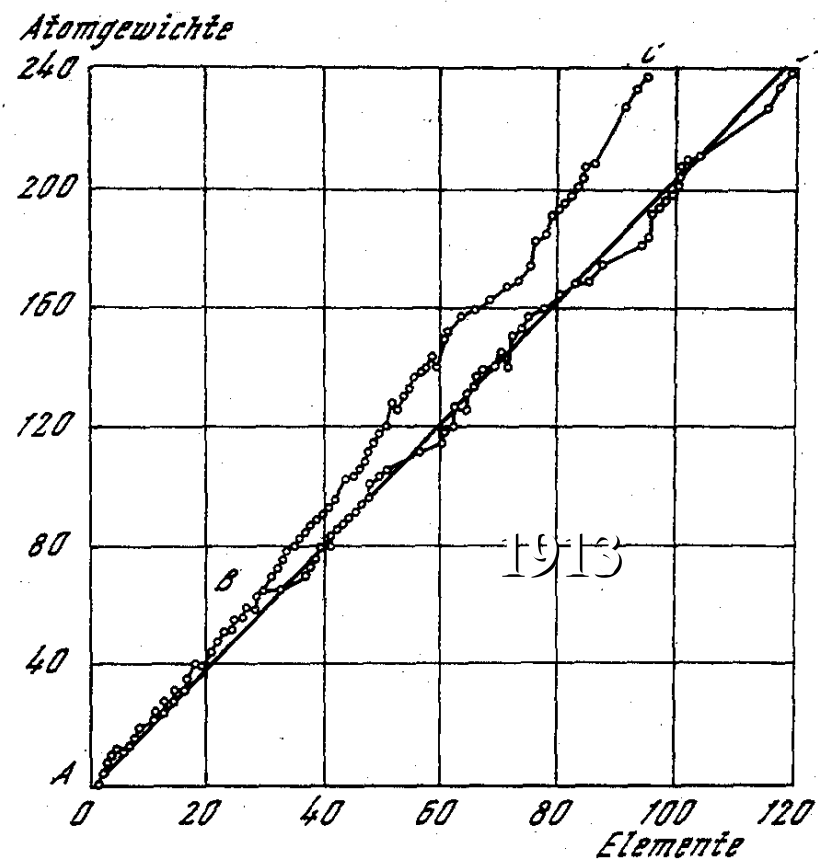
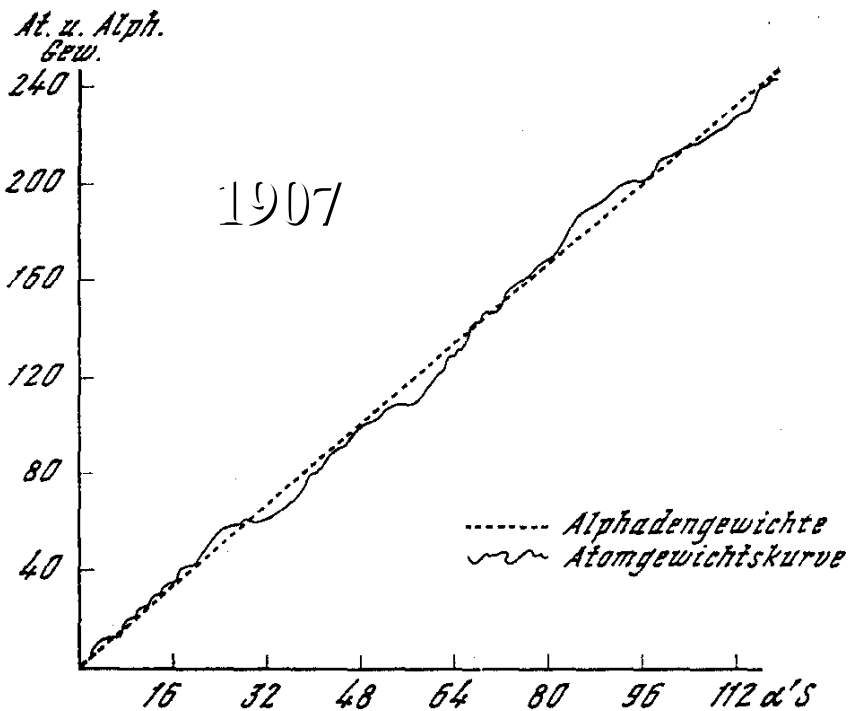
97	<i>Os</i>	195	190,9
98	<i>Ir</i>	196	193,1
99	<i>Pt</i>	199	195,2
100	<i>Au</i>	200	197,2
101	<i>Hg</i>	203	200,6
102	<i>Tl</i>	204	204,0
103	<i>Pb</i>	207	207,1
104	<i>Bi</i>	208	208,0
105	<i>RaF</i>	211	210,5
106	<i>ThC</i>	212	212,4
107	<i>RaC</i>	215	214,5
108	<i>ThA</i>	216	216,4
109	<i>RaA</i>	219	218,5
110	<i>ThEm</i>	220	220,4
111	<i>RaEm</i>	223	222,5
112	<i>ThX</i>	224	224,4
113	<i>Ra</i>	227	226,4
114	<i>Radth</i>	228	228,4
115	<i>Io</i>	231	230,5
116	<i>Th</i>	232	232,4
117	<i>UH</i>	235	234,5
118	<i>U</i>	236	238,5

Differenz  $8503,4 - 8485 = 18,4 = 0,22$  Proz.

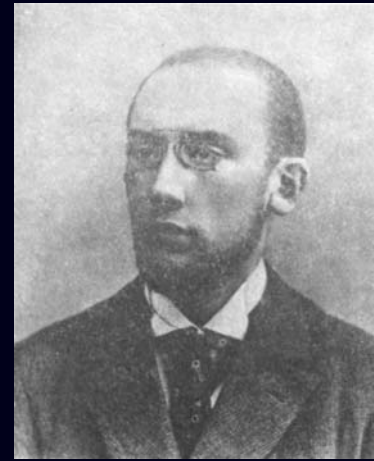
Układ periodyczny pierwiastków  
według propozycji Van den Broeka ze stycznia 1913 r.



# Van den Broek o układzie periodycznym pierwiastków



# Ładunek wewnątrzatomowy



„W poprzednim liście do Nature (10 VII 1911, s. 78) zaproponowana została hipoteza, że ciężar atomowy jest równy w przybliżeniu podwojonemu ładunkowi wewnątrzatomowemu....Ładunki [jąder atomowych] są znane tylko w przybliżeniu (przypuszczalnie z dokładnością do 20 procent), a liczba porządkowa ostatniego pierwiastka U w szeregu [periodycznym] nie jest nawet w przybliżeniu równa połowie jego ciężaru atomowego. Tak więc, albo liczba pierwiastków w układzie Mendelejewa nie jest poprawna (taka możliwość była rozważana w poprzednim liście), albo ładunek wewnątrzatomowy pierwiastków w końcu układu jest dużo mniejszy niż wydedukowany z doświadczeń...”

Antonius Van den Broek

*Nature* **92**, 372 (1913)

# Ładunek wewnętrzny



„Według Rutherforda iloraz rozpraszania cząstek  $\alpha$  na jeden atom do kwadratu jego ładunku musi być stały. Geiger i Marsden znaleźli jednak, przyjmując proporcjonalność ładunku jądra do ciężaru atomowego, wartości nie stałe, lecz wykazujące systematyczne odchylenia [od średniej] od 3,885 dla Cu do 3,25 dla Au. Jeżeli w tym stosunku zamiast ciężaru atomowego  $A$  weźmie się liczbę porządkową  $M$  pierwiastka w układzie Mendelejewa, to otrzymujemy rzeczywiście wartość stałą  $18,7 \pm 0,3$ .

Zatem proponowana [przez Rutherforda] hipoteza dobrze tłumaczy szereg Mendelejewa, ale ładunek jądra nie równa się połowie ciężaru atomowego. Jeżeli masa atomu składa się w przeważającej części z cząstek  $\alpha$ , to jądro musi także zawierać elektrony, aby skompensowany został ten dodatkowy ładunek...”

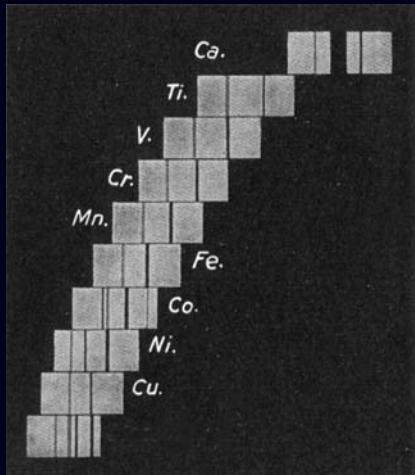
Antonius Van den Broek

*Nature* **92**, 372 (1913)

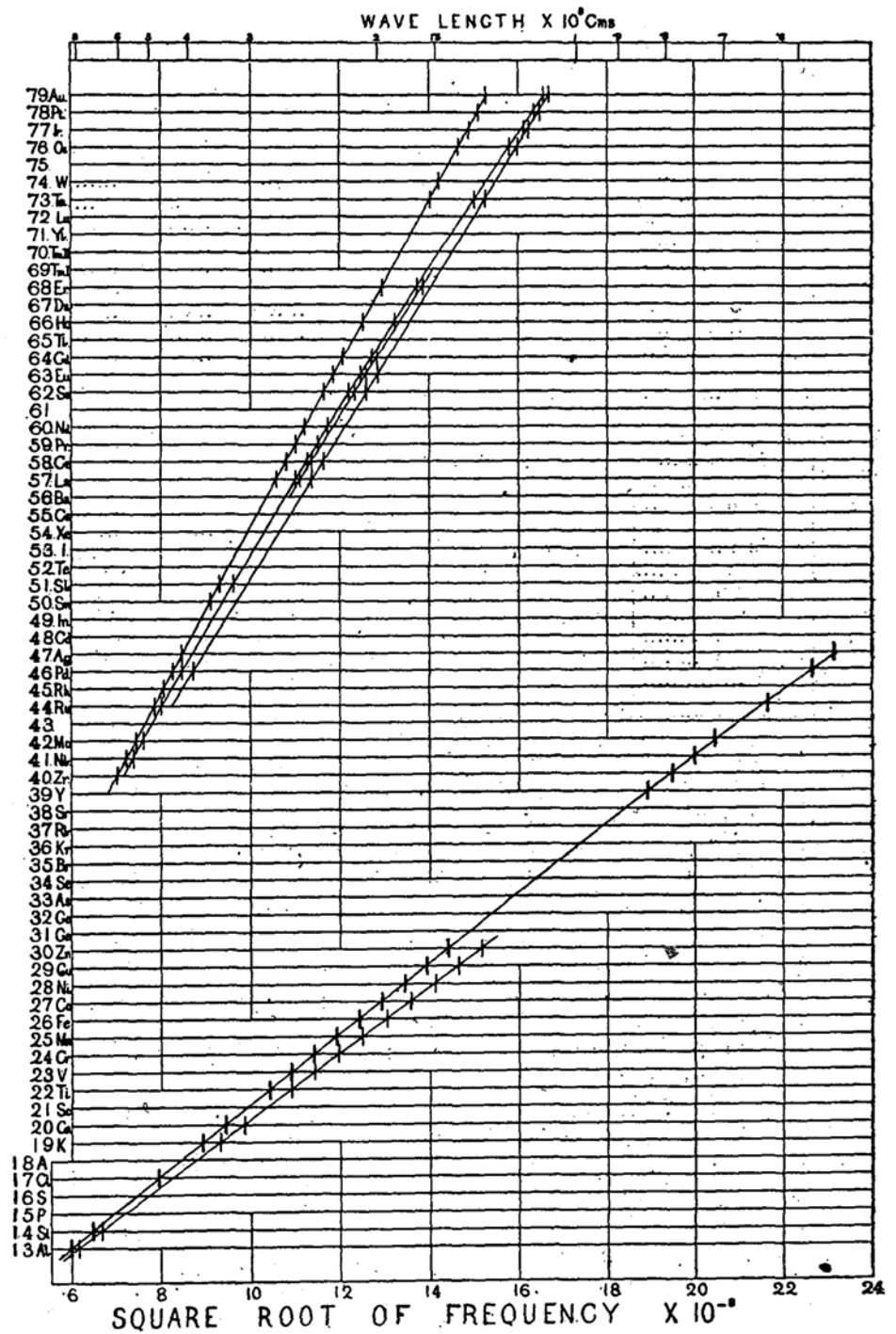
# Henry Moseley (1887-1915)



$$\nu = a (Z - \sigma)^2$$



H. G. J. Moseley,  
*Phil. Mag.* 26, 1024 (1913)



„Mamy tu dowód, że w atomie istnieje fundamentalna wielkość, która przyrasta o jednakowe wartości przy przechodzeniu od jednego pierwiastka do następnego. Ta wielkość może być jedynie ładunkiem centralnego dodatniego jądra, na którego istnienie mamy już ostateczny dowód. Rutherford wykazał, na podstawie rozpraszania cząstek  $\alpha$  przez materię, że to jądro posiada ładunek dodatni w przybliżeniu równy ładunkowi  $A/2$  elektronów, gdzie  $A$  oznacza liczbę atomową. Badając rozpraszanie promieni X przez materię Barkla wykazał, że liczba elektronów w atomie wynosi z grubsza  $A/2$ , co oznacza to samo dla atomów neutralnych elektrycznie. Ciężary atomowe rosną średnio o około 2 jednostki między kolejnymi pierwiastkami, co silnie sugeruje, że  $N$  rośnie zawsze o jednostkę przy przejściu między atomami kolejnych pierwiastków. Zatem z doświadczenia wynika, że  $N$  jest tym samym, co liczba porządkowa pierwiastka w układzie periodycznym... Tę teorię zapoczątkował Broek, a następnie stosował Bohr.”

H. G. J. Moseley, *Phil. Mag.* **26**, 1024 (1913)

„Podana przez Van den Broeka sugestia, że ładunek jądra jest równy liczbie atomowej, a nie połowie liczby masowej, wydaje mi się bardzo obiecująca. Tę ideę wykorzystywał już Bohr w swej teorii budowy atomów. Najsilniejszy i najbardziej przekonujący dowód prawdziwości tej hipotezy znajduje się w artykule Moseleya w *Philosophical Magazine* z tego miesiąca. Wykazuje on tam, że częstości promieniowania X wielu pierwiastków można prosto wyjaśnić, jeżeli liczba jednostek ładunku jądra jest równa liczbie atomowej. Wydaje się, że ładunek jądra jest fundamentalną stałą, która wyznacza fizyczne i chemiczne właściwości atomu, podczas gdy ciężar atomowy, chociaż w przybliżeniu śledzi wzrost liczby atomowej, jest przypuszczalnie jej skomplikowaną funkcją, zależną od szczegółów struktury jądra.”

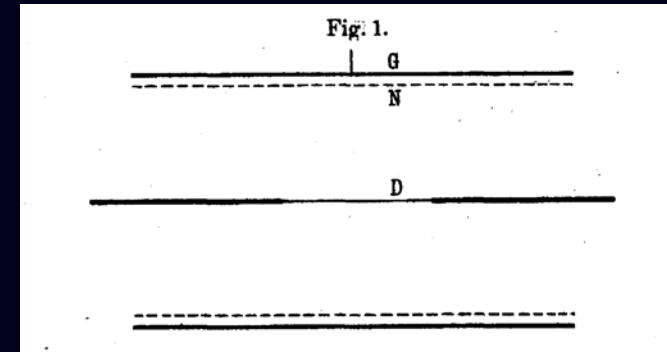
Rutherford, *Nature* 92, 423 (11 XII 1913)



## Doświadczenie Francka-Hertza

**James Franck**      **Gustav Hertz**

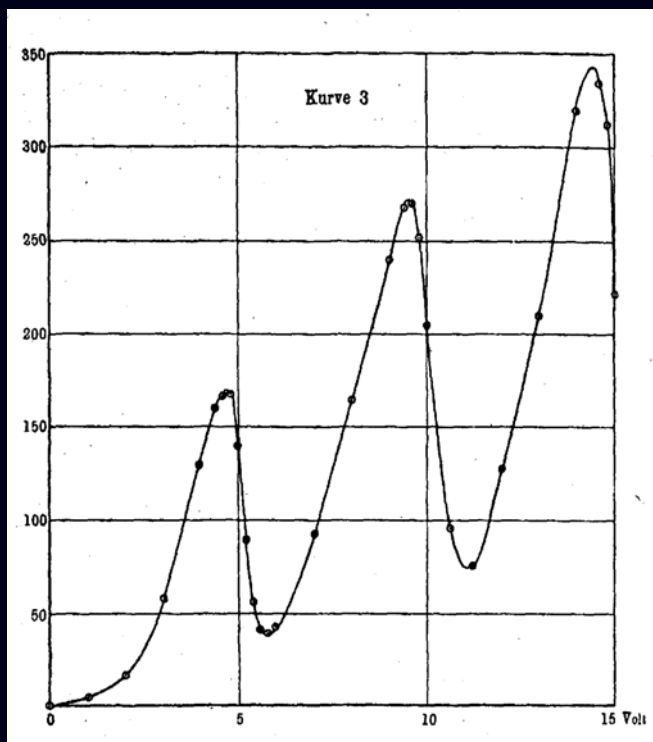
„Schemat aparatury użytej w tych badaniach i w ostatecznym pomiarze potencjału jonizacji jest pokazany na rys.1. D jest drutem platynowym, którego cienka część środkowa może być rozżarzana przez prąd. Siatka N z cienkiego drutu platynowego ma promień 4 cm i otacza D, natomiast G to cylindryczna folia platynowa oddalona od N o 1 do 2 mm. Została ona uziemiona przez galwanometr. Pierścienie folii platynowej zostały umieszczone w osłonie szklanej w celu uniemożliwienia jakiegokolwiek przepływu prądu od galwanometru od drutów pod napięciem. Poza szkłem i platyną przyrząd nasz nie zawierał części stałych. Wszystkie kontakty zostały zatopione w szkłe... Okazało się, że elektrony zostają odbite od atomów rtęci bez straty energii, jeśli ich prędkość odpowiada spadkowi [potencjału] mniejszemu niż 5 woltów...”



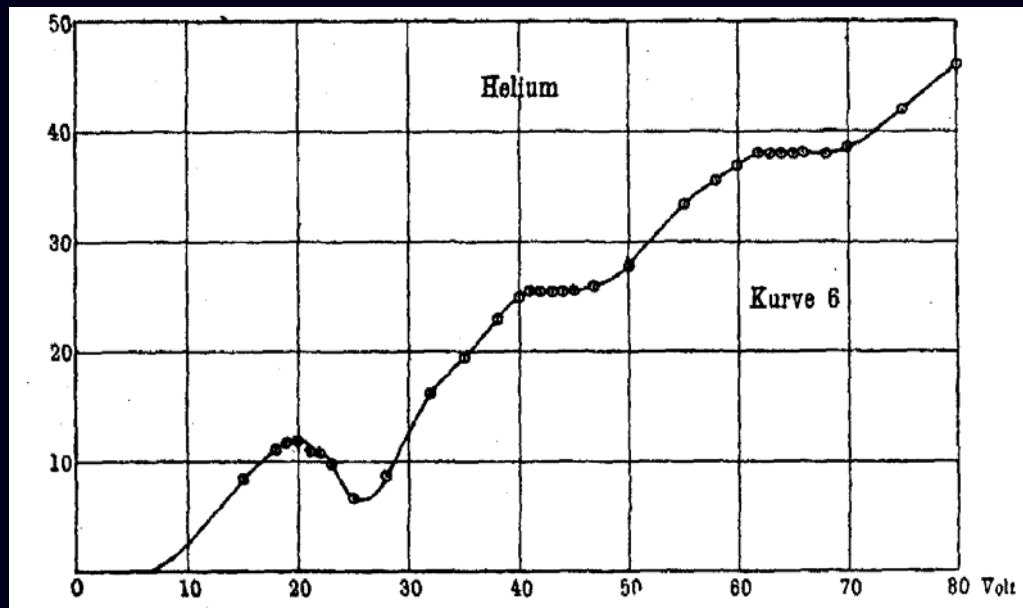
„Zderzenia między elektronami i cząsteczkami pary rtęci i potencjał jonizacji tych cząsteczek”,  
*Verhand. Deutsch. Physik. Ges.*, **16**, 457 (1914)



# Doświadczenie Francka - Hertza



Wyniki otrzymane dla rtęci



Wyniki otrzymane dla helu

„...Wartości odległości między kolejnymi maksimami leżą między 4,8 i 5,0 woltów, tak więc możemy przyjąć, że potencjał jonizacji pary rtęci wynosi 4,9 woltów...”



**James Franck**



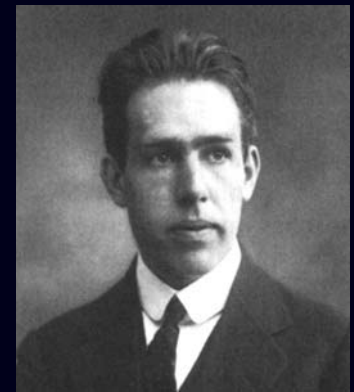
**Gustav Hertz**

„...nie można zakładać, jak to niedawno uczynił Bohr, że wiązki 20,5 woltów w helu i 4,9 woltów w rtęci wywołują tylko wtórną jonizację, taką, że promieniowanie krótkofalowe [wynikające ze zderzeń nieelastycznych] powoduje efekt fotoelektryczny na elektrodach, lub na obecnych w gazie zanieczyszczeniach.”

James Franck, Gustav Hertz (1916)

„Franck i Hertz zakładają, że 4,9 woltów odpowiada energii potrzebnej do oddzielenia elektronu od atomu rtęci, wydaje się jednak, że ich eksperymenty mogą być zgodne z założeniem, że napięcie to odpowiada tylko przejściu ze stanu normalnego do innego stanu stacjonarnego neutralnego atomu...”

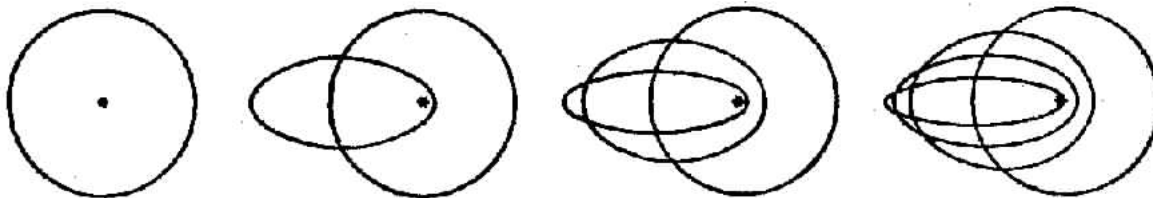
Niels Bohr (1915)





**Arnold Sommerfeld**  
(1868-1951)  
**Niels Bohr**  
(1885-1962)

Sommerfeld rozszerzył model Bohra wprowadzając dwie dodatkowe liczby kwantowe i wyjaśniając strukturę subtelną linii  $H_{\alpha}$  [*Ann. d. Physik* **51**, 94, 125 (1916)]



# Wojciech (Adalbert) Rubinowicz

(1918) reguły wyboru  $\Delta l = \pm 1$



We współczesnej  
terminologii:  
była to pierwsza ocena  
spinu fotonu

Wojciech Rubinowicz  
(1889-1974)

*Bohrsche Frequenzbedienung und Erhaltung des Impulsmomentum,*  
Phys. Z. **19**, 441-465, 465-474 (1918).

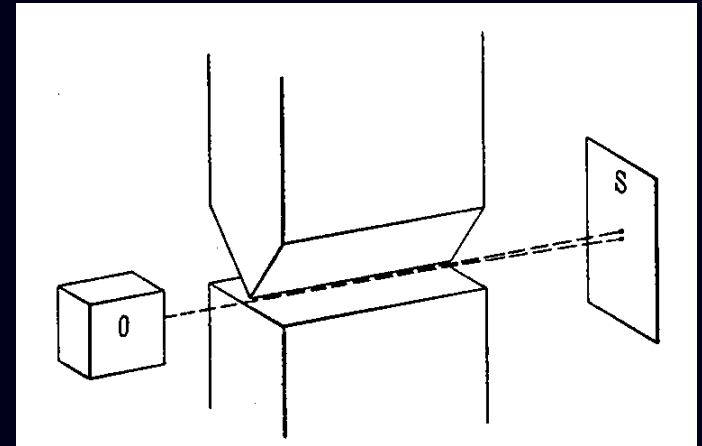
# Eksperyment Sterna-Gerlacha (1921)



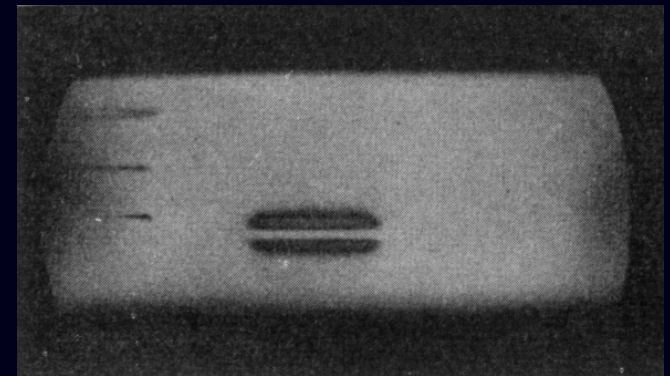
**Otto Stern (1888 - 1969)**



**Walther Gerlach (1889 - 1979)**



**Schemat eksperymentu**



**Wyniki**

„Hipoteza kwantów światła...nie może wyjaśnić natury promieniowania.”

**Bohr, Nobel lecture (1922)**

„Nie można podać ogólnego opisu zjawisk, w którym byłaby zachowana stosowalność praw zachowania energii i pędu w ich klasycznym sformułowaniu... zachowanie energii, zdefiniowane przez pojęcia klasyczne, wydaje się być od razu wykluczone.”

**Bohr (1923)**

„Rezygnujemy z wszelkich prób związku przyczynowego między przejściami w odległych od siebie atomach, a zwłaszcza ze stosowania zasad zachowania energii i pędu, tak charakterystycznych dla teorii klasycznych... Nie tylko zachowanie energii... lecz także zachowanie pędu prowadzą się do praw statystycznych.”

**Bohr, Kramers i Slater (1924)**

W 1925 r. eksperymenty licznikowe (koincydencyjne) (**Bothe i Geiger**) oraz fotografie z komory Wilsona (**Compton i Simon**) potwierdziły, że zachowanie energii i pędu pozostaje słuszne w indywidualnych oddziaływaniach.

„Trzeba szybko wydać honorowy pogrzeb dla naszej rewolucyjnej idei” (**Bohr, 1925**)

„...tylko krok prowadzi wprost do hipotezy ‘kwantów światła’, według której promieniowanie składa się z niewidzialnych paczek czy ‘atomów’ światła, które poruszają się w przestrzeni jak kule ze strzelby, aż natrafią na tarczę materialną, w której zostaną całkowicie pochłonięte. Ten pogląd został wysunięty w 1905 roku przez Einsteina jako hipoteza robocza, która umożliwiła mu wyprowadzenie poprawnego wzoru dla zjawiska fotoelektrycznego.

Mimo tego sukcesu wydaje się zupełnie pewne, że ten pogląd może być traktowany wyłącznie jako hipoteza robocza, a nie jako odzwierciedlenie rzeczywistości. Przeciw założeniu, że promieniowanie biegnie w postaci niepodzielnych kwantów przemawiają praktycznie wszystkie eksperymentalne dowody falowej teorii światła, zwłaszcza te, które dotyczą zjawisk dyfrakcji i interferencji...

Wydaje się, że fizycy są zgodni co do tego, że tej teorii nie można traktować jako przedstawienie rzeczywistości fizycznej.”

**Jeans, *The Dynamical Theory of Gases*,  
4<sup>th</sup> ed., str. 378 (1925)**



# Kręta droga Comptona do właściwego odkrycia

W 1917 r. bezskutecznie starał się znaleźć wpływ pola magnetycznego na rozpraszanie promieni na kryształach magnetytu

Potem przeczytał artykuł Barkli, który zmierzył wartość współczynnika absorpcji masowej promieni X w aluminium

$$\mu/\rho = 0.153 \text{ cm}^2/\text{g}$$

Współczynnik absorpcji masowej  $\mu/\rho$  jest sumą wyrazów  $\tau/\rho$  (fluorescencja) i  $\sigma/\rho$  (rozpraszanie)

Z klasycznej teorii Thomsona rozpraszania promieni X wynika, że  $\sigma/\rho = 0.188 \text{ cm}^2/\text{g}$  dla aluminium. Według tej teorii długość fali promieniowania nie ulega zmianie w wyniku rozpraszania

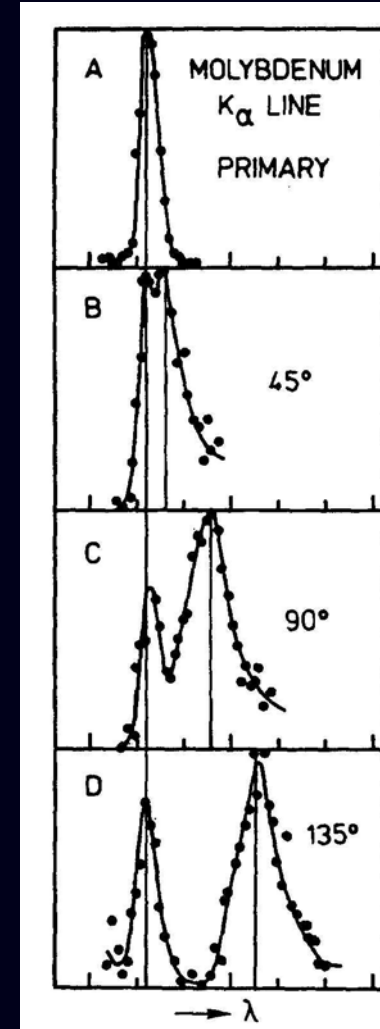
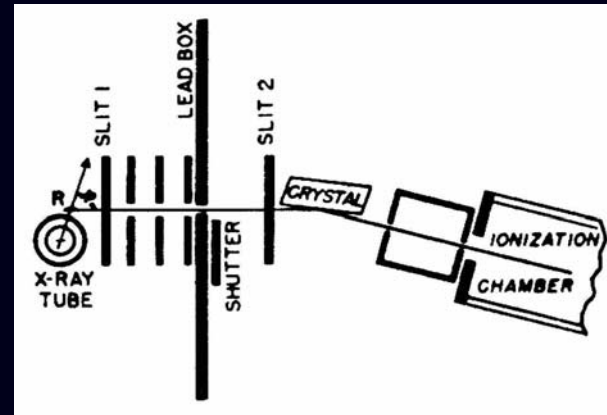
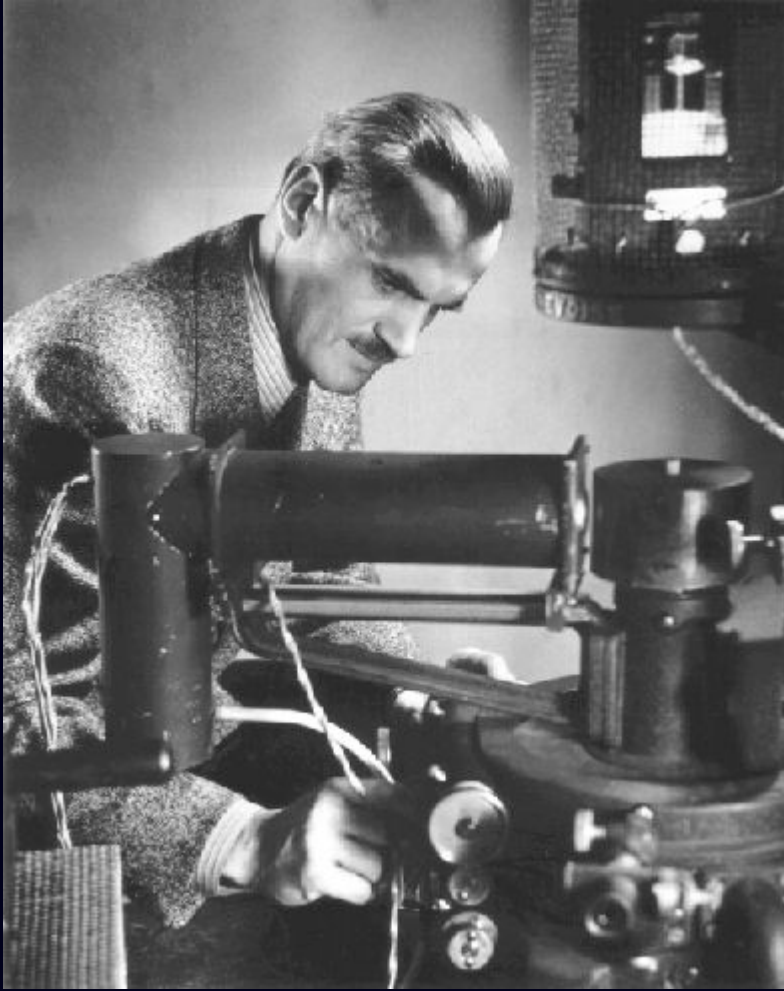
Compton doszedł do wniosku, że promienie X muszą ulegać dyfrakcji na elektronach. Aby wyjaśnić wartości mierzone dla  $\lambda = 10^{-9} \text{ cm}$  musiał przyjąć założenie, że elektron ma postać bardzo cienkiej powłoki kulistej elektryczności o promieniu  $2 \cdot 10^{-10} \text{ cm}$

*„an electron as big as a balloon !”* - Rutherford

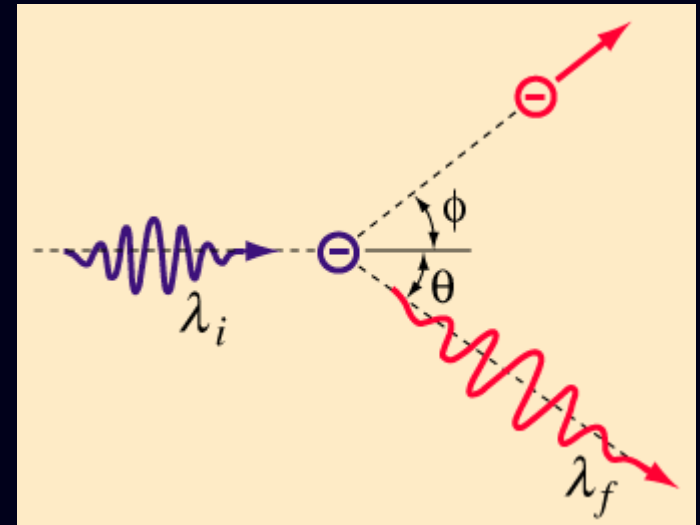
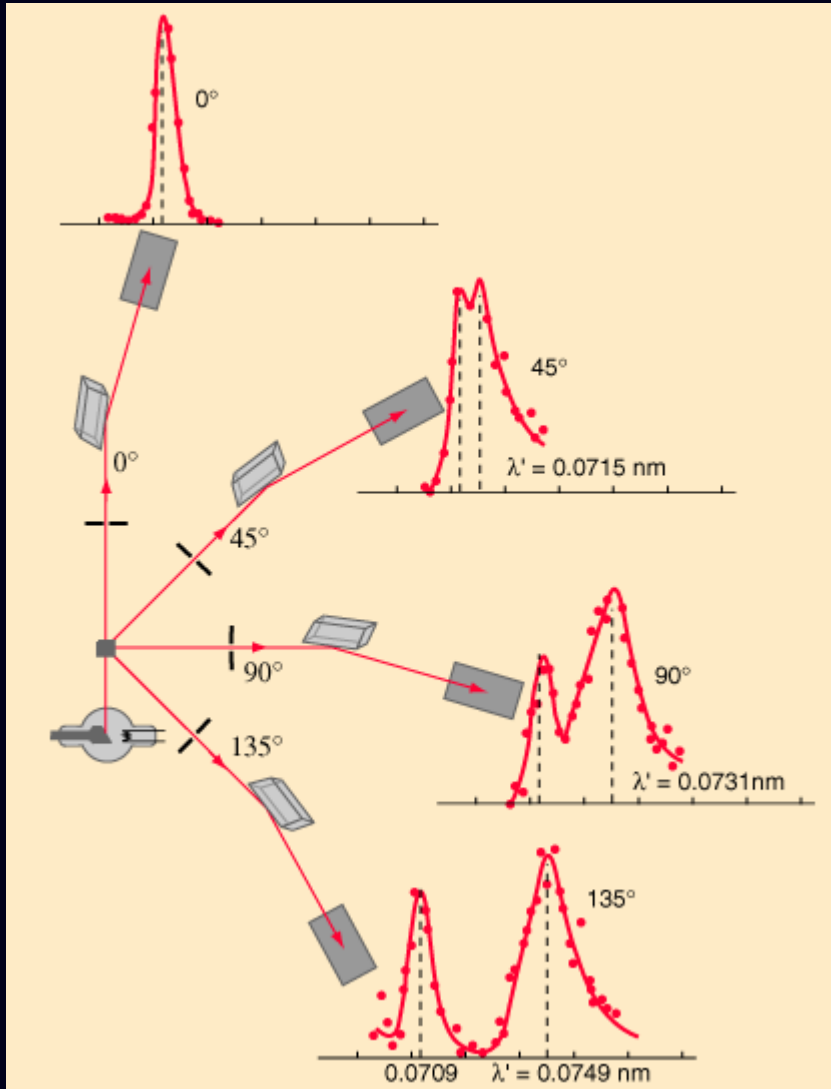


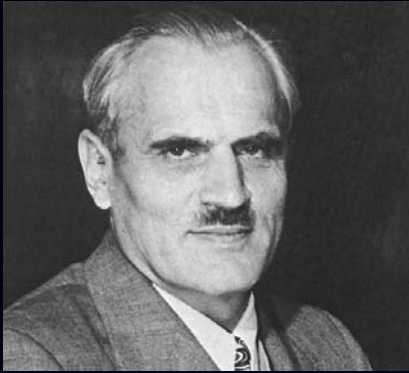
# Arthur Holly Compton

(1892 - 1962)

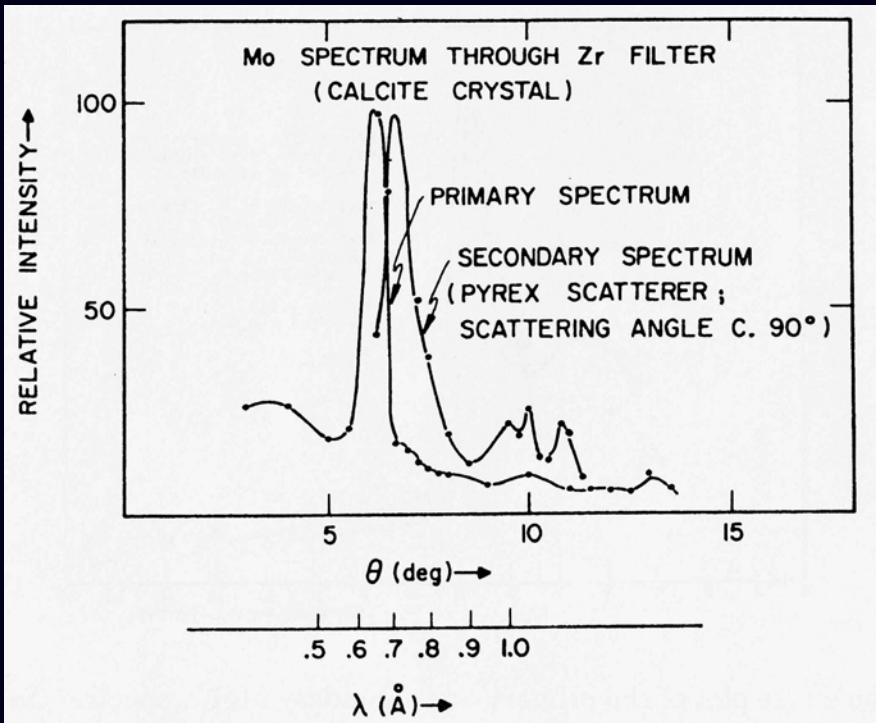


# Zjawisko Comptona





# Arthur Holly Compton (1892-1962)

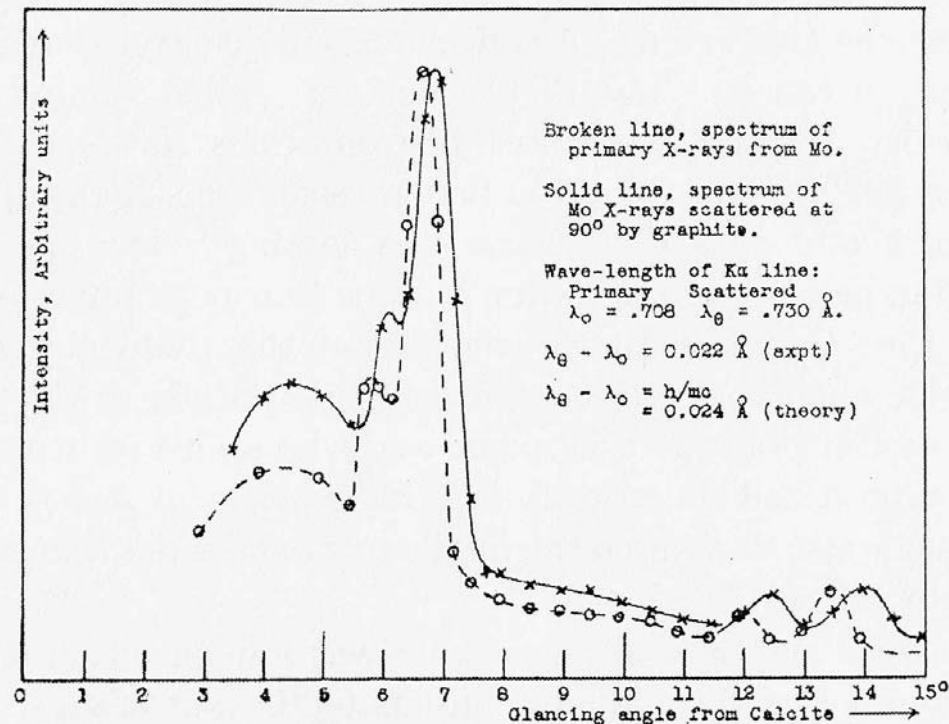
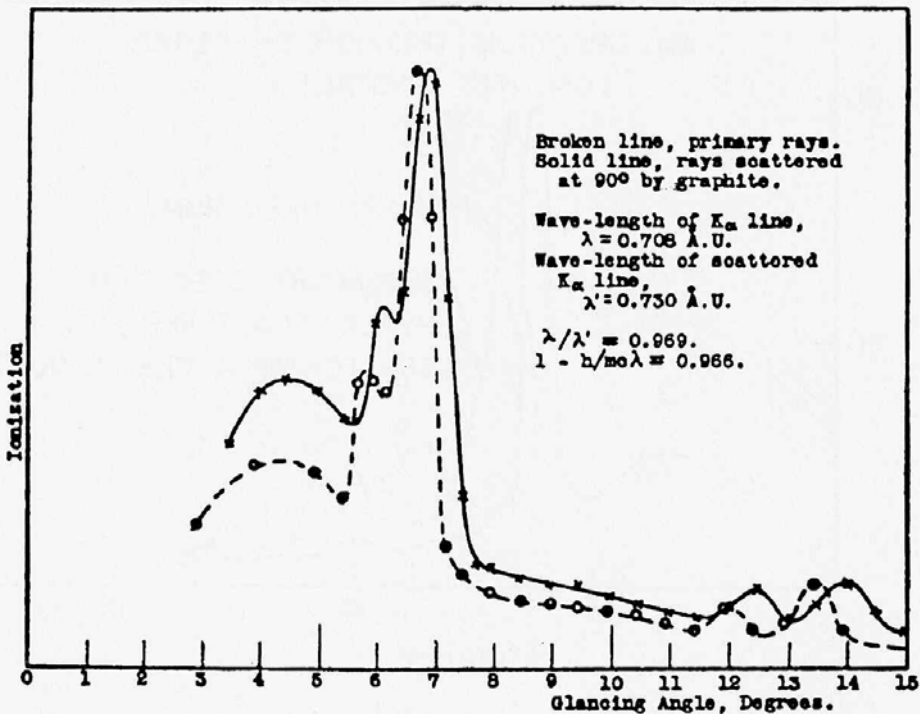


Interpretacja jako efekt Dopplera  
 $\lambda/\lambda' = 1 - v/c = 1 - (2hv/mc^2)^{1/2} =$   
 $= 0.74$

gdzie  $v$  wyznaczone przez  
„zachowanie energii”

$$hv = mv^2/2$$

Wyniki Comptona [(*Phys. Rev.* **19**, 267 (1922))]  
(podane w postaci wykresu przez Stuewera)

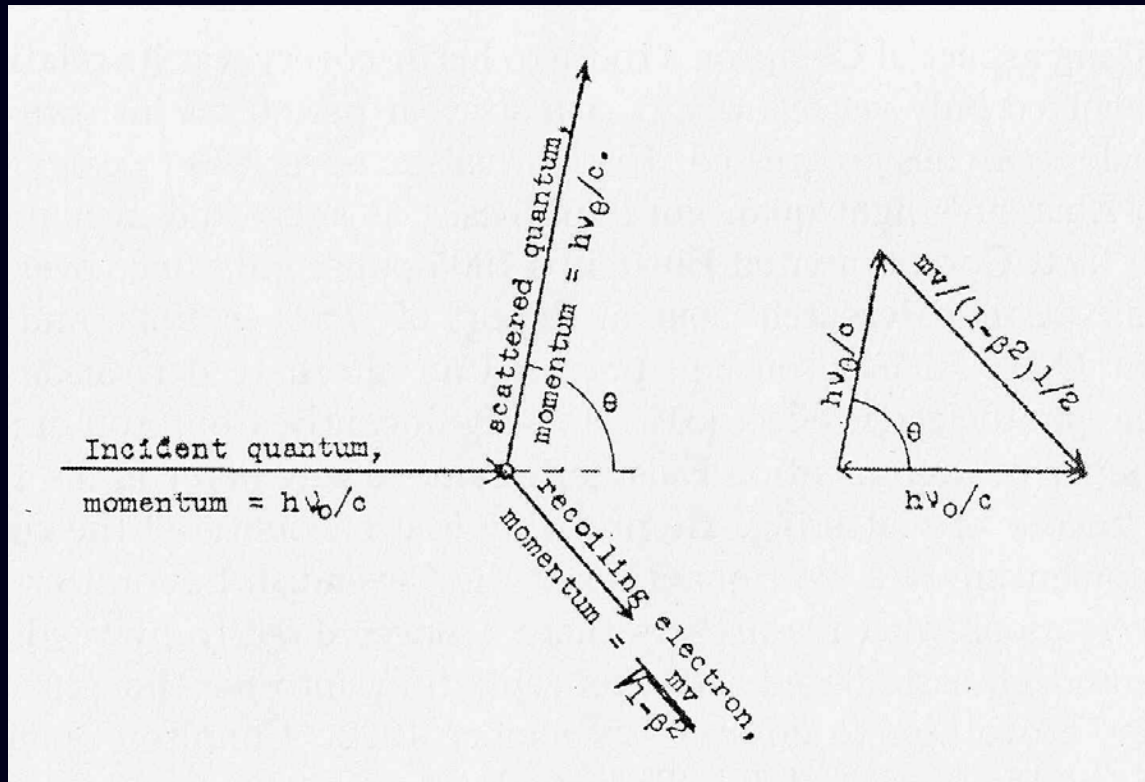


## Pierwszy wykres Comptona

Zmiana długości fali wskutek efektu Dopplera  $\lambda/\lambda' = 1 - v/c = 1 - h/mc\lambda = 1 - 0.034 = 0.966$ , gdzie  $v$  otrzymane z „zachowania pędu”  
 $h/\lambda = mv$

## Drugi wykres Comptona

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= \lambda' - \lambda = \\ &= (h/m_0c)(1 - \cos \Theta) = \\ &= 0.024 \text{ \AA} \text{ dla } 90^\circ \end{aligned}$$



Wektorowy diagram Comptona dla rozpraszania kwantu światła na swobodnym elektronie [*Phys. Rev.* 24, 483 (1923)]

RADIATIONS. — *Ondes et quanta* <sup>(1)</sup>. Note de M. LOUIS DE BROGLIE, présentée par M. Jean Perrin.

Considérons un mobile matériel de masse propre  $m_0$  se mouvant par rapport à un observateur fixe avec une vitesse  $v = \beta c$  ( $\beta < 1$ ). D'après le principe de l'inertie de l'énergie, il doit posséder une énergie interne égale à  $m_0 c^2$ . D'autre part, le principe des quanta conduit à attribuer cette énergie interne à un phénomène périodique simple de fréquence  $\nu_0$  telle que

$$h \nu_0 = m_0 c^2,$$

$c$  étant toujours la vitesse limite de la théorie de relativité et  $h$  la constante de Planck.

Pour l'observateur fixe, à l'énergie totale du mobile correspondra une fréquence

$$\nu = \frac{m_0 c^2}{h \sqrt{1 - \beta^2}}. \text{ Mais, si cet observateur fixe observe le phénomène périodique interne}$$

du mobile, il le verra ralenti et lui attribuera une fréquence  $\nu_1 = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ ; pour lui, ce phénomène varie donc comme

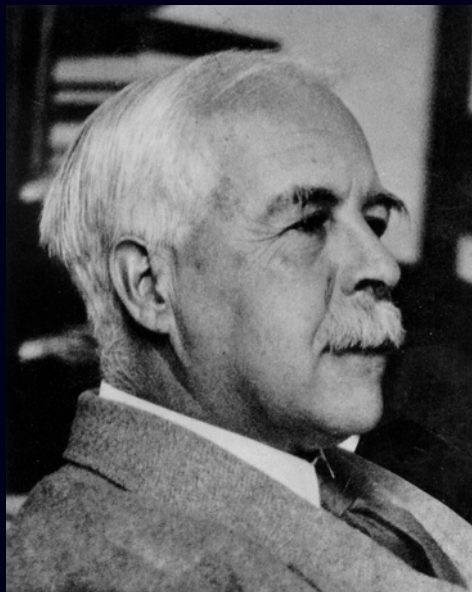
$$\sin 2\pi \nu_1 t.$$

Supposons maintenant qu'au temps  $t = 0$ , le mobile coïncide dans l'espace avec une onde de fréquence  $\nu$  ci-dessus définie se propageant dans la même direction que lui avec la vitesse  $\frac{c}{\beta}$ . Cette onde de vitesse plus grande que  $c$  ne peut correspondre à un



## Louis de Broglie

<sup>(1)</sup> Au sujet de la présente Note, voir M. BRILLOUIN, *Comptes rendus*, t. 168, 1919, p. 1318.



Gilbert Newton Lewis

„Byłoby niewłaściwie mówić o jakimś z tych hipotetycznych obiektów jako o cząstce światła, korpuskule światła, czy kwancie światła, skoro zakładamy, że spędza ona tylko drobny ułamek czasu swego istnienia jako nośnik energii promienistej, pozostając przez całą resztę ważnym składnikiem strukturalnym atomu...

Zatem, dla tego hipotetycznego nowego atomu, który nie jest światłem, ale odgrywa istotną rolę w każdym procesie promienistym, pozwalam sobie zaproponować nazwę foton.”

List do *Nature*, 1926

# Krótką kronika powstania mechaniki kwantowej

- 1923 IX Falowa natura elektronów (De Broglie)
- 1924 I Teoria promieniowania Bohra, Kramersa i Slatera
- 1924 VII Kwantowa statystyka (Bose i Einstein)
- 1925 I Zasada Pauliego
- 1925 VII Mechanika macierzowa Heisenberga
- 1925 X Spin elektronu (Goudsmit, Uhlenbeck)
- 1925 XI Praca Borna, Heisenberga i Jordana (*Dreimännerarbeit*)
- 1925 XI Mechanika kwantowa Diraca
- 1926 I Atom wodoru z mechaniki macierzowej (Pauli, Dirac)
- 1926 I Mechanika falowa Schrödingera
- 1926 II Statystyka kwantowa (Fermi)
- 1926 VI Born - probabilistyczna interpretacja funkcji falowej
- 1926 VIII Statystyka kwantowa (Dirac)
- 1927 III Zasada nieoznaczoności Heisenberga
- 1927 III Dyfrakcja elektronów (Davisson i Germer)
- 1928 I Kwantowa teoria elektronu Diraca



# Twórcy mechaniki kwantowej



**Louis Victor  
de Broglie  
(1892-1987)**



**Werner  
Heisenberg  
(1901-1976)**



**Erwin  
Schrödinger  
(1887-1961)**



**Pascual  
Jordan  
(1902-1980)**



**Max  
Born  
(1882-1970)**



**Wolfgang  
Pauli  
(1900-1958)**

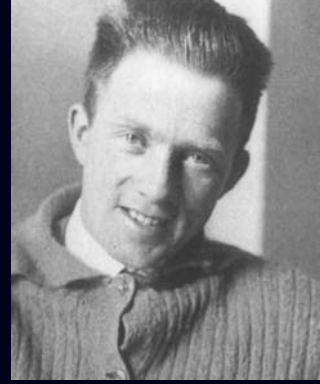


**Paul Adrien  
Dirac  
(1902-1984)**



**Niels Hendrik  
Bohr  
(1885-1962)**

„Była już prawie trzecia w nocy, gdy miałem przed sobą końcowy wynik rachunków... Miałem uczucie, że patrzę poprzez powierzchnię zjawisk atomowych na leżące głębiej pod nią podłoże o zadziwiającej wewnętrznej urodzie... Byłem tak podniecony, że nie mogłem myśleć o śnie. Wyszedłem więc z domu o rozpoczynającym się już świtaniu i poszedłem na północny cypel wyżyny, gdzie samotna, wystająca w morze iglica skalna wciąż budziła we mnie ochotę do prób wspinaczkowych. Udało mi się wspiąć na nią bez większych trudności i na jej szczycie doczekałem do wschodu słońca. ...Tak krytyczny zwykle Wolfgang Pauli, któremu opowiedziałem o swoich wynikach, zachęcił mnie do dalszej pracy w tym kierunku ”



Wspomnienia Heisenberga o dniu 15 czerwca 1925 r.

## Heisenberg w liście do Pauliego (9 VII 1925 r.)



„Jestem przekonany, że wyjaśnianie wzoru Rydberga [np. dla wodoru] przez odwoływanie się do orbit kołowych i eliptycznych (zgodnie z *klasyczną geometrią*), nie ma najmniejszego sensu fizycznego. Poświęcam cały mój rozpaczliwy wysiłek w celu całkowitego zniszczenia pojęcia orbity - której i tak nie można zaobserwować - i zastąpienia go przez bardziej odpowiednie pojęcie.”



# Narodziny mechaniki kwantowej



Werner Heisenberg  
(ok. 1924)

## Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.

Von W. Heisenberg in Göttingen.

(Eingegangen am 29. Juli 1925.)

In der Arbeit soll versucht werden, Grundlagen zu gewinnen für eine quantentheoretische Mechanik, die ausschließlich auf Beziehungen zwischen prinzipiell beobachtbaren Größen basiert ist.

Bekanntlich läßt sich gegen die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z. B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden, der schwerwiegende Einwand erheben, daß jene Rechenregeln als wesentlichen Bestandteil Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z. B. Ort, Umlaufzeit des Elektrons), daß also jenen Regeln offenbar jedes anschauliche physikalische Fundament mangelt, wenn man nicht immer noch an der Hoffnung festhalten will, daß jene bis jetzt unbeobachtbaren Größen später vielleicht experimentell zugänglich gemacht werden könnten. Diese Hoffnung könnte als berechtigt angesehen werden, wenn die genannten Regeln in sich konsequent und auf einen bestimmt umgrenzten Bereich quantentheoretischer Probleme anwendbar wären. Die Erfahrung zeigt aber, daß sich nur das Wasserstoffatom und der Starkeffekt dieses Atoms jenen formalen Regeln der Quantentheorie fügen, daß aber schon beim Problem der „gekreuzten Felder“ (Wasserstoffatom in elektrischem und magnetischem Feld verschiedener Richtung) fundamentale Schwierigkeiten auftreten, daß die Reaktion der Atome auf periodisch wechselnde Felder sicherlich nicht durch die genannten Regeln beschrieben werden kann, und daß schließlich eine Ausdehnung der Quantenregeln auf die Behandlung der Atome mit mehreren Elektronen sich als unmöglich erwiesen hat. Es ist üblich geworden, dieses Versagen der quantentheoretischen Regeln, die ja wesentlich durch die Anwendung der klassischen Mechanik charakterisiert waren, als Abweichung von der klassischen Mechanik zu bezeichnen. Diese Bezeichnung kann aber wohl kaum als sinngemäß angesehen werden, wenn man bedenkt, daß schon die (ja ganz allgemein gültige) Einstein-Bohrsche Frequenzbedingung eine so völlige Absage an die klassische Mechanik oder besser, vom Standpunkt der Wellentheorie aus, an die dieser Mechanik zugrunde liegende Kinematik darstellt, daß auch bei den einfachsten quantentheoretischen Problemen an

„Dobrze wiadomo, że formalne reguły stosowane w teorii kwantowej w celu obliczania wielkości obserwowanych, jak energia atomu wodoru, mogą być poddane surowej krytyce ponieważ zawierają jako istotny składnik, związki między wielkościami, które są nieobserwowalne z zasady, np. położenie, okres obiegu elektronu itd. Tym regułom brak jest oczywiście podstawy fizycznej, chyba że będzie się nadal utrzymywać nadzieję, iż te nieobserwowalne wielkości staną się być może później dostępne wyznaczeniu eksperymentalnemu. Taka nadzieja mogłaby być uzasadniona jeśli by powyższe reguły były wewnątrznie spójne i stosowalne do dobrze określonego zakresu zagadnień kwantowomechanicznych. Z doświadczenia jednak wynika, że tylko atom wodoru i występujący w nim efekt Starka dają się rozwiązywać przy zastosowaniu tych formalnych reguł teorii kwantowej....”

Werner Heisenberg, *Z.Phys.* **33**, 879 (1925)

„Zasadnicze trudności pojawiają się już w problemie pól skrzyżowanych (atom wodoru w polu elektrycznym i magnetycznym w różnych kierunkach). Także zachowanie się atomów w periodycznie zmiennych polach nie może być opisane przez te reguły. Wreszcie, rozszerzenie reguł kwantowych na atomy z więcej niż jednym elektronem okazało się niemożliwe... W tej sytuacji wydaje się rozsądne porzucić wszelką nadzieję zaobserwowania wielkości dotychczas nieobserwowalnych, jak położenie i okres obiegu elektronu, i przyznać, że częściowa zgodność reguł kwantowych z doświadczeniem jest mniej lub bardziej dziełem przypadku. Bardziej rozsądna wydaje się próba stworzenia teoretycznej mechaniki kwantowej, podobnej do mechaniki klasycznej, ale takiej, gdzie występują tylko związki między wielkościami obserwowalnymi...”

3. *Quantisierung als Eigenwertproblem;*  
von *E. Schrödinger.*

(Erste Mitteilung.)

§ 1. In dieser Mitteilung möchte ich zunächst an dem einfachsten Fall des (nichtrelativistischen und ungestörten) Wasserstoffatoms zeigen, daß die übliche Quantisierungsvorschrift sich durch eine andere Forderung ersetzen läßt, in der kein Wort von „ganzen Zahlen“ mehr vorkommt. Vielmehr ergibt sich die Ganzzahligkeit auf dieselbe natürliche Art, wie etwa die Ganzzahligkeit der *Knotenanzahl* einer schwingenden Saite. Die neue Auffassung ist verallgemeinerungsfähig und rührt, wie ich glaube, sehr tief an das wahre Wesen der Quantenvorschriften.

Die übliche Form der letzteren knüpft an die Hamiltonsche partielle Differentialgleichung an:

$$(1) \quad H\left(q, \frac{\partial S}{\partial q}\right) = E.$$

Es wird von dieser Gleichung eine Lösung gesucht, welche sich darstellt als *Summe* von Funktionen je einer einzigen der unabhängigen Variablen  $q$ .

Wir führen nun für  $S$  eine neue unbekannte  $\psi$  ein derart, daß  $\psi$  als ein *Produkt* von eingriffigen Funktionen der einzelnen Koordinaten erscheinen würde. D. h. wir setzen

$$(2) \quad S = K \lg \psi.$$

Die Konstante  $K$  muß aus dimensionellen Gründen eingeführt werden, sie hat die Dimension einer *Wirkung*. Damit erhält man

$$(1') \quad H\left(q, \frac{K}{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial q}\right) = E.$$

Wir suchen nun *nicht* eine Lösung der Gleichung (1'), sondern wir stellen folgende Forderung. Gleichung (1') läßt sich bei Vernachlässigung der Massenveränderlichkeit stets, bei Berücksichtigung derselben wenigstens dann, wenn es sich um das *Ein*-elektronenproblem handelt, auf die Gestalt bringen: quadratische

# Narodziny mechaniki falowej

*Ann. d. Physik* 79, 301 (1926)



Erwin Schrödinger  
(1887-1961)

## Erwin Schrödinger

Kwantowanie jako problem wartości własnych,  
*Ann. d. Physik* 79, 301 (1926)



„W tej pracy pragnę wykazać, że w najprostszym przypadku nierelatywistycznego i niezaburzonego atomu wodoru można zastąpić zwykłe reguły kwantyzacji przez inne warunki, w których nie wprowadza się już „liczb całkowitych”. Natomiast liczby całkowite pojawiają się w sposób naturalny, podobnie jak liczby wyznaczające liczbę węzłów drgającej struny. To nowe podejście można uogólnić i jestem przekonany, że dotyka ono bardzo głębokiej treści reguł kwantowych...”





## Schrödinger o mechanice macierzowej Heisenberga (1926)

„Moja teoria była inspirowana przez L. de Broglie’a i przez krótkie, ale nieskończenie dalekowzrocne uwagi A. Einsteina [*Berl. Ber.* 1925, p.9ff]. Byłem całkowicie nieświadomy jakiegokolwiek związku genetycznego z Heisenbergiem. Oczywiście wiedziałem o jego teorii, ale była dla mnie odpychająca, czy raczej odrażająca, ze względu na bardzo trudne metody transcendentnej algebry i brak pogładowości (*Anschaulichkeit*).”

## Heisenberg o mechanice falowej Schrödingera (1926)



„Im więcej myślę o części fizycznej teorii Schrödingera, tym bardziej obrzydliwa mi się ona wydaje. To, co Schrödinger pisze o jej pogładowości (*Anschaulichkeit*), nie ma w ogóle sensu, i inaczej mówiąc, myślę, że jest to bzdura (*Mist*).”

„...podczas spaceru nagle przyszło mi na myśl, że komutator  $A$  razy  $B$  minus  $B$  razy  $A$  jest bardzo podobny do nawiasu Poissona, który wykorzystuje się w mechanice klasycznej, kiedy się ją formułuje w postaci hamiltonowskiej... Nie wiedziałem wtedy dokładnie, co to jest nawias Poissona. To było coś, o czym czytałem w podręcznikach zaawansowanej dynamiki, ale ponieważ nie robiłem z tego użytku, to pojęcie uciekło mi z głowy i nie pamiętałem czego dotyczy... Kiedy tylko otwarto bibliotekę, sprawdziłem co to jest nawias Poissona i zobaczyłem, że tak jak myślałem, można znaleźć związek między tym nawiasem i komutatorem. To zapewniło bardzo ścisły związek między zwykłą mechaniką klasyczną, do której wszyscy byli przyzwyczajeni, i nową mechaniką, wprowadzoną przez Heisenberga, w której były wielkości niekomutujące. Po tej wczesnej idei praca była już całkiem prosta... Można było wyprowadzić równania nowej mechaniki, czyniąc po prostu odpowiednie uogólnienia równań klasycznych w postaci hamiltonowskiej...”

Paul Dirac

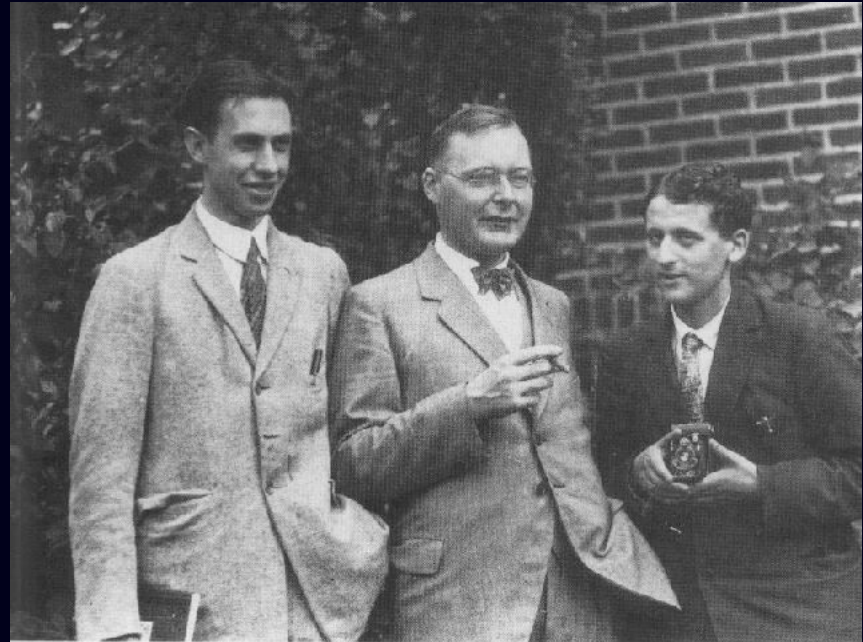
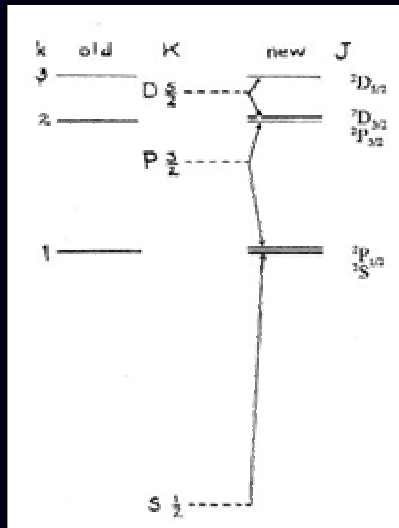
„To, że zmienne używane do opisu systemu dynamicznego nie podlegają prawu przemienności mnożenia znaczy oczywiście, że nie są one liczbami w zwykłym sensie tego słowa używanym dotychczas w matematyce. Aby rozróżnić te dwa rodzaje liczb będziemy nazywali zmienne kwantowe liczbami  $q$ , liczby klasycznej matematyki podlegające prawu przemienności - liczbami  $c$ , a samo słowo liczba będzie oznaczało albo liczbę  $q$ , albo liczbę  $c$ . Jeśli  $xy = yx$ , to powiemy, że  $x$  komutuje z  $y$ ...

Obecnie nikt nie może sobie wyobrazić tego, czym jest liczba  $q$ . Nie można powiedzieć, że jedna liczba  $q$  jest większa lub mniejsza od innej. Wszystko, co wiemy o liczbach  $q$ , to to, że jeśli  $z_1$  i  $z_2$  są dwiema liczbami  $q$ , lub jedna z nich jest liczbą  $q$ , a druga - liczbą  $c$ , to istnieją liczby  $z_1 + z_2$ ,  $z_1 z_2$ ,  $z_2 z_1$ , które ogólnie będą liczbami  $q$ , ale mogą też być liczbami  $c$ . Nie wiemy nic o tym jak powstają liczby  $q$ , poza tym, że podlegają zwykłym prawom algebry z wyjątkiem prawa przemienności mnożenia...”

[Z pomiarów otrzymujemy zawsze liczby  $c$ , nigdy liczby  $q$ ]

Dirac, *On the theory of quantum mechanics*, Proc. Roy.Soc. **A112**, 661 (1926)

# Spinning Electrons and the Structure of Spectra, *Nature*, 117, 264 (1926)



George Uhlenbeck, Hendrik Kramers  
i Samuel Goudsmit

„Jesteście obaj dostatecznie młodzi, aby sobie pozwolić na taką głupotę”  
- *Ehrenfest do Uhlenbecka i Goudsmita*

# Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.

Von **W. Heisenberg** in Kopenhagen.

Mit 2 Abbildungen. (Eingegangen am 23. März 1927.)

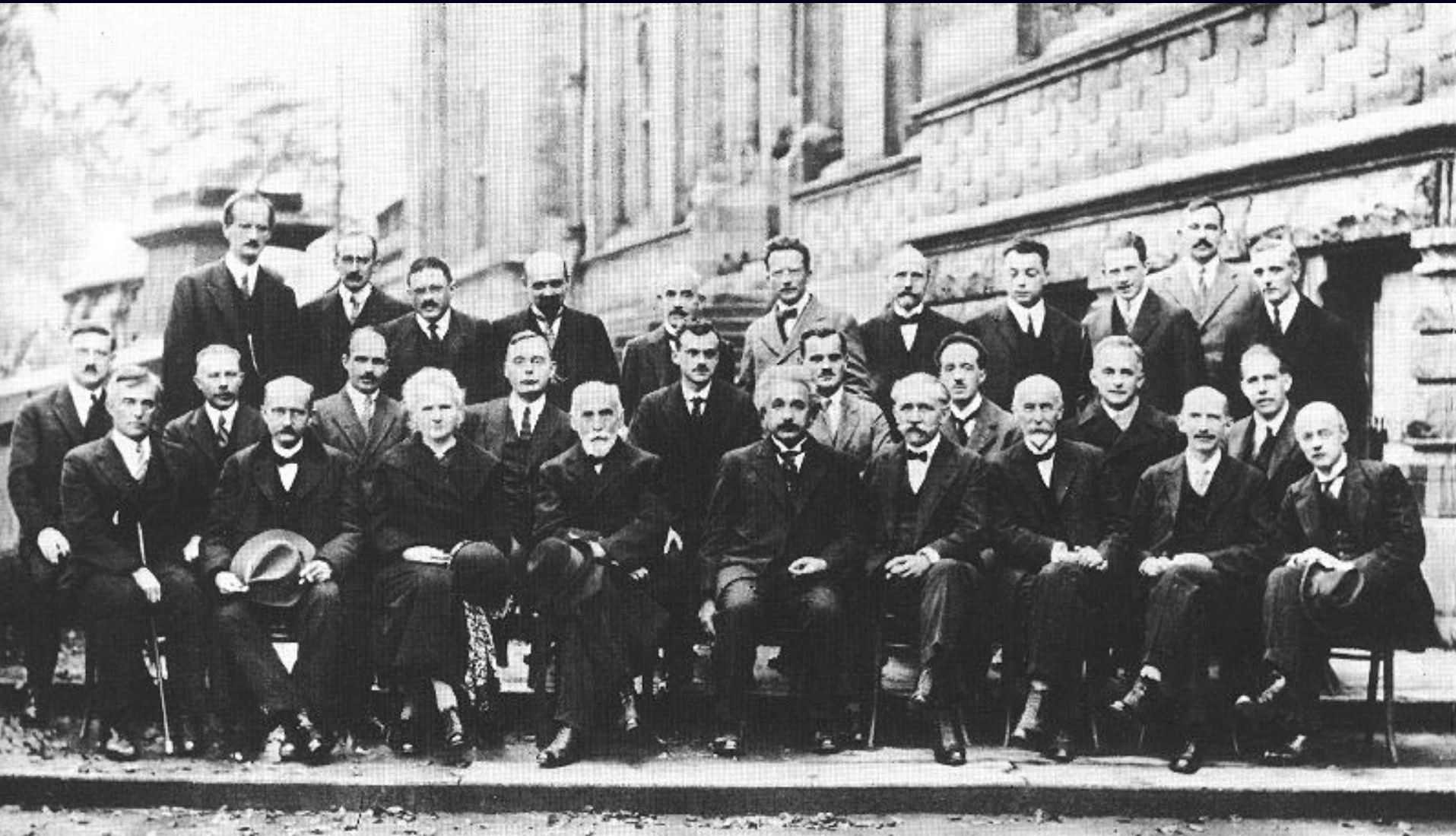
In der vorliegenden Arbeit werden zunächst exakte Definitionen der Worte: Ort, Geschwindigkeit, Energie usw. (z. B. des Elektrons) aufgestellt, die auch in der Quantenmechanik Gültigkeit behalten, und es wird gezeigt, daß kanonisch konjugierte Größen simultan nur mit einer charakteristischen Ungenauigkeit bestimmt werden können (§ 1). Diese Ungenauigkeit ist der eigentliche Grund für das Auftreten statistischer Zusammenhänge in der Quantenmechanik. Ihre mathematische Formulierung gelingt mittels der Dirac-Jordanschen Theorie (§ 2). Von den so gewonnenen Grundsätzen ausgehend wird gezeigt, wie die makroskopischen Vorgänge aus der Quantenmechanik heraus verstanden werden können (§ 3). Zur Erläuterung der Theorie werden einige besondere Gedankenexperimente diskutiert (§ 4).

Eine physikalische Theorie glauben wir dann anschaulich zu verstehen, wenn wir uns in allen einfachen Fällen die experimentellen Konsequenzen dieser Theorie qualitativ denken können, und wenn wir gleichzeitig erkannt haben, daß die Anwendung der Theorie niemals innere Widersprüche enthält. Zum Beispiel glauben wir die Einsteinsche Vorstellung vom geschlossenen dreidimensionalen Raum anschaulich zu verstehen, weil für uns die experimentellen Konsequenzen dieser Vorstellung widerspruchsfrei denkbar sind. Freilich widersprechen diese Konsequenzen unseren gewohnten anschaulichen Raum-Zeitbegriffen. Wir können uns aber davon überzeugen, daß die Möglichkeit der Anwendung dieser gewohnten Raum-Zeitbegriffe auf sehr große Räume weder aus unseren Denkgesetzen noch aus der Erfahrung gefolgert werden kann. Die anschauliche Deutung der Quantenmechanik ist bisher noch voll innerer Widersprüche, die sich im Kampf der Meinungen um Diskontinuums- und Kontinuumstheorie, Korpuskeln und Wellen auswirken. Schon daraus möchte man schließen, daß eine Deutung der Quantenmechanik mit den gewohnten kinematischen und mechanischen Begriffen jedenfalls nicht möglich ist. Die Quantenmechanik war ja gerade aus dem Versuch entstanden, mit jenen gewohnten kinematischen Begriffen zu brechen und an ihre Stelle Beziehungen zwischen konkreten experimentell gegebenen Zahlen zu setzen. Da dies gelungen scheint, wird andererseits das mathematische Schema der Quantenmechanik auch keiner Revision bedürfen. Ebenso wenig wird eine Revision der Raum-Zeitgeometrie für kleine Räume und Zeiten notwendig sein, da wir durch Wahl hinreichend schwerer Massen die quantenmechanischen Gesetze den

## Zasada nieoznaczoności

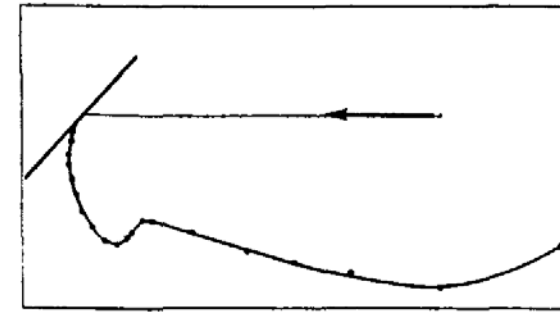
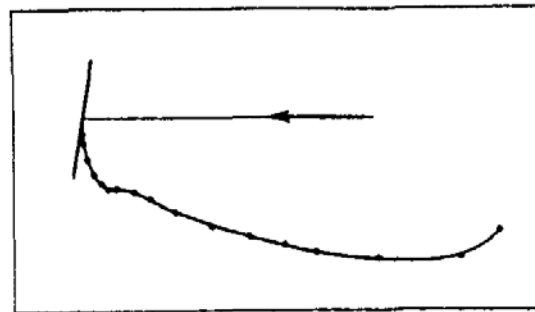


# Solvay Congress 1927

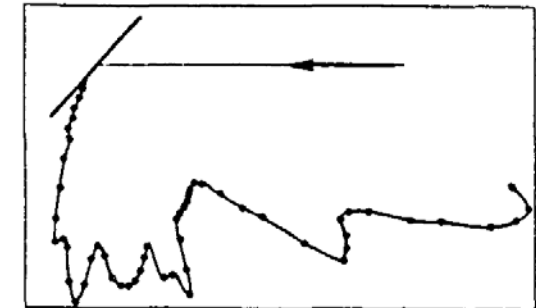
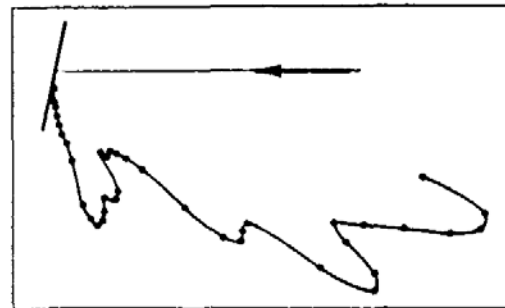


A. PICCARD    E. HENRIOT    P. EHRENFEST    Ed. HERZEN    Th. DE DONDER    E. SCHRÖDINGER    E. VERSCHAFFELT    W. PAULI    W. HEISENBERG    R.H. FOWLER    L. BRILLOUIN  
 P. DEBYE    M. KNUDSEN    W.L. BRAGG    H.A. KRAMERS    P.A.M. DIRAC    A.H. COMPTON    L. de BROGLIE    M. BORN    N. BOHR  
 I. LANGMUIR    M. PLANCK    Mme CURIE    H.A. LORENTZ    A. EINSTEIN    P. LANGEVIN    Ch.E. GUYE    C.T.R. WILSON    O.W. RICHARDSON

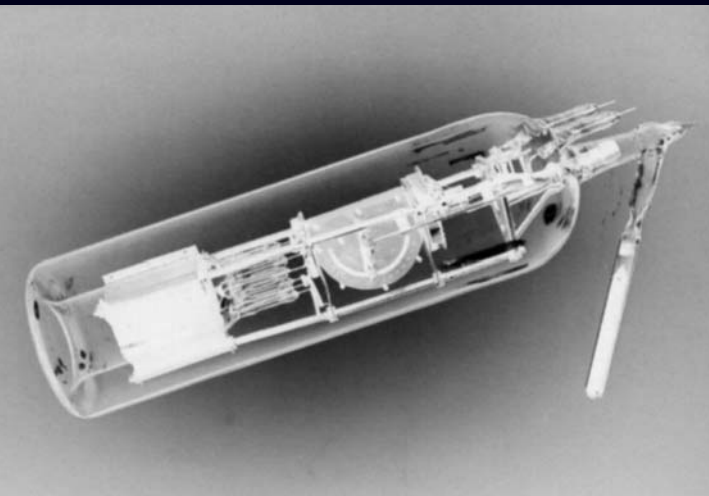
# Clinton Davisson i Lester Germer



SCATTERING OF 75 VOLT ELECTRONS FROM  
A BLOCK OF NICKEL (MANY SMALL CRYSTALS)



SCATTERING OF 75 VOLT ELECTRONS FROM  
SEVERAL LARGE NICKEL CRYSTALS



Dyfrakcja elektronów obserwowana  
przy odbiciu od kryształów niklu (1927)

C. Davisson i L. H. Germer, Phys. Rev. **30**, 705 (1927)

„Badania opisane w niniejszej pracy zostały rozpoczęte w wyniku wypadku, jaki wydarzył się w naszym laboratorium w kwietniu 1925 roku. W tym czasie zajmowaliśmy się potwierdzaniem wyników, po raz pierwszy ogłoszonych w 1921 r. [Davisson & Kunsman, *Science* **64**, 522 (1921)], dotyczących rozkładu kąтового elektronów rozproszonych przez tarczę ze zwykłego (polikrystalicznego) niklu. Podczas tej pracy eksplodowała butla z ciekłym powietrzem, gdy tarcza była rozgrzana do wysokiej temperatury; rura eksperymentalna się stłukła i tarcza silnie się utleniła pod wpływem powietrza. Przez długotrwałe wygrzewanie w wysokich temperaturach w wodorze i w próżni udało się w końcu zredukować tlenek i usunąć zewnętrzną warstwę tarczy przez parowanie. Kontynuując eksperymenty stwierdziliśmy, że rozkład kątowy rozproszonych elektronów zupełnie się zmienił...”



C. Davisson i L. H. Germer, Phys. Rev. **30**, 705 (1927)

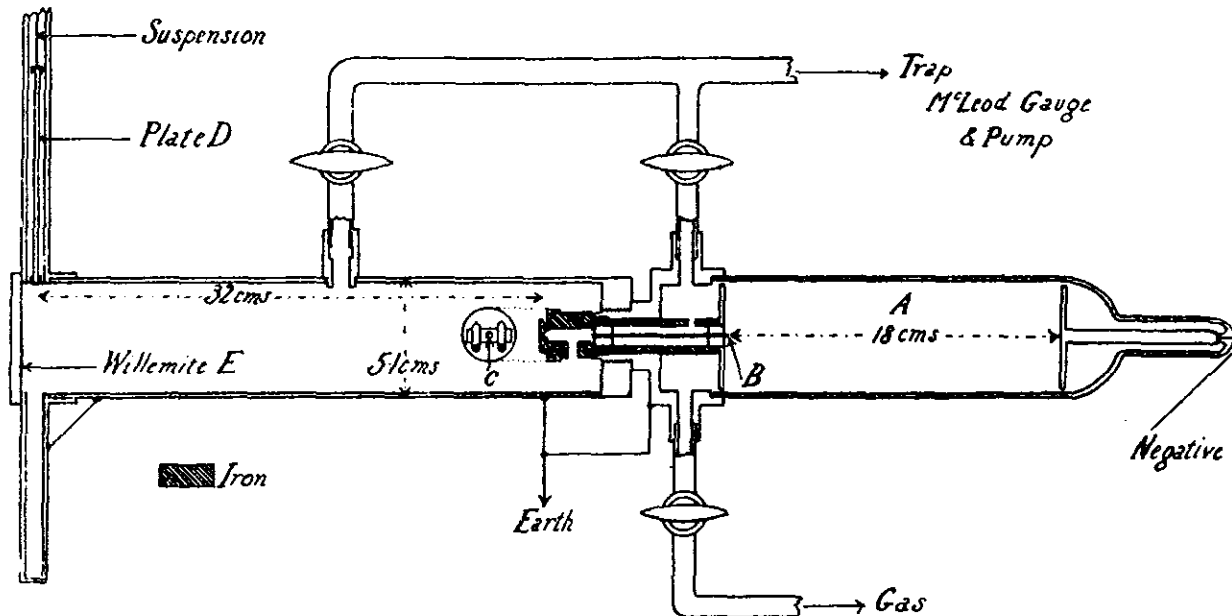
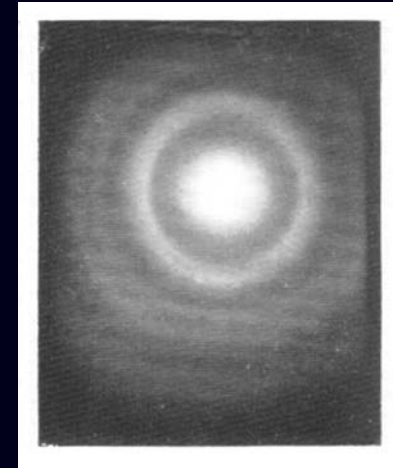
„Ta widoczna zmiana rozpraszania wynikała z rekrytalizacji tarczy podczas długotrwałego wygrzewania. W poprzednich eksperymentach, jak również przed wypadkiem, bombardowaliśmy wiele małych kryształów, natomiast po wypadku mieliśmy do czynienia tylko z kilkoma dużymi (było ich około dziesięciu).

Wydawało się prawdopodobne na podstawie tych wyników, że natężenie rozpraszania przez pojedynczy kryształ będzie wykazywało wyraźną zależność od orientacji kryształu, toteż od razu przystąpiliśmy do przygotowania eksperymentów w celu zbadania tej zależności. Musimy przyznać, że wyniki otrzymane w tych eksperymentach okazały się zupełnie sprzeczne z naszymi oczekiwaniami...”



# George P. Thomson

Dyfrakcja  
elektronów  
obserwowana  
w folii złota



Schemat  
aparatury

*The Quantum Theory of the Electron.*

By P. A. M. DIRAC, St. John's College, Cambridge.

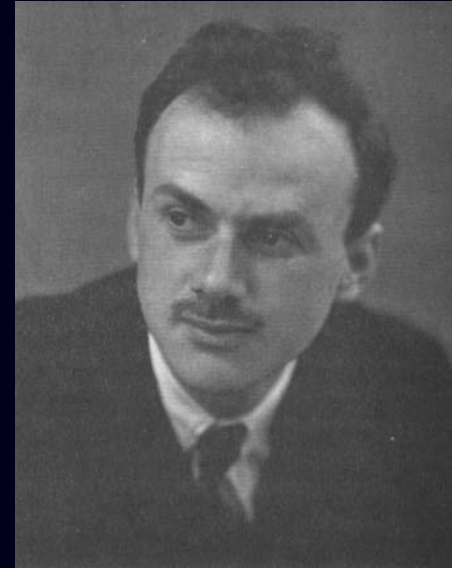
(Communicated by R. H. Fowler, F.R.S.—Received January 2, 1928.)

The new quantum mechanics, when applied to the problem of the structure of the atom with point-charge electrons, does not give results in agreement with experiment. The discrepancies consist of "duplexity" phenomena, the observed number of stationary states for an electron in an atom being twice the number given by the theory. To meet the difficulty, Goudsmit and Uhlenbeck have introduced the idea of an electron, with a spin angular momentum of half a quantum and a magnetic moment of one Bohr magneton. This model for the electron has been fitted into the new mechanics by Pauli,\* and Darwin,† working with an equivalent theory, has shown that it gives results in agreement with experiment for hydrogen-like spectra to the first order of accuracy.

The question remains as to why Nature should have chosen this particular model for the electron instead of being satisfied with the point-charge. One would like to find some incompleteness in the previous methods of applying quantum mechanics to the point-charge electron such that, when removed, the whole of the duplexity phenomena follow without arbitrary assumptions. In the present paper it is shown that this is the case, the incompleteness of the previous theories lying in their disagreement with relativity, or, alternatively, with the general transformation theory of quantum mechanics. It appears that the simplest Hamiltonian for a point-charge electron satisfying the requirements of both relativity and the general transformation theory leads to an explanation of all duplexity phenomena without further assumption. All the same there is a great deal of truth in the spinning electron model, at least as a first approximation. The most important failure of the model seems to be that the magnitude of the resultant orbital angular momentum of an electron moving in an orbit in a central field of force is not a constant, as the model leads one to expect.

\* Pauli, 'Z. f. Physik,' vol. 43, p. 601 (1927).

† Darwin, 'Roy. Soc. Proc.,' A, vol. 116, p. 227 (1927).



Paul Dirac w 1930 roku

„...Skłania to nas do założenia, że dziury w rozkładzie elektronów ujemnej energii to protony. Kiedy elektron o ujemnej energii wpada do dziury i wypełnia ją, obserwujemy znikanie elektronu i protonu z emisją promieniowania...

Wydaje się zatem, że musimy odrzucić utożsamianie dziur z protonami i musimy znaleźć dla nich jakąś inną interpretację. Za Oppenheimerem możemy założyć, że w świecie, który znamy, obsadzone są wszystkie, a nie prawie wszystkie stany o ujemnej energii elektronów. Dziura, gdyby istniała, byłaby nową cząstką, nieznaną dotychczas w fizyce doświadczalnej, o takiej samej masie jak elektron, ale o przeciwnym ładunku. Taką cząstkę możemy nazwać antyelektronem. Nie powinniśmy się spodziewać, że znajdziemy takie cząstki w przyrodzie ze względu na wielką szybkość ich rekombinacji z elektronami, gdyby jednak można je było wyprodukować w wysokiej próżni, to byłyby one trwałe i możliwe do obserwacji.”

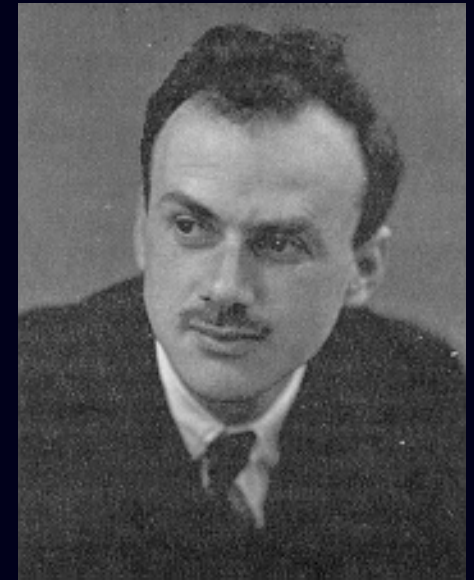
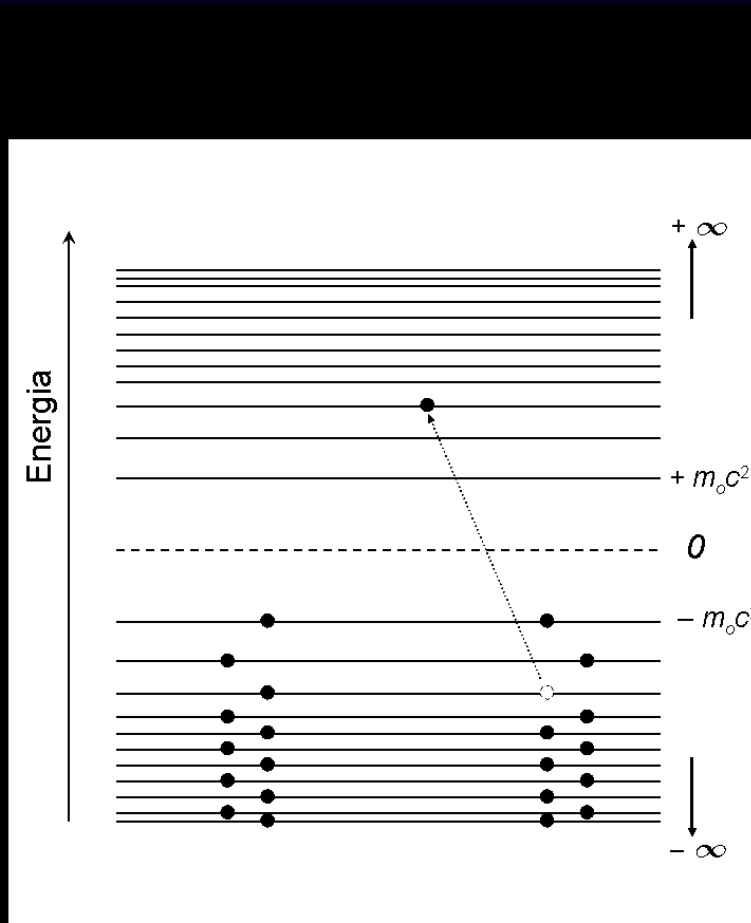
**Paul Dirac**

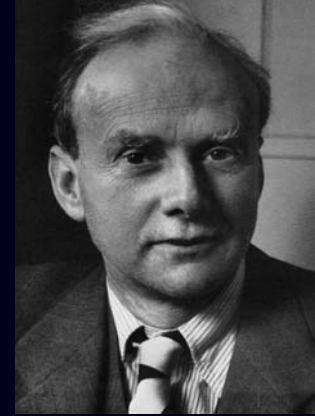
„W tym schemacie protony są zupełnie niezwiązane z elektronami. Przypuszczalnie protony mają także swoje stany o energii ujemnej, które normalnie są wszystkie obsadzone, a stan nieobsadzony byłby antyprotonem. Obecnie teoria nie zna powodu, dla którego między elektronami i protonami istniałaby jakaś różnica

„Jeśli przyjmiemy pogląd, iż istnieje całkowita symetria między dodatnimi i ujemnymi ładunkami elektrycznymi jako fundamentalne prawo przyrody, to musimy traktować jako przypadek, że Ziemia (i przypuszczalnie cały układ słoneczny) zawiera przewagę ujemnych elektronów i dodatnich protonów. Jest możliwe, że w niektórych gwiazdach jest odwrotnie i są one złożone głównie z pozytonów i ujemnych protonów. W istocie może być tyle samo gwiazd obu rodzajów. Oba te rodzaje gwiazd miałyby dokładnie jednakowe widma i nie byłoby można ich rozróżnić obecnymi metodami astronomicznymi.”

**Paul Dirac**

# Morze Diraca elektronów o ujemnej masie





„Ogólna teoria mechaniki kwantowej jest już kompletna... Poznane zostały całkowicie podstawowe prawa fizyczne konieczne dla matematycznej teorii dużej części fizyki i całej chemii i trudność przedstawia tylko to, że dokładne stosowanie tych praw prowadzi do równań o wiele za bardzo skomplikowanych, by się dały rozwiązać.”

**Paul Dirac** (1929)



„Koniec fizyki, jaką znamy, nastąpi za sześć miesięcy”

**Max Born**

(po publikacji przez Diraca relatywistycznego równania elektronu)