

Radiação de Corpo Negro

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Instituto de Física. Departamento de Física. Física do Século XXA (FIS1056). Prof. César Augusto Zen Vasconcellos. **Lista 2** (*Site: www.cesarzen.com*)

Tópicos. O Século 19 e o Alvorecer da Mecânica Quântica. Radiação de Corpo Negro e o Nascimento da Mecânica Quântica. Corpo Negro: definição e concepção.

O século 19 e o alvorecer da mecânica quântica

A Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra no século 18, representou uma nova ordem econômica modificando, por meio da ciência e da tecnologia, de maneira inexorável, o mundo moderno, expandindo-se no século 19, para o resto do mundo e tornando o capitalismo o sistema econômico preponderante entre as nações.

Novas tecnologias possibilitaram então a superação da era agrícola e da era artesanal, com as máquinas rivalizando e muitas vezes suplantando a força de trabalho humano e o estabelecimento de novas relações de produção, preponderando neste novo modo de organização social uma visão de liberalismo econômico conjugada com acumulação de capital. Este período foi também profícuo para que uma série de descobertas científicas, patentes e invenções ocorressem, como por exemplo, o processo de produção de aço, patenteado por

Henry Bessemer, em 1856, que aumentava a sua resistência e permitia a sua produção em escala industrial.

Ao final do século 19, os cientistas se sentiam de tal forma impregnados pelas interpretações do comportamento da natureza dadas pela física clássica, que uma parte expressiva acreditava que não havia espaço para novas descobertas no campo da física: a física clássica representaria para estes o apogeu do conhecimento científico a respeito do comportamento das leis da natureza.

Pois foi exatamente neste período que o rápido desenvolvimento da siderurgia de produção de aço¹ despertou um maior interesse no estudo da radiação térmica em uma busca sistemática de uma melhor compreensão da energia irradiada pelos fornos de altas temperaturas² das siderúrgicas então existentes na

¹O aço é uma liga que consiste principalmente de ferro com um pequeno teor de outras substâncias tais como carbono, manganês, cromo, vanádio e tungstênio, que atuam como agentes de endurecimento da liga, evitando deslocamentos dos átomos de ferro nas redes cristalinas. Por meio de variações das quantidades de elementos da liga é possível controlar as qualidades resultantes do aço assim produzido, tais como dureza, ductibilidade (propriedade que caracteriza o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura), maleabilidade (propriedade que permite a formação de lâminas delgadas do material sem que este se rompa) e resistência à tração.

²O controle de temperatura representa um dos mais relevantes elementos na produção do aço. Evidentemente, este controle não pode ser realizado por meio da utilização de termômetros convencionais. À época havia a proposta de determinação destas temperaturas por meio da combinação de dois fatores, o conheci-

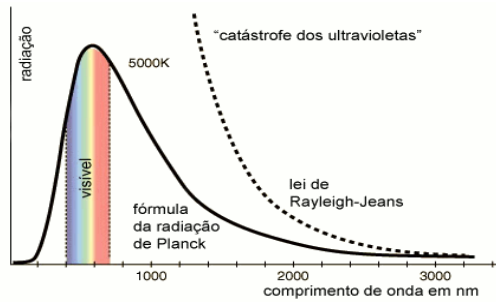


Figura 1: Espectro de emissão de radiação eletromagnética em fornos de altas temperaturas e a catástrofe dos ultravioletas. O gráfico mostra o comportamento da densidade de energia no interior de um forno (corpo negro), isto é, da energia por unidade de volume no interior do forno, em função do comprimento de onda da radiação eletromagnética. Como se pode verificar, o máximo da curva está na região visível do espectro eletromagnético.

Créditos: <http://cftc.cii.fc.ul.pt/>

Europa (ver figuras (1), (2) e (3)).

Ao final do século 19, as leis clássicas da termodinâmica e os trabalhos de Maxwell eram bem conhecidos. Sabia-se por exemplo que a luz era composta por ondas eletromagnéticas, embora sua natureza intrínseca não fosse conhecida. Por isto, usando os conhecimentos de então, era possível calcular a densidade de energia contida no interior de um forno e comparar as previsões teóricas com os dados experimentais. A densidade de energia representa a energia contida em cada centímetro cúbico da cavidade.

Ao fazer isto, os físicos se surpreenderam: na região de grandes comprimentos de onda, a teoria clássica concordava com a experiência. Mas à medida em que se comparavam as densidades

mento da natureza do espectro eletromagnético e a observação de radiação eletromagnética emitida através de uma abertura muito pequena (*pinhole*). O primeiro fator possibilitaria a realização de previsões teóricas enquanto o segundo a confirmação destas previsões.

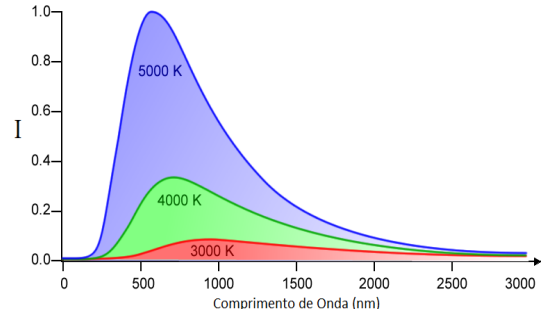


Figura 2: Espectro da radiação de corpo negro. O eixo vertical indica a intensidade da radiação, I , em função de comprimento de onda. As unidades da intensidade da radiação são arbitrárias. As cores indicadas na figura correspondem apenas ao comprimento de onda (ou frequência) dos máximos das curvas (cada uma das curvas acima representadas contempla o espectro completo de radiação e portanto todas as cores do espectro eletromagnético).

Créditos: <http://spaceflight.esa.int/>

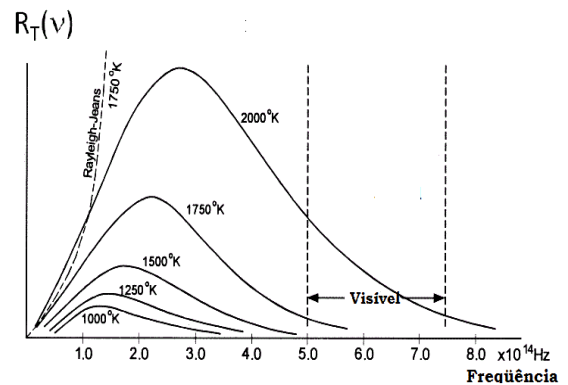


Figura 3: Espectro da Radiação de Corpo Negro. O eixo vertical indica a densidade de energia em função da frequência da radiação.

Créditos: <http://www.modelofreality.org/>

de energia previstas com os dados experimentais para menores comprimentos de onda, esta concordância se esvaia, como mostram os dados da figura (1).

Cor	Comprimento de onda	Frequência
vermelho	~ 625-740 nm	~ 480-405 THz
laranja	~ 590-625 nm	~ 510-480 THz
amarelo	~ 565-590 nm	~ 530-510 THz
verde	~ 500-565 nm	~ 600-530 THz
ciano	~ 485-500 nm	~ 620-600 THz
azul	~ 440-485 nm	~ 680-620 THz
violeta	~ 380-440 nm	~ 790-680 THz

Figura 4: Espectro da luz visível.

Créditos: <http://arianepadiilha.com/>

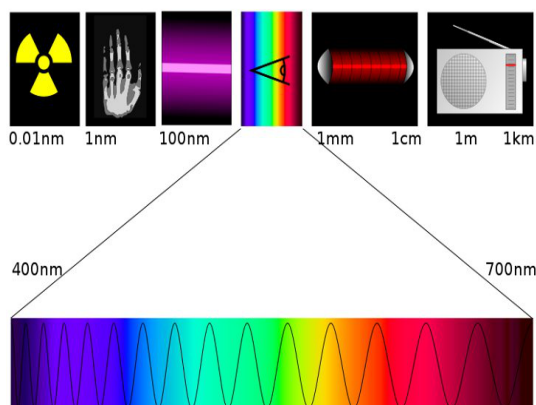


Figura 5: Espectro eletromagnético.

Créditos: <http://chemistry.about.com/>

Este desacordo ficou conhecido à época com o nome de catástrofe dos ultravioletas. Na figura, verifica-se as previsões teóricas da física clássica (linhas tracejadas) para o comportamento da densidade de energia em função do comprimento de onda da radiação térmica emitida. Os resultados mostram que a intensidade do espectro (pontos tracejados) cresce sempre no sentido dos menores comprimentos de onda,

o que significaria que a densidade de energia térmica no interior do forno aumentaria progressivamente para menores comprimentos de onda da radiação. Se esta densidade aumentasse ilimitadamente, a energia contida no interior do forno seria infinita, o que representaria um absurdo do ponto de vista físico. Estes resultados tornavam evidente a necessidade de uma *nova física*.

Radiação de corpo negro e o nascimento da mecânica quântica

Como nasceu a mecânica quântica e a concepção da quantização de energia?

A física quântica, desde seus primórdios, causou um enorme impacto na forma de pensarmos a natureza. Entre seus aspectos conceituais mais fascinantes se inserem os da quantização da energia, da dualidade onda-partícula e do princípio da indeterminação.

A quantização da energia, um dos primeiros conceitos a ser introduzido na física quântica, nasceu para explicar a radiação emitida por fornos a altas temperaturas, fornos estes idealizados na forma de um *Corpo Negro*. Os físicos à época supunham que o conhecimento da natureza da radiação eletromagnética emitida por um corpo negro possibilitaria a determinação das temperaturas no interior dos fornos siderúrgicos por meio da observação da luz que emanava através de pequenos orifícios dos fornos.

É importante lembrar que todo corpo com uma temperatura T , tal que $T \neq 0$, emite radiação em alguma faixa do espectro eletromagnético. O comportamento previsto na física clássica para um corpo negro, ou seja, um corpo que absorve toda a radiação que nele incide, não era porém condizente com os resultados observados. As previsões da física clássica indicavam que a densidade espectral de emissão de energia térmica de um corpo

negro devia depender de suas características estruturais específicas. Entretanto, diferentemente das previsões da física clássica, os resultados observados indicavam que a densidade

espectral de emissão de energia térmica por um corpo negro, diferentemente de outros corpos, depende apenas da frequência da radiação e da temperatura.

Radiações Eletromagnéticas

Radiação	Rádio	Microonda	Infravermelho	Visível	Ultravioleta	Raios X	Raios γ
λ (m)	10^3	10^{-2}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}
Escala	Prédios	Borboletas	Ponta de Agulha	Protozoários	Moléculas	Átomos	Núcleos
Frequência (Hz)	10^4	10^8	10^{12}	10^{15}	10^{16}	10^{18}	10^{20}

Radiação eletromagnética, ao incidir sobre um corpo opaco, apresenta um efeito muito interessante: parte da radiação é refletida e parte dela é absorvida³. Corpos de cores claras, por sua vez, refletem a maior parte da radiação visível incidente, enquanto que corpos de cores escuras absorvem a maior parte dessa radiação.

Ademais, a radiação, ao incidir sobre um corpo, transfere energia térmica para seus átomos constituintes, que sofrem então um processo de conversão da energia térmica incidente em energia de movimento (cinética).

³Os distintos materiais são caracterizados por diferentes propriedades térmicas, citadas a seguir. Absortividade: razão entre a taxa de radiação absorvida pela superfície de um material e a taxa de radiação que incide sobre a superfície do material. Refletividade: razão entre a taxa de radiação refletida pela superfície de um material e a taxa de radiação que incide sobre a superfície do material. Transmissividade: razão entre a taxa de radiação que atravessa a superfície de um material e a taxa de radiação que incide sobre a superfície do material. Emissividade: razão entre a taxa de radiação emitida pela superfície de um material e a taxa de radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. Condutividade Térmica: propriedade do material que caracteriza o fluxo de calor transferido no material por unidade de espessura e por unidade de gradiente de temperatura. Calor Específico: quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura do material por unidade de massa.

Com isto estes átomos oscilam mais rapidamente em torno de uma posição de equilíbrio de forma que a temperatura do corpo é determinada, do ponto de vista clássico, pelo valor da energia cinética média dos seus átomos constituintes. Assim, a absorção de radiação por um corpo traz como consequência o aumento da energia cinética média de seus átomos constituintes e portanto de sua temperatura.

Por outro lado, como os corpos contêm partículas eletricamente carregadas que se movem em orbitais (os elétrons) e que também são energeticamente excitadas pela radiação incidente, pode ocorrer então emissão radioativa por parte dos átomos (a natureza e os mecanismos que originam esta radiação serão estudados mais adiante); esta emissividade de energia pelos átomos diminui por sua vez a energia cinética atômica e em consequência a temperatura resultante de um corpo é dada pelo balanço entre estes dois efeitos que determina se a temperatura do corpo cresce, ao absorver radiação, ou não. Sabemos que, quando a taxa de absorção de radiação por um corpo for igual à taxa de emissão dessa radiação, então a sua temperatura permanece constante; dizemos então que o corpo se encontra em

equilíbrio térmico com o meio que o cerca. E a radiação emitida nestas circunstâncias, de natureza eletromagnética, é denominada de radiação térmica⁴.

⁴Apresentamos a seguir alguns conceitos importantes quando estudamos a propagação do calor.

- **Fluxo de Calor.** É a denominação utilizada para caracterizar a passagem de calor de um meio, (1), para outro meio, (2), que apresentam temperaturas diferentes, T_1 e T_2 , tal que $T_1 < T_2$, sendo os dois meios separados por uma parede de área A e espessura L . Chamamos de fluxo de calor (f_Q) através da parede ao quociente da quantidade de calor (Q) que atravessa a parede e o tempo gasto (t) para atravessá-la: $f_Q = Q/t$. Esta passagem de calor do meio (2) para o meio (1) se dá pela absorção e pela emissão das partículas (átomos e moléculas) que constituem a parede. Usando o sistema inglês de unidades, o calor é medido em calorias (*cal*) e o tempo é medido em segundos, então a unidade de medida do fluxo de calor é a caloria por segundo (*cal/s*). Verifica-se experimentalmente que o fluxo de calor (f_Q) é proporcional à área da parede, A , à diferença de temperatura entre os meios (1) e (2), ou seja $T_2 - T_1$, e é inversamente proporcional à espessura L da parede:

$$f_Q = \frac{k_{CT}(T_2 - T_1)A}{L}.$$

Esta relação é conhecida como Lei da Condução Térmica. Nesta expressão, a constante de proporcionalidade, k_{CT} , depende da natureza do material, sendo denominada de coeficiente de condutibilidade térmica. Seu valor é elevado para bons condutores térmicos, como os metais e baixo para os isolantes térmicos, como o isopor, a cortiça e o ar. Lembramos que a propagação ou transmissão de calor é realizada por meio de três processos distintos denominados, respectivamente, de condução, convecção e radiação. Como bem sabemos, o calor sempre se propaga, quando de forma espontânea, de uma região ou corpo com maior temperatura para uma região ou corpo com menor temperatura.

- **Condução Térmica.** É um dos meios de transferência de calor que geralmente ocorre em materiais sólidos e corresponde à propagação do calor por meio do contato de moléculas de duas ou mais substâncias com temperaturas diferentes (metais, madeiras, cerâmicas, entre outras). Neste caso, ocorre a propagação de calor sem que ocorra transporte da substância formadora do sistema,

Corpo Negro: definição e concepção

Corpo negro é uma idealização teórica de

ou seja, ocorre a transferência de energia por meio de choques entre as partículas integrantes do sistema ou por meio de intercâmbios energéticos dos átomos, moléculas, e elétrons. Os metais, devido à sua elevada condutividade térmica, são excelentes meios de propagação de calor. Os gases e alguns sólidos, que possuem baixa condutividade térmica, são meios pouco eficientes na propagação de calor.

- **Convecção Térmica.** Em fluídos (líquidos e gases) também ocorre a transferência de calor por condução. Porém, nos fluídos ocorre um processo adicional de transferência de calor chamado de convecção. Isto porque o aumento da temperatura provoca uma alteração na densidade do fluído na região de maior temperatura, provocando uma movimentação macroscópica de porções de matéria. Em suma, a convecção é um processo de transporte de energia devido à diferenças de densidade em porções de um fluído, dando origem às chamadas correntes de convecção. São as correntes de convecção que mantêm o fluído em circulação.
- **Radiação Térmica.** Este processo corresponde a energia eletromagnética emitida por um corpo à temperatura T . A radiação térmica é uma forma de transmissão de calor, pois um segundo corpo próximo ao anterior pode absorver as ondas caloríficas emitidas por ele que se propagam pelo espaço em forma de energia eletromagnética aumentando assim a temperatura do segundo corpo. Como as ondas eletromagnéticas também podem se propagar no vácuo, a transferência de calor de um corpo a outro por meio de radiação ocorre mesmo se não existir meio material entre os dois corpos, ao contrário do que ocorre nos processos de condução e de convecção térmica. A maior parte da radiação ocorre ao redor de um comprimento de onda específico, chamado de comprimento de onda principal de radiação, que depende da temperatura do corpo. Quanto maior a temperatura do corpo, maior é a frequência de radiação térmica e menor é o comprimento de onda correspondente. Em outras palavras, objetos com temperaturas altas produzem uma luz mais azulada, enquanto objetos com temperaturas não tão altas podem produzir uma luz mais avermelhada.

um corpo físico que absorveria toda a radiação eletromagnética nele incidente, ou seja, seria um corpo com absorvidade perfeita em todos os comprimentos de onda⁵. Neste sentido, um corpo negro seria também um emissor perfeito de radiação eletromagnética.

A concepção de corpo negro foi criada por Gustav Kirchhoff em 1860 (Gustav Robert Kirchhoff (Alemanha, 1824-1887)). Max Karl Ernst Ludwig Planck (Alemanha, 1858 - 1947), conhecido como o fundador da mecânica quântica, trabalho pelo qual foi agraciado com o Prêmio Nobel de 1918, se interessou pelo estudo da radiação de corpo negro devido ao caráter universal do fenômeno, pois ele considerava a busca por leis universais como a mais elevada atividade científica.

A teoria clássica descrevia as emissões de radiação de um corpo negro, de maneira satisfatória, apenas para baixas temperaturas. À temperatura ambiente, corpos negros emitem radiação de comprimentos de onda correspondentes à região do infravermelho. Mas a medida em que a temperatura do corpo negro aumenta algumas centenas de graus Celsius, corpos negros começam a emitir radiação em comprimentos de onda situados na região visível⁶

⁵Corpos negros perfeitos não existem na natureza. Esta idealização é importante porque estabelece um padrão de comparação em termos de absorvidade para corpos reais. A denominação corpo negro tem como origem o fato de que um corpo que absorva toda a radiação que nele incide pareceria negro para nossos olhos.

⁶Espectro visível (ou espectro ótico) é a porção do espectro eletromagnético cuja radiação, composta por fótons, como veremos mais adiante, pode ser captada pelo olho humano. Identifica-se esta radiação como sendo a luz visível do espectro, ou simplesmente luz. Esta faixa do espectro situa-se entre a radiação infravermelha e a ultravioleta. Para cada frequência da luz visível é associada uma cor. Espectro Visível: corresponde a comprimentos de onda entre 625 a 380 nanômetros. A frequência é o número de ondas que passa por um ponto no espaço durante um intervalo de tempo determinado. Ela é medida em unidades de ciclos (ondas) por segundo ou Hertz (Hz). A frequência

a olho nu, começando na região do vermelho, passando pelo amarelo e finalmente atingindo a região do azul, após o qual a emissão passa a incluir comprimentos de onda da região do ultravioleta.

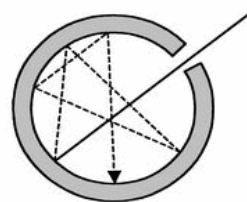


Figura 6: Modelo de cavidade para simulação de um corpo negro.

Experimentalmente, o espectro de radiação mais próximo à de um corpo negro ideal é aquele emitido por pequenas aberturas em cavidades extensas (ver figura (6)). A luz, ao penetrar pela abertura na cavidade, pode ser refletida várias vezes no interior da mesma antes de escapar para o exterior. E, se a área do orifício for muito pequena comparativamente à área da superfície interna da cavidade, a probabilidade de que os raios de luz sejam absorvidos pelas paredes durante o processo pode crescer expressivamente, independentemente de qual seja o material que a compõe ou o comprimento de onda da radiação. O espectro da radiação emitida pelo orifício apresenta então propriedades da radiação emitida pela superfície de um corpo negro e representa

de luz visível é chamada de cor e varia entre 480 trilhões de Hz, vista como vermelho, até 790 trilhões de Hz, vista como violeta. A escala total de frequências vai além do espectro visível, de menos de 1 bilhão de Hz (como nas ondas de rádio) até mais de 3 bilhões de Hz (como nos raios gama). Conforme dito acima, as ondas de luz são ondas de energia. A quantidade de energia de uma onda de luz está proporcionalmente relacionada à sua frequência: luz de alta frequência tem energias altas, luz de baixa frequência tem energias baixas. Assim sendo, os raios gama têm maior energia e as ondas de rádio menor. Dos comprimentos de onda da luz visível, o violeta tem mais energia e o vermelho tem menos.

portanto uma aproximação de um corpo negro. Ao ser aquecido, o espectro da radiação da cavidade (a quantidade de luz emitida pela cavidade em cada comprimento de onda) é contínuo, e não depende do material da cavidade. A Lei de Kirchhoff, expressa que o espectro então observado depende apenas da temperatura das paredes da cavidade e que em um corpo negro ideal, em equilíbrio termodinâmico à temperatura T , a radiação total emitida pelo corpo deve ser igual a radiação total absorvida.

O cálculo da curva espectral da radiação emitida por um Corpo Negro representou um dos maiores desafios no campo da Física Teórica durante o fim do século 19. O problema foi finalmente resolvido em 1901, por Max Planck, com a chamada Lei de Planck da Radiação de Corpo Negro. Por meio de modificações da Lei da Radiação de Wien, modificações estas consistentes com a termodinâmica e o eletromagnetismo, Max Planck deduziu uma fórmula matemática que descrevia de maneira apropriada os dados experimentais.

E, ao buscar uma interpretação física para os resultados obtidos por Max Planck, Albert Einstein propôs a quantização da energia da radiação eletromagnética, em 1905,

para explicar o efeito fotoelétrico. Estes avanços teóricos resultaram na criação da eletrodinâmica quântica.

Problemas

1. Considere uma onda produzida em um lago, cuja velocidade de deslocamento é de 20cm/s . A distância entre dois máximos (cristas) é de 4cm . Qual a frequência de oscilação dessa onda?
2. É possível investigar a estrutura de objetos usando a radiação eletromagnética. No entanto, para que isto possa ser realizado, o comprimento de onda da radiação deve ser da mesma ordem de grandeza das dimensões do objeto a ser investigado. Os raios laser são um tipo específico de radiação eletromagnética, cujas frequências se situam entre $4,6 \times 10^{14}$ hertz e $6,7 \times 10^{14}$ hertz. Considerando esses dados seria possível utilizar fontes de laser para investigar o interior de um núcleo atômico esférico que tem um raio da ordem de 10^{-15} m?