

Notas de Aula - Física 4 - Carlos E. J. Carneiro

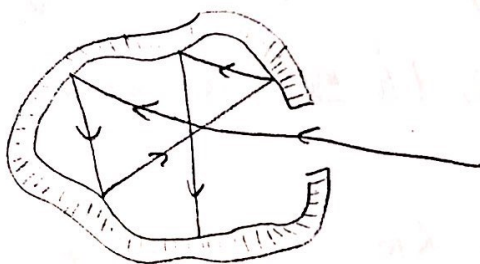
Cap. 40 Introdução à Física Quântica

Além da Teoria da Relatividade, uma outra revolução na Física ocorreu no começo do séc. XX — a Mecânica Quântica. As ideias básicas começaram a ser formuladas por Planck e foram utilizadas para resolver o problema da radiação do corpo negro.

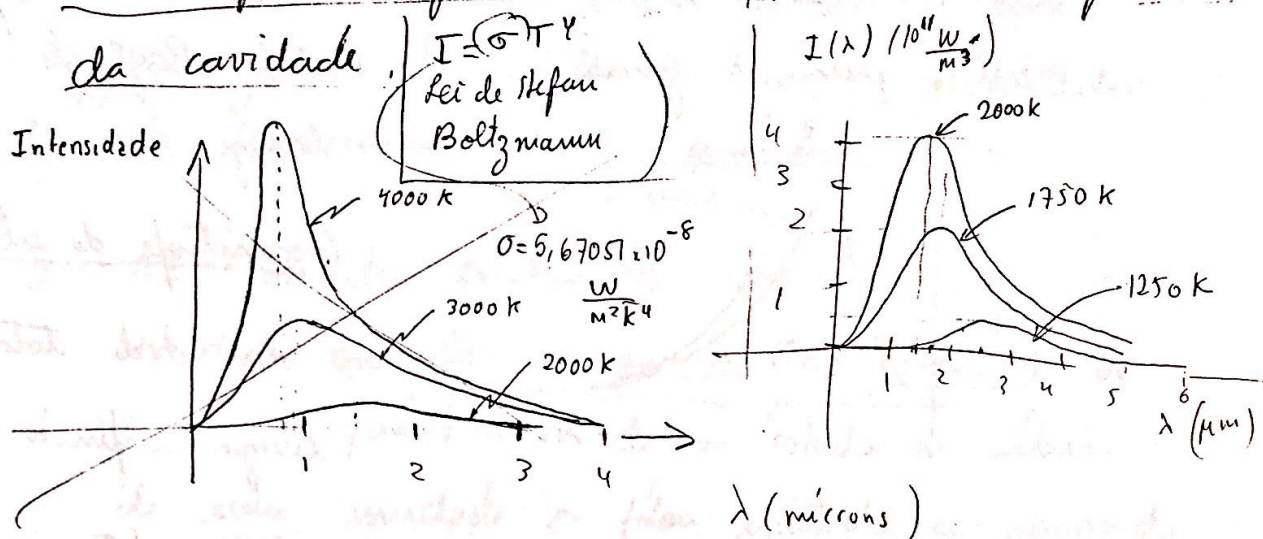
40.1 Radiação do corpo negro

Um corpo aquecido irradia em raios com comprimento de onda, que vão do infravermelho ao ultravioleta.

É mais fácil tratar o problema com um corpo ideal que absorve toda a radiação que sobre ele incide — corpo negro. Uma cavidade com uma abertura é uma ótima aproximação para um corpo negro. Depois de várias reflexões, a radiação é toda absorvida e as paredes se aquecem. A radiação emitida pela abertura da cavidade



(65) Inte depende apenas da temperatura das paredes da cavidade



Note que quando  $T$  aumenta o máximo da distribuição se desloca, a lei que rege este deslocamento é conhecida como lei do deslocamento de Wien

$$\lambda_{max} T = 0,2898 \cdot 10^{-2} m K$$

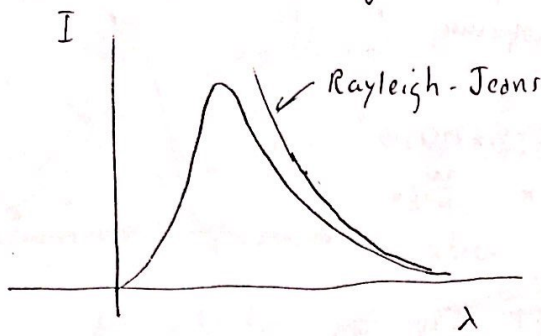
O cálculo teórico clássico do problema do corpo negro, conhecido como a lei de Rayleigh-Jeans fornece

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c k T}{\lambda^4}$$

onde  $I(\lambda, T) d\lambda$  fornece a potência por unidade de área no intervalo  $[\lambda, \lambda + d\lambda]$ .



Esta lei só concorda com os resultados experimentais para  $\lambda$  grande. A lei de Rayleigh - Jeans diverge para  $\lambda \rightarrow 0$



(catástrofe do ultravioleta)

$\Rightarrow$  densidade total de energia infinita

Em 1900 Max Planck conseguiu obter a forma correta para  $I$ :

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}, \quad \frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{cT}$$

onde  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J.s é a constante de Planck

Para  $\lambda$  grande  $e^{\frac{hc}{\lambda kT}} \approx 1 + \frac{hc}{\lambda kT}$  e recupera-se a

lei de Rayleigh - Jeans.

$$I = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad \left( \frac{\text{Lei de Stefan-Boltzmann}}{\text{deduzida da Termodinâmica}} \right)$$

Para chegar a estes resultados, Planck supôs que:

(1) As moléculas oscilantes das paredes da cavidade só podem ter valores discretos da energia  $E_n$ , dado por

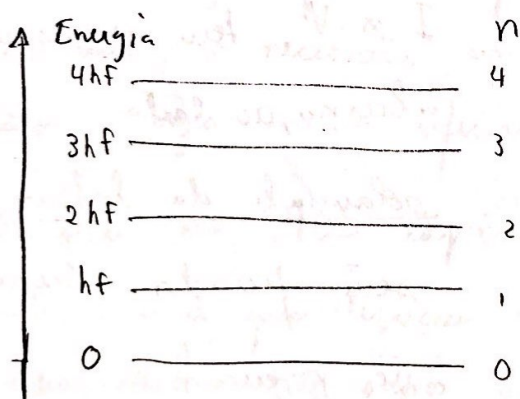
$$E_n = n h f,$$

onde  $n$  é um inteiro e  $f$  é a frequência de vibração das

(67)

moléculas. As energias das moléculas estão quantizadas e os estados de energia permitidos são denominados estados quânticos.

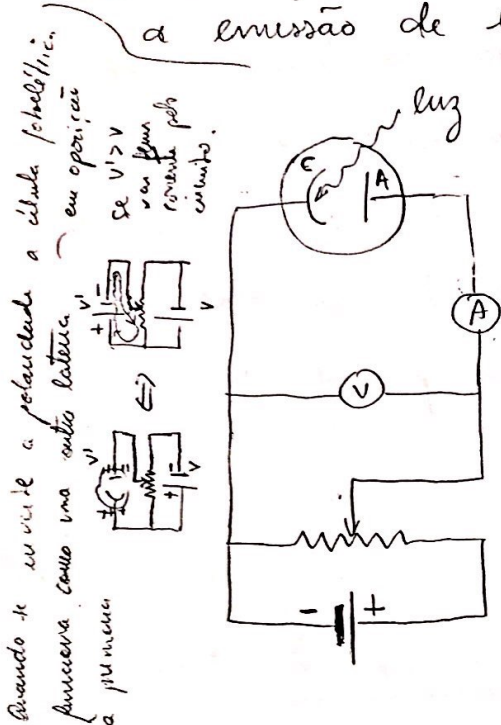
2. As moléculas emitem ou absorvem energia em unidades discretas, os quanta (ou fótons). Se o número quântico  $n$  de um estado se altera de uma unidade o fóton emitido ou absorvido tem energia  $hf$  ( $E_n = nhf$ ). A molécula só absorve ou emite energia quando seu estado quântico se altera.





## 40.2 O Efeito Fotoelétrico

no final do séc. XIX, Hertz descobriu que quando a luz incidia sobre algumas superfícies metálicas, havia a emissão de elétrons pela superfície (efeito fotoelétrico).



Assim, devido à emissão de elétrons, passa corrente no circuito.

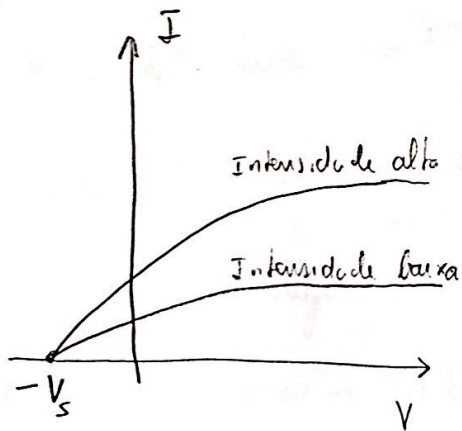
Os elétrons que saem do cátodo (C) são acelerados devido à ddp  $V$  até o ânodo (A). O gráfico

$I \times V$  tem o aspecto mostrado abaixo, ao lado. Invertendo a polaridade da bateria os elétrons

serão freados. Quando a diferença de potencial se torna suficientemente negativa nenhum elétron chega ao

ânodo e a corrente cessa. A energia cinética máxima está relacionada ao potencial  $V_s$  através da expressão

$$E_c^{\max} = eV_s$$



ao potencial  $V_s$  através da expressão

(69)

Experimentalmente observa-se que:

(1) Nenhum elétron é emitido abaixo de uma linha de frequência, característica do material iluminado ( $f_c = 5,50 \times 10^{14}$  Hz para o Na). A teoria clássica prevê que o efeito depende apenas da intensidade, não da frequência.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{5,5 \cdot 10^{14}} = 5,45 \cdot 10^{-7} = \underline{545 \text{ nm}} \quad \text{Vide}$$

(2)  $E_c^{\text{max}}$  dos elétrons só depende da frequência, não depende da intensidade da luz.

(3) Os elétrons são emitidos muito rapidamente, menos de  $10^{-9}$  seg após a superfície ser iluminada. Classicamente, é necessário um tempo maior para o elétron adquirir energia cinética suficiente para escapar do metal.

Einstein em 1905 explicou o efeito fotoelétrico, generalizando a quantização de Planck para as ondas eletromagnéticas. Ele supôs que

(a) a luz era constituída de uma corrente de fótons;

(b) a energia da luz se concentrava nestes fótons;

(c) o efeito fotoelétrico ocorre quando um fóton transfere toda a sua energia, dada por

$$E = hf$$

ao elétron;





(d) a  $E_c^{max}$  era dada por

$$E_c^{max} = hf - \phi$$

onde  $\phi$  é a função trabalho do material e é igual à energia de ligação do elétron no material. (\*)

Assim, só fótons com frequência maior do que  $f_c = \frac{\phi}{h}$  têm energia suficiente para arrancar elétrons. (\*\*)

A intensidade da luz está ligada ao número de fótons, e não à energia individual de cada fóton.

(\*)

Metálo	$\phi$ (eV)
Na	2,28
Cu	4,70
Ag	6,35

(\*\*) 
$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{ch}{\phi}$$