

Introdução à Física de Partículas

Introduction to particle Physics

(2/4)



FILIPE JOAQUIM

IST Dep. de Física e CFTP, Lisboa, Portugal



16ª Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa 2024

16th CERN Portuguese Language Teachers Programme 2024

1-6 Setembro, CERN, Genebra

1564-1896

1564-1642
Galileo



O pai da Física moderna

1642 - 1727
Newton



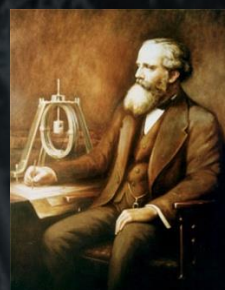
Mecânica Clássica

1773 - 1829
Young



Teoria ondulatória da luz

1873
Maxwell

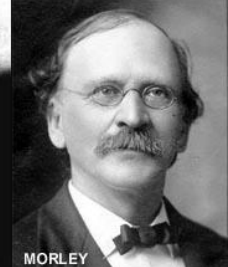


Electromagnetismo e propagação da luz

1887
Michelson-Morley



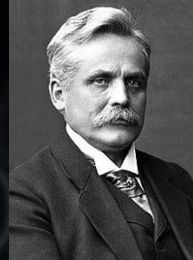
MICHELSON



MORLEY

Não à Teoria do Éter Lei de Wien

1896
Wien



1571-1630
Kepler



Movimento planetário

1791 - 1867
Faraday



Indução

1799 - 1878
Henry



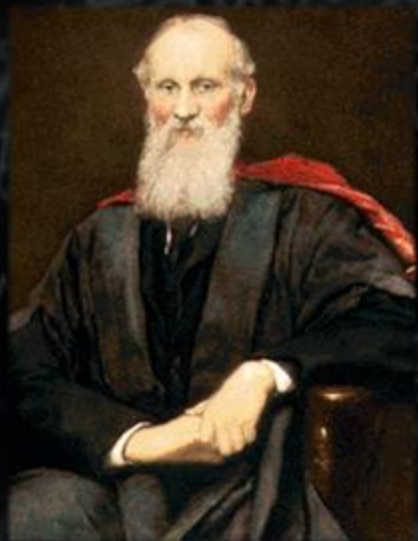
1904, 1905
Rayleigh Jeans



Rayleigh - Jeans

AS NÚVENS DE KELVIN

“Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light”



Lord Kelvin, 27 de Abril 1900

“The beauty and clearness of the dynamical theory, which asserts heat and light to be modes of motion, is at present obscured by two clouds.”

Que núvens eram essas?

Incapacidade de detectar o Éter e a “Catástrofe ultra-violeta”

A Física estaria limitada à medição de quantidades conhecidas com grande precisão...

Kelvin não podia estar mais enganado...

1867-1896

J.J. Thomson

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

[FIFTH SERIES.]

OCTOBER 1897.

XL. *Cathode Rays.* By J. J. THOMSON, M.A., F.R.S.,
Cavendish Professor of Experimental Physics, Cambridge*.

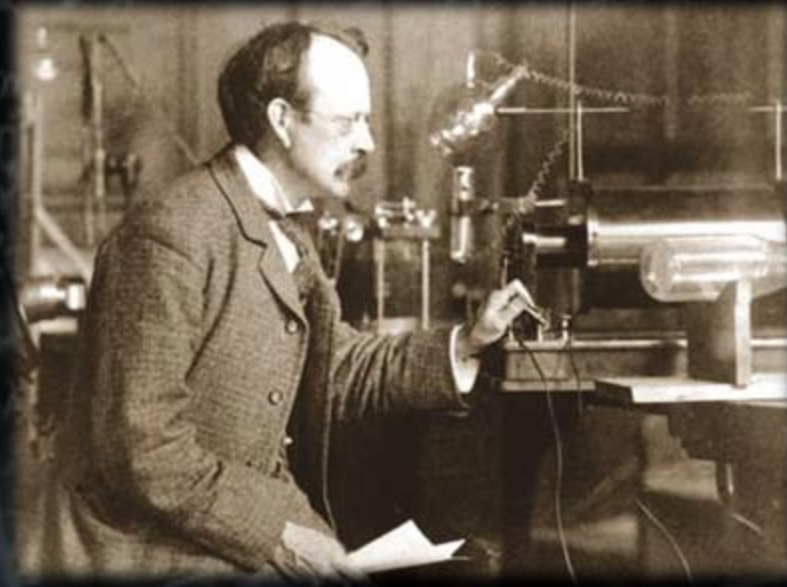
THE experiments † discussed in this paper were undertaken in the hope of gaining some information as to the nature of the Cathode Rays. The most diverse opinions are held as to these rays; according to the almost unanimous opinion of German physicists they are due to some process in the æther to which—inasmuch as in a uniform magnetic field their course is circular and not rectilinear—no phenomenon hitherto observed is analogous: another view of these rays is that, so far from being wholly ætherial, they are in fact wholly material, and that they mark the paths of particles of matter charged with negative electricity. It would seem at first sight that it ought not to be difficult to discriminate between views so different, yet experience shows that this is not the case, as amongst the physicists who have most deeply studied the subject can be found supporters of either theory.

The electrified-particle theory has for purposes of research a great advantage over the ætherial theory, since it is definite and its consequences can be predicted; with the ætherial theory it is impossible to predict what will happen under any given circumstances, as on this theory we are dealing with hitherto

* Communicated by the Author.

† Some of these experiments have already been described in a paper read before the Cambridge Philosophical Society (Proceedings, vol. ix. 1897), and in a Friday Evening Discourse at the Royal Institution ('Electrician,' May 21, 1897).

Phil. Mag. S. 5. Vol. 44. No. 269. Oct. 1897. Y



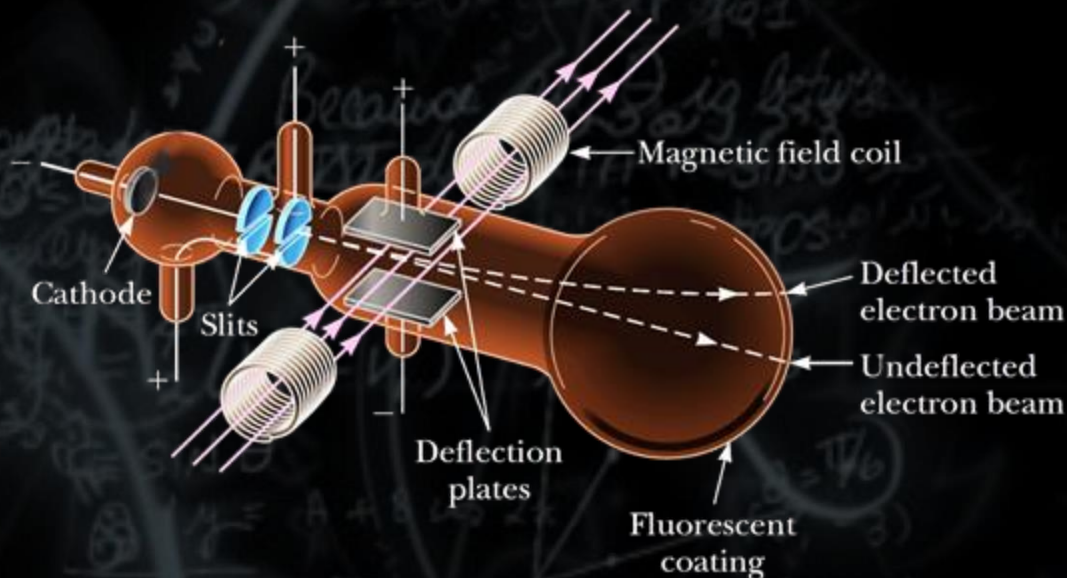
THE experiments † discussed in this paper were undertaken in the hope of gaining some information as to the nature of the Cathode Rays. The most diverse opinions are held as to these rays; according to the almost unanimous opinion of German physicists they are due to some process in the æther to which—inasmuch as in a uniform magnetic field their course is circular and not rectilinear—no phenomenon hitherto observed is analogous: another view of these rays is that, so far from being wholly ætherial, they are in fact wholly material, and that they mark the paths of particles of matter charged with negative electricity. It would seem at first sight that it ought not to be difficult to discriminate

1897

1564-1896

Os raios catódicos são constituídos por "partículas" carregadas negativamente

$$\frac{q}{m} = 1.758820088 \pm 39 \times 10^{11} \text{ C/Kg}$$



Gas.	θ .	H.	F.	l .	m/e .	v .
Air	8/110	5.5	1.5×10^{10}	5	1.3×10^{-7}	2.8×10^9
Air	9.5/110	5.4	1.5×10^{10}	5	1.1×10^{-7}	2.8×10^9
Air	13/110	6.6	1.5×10^{10}	5	1.2×10^{-7}	2.3×10^9
Hydrogen	9/110	6.3	1.5×10^{10}	5	1.5×10^{-7}	2.5×10^9
Carbonic acid...	11/110	6.9	1.5×10^{10}	5	1.5×10^{-7}	2.2×10^9
Air	6/110	5	1.8×10^{10}	5	1.3×10^{-7}	3.6×10^9
Air	7/110	3.6	1×10^{10}	5	1.1×10^{-7}	2.8×10^9

O prémio Nobel da Física foi atribuído a J.J. Thomson em 1906.



"in recognition of the great merits of his theoretical and experimental investigations on the conduction of electricity by gases".

1897

Rayleigh-Jeans:

$$B_T(\lambda) = \frac{2ck_B T}{\lambda^4}$$

 $\lambda \rightarrow 0$: Catástrofe UV

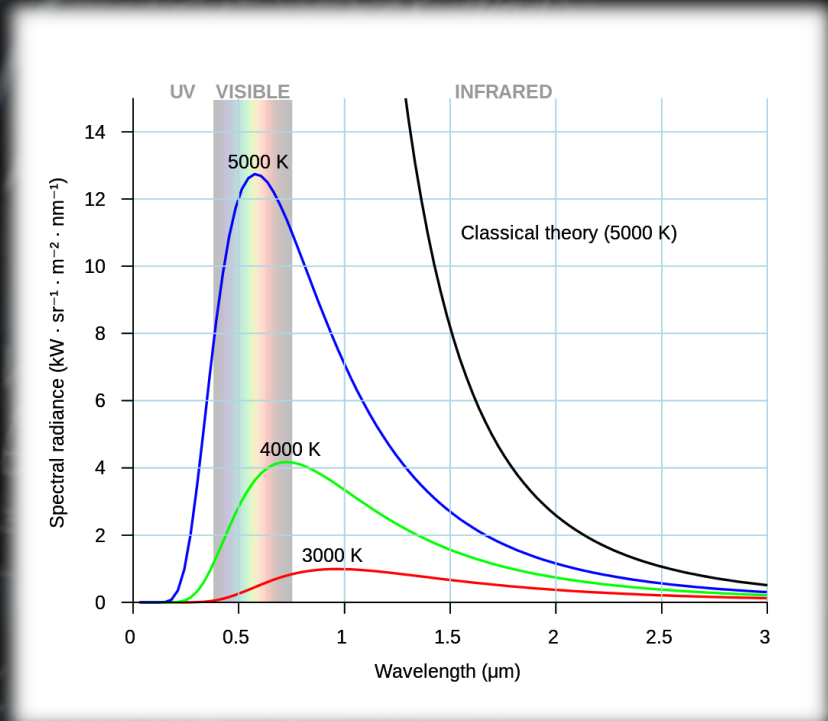
Falha da teoria clássica:

$$P(E) \propto \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) \rightarrow \langle E \rangle = k_B T$$



A “energia electromagnética” pode apenas ser emitida em múltiplos de uma “energia fundamental” igual a $h\nu$.

$$P(E) \propto \exp\left(-\frac{nh\nu}{k_B T}\right) \rightarrow \langle E \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$



1890

Distribuição de Planck para a radiação do corpo negro:

$$u = \frac{8 \pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k\theta}} - 1}$$

onde:

$$h = 6,55 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$$

ERA O ÍNICIO DA "TEORIA QUÂNTICA"

O prémio Nobel da Física foi atribuído a Max Planck em 1918

"in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta".



9. Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum; von Max Planck.

(In anderer Form mitgeteilt in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Sitzung vom 19. October und vom 14. December 1900, Verhandlungen 2. p. 202 und p. 237. 1900.)

Einleitung.

Die neueren Spectralmessungen von O. Lummer und E. Pringsheim¹⁾ und noch auffälliger diejenigen von H. Rubens und F. Kurlbaum²⁾, welche zugleich ein früher von H. Beckmann³⁾ erhaltenes Resultat bestätigten, haben gezeigt, dass das zuerst von W. Wien aus molecularkinetischen Betrachtungen und später von mir aus der Theorie der elektromagnetischen Strahlung abgeleitete Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum keine allgemeine Gültigkeit besitzt.

Die Theorie bedarf also in jedem Falle einer Verbesserung, und ich will im Folgenden den Versuch machen, eine solche auf der Grundlage der von mir entwickelten Theorie der elektromagnetischen Strahlung durchzuführen. Dazu wird es vor allem nötig sein, in der Reihe der Schlussfolgerungen, welche zum Wien'schen Energieverteilungsgesetz führten, dasjenige Glied ausfindig zu machen, welches einer Abänderung fähig ist; sodann aber wird es sich darum handeln, dieses Glied aus der Reihe zu entfernen und einen geeigneten Ersatz dafür zu schaffen.

Dass die physikalischen Grundlagen der elektromagnetischen Strahlungstheorie, einschliesslich der Hypothese der „natürlichen Strahlung“, auch einer geschärften Kritik gegenüber Stand halten, habe ich in meinem letzten Aufsatz⁴⁾ über diesen

1) O. Lummer u. E. Pringsheim, Verhandl. der Deutsch. Physikal. Gesellsch. 2. p. 163. 1900.

2) H. Rubens und F. Kurlbaum, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin vom 25. October 1900, p. 929.

3) H. Beckmann, Inaug.-Dissertation, Tübingen 1898. Vgl. auch H. Rubens, Wied. Ann. 69. p. 582. 1899.

4) M. Planck, Ann. d. Phys. 1. p. 719. 1900.

1904

O modelo “Bolo de passas”

Structure. By J. J. THOMSON, F.R.S., Cavendish Professor of Experimental Physics, Cambridge.*

THE view that the atoms of the elements consist of a number of negatively electrified corpuscles enclosed in a sphere of uniform positive electrification, suggests, among other interesting mathematical problems, the one discussed in this paper, that of the motion of a ring of n negatively electrified particles placed inside a uniformly electrified sphere. Suppose when in equilibrium the n corpuscles are arranged at equal angular intervals round the circumference

Electrão



Massa carregada positivamente

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

[SIXTH SERIES.]

MARCH 1904.

XXIV. *On the Structure of the Atom: an Investigation of the Stability and Periods of Oscillation of a number of Corpuscles arranged at equal intervals around the Circumference of a Circle; with Application of the results to the Theory of Atomic Structure. By J. J. THOMSON, F.R.S., Cavendish Professor of Experimental Physics, Cambridge*.*

THE view that the elements consist of a number of negatively electrified corpuscles enclosed in a sphere of uniform positive electrification, suggests, among other interesting mathematical problems, the one discussed in this paper, that of the motion of a ring of n negatively electrified particles placed inside a uniformly electrified sphere. Suppose when in equilibrium the n corpuscles are arranged at equal angular intervals round the circumference of a circle of radius a , each corpuscle carrying a charge e of negative electricity. Let the charge of positive electricity contained within the sphere be νe , then if b is the radius of this sphere, the radial attraction on a corpuscle due to the positive electrification is equal to $\nu e^2 a/b^2$; if the corpuscles are at rest this attraction must be balanced by the repulsion exerted by the other corpuscles. Now the repulsion along OA , O being the centre of the sphere, exerted on a corpuscle at A by one at B , is equal to $\frac{e^2}{AB^2} \cos OAB$, and, if $OA = OB$, this is equal to $\frac{e^2}{4OA^2 \sin^2 \frac{1}{2}AOB}$: hence, if we have n corpuscles arranged at equal angular intervals $2\pi/n$ round the circumference of a circle, the radial repulsion on one corpuscle

* Communicated by the Author.

Phil. Mag. S. 6. Vol. 7. No. 39. March 1904.

8

1904

6. Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwell'schen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwell'schen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwell'schen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das

On a heuristic point of view about
the creation and conversion of light

Annalen der Physik **17** (6): 132–148 (1905)



$$K_{\text{MAX}} = h\nu - W$$

O prémio Nobel da Física foi
atribuído a Albert Einstein em 1921;

"for his services to Theoretical Physics,
and especially for his discovery of the
law of the photoelectric effect".



1905

1904

5. *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen;*
von A. Einstein.

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem Mikroskop nachgewiesen werden können. Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der sogenannten „Brownischen Molekularbewegung“ identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau, daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.

Wenn sich die hier zu behandelnde Bewegung samt den für sie zu erwartenden Gesetzmäßigkeiten wirklich beobachten läßt, so ist die klassische Thermodynamik schon für mikroskopisch unterscheidbare Räume nicht mehr als genau gültig anzusehen und es ist dann eine exakte Bestimmung der wahren Atomgröße möglich. Erwies sich umgekehrt die Voraussage dieser Bewegung als unzutreffend, so wäre damit ein schwerwiegendes Argument gegen die molekularkinetische Auffassung der Wärme gegeben.

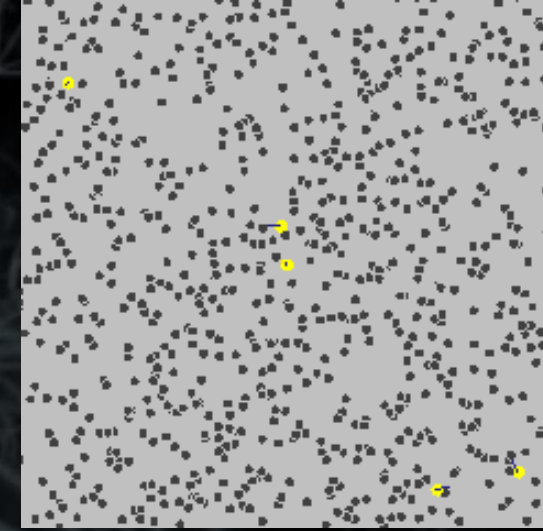
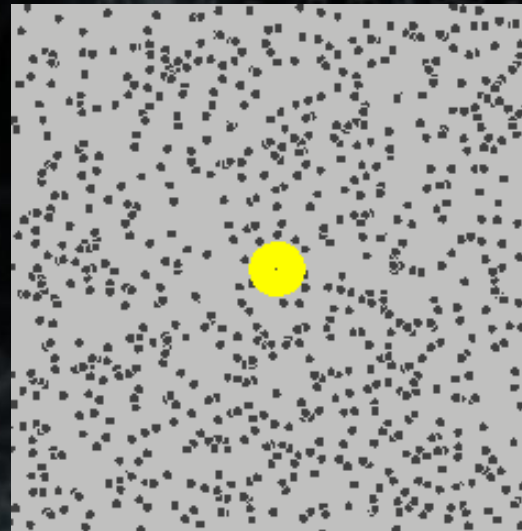
§ 1. *Über den suspendierten Teilchen zuzuschreibenden osmotischen Druck.*

Im Teilvolumen V^* einer Flüssigkeit vom Gesamtvolumen V seien z -Gramm-Moleküle eines Nichtelektrolyten gelöst. Ist das Volumen V^* durch eine für das Lösungsmittel, nicht aber für die gelöste Substanz durchlässige Wand vom reinen Lösungs-

“On the Motion of Small Particles Suspended in a Stationary Liquid, as Required by the Molecular Kinetic Theory of Heat”

Annalen der Physik 17 (8): 549–560 (1905)

Movimento de partículas suspensas num líquido ou gás

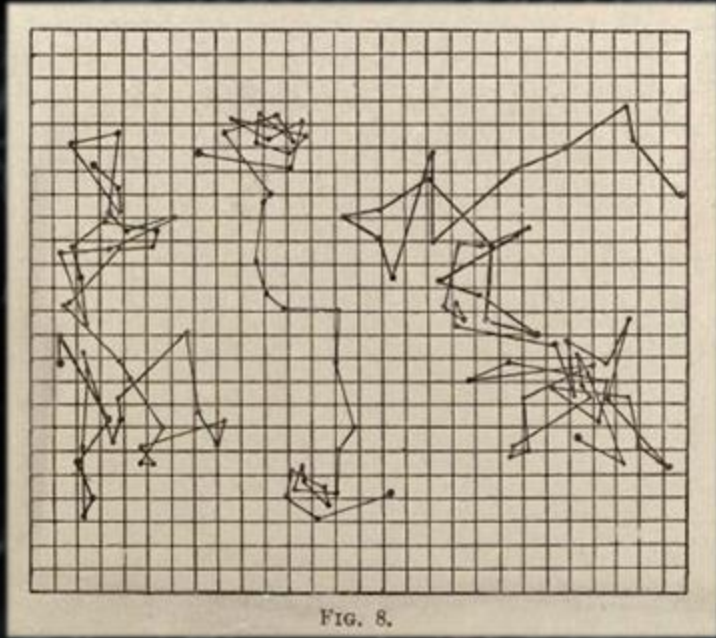


Movimento Browniano

1905

Deslocamento médio:

$$\lambda_x = \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{RT}{N}} \frac{1}{3\pi k P}$$



Jean Perrin verificou experimentalmente a teoria de Einstein e determinou o número de Avogadro:

$$N = 62.10^{22};$$

O prémio Nobel da Física foi atribuído a Jean Baptiste Perrin em 1926;

"for his work on the discontinuous structure of matter, and especially for his discovery of sedimentation equilibrium"



1905

1904

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper;
von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhafsten scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

On the electrodynamics of moving bodies

Annalen der Physik **17** (10): 891-921 (1905)

Postulados da RR:

- As leis da Física são válidas em todos os referenciais inerciais.
- A velocidade da luz é constante e o seu valor não depende do estado de movimento do observador (nem da fonte).

Espaço – tempo: $x^\mu = (ct, x, y, z)$

Consequências: Contração do espaço, dilatação do tempo, equivalência massa-energia.

1905

1904

Does the inertia of a body depend on its energy content?

Annalen der Physik **18** (13): 639-641 (1905)

13. *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*
von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung¹⁾ führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll.

Ich legte dort die Maxwell-Hertz'schen Gleichungen für den leeren Raum nebst dem Maxwell'schen Ausdruck für die elektromagnetische Energie des Raumes zugrunde und außerdem das Prinzip:

Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Parallel-Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden (Relativitätsprinzip).

Gestützt auf diese Grundlagen²⁾ leitete ich unter anderem das nachfolgende Resultat ab (l. c. § 8):

Ein System von ebenen Lichtwellen besitze, auf das Koordinatensystem (x, y, z) bezogen, die Energie l ; die Strahlrichtung (Wellennormale) bilde den Winkel φ mit der x -Achse des Systems. Führt man ein neues, gegen das System (x, y, z) in gleichförmiger Paralleltranslation begriffenes Koordinatensystem (ξ, η, ζ) ein, dessen Ursprung sich mit der Geschwindigkeit v längs der x -Achse bewegt, so besitzt die genannte Lichtmenge — im System (ξ, η, ζ) gemessen — die Energie:

$$l^* = l \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}},$$

wobei V die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Von diesem Resultat machen wir im folgenden Gebrauch.

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17. p. 891. 1905.

2) Das dort benutzte Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist natürlich in den Maxwell'schen Gleichungen enthalten.

algemeineren Folgerung geführt werden:

Die Masse eines Körpers ist ein Maß für dessen Energieinhalt; ändert sich die Energie um L , so ändert sich die Masse in demselben Sinne um $L/9 \cdot 10^{20}$, wenn die Energie in Erg und die Masse in Grammen gemessen wird.

Es ist nicht ausgeschlossen, daß bei Körpern, deren

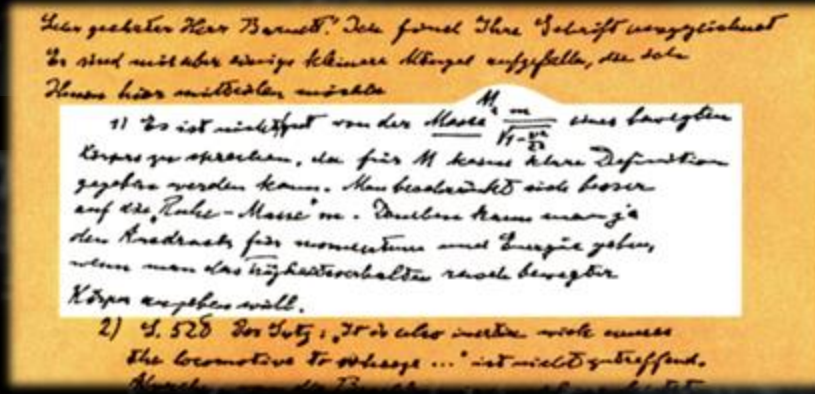
Se um corpo emitir uma energia L na forma de radiação, então a sua massa diminui de L/c^2 .

Ou, em linguagem moderna:

$$E = mc^2$$

1905

1904



Letter from Albert Einstein to Lincoln Barnett, 19 June 1948.

"It is not good to introduce the concept of mass

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

of a moving body for which no clear definition can be given. It is better to introduce no other mass concept than the 'rest mass' m . Instead of introducing M , it is better to mention the expression for the momentum and energy of a body in motion".

$$M^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$$

THE mass M is a lorentz invariant quantity.
 No need for other mass definitions.

THE CONCEPT OF MASS

In the modern language of relativity theory there is only one mass, the Newtonian mass m , which does not vary with velocity; hence the famous formula $E = mc^2$ has to be taken with a large grain of salt.

Lev B. Okun

opinion poll related to it.

The famous Einstein relation between mass and energy is a symbol of our century. Here you have four equations:

$$E_0 = mc^2 \tag{1}$$

$$E = mc^2 \tag{2}$$

$$E_0 = m_0 c^2 \tag{3}$$

$$E = m_0 c^2 \tag{4}$$

In these equations c is the velocity of light, E the total energy of a free body, E_0 its rest energy, m_0 its rest mass and m its mass.

1905

Rutherford & Geiger



“It was quite the most incredible event that has ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you fire a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you.”

E. Rutherford

On a Diffuse Reflection of the α -Particles.

By H. GEIGER, Ph.D., John Harling Fellow, and E. MARSDEN, Hatfield Scholar, University of Manchester.

(Communicated by Prof. E. Rutherford, F.R.S. Received May 19,—Read June 17, 1909.)

When β -particles fall on a plate, a strong radiation emerges from the same side of the plate as that on which the β -particles fall. This radiation is regarded by many observers as a secondary radiation, but more recent experi-

the relatively small scattering which α -particles suffer in penetrating matter.†

In the following experiments, however, conclusive evidence was found of the existence of a diffuse reflection of the α -particles. A small fraction of the α -particles falling upon a metal plate have their directions changed to such an extent that they emerge again at the side of incidence. To form an idea of the way in which this effect takes place, the following three points were investigated:

sphere of positive electricity is minute compared with the diameter of the sphere of influence of the atom.

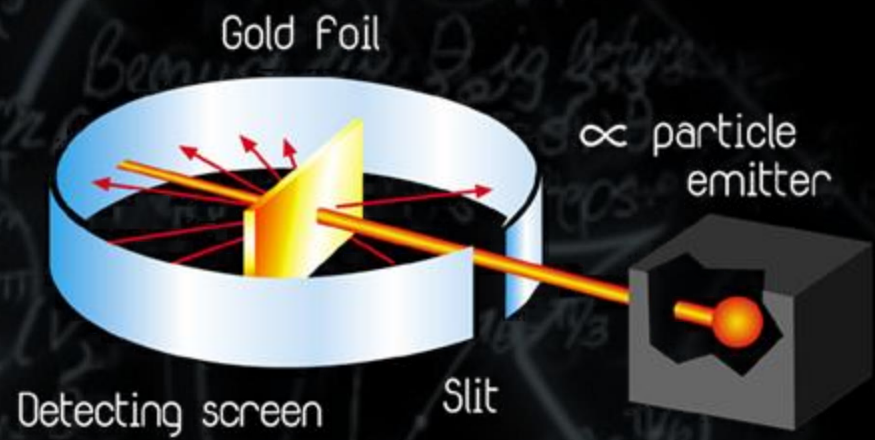
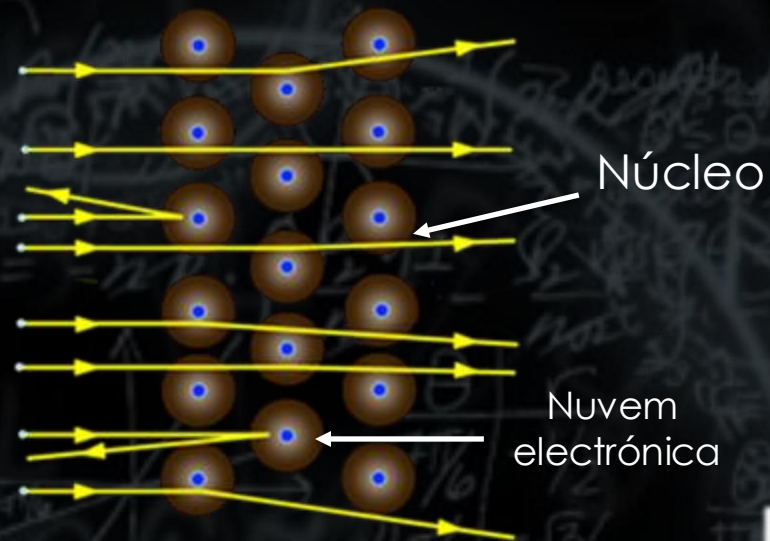
Since the α and β particles traverse the atom, it should be possible from a close study of the nature of the deflexion to form some idea of the constitution of the atom to produce the effects observed. In fact, the scattering of high-speed charged particles by the atoms of matter is one of the most promising methods of attack of this problem. The development of the scintillation method of counting single α particles affords unusual advantages of investigation, and the researches

“The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom”, E. Rutherford, 1911.

1911

1905

Partículas α



Secção eficaz de Rutherford (clássica).

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \left(\frac{Zze^2}{8\pi\epsilon_0 m v^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

Variation of scattering with angle.

I Angle of deflection, ϕ	II $\text{cosec}^4 \frac{1}{2}\phi$	III SILVER IV		V GOLD VI	
		Number of scintillations, N	$\frac{N}{\text{cosec}^4 \frac{1}{2}\phi}$	Number of scintillations, N	$\frac{N}{\text{cosec}^4 \frac{1}{2}\phi}$
150°	1.15	22.2	19.3	33.1	28.8
135	1.38	27.4	19.8	43.0	31.2
120	1.79	33.0	18.4	51.9	29.0
105	2.53	47.3	18.7	69.5	27.5
75	7.25	136	18.8	211	29.1
60	16.0	320	20.0	477	29.8
45	46.6	989	21.2	1435	30.8
37.5	93.7	1760	18.8	3300	35.3
30	223	5260	23.6	7800	35.0
22.5	690	20300	29.4	27300	39.6
15	3445	105400	30.6	132000	38.4

1913

Modelo "Planetário" de Rutherford → Átomo instável

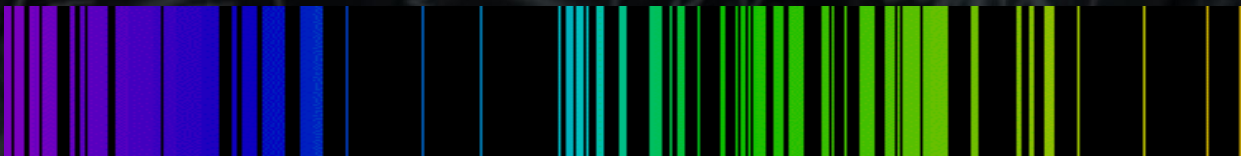
MODELO DE BOHR – O electrão orbita em volta do núcleo em órbitas bem definidas.



Quantização do momento angular:

$$m_e v r = n \hbar \rightarrow E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV}$$

Explicação para as linhas de emissão atómicas:



Fórmula de Rydberg:

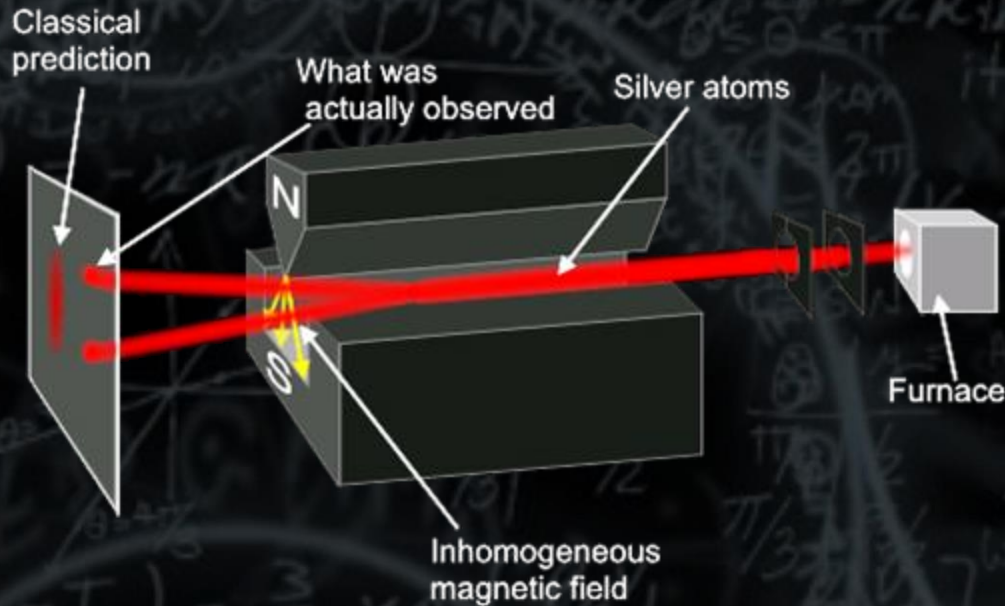
$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right)$$

We suppose that the radiation in question is emitted when the amount of energy is



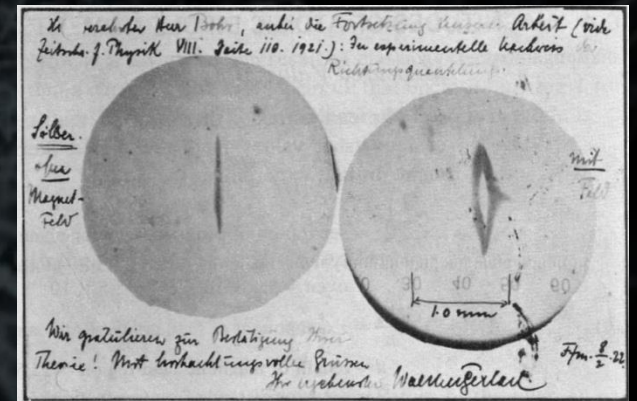
1923

EXPERIÊNCIA DE STERN-GERLACH



Os electrões têm um momento angular intrínseco.

SPIN: $S_z = \pm \frac{\hbar}{2}$ **Quantização !!!**



1924

NATUREZA ONDULATÓRIA DA MATÉRIA:

$$\lambda = h/p$$



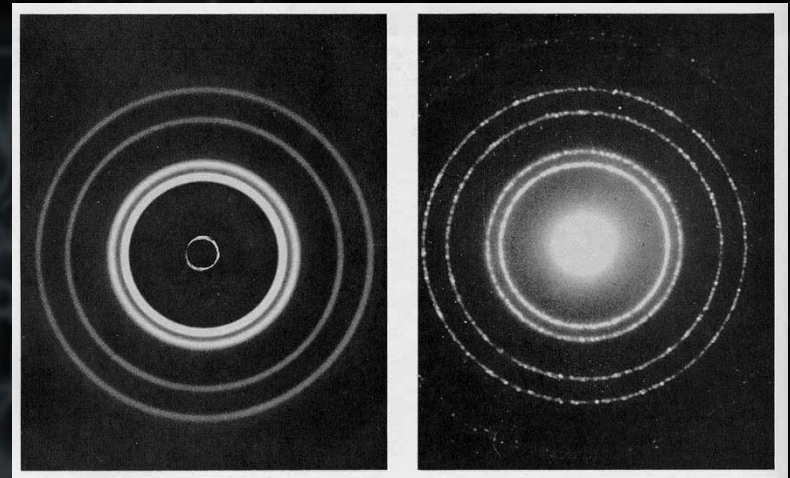
When I conceived the first basic ideas of wave mechanics in 1923–24,⁽¹⁾ I was guided by the aim to perform a real physical synthesis, valid for all particles, of the coexistence of the wave and of the corpuscular aspects that Einstein had introduced for photons in his theory of light quanta in 1905. I did not have any doubts at that time about the physical reality of the wave and the localization of the particle in the wave.

At that time, one remark made a deep impression on me. The phase of the plane monochromatic wave, written as

Verificada experimentalmente por
Davisson e Germer em 1927

O prémio Nobel da Física foi atribuído
a Louis De Broglie em 1929;

"for his discovery of the
wave nature of electrons".



1920-1925

Apesar dos sucessos do modelo de Bohr, o mesmo tinha várias limitações.

- Intensidade relativa das riscas de emissão;
- Não permitia descrever átomos com mais elétrões;
- Separação das linhas espectrais devido a campos magnéticos externos (efeito de Zeeman);
- Estrutura fina e hiperfina dos átomos;

1920-1925

ERA NECESSÁRIA UMA TEORIA QUE FOSSE BASEADA
EM PRIMEIROS PRINCÍPIOS

A NOVA TEORIA QUÂNTICA



1920-1925

Abandono do determinismo
da Física clássica

$$\vec{r}, t \rightarrow \psi(\vec{r}, t)$$

EQUAÇÃO DE SCHRÖDINGER

$$\Delta\psi + 8\pi^2m(E - V)\psi/h^2 = 0$$

Numa versão mais moderna:

$$i\hbar \frac{d\psi(\vec{r}, t)}{dt} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r}, t) \right] \psi(\vec{r}, t)$$

Second Series

December, 1926

Vol. 28, No. 6

THE
PHYSICAL REVIEW

AN UNDULATORY THEORY OF THE MECHANICS
OF ATOMS AND MOLECULES

By E. SCHRÖDINGER

ABSTRACT

The paper gives an account of the author's work on a new form of quantum theory. §1. The Hamiltonian analogy between mechanics and optics. §2. The analogy is to be extended to include real "physical" or "undulatory" mechanics instead of mere geometrical mechanics. §3. The significance of wave-length; macro-mechanical and micro-mechanical problems. §4. The wave-equation and its application to the hydrogen atom. §5. The intrinsic reason for the appearance of discrete characteristic frequencies. §6. Other problems; intensity of emitted light. §7. The wave-equation derived from a Hamiltonian variation-principle; generalization to an arbitrary conservative system. §8. The wave-function physically means and determines a continuous distribution of electricity in space, the fluctuations of which determine the radiation by the laws of ordinary electrodynamics. §9. Non-conservative systems. Theory of dispersion and scattering and of the "transitions" between the "stationary states." §10. The question of relativity and the action of a magnetic field. Incompleteness of that part of the theory.

1. The theory which is reported in the following pages is based on the very interesting and fundamental researches of L. de Broglie¹ on what he called "phase-waves" ("ondes de phase") and thought to be associated with the motion of material points, especially with the motion of an electron or proton. The point of view taken here, which was first published in a series of German papers,² is rather that material points consist of, or are nothing but, wave-systems. This extreme conception may be wrong, indeed it does not offer as yet the slightest explanation of why only such wave-systems seem to be realized in nature as correspond to mass-points of definite mass and charge. On the other hand the opposite point of view, which neglects altogether the waves discovered by L. de Broglie and treats only the motion of material points, has led to such grave difficulties in the theory of atomic mechanics

¹ L. de Broglie, Ann. de Physique 3, 22 (1925).

² E. Schrödinger, Ann. d. Physik 79, 361, 489, 734; 80, 437 81, 109 (1926); Die Naturwissenschaften 14, 664 (1926).

1049

1926

Qual o significado de ψ ?

1920-1925



Max Born

where the ν_{nm}^0 are the frequencies of the unperturbed atom.

If one translates this result into terms of particles, only one interpretation is possible. $\Phi_{n,m}(\alpha, \beta, \gamma)$ gives the probability* for the electron, arriving from the z -direction, to be thrown out into the direction designated by the angles α, β, γ , with the phase change δ . Here its energy τ has increased by one quantum $h\nu_{nm}^0$ at the cost of the energy of the atom (collision of the first kind for $W_n^0 < W_m^0, h\nu_{nm}^0 < 0$; collision of the second kind $W_n^0 > W_m^0, h\nu_{nm}^0 > 0$)

“On the quantum mechanics of collisions”, 1926

INTERPRETAÇÃO PROBABILÍSTICA

$$|\psi(\vec{r}, t)|^2 dV$$

Probabilidade de encontrar a partícula num volume infinitesimal dV

$$\int |\psi(\vec{r}, t)|^2 dV = 1$$

gerade einen gequantelten Zustand des ganzen Gaskörpers und umgekehrt. Fermis statistische Grundannahme erscheint demnach auch vom Stand-

¹⁾ Hat man ein System aus N Partikeln, mit den Lagenkoordinaten $q_1 \dots q_f$, so wird jedem Quantenzustand des Systems nach Schrödinger eine Funktion $\psi(q_1 \dots q_f)$ zugeordnet, die einer von ihm angegebenen Differentialgleichung genügt. Wir wollen diese (vom reinen Wellenstandpunkt aus wohl kaum verständliche) Funktion im Sinne der von Born in seiner Stoßmechanik (ZS. f. Phys. **37**, 863, 1926; **38**, 803, 1926) vertretenen Auffassung des „Gespensterfeldes“ folgendermaßen deuten: Es ist $|\psi(q_1 \dots q_f)|^2 dq_1 \dots dq_f$ die Wahrscheinlichkeit dafür, daß im betreffenden Quantenzustand des Systems diese Koordinaten sich zugleich im betreffenden Volumenelement $dq_1 \dots dq_f$ des Lagenraumes befinden. Die im Text erwähnte Vorschrift für die Charakterisierung der in der Natur realisierten Lösung im besonderen Falle N gleicher Partikel besagt nun, daß die zugehörige Funktion ψ das Vorzeichen ändern soll, wenn man die Koordinaten je zweier Partikeln vertauscht. Haben die Teilchen wie die Elektronen einen Eigenimpuls, so müssen zu den drei Translationskoordinaten für jede Partikel noch weitere den Rotationsfreiheitsgraden entsprechende Koordinaten hinzugefügt werden und die Vertauschung der Koordinaten je zweier Partikeln muß dann für jede Partikel alle Freiheitsgrade zugleich betreffen.

²⁾ P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. (A) **112**, 661, 1926. In dieser Arbeit

W. Pauli, Z. für Physik **41**, 81-102 (1927)

1926

1920-1925

Qual a função de onda do gato de Schrödinger?

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{gato vivo}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{gato morto}\rangle$$

Depois de abrirmos a caixa:

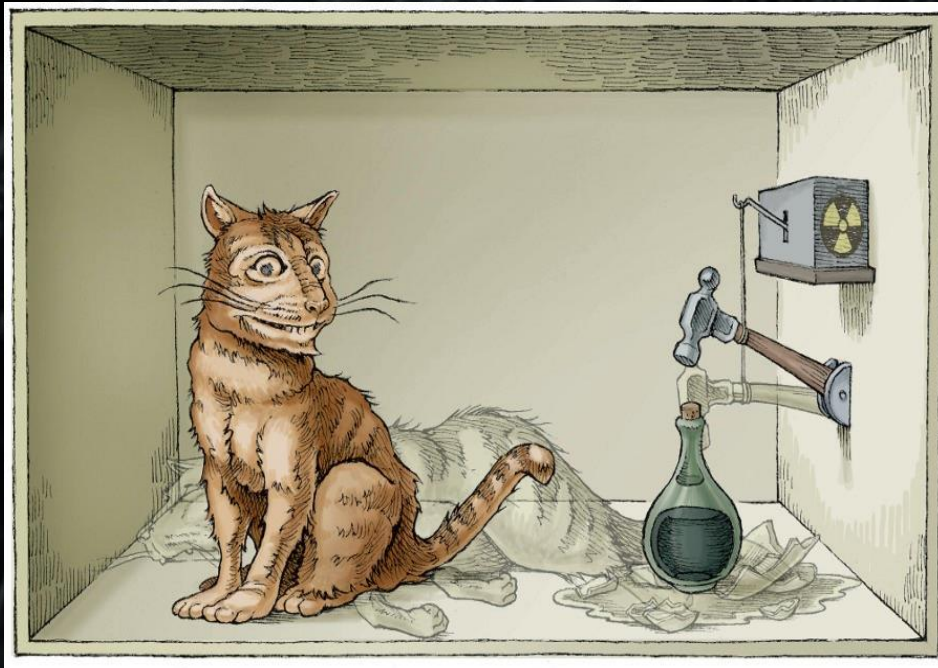
$$|\text{gato morto}\rangle \text{ OU } |\text{gato vivo}\rangle$$

COLAPSO DA FUNÇÃO DE ONDA DEVIDO
À OBSERVAÇÃO

1926

1920-1925

Qual a função de onda do gato de Schrödinger?



$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{gato vivo}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{gato morto}\rangle$$

Depois de abrirmos a caixa:

$$|\text{gato morto}\rangle \text{ OU } |\text{gato vivo}\rangle$$

COLAPSO DA FUNÇÃO DE ONDA DEVIDO À OBSERVAÇÃO

1927

Não é possível medir
simultaneamente

a posição e o momento de
uma partícula
 $\Delta p \Delta x \geq \hbar/2$

1926



O prémio Nobel da Física foi atribuído a Werner Heisenberg em 1932;

"for the creation of quantum mechanics".



172

Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.

Von W. Heisenberg in Kopenhagen.

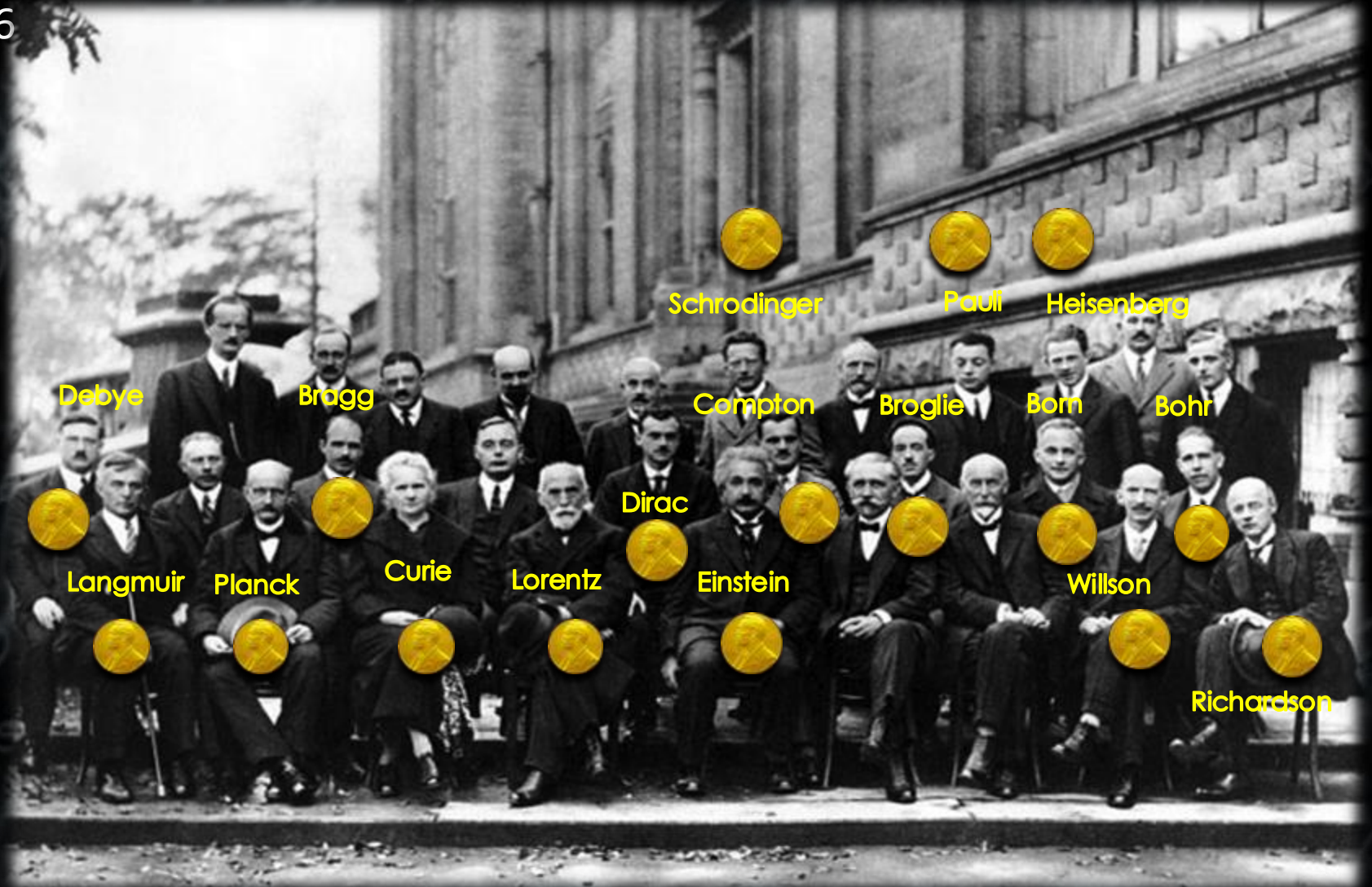
Mit 2 Abbildungen. (Eingegangen am 23. März 1927.)

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 Diskontinuitäts- 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. Ebensovienig wird eine Revision der Raum-Zeitgeometrie für kleine Räume und Zeiten notwendig sein, da wir durch Wahl hinreichend schwerer Massen die quantenmechanischen Gesetze den

1927

1926



Fifth conference participants, 1927. Institut International de Physique Solvay in Leopold Park.