

Instituto de Física USP

Física V - Aula 22

Professora: Mazé Bechara

Aula 22 – Experimento de Franck e Hertz, princípio de correspondência e regra de quantização de Wilson-Sommerfeld

1. O Experimento de Franck e Hertz – mais uma evidência da quantização nos estados atômicos.
2. Princípio de correspondência de Bohr. Aplicações.
3. A regra de Quantização de Wilson-Sommerfeld. Aplicações: MHS unidimensional.

Experimento de Franck-Hertz (1914)

prêmio Nobel de Física em 1925

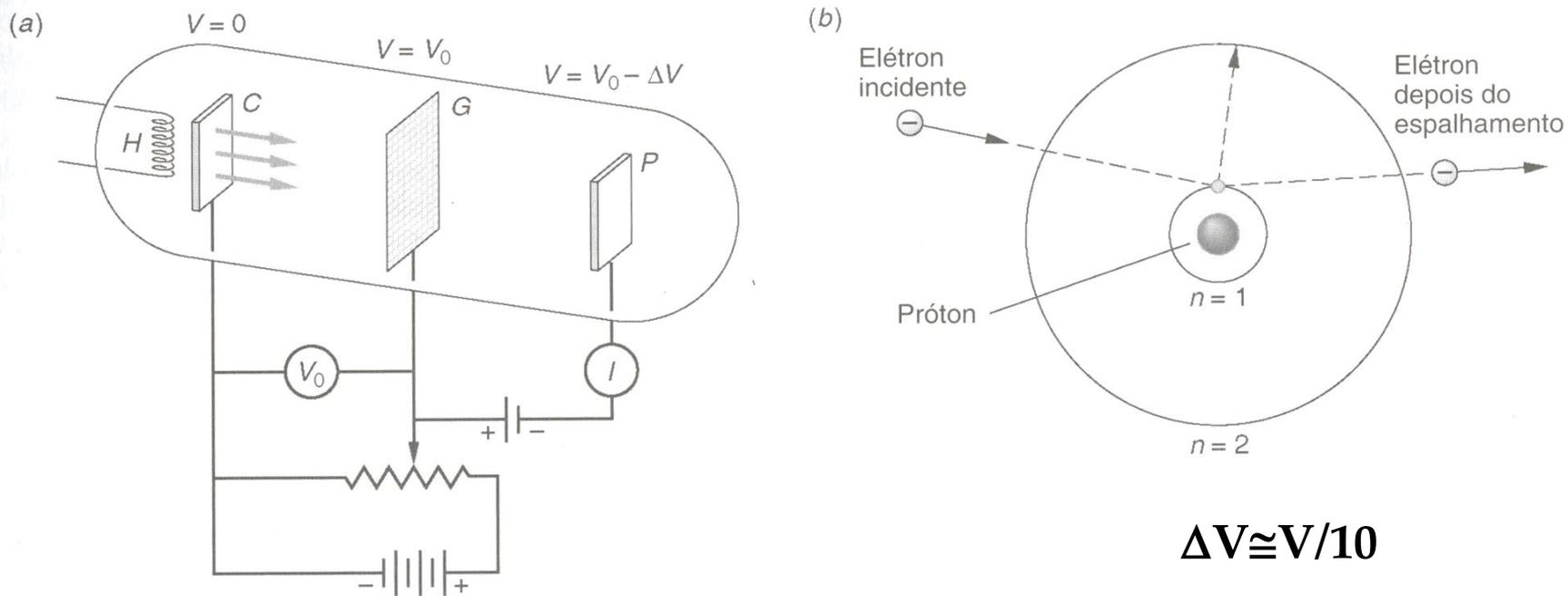
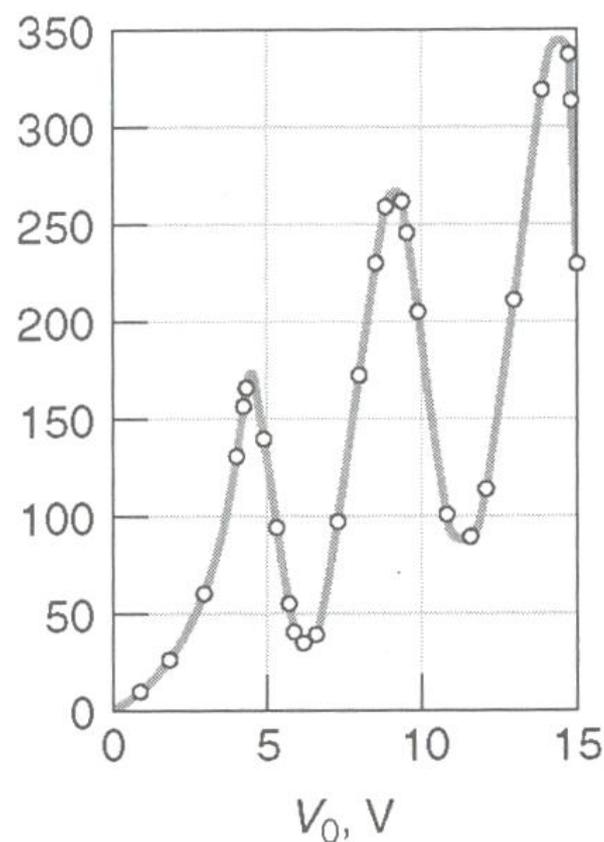


Fig. 4-20 (a) Diagrama esquemático do experimento de Franck-Hertz. Elétrons ejetados do catodo aquecido C são atraídos pela grade positiva G . Os elétrons que passam pelos furos da grade chegam à placa P e portanto contribuem para a corrente I , se tiverem energia suficiente para vencer o pequeno potencial negativo ΔV . O tubo contém um gás do elemento a ser estudado. (b) Resultados possíveis para o hidrogênio. Se o elétron incidente não tiver energia suficiente para transferir uma parcela $\Delta E = E_2 - E_1$ para o elétron do hidrogênio na órbita $n = 1$ (estado fundamental), o espalhamento será elástico; se o elétron tiver uma energia cinética igual ou maior que ΔE , o espalhamento será inelástico e uma energia ΔE será transferida para o elétron que está na órbita $n = 1$, transferindo-o para a órbita $n = 2$. O elétron excitado voltará rapidamente para o estado fundamental, emitindo um fóton de energia ΔE .



Espalhamento inelástico de elétrons por gás de mercúrio
Corrente elétrica versus o potencial acelerador.

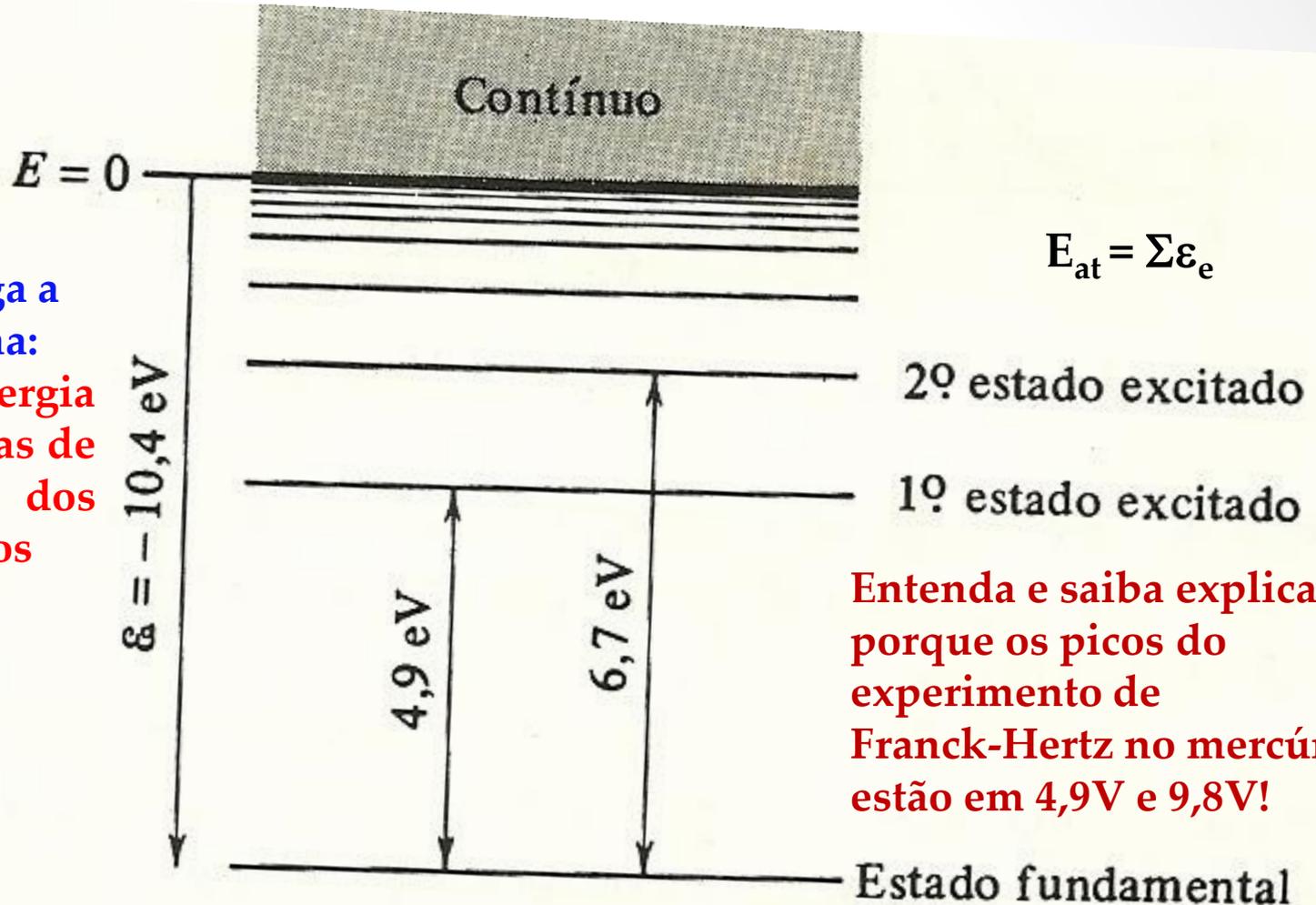
Fig. 4-21 Corrente em função da tensão de aceleração no experimento de Franck-Hertz. A corrente diminui porque muitos elétrons perdem energia em colisões inelásticas com átomos de mercúrio e portanto não conseguem vencer o pequeno potencial negativo indicado na Fig. 4-20a. O espaçamento regular dos picos nesta curva indica que apenas uma certa energia, 4,9 eV, pode ser transferida para os átomos de mercúrio. Esta interpretação é confirmada pela observação de fótons com uma energia de 4,9 eV emitidos pelos átomos de mercúrio quando V_0 é maior que esta energia. [Fonte: J. Franck e G. Hertz, *Verband Deutscher Physikalischer Gesellschaften*, **16**, 457 (1914).]

O processo observado no experimento de Franck e Hertz

- **Processo:** espalhamento inelástico dos elétrons do catodo com os átomos de mercúrio de baixa pressão.
- **Como ocorre:** quando os elétrons do catodo atingem $4,9\text{eV}$ de energia cinética ($E_c = eV$) nas vizinhanças da grade, o elétron do átomo rouba esta energia para uma transição que deixa o átomo no seu 1º estado excitado. O elétron do catodo não consegue passar na grade, que tem pequeno potencial desacelerador, e cai a corrente.
- Com mais tensão, a corrente aumenta até chegar em ($9,8\text{V}$). Nesta situação alguns elétrons podem ceder energia cinética duas vezes entre o catodo e a grade: uma na metade do trajeto (Energia cinética igual a $4,9\text{eV}$) e outra novamente próximo a grade (novamente $4,9\text{eV}$ de energia cinética). E a corrente começa a cair novamente.
- **Moral da história:** elétrons ligados a átomos só absorvem uma quantidade exata de energia, mesmo quando é energia cinética de outra partícula.

Diagrama de níveis de energia dos átomos de mercúrio

Como se chega a este diagrama: medindo a energia de ionização e as de excitação dos estados atômicos



Entenda e saiba explicar porque os picos do experimento de Franck-Hertz no mercúrio estão em $4,9\text{V}$ e $9,8\text{V}$!

Fig. do Eisberg - Resnick

Princípio de Correspondência

(Estabelecido por Bohr em 1920)

1. **A Física Quântica** para qualquer sistema e dinâmica **deve coincidir com a Física Clássica no limite no qual os números quânticos que especificam o estado do sistema, se tornam muito grandes (números quânticos $\rightarrow \infty$).**
2. **As regras de seleção são válidas para todos os números quânticos possíveis.** Assim, as regras de seleção que são necessárias para obter a coincidência de uma teoria quântica com a clássica quando os números quânticos são grandes, também se aplicam na situação quântica, ou seja, *de números quânticos pequenos.*

Aplicações do princípio de correspondência

trabalhados em sala de aula

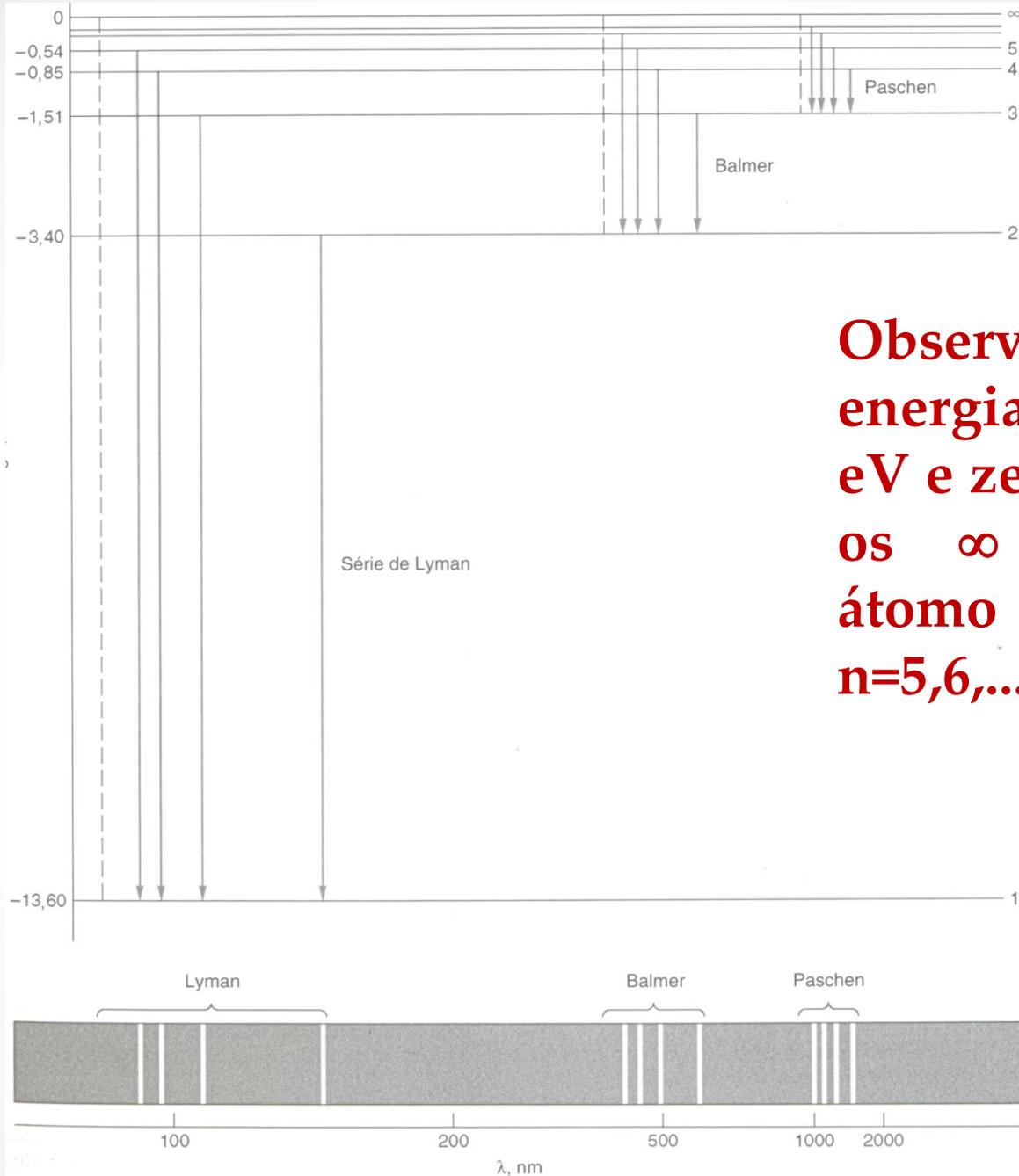
1. Seria o momento angular da bolinha macroscópica em MCU quantizada, no entendimento da Física atual? **Sugestão: Use a princípio de correspondência para dar sua resposta qualitativa e quantitativa.**
2. **O princípio de correspondência na energia e frequências emitidas do átomo de H.**

A frequência ν_0 foi calculada como o inverso do período, como exige a Física Clássica, mas usando os raios e velocidades do modelo de Bohr.

A frequência ν foi calculada como a diferença entre duas energias, estado n e $n-1$, do modelo de Bohr sobre h , de acordo com uma das hipóteses sobre transições atômicas do modelo.

TABELA 4-2 O Princípio da Correspondência para o Hidrogênio

n	ν_0	ν	Diferença %
5	$5,26 \times 10^{13}$	$7,38 \times 10^{13}$	29
10	$6,57 \times 10^{12}$	$7,72 \times 10^{12}$	14
100	$6,578 \times 10^9$	$6,677 \times 10^9$	1,5
1.000	$6,5779 \times 10^6$	$6,5878 \times 10^6$	0,15
10.000	$6,5779 \times 10^3$	$6,5789 \times 10^3$	0,015



Observe que com energia entre $-0,54$ eV e zero estão todos os ∞ estados do átomo de H com $n=5,6,\dots,\infty$

A regra de quantização de Wilson-Sommerfeld

- Para **qualquer sistema físico, em movimento periódico**, existe a seguinte condição de quantização:

$$\oint_{1T} p_q dq = n_q h$$

- $n_q = 0, 1, 2, 3, \dots$
- q são as coordenadas (generalizadas) necessárias para a descrição do movimento, e p_q os momentos (generalizados) associados às coordenadas q . A integral deve ser realizada em um período ($1T$) do movimento.