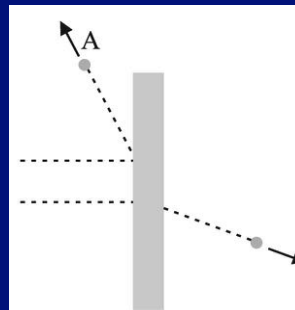
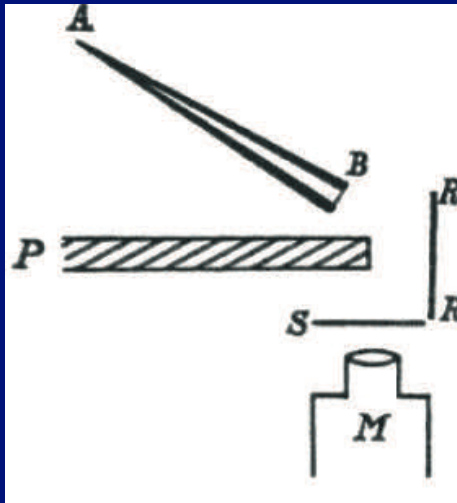


# Breve história da MQ

## Rutherford 1911: descoberta do núcleo atômico

especialista em radioatividade: partículas alfa e beta...

Fonte de partículas alfa - espalhamento por lâmina de ouro muito fina



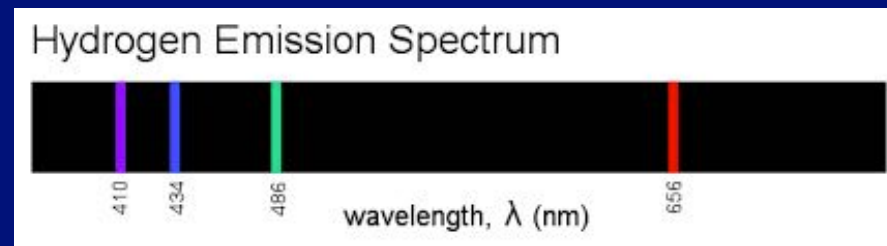
Espalhamento para trás...  
possível apenas se massa  
atômica estiver concentrada  
em região  $\ll$  átomo

Geiger + Marsden 1909

# Breve história da MQ

## Espectro do Hidrogênio

quatro linhas no visível (Angström 1860):



Balmer 1885: fórmula empírica para sub-conjunto do espectro do H  
 $n = 7, 8, 9, \dots \Rightarrow$  linhas ultra-violetas do H

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, 6.$$

Rydberg 1888: generalização para todo o espectro

$$R_H = 0,01097 \text{ nm}^{-1}$$

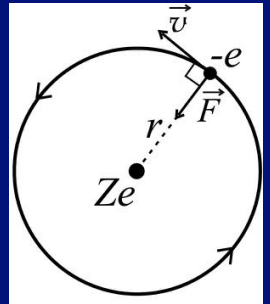
**Bohr 1913: unificação entre espectroscopia e física atômica**

# Breve história da MQ

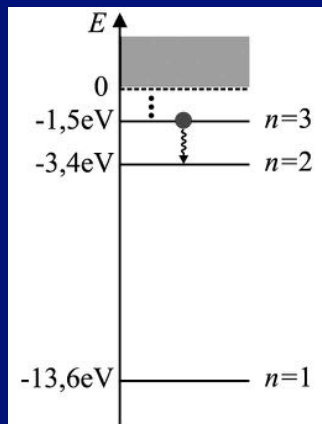
## Pré MQ

### Bohr 1913: unificação entre espectroscopia e física atômica

Modelo: elétron(s) em órbita em torno do núcleo atômico (Rutherford)



- Energia cinética do elétron quantizada - constante de Planck  $h$
- *Níveis de energia - emissão de fóton quando elétron realiza transição entre níveis*



$$E_n = -\frac{\mathcal{R}_Z}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$E_n = E_m + h\nu$$

$$\frac{1}{\lambda} = R_Z \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R_Z = \frac{\mathcal{R}_Z}{hc} = \frac{m_e (Ze^2)^2}{8c\epsilon_0^2 h^3}$$

Derivação das fórmulas de Balmer e Rydberg para  $Z=1$  (Hidrogênio) !

# Breve história da MQ

Início dos anos 20: fracasso da ‘velha’ Física Quântica (Bohr, Sommerfeld) em explicar a dinâmica e estrutura atômica

Julho de 1925: Heisenberg publica primeiro artigo sobre a ‘nova’ Mecânica Quântica. Trecho do resumo:

‘...este artigo procura estabelecer uma base para a mecânica quântica ...’

posição e momento linear representados por matrizes que não comutam!

Novembro 1925: Born+Jordan (e independentemente por P. Dirac) formalização ...comutador entre posição **X** e momento **P** de uma partícula:

$$\mathbf{X} \cdot \mathbf{P} - \mathbf{P} \cdot \mathbf{X} = i \frac{h}{2\pi} \mathbf{1}$$

Constante  
de Planck

# Breve história da MQ



(1927)

**Werner Heisenberg** (1901 - 1976)

Prêmio Nobel (Física) de 1932, ‘pela criação da Mecânica Quântica...’

1920-1923 Doutorado em Munique com A. Sommerfeld

1923-1926 Assistente de M. Born na Universidade de Göttingen

(1924-1925) 1926-1927 Visitante no Instituto de Física Teórica de N. Bohr em Copenhagen

1927-1941 Professor na Universidade de Leipzig

(Guido Beck foi seu assistente durante 1928-1932)

# Breve história da MQ

Quão grandes são as flutuações em torno da média estatística?

$$\Delta x \equiv \sqrt{\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle}$$

$$\Delta p \equiv \sqrt{\langle (p - \langle p \rangle)^2 \rangle}$$

$X$  e  $P$  não comutam!  $\Rightarrow$  princípio da incerteza:

Limite inferior fundamental para as incertezas de posição e momento:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Pauli 1926 (carta para Heisenberg):

‘por que  $p$  e  $x$  não podem ser conhecidos com precisão arbitrária? ...podemos olhar o mundo com o olho- $p$  ou com o olho- $x$ , mas quando queremos abrir ambos os olhos ficamos tontos’.

Medida do momento apaga (embaralha) informação sobre a posição (e vice-versa)

# Breve história da MQ

1925-1926: contribuições fundamentais

**Schrödinger:** formulação alternativa em termos da função de onda (1926) - inspirado por onda piloto de de Broglie (1923). Derivação do espectro dos hidrogenóides (Bohr)

**Born - interpretação probabilística (1926) - Prêmio Nobel 1954**  
‘...pela interpretação estatística da função de onda..’

## Regra de Born

### 1.2 ON THE QUANTUM MECHANICS OF COLLISIONS

[Preliminary communication]<sup>†</sup>

MAX BORN

Through the investigation of collisions it is argued that quantum mechanics in the Schrödinger form allows one to describe not only stationary states but also quantum jumps.

<sup>†</sup> This report was originally intended for *die Naturwissenschaften*, but could not be accepted there for lack of space. I hope that its publication in this journal [*Zeitschrift für Physik*] does not seem out of place [M.B.].

Originally published under the title, “Zur Quantenmechanik der Stössvorgänge,” *Zeitschrift für Physik*, 37, 863–67 (1926); reprinted in *Dokumente der Naturwissenschaft*, 1, 48–52 (1962) and in M. Born (1963); translation into English by J.A.W. and W.H.Z., 1981.

# Regra de Born: 1926

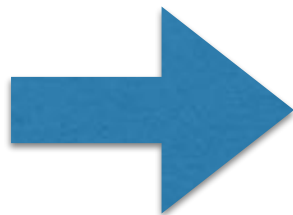
If one translates this result into terms of particles, only one interpretation is possible.  $\Phi_{\alpha\beta\gamma}(\alpha, \beta, \gamma)$  gives the probability\* for the electron, arriving from the  $z$ -direction, to be thrown out into the direction designated by the angles  $\alpha, \beta, \gamma$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

Schrödinger's quantum mechanics therefore gives quite a definite answer to the question of the effect of the collision; but there is no question of any causal description. One gets no answer to the question, "what is the state after the collision," but only to the question, "how probable is a specified outcome of the collision" (where naturally the quantum mechanical energy relation must be fulfilled).

Here the whole problem of determinism comes up. From the standpoint of our quantum mechanics there is no quantity which in any individual case causally fixes the consequence of the collision; but also experimentally we have so far no reason to believe that there are some inner properties of the atom which condition a definite outcome for the collision. Ought we to hope later to discover such properties (like phases or the internal atomic motions) and determine them in individual cases? Or ought we to believe that the agreement of theory and experiment—as to the impossibility of prescribing conditions for a causal evolution—is a pre-established harmony founded on the nonexistence of such conditions? I myself am inclined to give up determinism in the world of atoms. But that is a philosophical question for which physical arguments alone are not decisive.

In practical terms indeterminism is present for experimental as well as for theoretical physicists. The "yield function"  $\Phi$  so much investigated by experimentalists is now also sharply defined theoretically. One can determine it from the potential energy of interaction,  $V(x, y, z; q_k)$ . However, the calculations required

\* Addition in proof: More careful consideration shows that the probability is proportional to the square of the quantity  $\Phi_{\alpha\beta\gamma}$ .



# Breve história da MQ

1925-1926: contribuições fundamentais

**Dirac** - Teoria quântica do campo EM, emissão/absorção (1926/1927)  
MQ relativística (1928), 'Principles of QM' - 1o livro-texto!

Prêmio Nobel 1933: Schrödinger + Dirac, '...pela descoberta de novas formas da teoria atômica'

**Pauli** - spin, ...Prêmio Nobel 1945 pelo princípio de exclusão

# Breve história da MQ

- Complementaridade (Bohr) , dualidade onda-partícula
- Fim das órbitas do modelo atômico de Bohr: trajetórias não são definidas
- Fim do determinismo Newtoniano
- Mec Quântica é intrinsecamente probabilística

## Referências:

*Niels Bohr's Times*, Abraham Pais, Clarendon Press 1991

AIP Center for the History of Physics: <http://www.aip.org/history/heisenberg/>