

*Instituto de Física  
USP*

*Física V - Aula 23*

*Professora: Mazé Bechara*

# *Aula 23 – Modelo de Bohr. O modelo de camadas. O experimento de Franck e Hertz.*

1. Aplicações relativas ao modelo de Bohr a átomos de mais de um elétron:

**Q15 do Guia ao Tópico III.**

2. **Átomos de muitos elétrons** – os raios e velocidades das órbitas dos elétrons comparadas com a do H. **O modelo de camadas + o princípio de exclusão de Pauli** para descrever as propriedades físico-químicas dos elementos.

3. A descoberta de Moseley sobre a relação entre a frequência do raio X e o Z (na linguagem atual) do átomo. **Os processos que geram a estrutura fina dos espectros de raios X e sua diferença dos que geram os espectros de emissão atômica (menores frequências).**

4. **O Experimento de Franck e Hertz** – mais uma evidência da quantização nos estados atômicos, agora com excitação dos átomos via energia de elétrons .

# Estrutura no Modelo de Bohr - Aplicação

Baseada na Questão 15 do Guia ao Tópico III

Adotando o modelo de Bohr

- (a) **Calcule a energia total do estado fundamental do átomo de He** desprezando todas as interações entre eles. **Justifique**
- (b) **Considerando agora a repulsão mútua** devido às cargas dos elétrons, e supondo que eles mantenham entre si a distância máxima (velocidade relativa nula) **calcule a energia elétrica de interação entre eles e a energia do átomo no estado fundamental neste caso. Justifique.**
- (c) Com base nos cálculos acima **estime a energia de ionização do átomo de He. Justifique. Compare** o resultado com o **valor experimental:  $24,6\text{eV}$**  e comente.
- (d) Com base neste modelo de Bohr, quais as órbitas dos elétrons no 1º estado excitado do átomo de He?

# *O modelo de camadas nos átomos*

- **Questão 1.** No estado fundamental dos átomos de muitos elétrons, todos estão no estado  $n=1$ ?
- **Resposta: Não. Porque a natureza física dos elementos parece ser assim.**
- **Questão 2.** Como se chegou a isto?
- **Resposta: pelas propriedades físico-químicas dos elementos, em particular, pela capacidade de interagir, ou de não interagir dos elementos, para formar ou não formar outras substâncias.**
- **Também os picos característicos dos raios X indicam que os elétrons não estão todos na órbita de mesmo  $n$ .**

# *Modelo para os átomos de Z elétrons*

1. Há um número de elétrons em cada um dos estados eletrônicos de número quântico  $n$  do modelo de Bohr: é o “modelo de camadas”. Os números de elétrons em que cabem em cada “camada” (com mesmo  $n$ ) foram inicialmente chamados de “números mágicos”.
2. A proposta de Pauli é de um “princípio de exclusão”, que recebeu o nome do autor: não há mais de um elétron em um mesmo estado físico nos átomos. Mais tarde na disciplina, quando da discussão do átomo de Hidrogênio na mecânica quântica, será possível compreender porque estes elétrons com mesmo  $n$  não estão no mesmo estado quântico.
3. Atualmente se descreve os números “mágicos” na estatística quântica para as partículas com spin (grandeza física quântica) semi-inteiro, que são as partículas obedecem ao princípio de exclusão de Pauli. A mecânica estatística quântica para partículas com spin semi-inteiro, chamada de estatística de Fermi-Dirac, vale para os elétrons que tem número quântico de spin igual a  $\frac{1}{2}$ .

**Maiores detalhes da mecânica estatística quântica na disciplina Física Moderna II**

# Periodic Table of Elements

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																		
1 <b>H</b> Hydrogen 1.00794	Atomic # Symbd Name Atomic Mass																2 <b>He</b> Helium 4.002602																		
3 <b>Li</b> Lithium 6.941	4 <b>Be</b> Beryllium 9.012182	<b>C</b> Solid <b>Hg</b> Liquid <b>H</b> Gas <b>Rf</b> Unknown										<b>Metals</b> Alkali metals Alkaline earth metals Lanthanoids Actinoids Transition metals Poor metals			<b>Nonmetals</b> Other nonmetals Noble gases			5 <b>B</b> Boron 10.811	6 <b>C</b> Carbon 12.0107	7 <b>N</b> Nitrogen 14.0067	8 <b>O</b> Oxygen 15.9994	9 <b>F</b> Fluorine 18.9984032	10 <b>Ne</b> Neon 20.1797												
11 <b>Na</b> Sodium 22.98976928	12 <b>Mg</b> Magnesium 24.3050	13 <b>Al</b> Aluminium 26.9815386	14 <b>Si</b> Silicon 28.0855	15 <b>P</b> Phosphorus 30.973762	16 <b>S</b> Sulfur 32.065	17 <b>Cl</b> Chlorine 35.453	18 <b>Ar</b> Argon 39.948	19 <b>K</b> Potassium 39.0983	20 <b>Ca</b> Calcium 40.078	21 <b>Sc</b> Scandium 44.955912	22 <b>Ti</b> Titanium 47.867	23 <b>V</b> Vanadium 50.9415	24 <b>Cr</b> Chromium 51.9961	25 <b>Mn</b> Manganese 54.938045	26 <b>Fe</b> Iron 55.845	27 <b>Co</b> Cobalt 58.933195	28 <b>Ni</b> Nickel 58.6934	29 <b>Cu</b> Copper 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.38	31 <b>Ga</b> Gallium 69.723	32 <b>Ge</b> Germanium 72.64	33 <b>As</b> Arsenic 74.92160	34 <b>Se</b> Selenium 78.96	35 <b>Br</b> Bromine 79.904	36 <b>Kr</b> Krypton 83.798										
37 <b>Rb</b> Rubidium 85.4678	38 <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 <b>Y</b> Yttrium 88.90585	40 <b>Zr</b> Zirconium 91.224	41 <b>Nb</b> Niobium 92.90638	42 <b>Mo</b> Molybdenum 95.96	43 <b>Tc</b> Technetium (97.9072)	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102.90550	46 <b>Pd</b> Palladium 106.42	47 <b>Ag</b> Silver 107.8682	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.411	49 <b>In</b> Indium 114.818	50 <b>Sn</b> Tin 118.710	51 <b>Sb</b> Antimony 121.760	52 <b>Te</b> Tellurium 127.60	53 <b>I</b> Iodine 126.90447	54 <b>Xe</b> Xenon 131.293	55 <b>Cs</b> Caesium 132.9054519	56 <b>Ba</b> Barium 137.327	57-71	72 <b>Hf</b> Hafnium 178.49	73 <b>Ta</b> Tantalum 180.94788	74 <b>W</b> Tungsten 183.84	75 <b>Re</b> Rhenium 186.207	76 <b>Os</b> Osmium 190.23	77 <b>Ir</b> Iridium 192.217	78 <b>Pt</b> Platinum 195.084	79 <b>Au</b> Gold 196.966569	80 <b>Hg</b> Mercury 200.59	81 <b>Tl</b> Thallium 204.3833	82 <b>Pb</b> Lead 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208.98040	84 <b>Po</b> Polonium (208.9824)	85 <b>At</b> Astatine (208.9871)	86 <b>Rn</b> Radon (222.0176)
87 <b>Fr</b> Francium (223)	88 <b>Ra</b> Radium (226)	89-103	104 <b>Rf</b> Rutherfordium (261)	105 <b>Db</b> Dubnium (262)	106 <b>Sg</b> Seaborgium (266)	107 <b>Bh</b> Bohrium (264)	108 <b>Hs</b> Hassium (277)	109 <b>Mt</b> Meitnerium (268)	110 <b>Ds</b> Darmstadtium (271)	111 <b>Rg</b> Roentgenium (272)	112 <b>Uub</b> Ununbium (285)	113 <b>Uut</b> Ununtrium (284)	114 <b>Uuq</b> Ununquadium (289)	115 <b>Uup</b> Ununpentium (288)	116 <b>Uuh</b> Ununhexium (292)	117 <b>Uus</b> Ununseptium	118 <b>Uuo</b> Ununoctium (294)																		

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah (michael@dayah.com). <http://www.ptable.com/>



57 <b>La</b> Lanthanum 138.90547	58 <b>Ce</b> Cerium 140.116	59 <b>Pr</b> Praseodymium 140.90765	60 <b>Nd</b> Neodymium 144.242	61 <b>Pm</b> Promethium (145)	62 <b>Sm</b> Samarium 150.36	63 <b>Eu</b> Europium 151.964	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	65 <b>Tb</b> Terbium 158.92535	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162.500	67 <b>Ho</b> Holmium 164.93032	68 <b>Er</b> Erbium 167.259	69 <b>Tm</b> Thulium 168.93421	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173.054	71 <b>Lu</b> Lutetium 174.9668
89 <b>Ac</b> Actinium (227)	90 <b>Th</b> Thorium 232.03806	91 <b>Pa</b> Protactinium 231.03688	92 <b>U</b> Uranium 238.02891	93 <b>Np</b> Neptunium (237)	94 <b>Pu</b> Plutonium (244)	95 <b>Am</b> Americium (243)	96 <b>Cm</b> Curium (247)	97 <b>Bk</b> Berkelium (247)	98 <b>Cf</b> Californium (251)	99 <b>Es</b> Einsteinium (252)	100 <b>Fm</b> Fermium (257)	101 <b>Md</b> Mendelevium (288)	102 <b>No</b> Nobelium (259)	103 <b>Lr</b> Lawrencium (262)

# Propriedades dos elementos e os números mágicos

1. Os gases nobres, na última coluna da tabela periódica, têm propriedades físico químicas parecidas, em particular não se unem a outros elementos para formar compostos. São “nobres”. Eles são os elementos He ( $Z=2$ ), Ne ( $Z=10$ ), Ar ( $Z=18$ ), Kr( $Z=36$ ), Xe( $Z=54$ ) e Rn ( $Z=86$ ). Daí se chegou nos “números mágicos”, que fecham as “camadas” com número completo de elétrons: 2 elétrons na 1ª camada; 8 na 2ª ( $1^a + 2^a = 10$  elétrons); 8 na terceira camada ( $1^a + 2^a + 3^a = 18$ ), 18 elétrons na 4ª camada ( $1^a + 2^a + 3^a + 4^a = 36$ ). O que exigiu uma interpretação (especulação ?) de que as moléculas se formam com os elétrons dos elementos “partilhando” dois núcleos nas camadas que têm de elétrons como átomos. O que seria um impedimento para os elementos de “camadas completas” de elétrons formarem outras moléculas.
2. Na penúltima coluna estão os halógenos:  $Z= 9, 17, 35, 53$  e  $85$ , com propriedades parecidas entre si. Eles têm um elétron “faltando” para “completar” uma camada.

# Propriedades dos elementos e os números mágicos

3. Já na primeira coluna da tabela periódica se encontraram os alcalinos, com propriedades físico-químicas semelhantes, e têm  $Z = 1, 3, 11, 19, 37, 55$  e  $87$ , ou seja, com um único elétron em sua “camada” mais externa.
4. Os Alcalinos gostam de se unir com outros elementos, em particular com os halogenos, formando substâncias. **Coerente com a interpretação de formação de moléculas: o elétron que “sobra” na última “camada” do alcalino, completa o que “falta” na última “camada” do halogeno, formando moléculas estáveis.**

As propriedades dos elementos inspiraram uma primeira interpretação. Mas haveria que se construir uma teoria sólida que contivesse tais resultados, e medidas experimentais que apontassem detalhes na formação molecular. Que como se sabe hoje, é muito mais do que essa primeira e simplista interpretação...

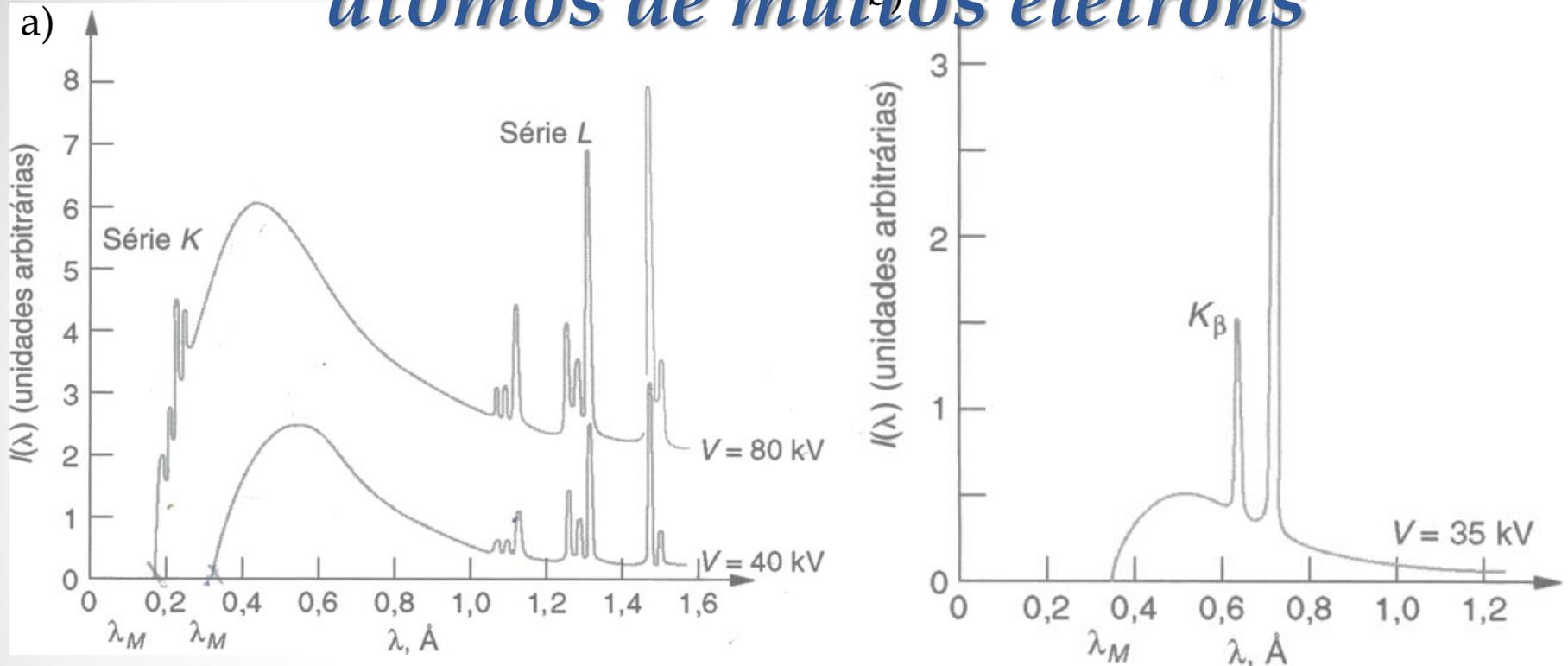
# *Construções nas ciências físicas*

Esta física foi construída no século XX, e gerou uma infinidade de conhecimento que está nesta disciplina se iniciando a apresentação a vocês.

**Física é o resultado de ótimas idéias: especulativas as vezes sobre o que se conhece, de novos experimentos para se certificar do acerto das especulações, de inferências de vários resultados e especulações, e de modelos/teorias que organizem e quantifiquem e generalizem o que já foi pensado, e observado. Mas os resultados de ambos, experimentos e modelos e teorias inspiram novas idéias, especulações, observações, aperfeiçoamentos nos modelos e teorias,..**

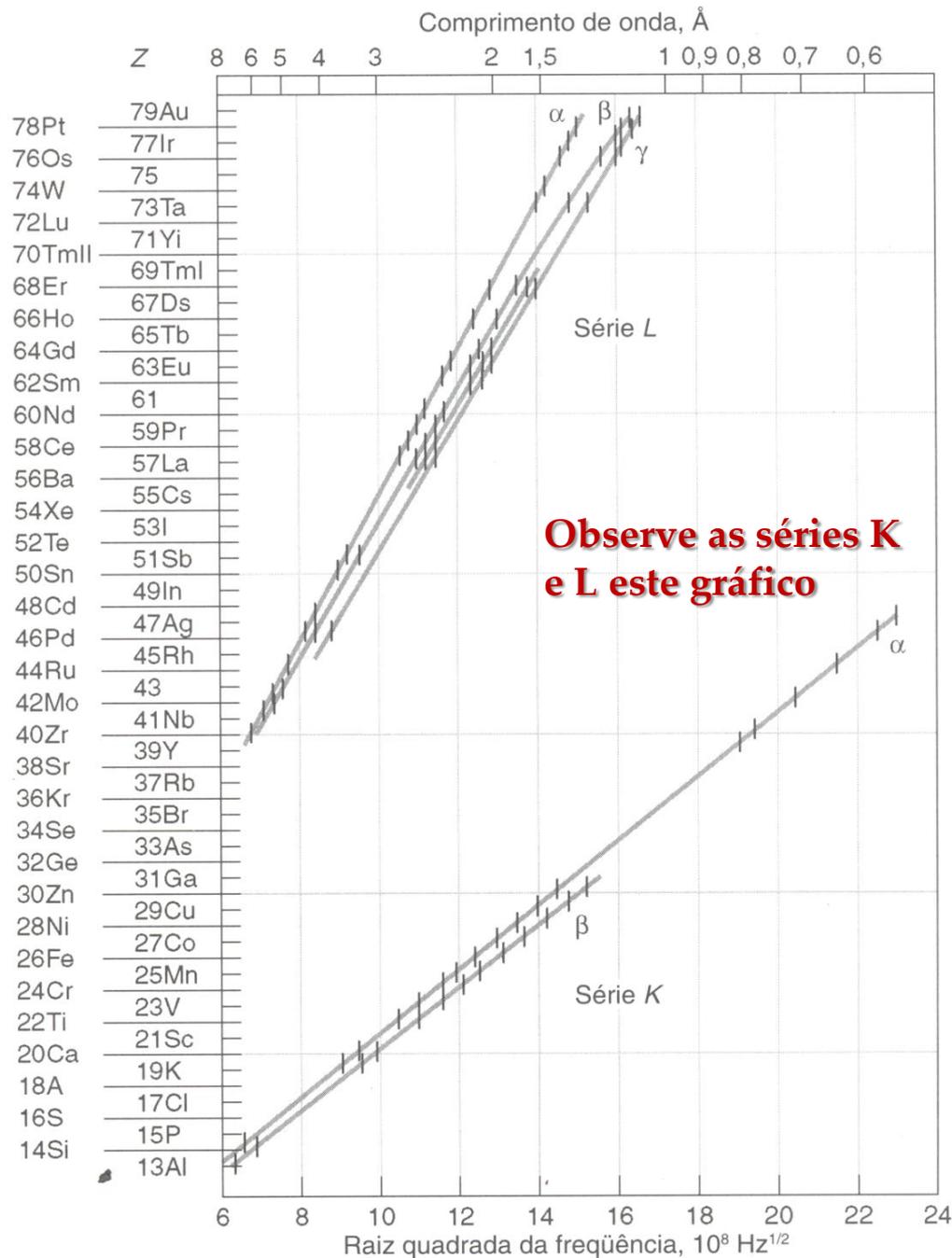
Entender o processo que leva a uma conclusão é tão relevante quanto o próprio resultado. Principalmente para quem quer participar no futuro de um processo de criação nas ciências físicas, seja por que vertente for.

# Espectros característicos de raios X em átomos de muitos elétrons



**Fig. 3-18** Espectros de raios X do tungstênio (a) e do molibdênio (b). Os nomes das séries de linhas (K e L) são explicados no Cap. 4. As linhas da série L do Mo (que não aparecem na figura) ocorrem para  $\lambda \approx 5 \text{ \AA}$ . O comprimento de onda de corte  $\lambda_m$  não depende do material e é dado por  $\lambda_m = hc/eV$ , onde  $V$  é a tensão do tubo de raios X. Os comprimentos de onda das linhas de difração são característicos de cada material.

**Observe o nome série L no tungstênio, com três picos sequenciais, e o nome série K no molibdênio com dois picos sequenciais.**



*Fonte da figura: H. Moseley, Philosophical Magazine (6), 27, 713 (1914)*

**A estrutura fina dos raios-X criados por diferentes elementos – dependência linear entre  $Z$  e a raiz quadrada de frequência.**

**Descoberta de Henry Moseley que contrariando seus mentores, Rutherford inclusive, foi lutar na 1ª guerra mundial e morreu em 1915 aos 27 anos!!!**

Mais detalhes em  
**FÍSICA MODERNA II**

# *Resultados de Moseley de 1913 e o modelo de camadas para os elétrons dos átomos*

1. As frequências dos raios-X do espectro característico obedece a relação:  $\sqrt{\nu} = A_n (Z - b)$  com  $b=1$  para a série K e  $b=7,4$  para a série L.  **$A_n$  é praticamente o mesmo para todas as linhas.**
2. Questão: com base no modelo de camadas como poderia se explicar tal resultado?
  - Para este tema vejam a Ref. Tipler e Llewellyn - Física Moderna – Cap. 4. **Observem em particular a explicação sobre as linhas de uma mesma série abaixo da equação 4.34 e argumente, com base no modelo de Bohr, se a explicação poderia estar correta.**

## MODELO DE CAMADAS

Em  $n=1$  "cabem" 2 elétrons;

Em  $n=2$  "cabem" 8 elétrons;

Em  $n=3$  "cabem" 8 elétrons....

O átomo da figura é de S, pois tem  $Z=16$ .

Quando muda de camada  $n$ , muda consideravelmente a energia do elétron em sua "órbita", mesmo levando em conta a repulsão entre os elétrons.

**Observação:** A "numerologia" da natureza atômica é descrita pela mecânica quântica e estatística quântica. Deixou de ser "mágica".



O elétron da camada  $n=1$  absorve energia do elétron livre energético e sai do átomo.

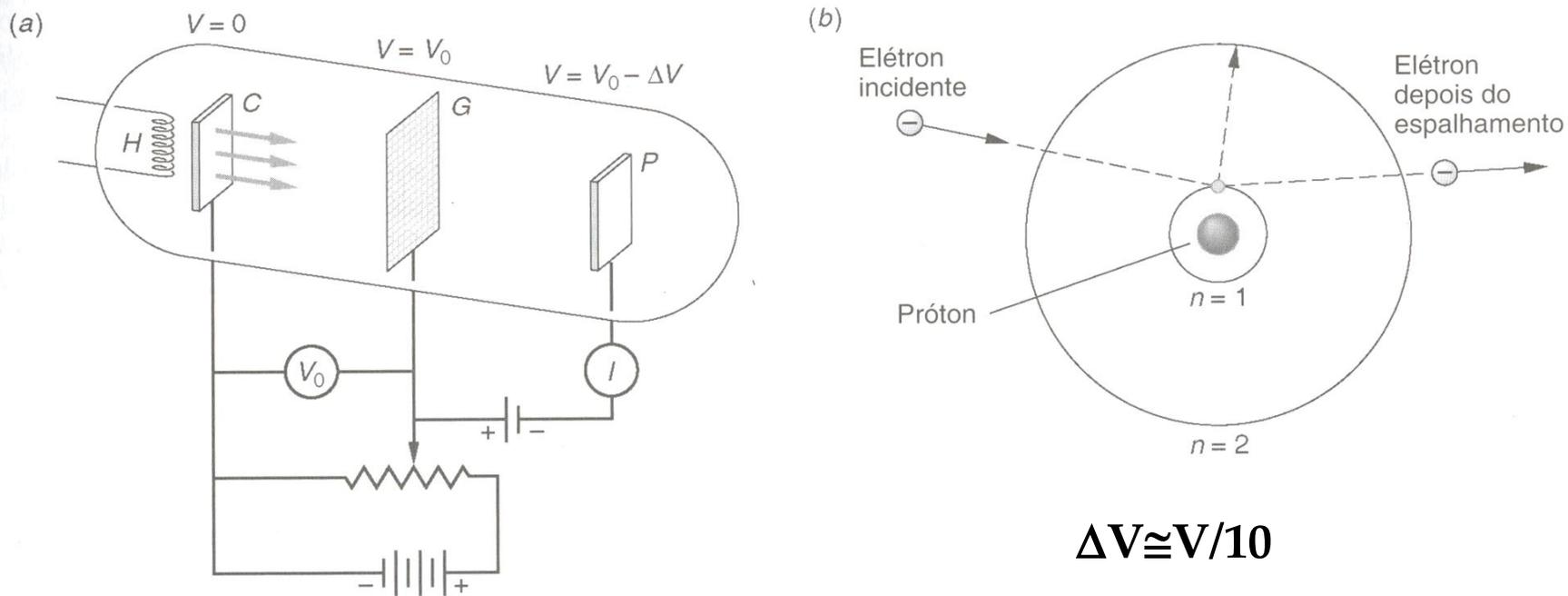
Observe que a figura mostra as linhas  $K_\alpha$  e  $L_\alpha$ . Mas há as  $K_\beta$ ,  $L_\beta$  e  $L_\gamma$  que aparecem nos espectros característicos de raios-X.

# O modelo de camadas, os dados de Moseley e os elementos

- O Experimento de Moseley “reorganizou” a tabela periódica, definindo cada elemento não pela massa, como era antes dele, mas pelo número de cargas no núcleo = número de elétrons = número atômico  $Z$  que define os elementos. O número atômico  $Z$  é aproximadamente igual a metade do número de massa  $A$ .
- O argônio ( $A=40$ ) e o potássio ( $A=39$ ) “encaixaram-se” melhor “invertidos” em relação à tabela antes de Moseley, já que eles têm  $Z=18$  e  $Z=19$ , respectivamente. Assim o argônio fica na coluna dos gases nobres e o potássio na dos alcalinos quando “ordenados” pelo  $Z$  e não pela massa.
- Também Moseley percebeu que havia lacunas na tabela periódica, que corresponderiam aos elementos com  $Z = 43, 61$  e  $75$ , não conhecidos à época, que são respectivamente os elementos tecnécio (descoberto em 1937), o promécio (descoberto em 1945) e o rênio (descoberto em 1925).

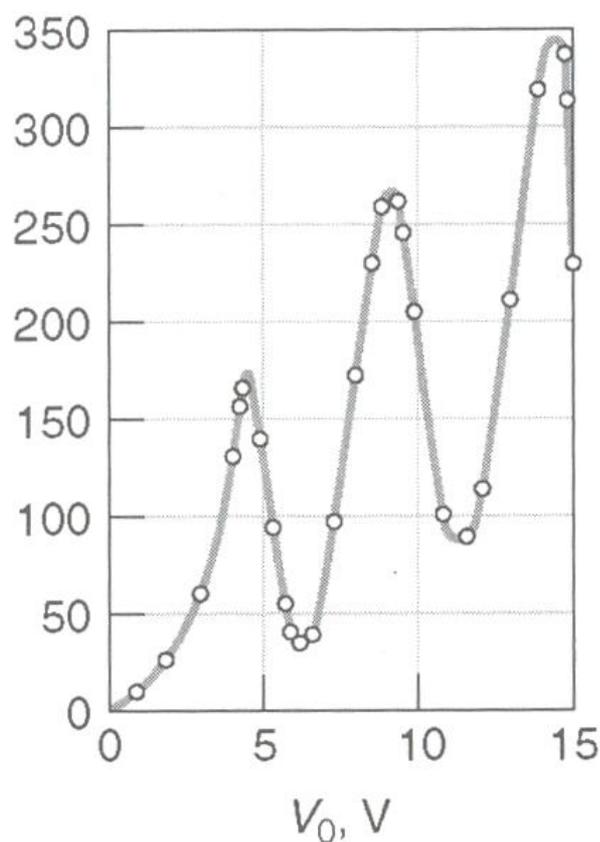
# Experimento de Franck-Hertz (1914)

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  $\Delta V$ . 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  $\Delta E$ , o espalhamento será inelástico e uma energia  $\Delta E$  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  $\Delta E$ .

**O Tubo tem vapor de mercúrio: Hg (Z=80, A=194)**



## Corrente elétrica versus o potencial acelerador.

**Interpretação para a queda e subida da corrente: espalhamento inelástico de elétrons por gás de mercúrio**

**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).]

# Diagrama de níveis de energia dos átomos de mercúrio

Como se chega a este diagrama: medindo a energia de ionização e as de excitação (espectro de absorção, por exemplo) dos estados atômicos

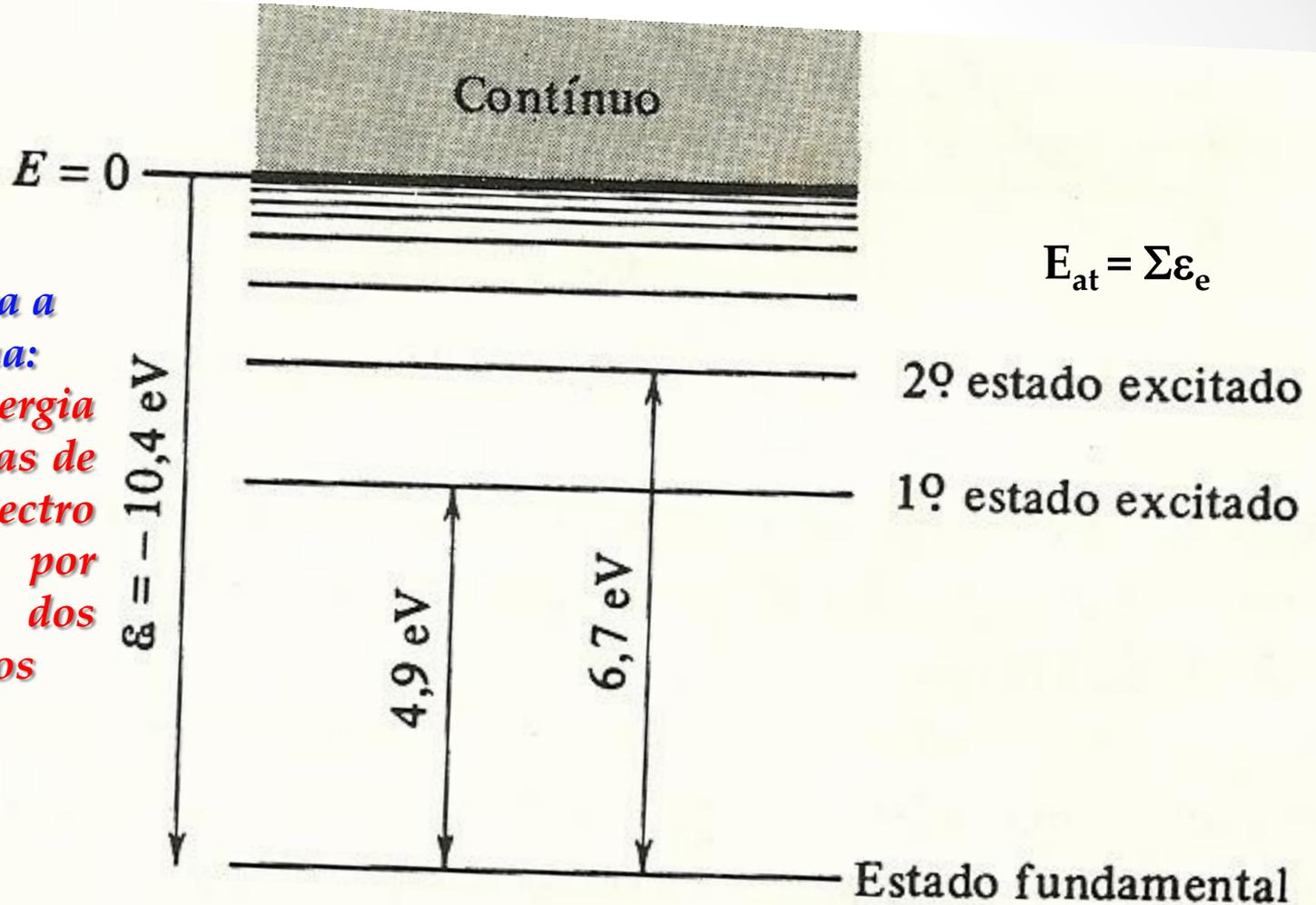


Fig. do Eisberg - Resnick

# O processo observado no experimento de Franck e Hertz e sua interpretação

- **Interpretação do processo** - espalhamento inelástico dos elétrons do catodo pelos 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 mais externo do átomo rouba esta quantidade exata de energia para fazer uma transição entre dois estados eletrônicos, o que faz o átomo ir do seu estado fundamental ao seu 1º estado excitado. O elétron livre do catodo, agora com energia cinética praticamente zero não consegue passar na grade, que tem pequeno potencial desacelerador, e cai a corrente.
- Com mais tensão, a corrente aumenta até chegar em  $(9,8\text{V})$ . Para  $9,8\text{ V}$ , os 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 para realizar transições entre níveis de energia que lhe são permitidos, mesmo quando recebem energia cinética de outra partícula.