

## RAIOS X: UM TEMA INSTIGANTE PARA A INTRODUÇÃO DA FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NA SALA DE AULA DO ENSINO BÁSICO

*X-ray: an exciting topic to introduce Modern and Contemporary Physics in the classroom of Basic Education level*

**Cilaine Verônica Teixeira** [cilaineteix@if.ufrgs.br]

**Neusa Teresinha Massoni** [neusa.massoni@if.ufrgs.br]

*Instituto de Física - UFRGS*

*Código Postal 15051 - Campus 91501-970 Porto Alegre, RS*

**Ghisiane Spinelli Vargas** [ghisiv@gmail.com]

*E.E. de Educação Básica Gomes Carneiro*

*Praça Paulo de Aragão Bozzano, s/nº -91360-160 Porto Alegre, RS*

### Resumo

Este texto tem o objetivo de ser uma introdução ao estudo dos raios X: o que são, como são produzidos e como afetam a vida humana. É, portanto, um texto introdutório que visa oferecer subsídios para uma abordagem do tema matéria e radiação em sala de aula, para a discussão de certos aspectos históricos indissociáveis à construção da ciência e para uma reflexão sobre as conexões do conhecimento científico com o cotidiano. Não dispensa, contudo, consulta a outras fontes para que o assunto possa ser aprofundado. Espera-se incentivar os professores de física do Ensino Básico a discutir esse assunto que é, ao mesmo tempo, instigante e relevante para a criticidade do aluno.

**Palavras-chave:** Raios X, Matéria e Radiação, Ensino de Física.

### Abstract

This manuscript presents an introduction to the physics of X-rays: what they are and their effects on human life. Our aim is to give support for the discussion about the interaction between radiation and matter in the classroom, providing historical aspects which are relevant to science and its development. We also discuss the connection between science and daily life. The search of novel sources to deepen the reader's knowledge is also encouraged in this work. Finally, we hope that our work will stimulate the teachers of Elementary School to bring this topic to their students, in order to develop their critical thinking.

**Keywords:** X-rays, radiation and matter, Physics teaching.

### Introdução

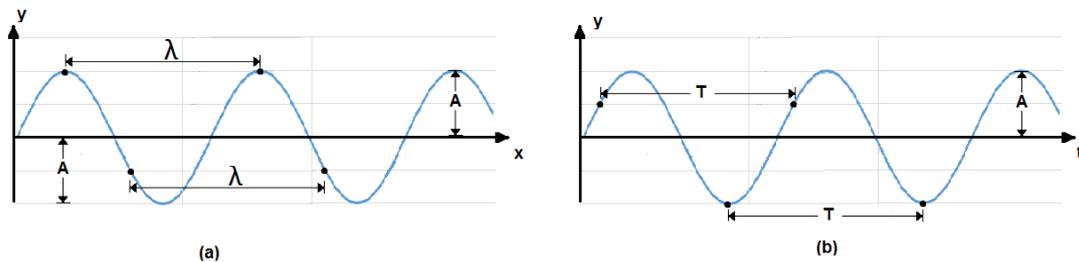
Todos já fizemos alguma vez uma radiografia no dentista, ou de alguma parte do corpo. Os raios X há muito tempo fazem parte do nosso cotidiano e são, sem dúvida, de grande importância na área da saúde, seja na realização de radiografias ou de tomografias computadorizadas. Mas a sua utilidade vai muito além de sua aplicação em diagnósticos por imagem. Eles também são utilizados para determinar estruturas e estudar o comportamento de materiais para diversas aplicações, tanto na área da saúde, como nas indústrias de alimentos, de cosméticos e de eletrônicos. Utilizando os raios X podemos “descobrir” o que existe dentro de materiais diversos, em uma escala nanométrica,

ou seja, da ordem de um bilionésimo de metro. Mas o que é essa coisa, que não podemos ver, que nos permite observar o que não enxergamos naturalmente? Neste artigo, vamos aprender o que são os raios X e como são produzidos. Para isso, veremos primeiramente alguns conceitos essenciais para que possamos compreender a Física que está envolvida neste processo.

## Conceitos básicos

### Ondas

As ondas mais conhecidas são chamadas ondas mecânicas: ondas do mar, ondas sísmicas, ou ondas em uma corda que é sacudida. Estas ondas necessitam de um meio material para se propagar (a água, a terra, a corda). Por serem mais familiares ao nosso cotidiano, ficará mais fácil entender alguns conceitos tomando como exemplo uma onda mecânica. Vamos considerar, então, uma corda colocada para oscilar através de uma de suas extremidades, com um movimento constante para cima e para baixo. Esta onda se propaga através da corda da esquerda para a direita, como na Figura 1. A essa direção de propagação chamaremos direção  $x$ . Se fizermos uma foto da corda, em um instante definido, vemos que cada ponto da corda está a uma altura,  $y$  em relação ao eixo de propagação  $x$ . Vemos na Figura 1 (a) que a altura de cada ponto da corda pode ser representada como um gráfico de  $y$  (altura) em função de  $x$  (posição ao longo da direção de propagação) e que existe uma altura máxima, a partir do zero, que é a amplitude da onda. Escrevemos isso como  $y(x)$ . A altura oscila entre o valor da amplitude acima e abaixo da linha do zero. A distância em  $x$  entre dois pontos com mesma altura, depois de passar por um ciclo completo, é definida como comprimento de onda,  $\lambda$ , dado em metros no sistema internacional de medidas.



**Figura 1:** Representação de uma onda em função (a) da posição na direção de propagação; (b) do tempo.

Do mesmo modo, se observarmos um ponto em uma determinada posição  $x$  durante algum tempo, veremos a mudança de altura  $y$  deste ponto. Podemos igualmente representar esta altura em um gráfico como uma função  $y(t)$ , como na Figura 1 (b). O tempo necessário para que o ponto volte a ter a mesma altura, depois de passar por todas as alturas possíveis, é o período da onda,  $T$ . O número de vezes em que a corda passa por um determinado valor de  $y$ , em um determinado período de tempo, é a frequência da onda,  $f$ . Dessa forma a frequência de uma onda é o inverso do seu período:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

$T$  é medido em segundos e a unidade de frequência é o Hertz.

Como sabemos, quando um corpo se move, a sua velocidade média é dada pela razão entre a distância percorrida e o intervalo de tempo correspondente,

$$v = \frac{d}{t} \quad (2)$$

Considerando que os impulsos dados à corda sigam um ritmo constante, eles irão se propagar através da corda com velocidade também constante. Assim a velocidade de propagação da onda é igual à velocidade média. A distância percorrida na direção  $x$  para que tenhamos dois pontos à mesma altura depois de um ciclo é, como já vimos, o comprimento de onda ( $\lambda$ ). E o intervalo de tempo para que tenhamos a mesma altura após um ciclo completo é o seu período ( $T$ ). Assim, a velocidade de propagação da onda será a razão entre o comprimento de onda e o período:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (3)$$

Como a frequência de uma onda é o inverso de seu período, temos:

$$v = \lambda f \quad (4)$$

A força que aplicamos à extremidade da corda, que está na direção do eixo  $y$  e no nosso caso, se propaga (na forma de uma perturbação denominada pulso) ponto a ponto ao longo da mesma, de modo que a velocidade na direção  $y$  varia ponto a ponto. Apesar disso, desde que o nosso movimento varie repetidamente em intervalos de tempo regulares, a velocidade de propagação do pulso ao longo da direção  $x$  é constante. Para fazer a corda oscilar, devemos fornecer energia à corda, e essa energia é transmitida ao longo de toda a corda quando esta oscila. Em outras palavras, uma onda transporta energia.

### *Ondas eletromagnéticas*

Diversamente das ondas em uma corda ou das ondas do mar (que são mecânicas), não conseguimos ver a oscilação das ondas eletromagnéticas, mas elas fazem parte do nosso dia a dia. A luz, as ondas de rádio, as micro-ondas, e os raios X são ondas eletromagnéticas. Diferente das ondas mecânicas, as ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio material para se propagar.

Qualquer partícula que tem carga elétrica produz, no espaço em torno de si, um campo elétrico. Este campo elétrico afeta todo o espaço onde ele está e age em todas as cargas elétricas que eventualmente estiverem ali. Sempre que duas partículas interagem, existe entre elas uma energia potencial. Assim, uma carga que está sujeita a um campo elétrico interage com ele, em função da existência de uma energia potencial associada a cada ponto do espaço, que é maior quanto mais próxima a carga estiver da fonte que dá origem ao campo. A energia potencial para cada unidade de carga elétrica é chamada de potencial elétrico.

Vamos considerar uma fonte que produz uma diferença de potencial elétrico que oscila periodicamente com o tempo. Quando uma carga elétrica é submetida a uma diferença de potencial elétrico ela irá se movimentar. Portanto, as partículas carregadas sujeitas a este potencial também terão um movimento oscilatório. Como partículas carregadas criam um campo elétrico no espaço que as cercam, então a oscilação da posição das cargas produz um campo elétrico oscilante.

Além disso, a variação de carga elétrica ( $\Delta q$ ) em um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), que faz com que um fluxo líquido de cargas atravesse uma determinada superfície, constitui uma corrente elétrica ( $i$ ):

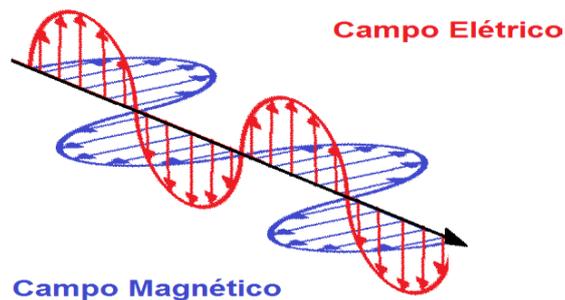
$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (5)$$

Quando uma diferença de potencial é aplicada entre os terminais de um material, a corrente elétrica se relaciona com o potencial por:

$$i = \frac{V}{R} \quad (6)$$

onde  $R$  é a resistência que o material apresenta para a condução das cargas.

Corrente elétrica, isto é, cargas em movimento, produz campo magnético. Como a corrente está oscilando à medida que o tempo passa, devido à variação do potencial elétrico, haverá a produção de um campo magnético periódico. Deste modo, haverá oscilações tanto do campo elétrico quanto do campo magnético. As variações do campo elétrico e do campo magnético são interdependentes e simultâneas. Como resultado, temos uma onda de campo elétrico e uma onda de campo magnético que oscilam simultaneamente em direções perpendiculares entre si, e se propagam juntas na direção perpendicular às direções de suas oscilações, como representado na Figura 2. Isso é o que constitui uma onda eletromagnética. A onda eletromagnética transporta energia elétrica e magnética. Sempre que cargas elétricas são aceleradas, produzem uma radiação eletromagnética que se propaga ao longo do espaço. Essa radiação pode ser produzida de formas diversas, seja por cargas oscilando em um circuito ligado a uma fonte de alimentação, seja no interior dos átomos.



**Figura 2:** Representação de uma onda eletromagnética com a representação dos campos elétricos e magnéticos.

Foi James Clerk Maxwell quem, em 1873, desenvolveu a teoria do eletromagnetismo e “descobriu” que a luz é uma onda eletromagnética (Huray, 2010; Halliday, Resnick, Walker, 2008). Maxwell determinou também a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo, que é conhecida pela letra “c”<sup>1</sup>. Mais tarde, em 1887, Heinrich Hertz gerou e detectou ondas de rádio e “descobriu” que estas também eram ondas eletromagnéticas. Hoje conhecemos um amplo espectro de ondas eletromagnéticas, que vai desde os raios  $\gamma$  (raios gama) até ondas longas, por exemplo, ondas de rádio, passando pelos raios X, micro-ondas e pela luz visível, como mostrado na Figura 3. Todas elas se propagam com a mesma velocidade em um mesmo meio. Se o meio for o vácuo, propagam-se com velocidade  $c = 299\,792\,458$  m/s. Da equação 4 vemos que o comprimento de onda e a frequência são inversamente proporcionais. Portanto, comprimentos de onda maiores correspondem a baixas frequências e vice-versa. Note-se também que o espectro está em aberto, não há limites definidos. Isto significa que poderão ser, no futuro, “descobertas” ondas mais longas que as ondas de rádio e ondas mais curtas que os raios gama.

Ao incidir em qualquer material, uma onda eletromagnética interage com a matéria de que é formado. Essa interação ocorre de modo semelhante à interação entre duas partículas (Halliday, Resnick, Walker, 2008; Young et al., 2009). Na realidade, a luz, assim como as outras ondas eletromagnéticas, ora se comporta como onda, ora como partícula. Esse duplo comportamento é chamado de dualidade partícula-onda, e foi verificado por Albert Einstein, em 1905, ao estudar o efeito fotoelétrico<sup>2</sup>. A partícula que transporta a energia de uma onda eletromagnética é chamada fóton. Assim, ao incidir na matéria, o fóton transfere energia em pacotes, ou seja, cada fóton fornece uma quantidade bem definida de energia. A energia de cada pacote é dada por:

$$E = hf \quad (7)$$

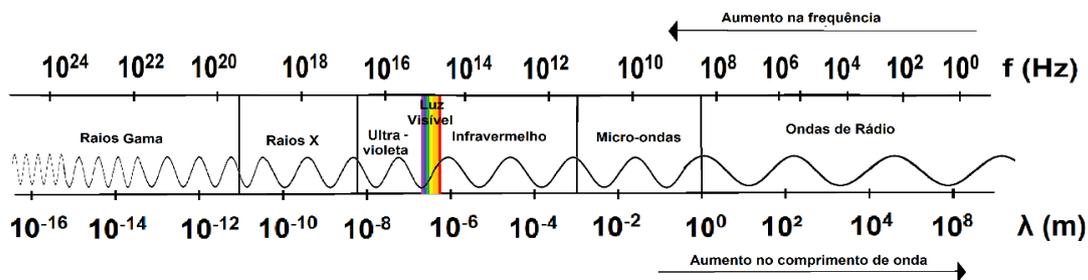
<sup>1</sup> Hoje sabemos que a velocidade (valor de “c”) de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo é muito grande, próxima a 300.000 km/s, como se verá na sequência deste texto.

<sup>2</sup> Efeito fotoelétrico é um fenômeno em que uma lâmina metálica é iluminada por luz de frequência adequada a qual ao incidir consegue arrancar elétrons da placa.

onde  $f$  é a frequência da onda e  $h$  é uma constante introduzida por Max Planck, e que por isso recebeu seu nome.

Quando a energia de um sistema qualquer tem níveis bem definidos, diz-se que ela é quantizada.

Dessa forma, as ondas eletromagnéticas, ou seja, a radiação, pode interagir com a matéria produzindo diferentes efeitos. Quando moléculas de um determinado corpo são atingidas por fótons de baixa energia, essa interação pode gerar aumento da temperatura desse corpo, caso os fótons excitem os modos de vibração dessas moléculas. Este tipo de interação é a base do funcionamento do forno de micro-ondas, que excita os modos de vibração das moléculas da água que constituem o alimento. Outro tipo de interação, que retomaremos detalhadamente no próximo item, ocorre quando os fótons que interagem com o corpo possuem energias maiores. Nesta situação eles podem ionizar os átomos, ou seja, arrancarem elétrons desses átomos, ou ainda realizar a dissociação de moléculas, quando sua energia é utilizada para realizar a quebra de ligações químicas dessas moléculas. Essas radiações são chamadas de radiações ionizantes e podem provocar danos às células do nosso corpo. Porém, nem sempre esse dano é prejudicial. Por exemplo, quando uma pessoa é submetida a radioterapia para tratar o câncer, as ondas utilizadas transportam energia suficiente para matar as células cancerígenas.



**Figura 3:** Espectro eletromagnético

### Níveis de energia dos elétrons nos átomos

Sabemos que os átomos são formados por um núcleo com carga positiva, em torno do qual os elétrons giram. Os elétrons são distribuídos em órbitas definidas: as camadas, denominadas K, L, M, N..., começando, respectivamente, da mais próxima ao núcleo. Diz-se que os elétrons estão ligados ao núcleo atômico, pois existe entre eles (elétrons e núcleo) uma energia potencial negativa (i.e., de ligação). Cada camada eletrônica corresponde a uma energia de ligação bem definida, também chamadas de níveis de energia (bem definidos), sendo que os elétrons que constituem um átomo podem ocupar apenas os níveis de energia correspondentes a cada uma dessas camadas. Níveis intermediários são proibidos e nunca serão ocupados por elétrons. Devido à existência de níveis de energia bem definidos, dizemos que a energia é quantizada<sup>3</sup>. A organização dos elétrons em camadas dá-se porque, além da quantização da energia, os elétrons não podem ocupar todos o

<sup>3</sup> A hipótese de quantização para a dinâmica dos elétrons foi proposta em 1913 pelo cientista dinamarquês Niels Bohr, através de duas hipóteses ousadas para a época. Primeiro, Bohr assumiu que o elétron em sua órbita ao redor do núcleo não emitiria radiação eletromagnética se ocupasse determinadas órbitas permitidas, chamadas *estacionárias* e, com isso, contrariou a teoria de Maxwell que dizia que corpos com carga elétrica (como é o caso do elétron) acelerados deveriam emitir radiação, perdendo energia. Segundo, Bohr propôs que o elétron emitiria radiação quando saltasse de uma órbita estacionária para outra de mais baixa energia, na forma de *salto quântico* e isto implicava admitir que como as mudanças de órbitas estacionárias ocorreria aos saltos, o movimento orbital angular (que não será aprofundado aqui, neste texto) deveria ser quantizado. Isto não encontrava justificativas na mecânica de Newton e ficou conhecido como “quantização do momento angular orbital. Na verdade, como se pode ver, Bohr propôs duas hipóteses que contrastavam, à época, com a teoria eletromagnética de Maxwell e com a mecânica de Isaac Newton e, por essa razão, seu modelo atômico está no bojo de uma nova física, que é hoje um dos pilares da Física Moderna e Contemporânea, conhecida como Mecânica Quântica (Schenberg, 2001).

mesmo nível de energia. Essa “regra” se chama princípio de exclusão de Pauli, em homenagem a Wolfgang Pauli, que foi quem descobriu esse princípio em 1925 (Young et al., 2009), do contrário não estariam organizados em várias camadas.

Para arrancar um elétron de um átomo, precisamos fornecer energia (externa) que seja igual ou maior que a energia de ligação dele. As camadas mais próximas do núcleo possuem energia de ligação maior do que as camadas mais externas. Por essa razão, é mais difícil arrancar um elétron de uma camada mais interna do que de uma mais externa, ou seja, temos que fornecer maior energia para arrancar um elétron da camada K, do que para arrancar um elétron da camada N, por exemplo.

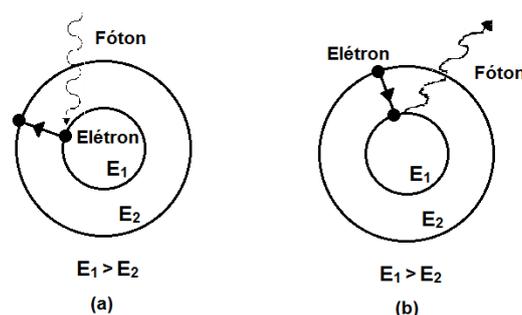
Há várias formas de fornecer energia para um material: se aumentamos a temperatura de um dado material, por exemplo, estamos fornecendo energia em forma de calor. Podemos observar isso quando fervemos a água em uma chaleira. Quando a temperatura aumenta, as moléculas ganham energia e se movimentam. É possível, também, fornecer energia para um material através de ondas eletromagnéticas. Como descrito anteriormente, as ondas eletromagnéticas transportam energia.

Como a luz é uma onda eletromagnética, se incidimos luz sobre uma superfície, fornecemos energia aos átomos que estão ali, e se essa energia for suficiente, pode arrancar um elétron deste átomo, ou apenas mudá-lo para uma camada mais externa (com energia menos negativa). Pode-se também fornecer energia para certo material ou partícula através de uma colisão. Por exemplo, ao chutarmos uma bola, estamos transferindo energia para ela, que se moverá.

Quando um átomo absorve energia vinda do exterior e um elétron salta para uma camada mais externa, o átomo fica em um estado de energia elevado (chamado de estado excitado). O estado excitado não lhe é favorável, e para abaixar o nível de energia desse átomo, o elétron volta ao seu nível de energia mais baixo, liberando uma quantidade de energia bem definida, correspondente à diferença entre os dois níveis. Essa liberação de energia normalmente ocorre em forma de emissão de uma onda eletromagnética (fóton), que pode ter energia na região da luz visível, ou fora dessa região.

Na Figura 4 temos uma ilustração de mudança de nível de energia de um elétron, através de absorção e de emissão de um fóton.

Agora estamos aptos a compreender como são gerados os raios X.

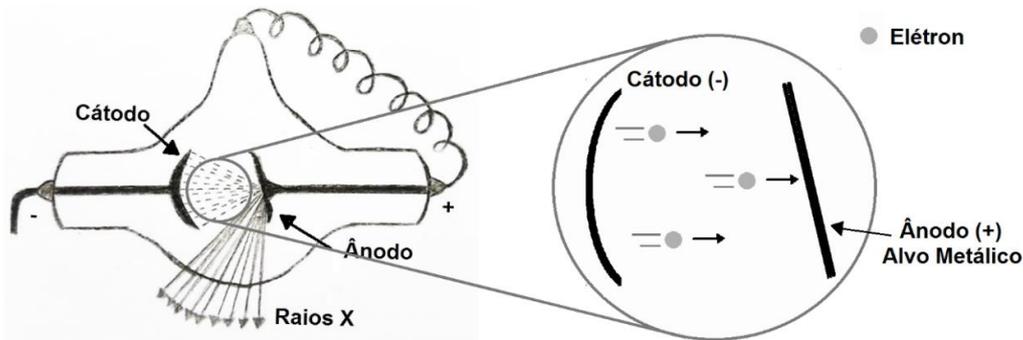


**Figura 4:** Representação da mudança de nível de energia de elétron com a. absorção e b. emissão de um fóton.

## Os raios X

Em 1895, o físico alemão Wilhelm Röntgen percebeu, durante um experimento, que algo não visível impregnava filmes fotográficos. Por se tratar de algo desconhecido, ele os chamou de raios X. Röntgen observou que esta misteriosa radiação atravessava objetos e os tecidos da pele, e que era absorvida pelos ossos. Prontamente descobriu-se a sua primeira aplicação: a radiografia, utilizada mesmo sem conhecimento da natureza desse fenômeno.

Hoje sabemos que os raios X, assim como a luz e as ondas de rádio, são ondas eletromagnéticas. Mas os raios X são muito mais penetrantes do que a luz e as ondas de rádio (i. e., são mais energéticos), e é esta característica que permite a sua aplicação na medicina, como nos exames de radiografia e tomografia, e é explorada na indústria nas técnicas de caracterização de materiais.



**Figura 5:** Esquema de um “tubo de raios X”. Em destaque, uma representação esquemática dos elétrons sendo acelerados em direção ao alvo metálico (ânodo).

### Formação dos raios X

O equipamento mais primário para se produzir raios X consiste em um tubo de vácuo, esquematizado na Figura 5. Em uma ampola de vidro mantida a vácuo são dispostos, um em frente ao outro, dois eletrodos metálicos: o cátodo (filamento) e o ânodo (alvo). Vários metais podem ser usados como alvo, sendo os mais comuns o cobre e o molibdênio. Faz-se passar uma pequena corrente pelo filamento (cátodo), apenas para aquecê-lo e fornecer energia para que os elétrons que ali estão possam escapar da sua superfície. E aplica-se uma alta tensão entre o cátodo e o ânodo, com o polo negativo no cátodo. Uma capa de metal aberta é colocada em torno do filamento, como se fosse um espelho côncavo, e mantida ao mesmo potencial negativo do filamento. Assim, quando a tensão é aplicada entre o cátodo e o ânodo, os elétrons serão repelidos e ao mesmo tempo direcionados pela capa de metal, em direção ao ânodo. Como o potencial é alto, os elétrons ganham uma velocidade muito alta e também uma energia cinética ( $K$ ) muito grande, obtida pela equação:

$$K = \frac{mv^2}{2}. \quad (8)$$

Os raios X são formados de duas formas diferentes: uma delas resulta no que chamamos de espectro contínuo e a outra no espectro característico, que veremos nas próximas seções.

### Espectro contínuo de raios X

Ao se chocar com o ânodo, os elétrons são desacelerados e perdem toda a sua energia cinética. Essa energia é liberada em forma de radiação eletromagnética, os raios X, como esquematizado na Figura 5. Para diminuir a perda de energia cinética durante o percurso dos elétrons, o tubo é mantido em vácuo. Mesmo assim, elétrons podem se chocar com algumas partículas de ar remanescentes, ou mesmo uns com outros, perdendo e recuperando energia durante o caminho. Deste modo, nem todos os elétrons chegam ao alvo com a mesma energia, de modo há uma distribuição contínua de energia liberada. Esses valores de energia não dependem do material usado no alvo, mas apenas da energia com que os elétrons chegam ao alvo. Como vimos anteriormente, a energia de uma onda eletromagnética é carregada em pacotes pelos fótons e dependem da frequência da onda. Como a frequência está relacionada com o comprimento de onda

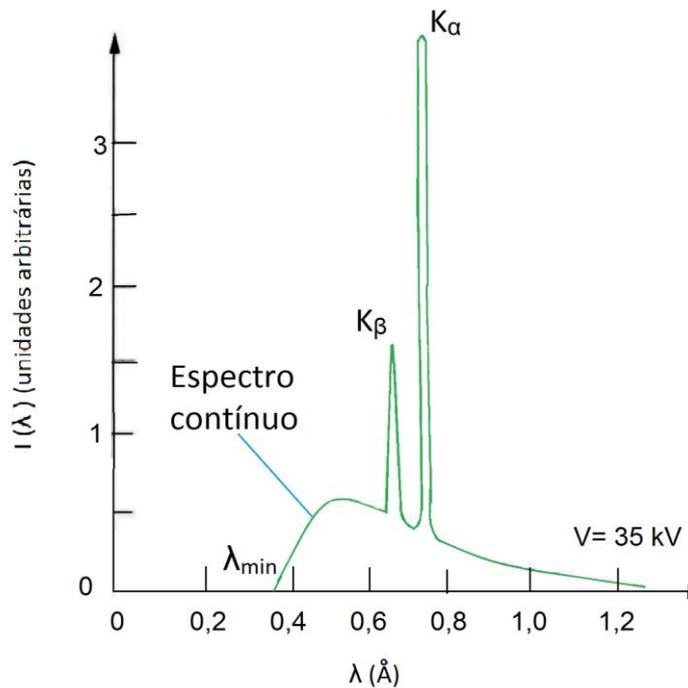
através da velocidade, que no vácuo é  $c$ , pode-se relacionar a energia cinética dos elétrons com o comprimento de onda dos raios X, através da equação:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (9)$$

A energia depende da tensão aplicada. Como há perda de energia durante o percurso, a energia cinética máxima adquirida se relaciona com a tensão aplicada por:

$$E_{m\acute{a}x} = eV, \quad (10)$$

onde  $e$  é a carga do elétron,  $1,602 \times 10^{-19}$  C e  $V$  é a tensão aplicada. Há, portanto, uma variação de intensidade de raios X produzidos em função da energia e, naturalmente, do comprimento de onda, como mostra a Figura 6. Por ter uma variação contínua, são chamados de radiação contínua, ou de radiação branca, já que, assim como a luz branca, é constituído por diversos comprimentos de onda. Outro nome dado a esse tipo de radiação é *bremsstrahlung*, que em alemão significa desaceleração da radiação.



**Figura 6:** Intensidade de raios X produzidos em função do comprimento de onda.

Fonte: Imagem adaptada de Física Moderna (Tipler & Llewellyn, 2001, p.94)

### *Espectro característico de raios X*

Na Figura 6 vemos dois picos intensos sobrepostos à linha contínua. Vamos ver agora de onde eles vêm.

Como foi visto acima, os elétrons são dispostos nas diversas camadas em torno do núcleo. A camada K, a mais interna, é a mais energética. Como a tensão aplicada entre o ânodo e o cátodo é muito alta, os elétrons que atingem o alvo têm uma energia muito grande. Essa energia é tão grande que, quando transferida para o material através da colisão, consegue arrancar um de seus elétrons

mais ligados, da camada K. O preenchimento das camadas em torno do núcleo, com elétrons, dá-se de dentro para fora, situação que confere estabilidade ao átomo. Quando um átomo perde um elétron da camada K, permanecendo com as camadas mais externas ocupadas, um elétron de uma dessas camadas vem a ocupar essa posição, para que o átomo volte a ficar estável. Quando isso acontece, a diferença de energia entre as duas camadas é liberada em forma de raios X. Como a diferença entre os níveis de energia de cada camada eletrônica é característica de cada elemento, os raios X liberados por essa transição são chamados de radiação característica, e se dá a comprimentos de onda bem específicos. Quando o átomo perde um elétron da camada K, qualquer elétron, de qualquer outra camada mais externa, pode vir a ocupar o seu lugar. Se este lugar é ocupado por um elétron da camada L (a segunda camada), chamamos a radiação de  $K_{\alpha}$ , ou linha  $K_{\alpha}$ . Se ele vem da camada M (a terceira), temos a linha  $K_{\beta}$ , e assim por diante.

Elétrons de camadas mais externas também podem vir a ocupar a camada K, mas a diferença de energia correspondente é maior e, muitas vezes, está fora do intervalo de energias que medimos no estudo dos raios X. De qualquer modo, os eventos de decaimento de um elétron para ocupar uma camada mais interna é um evento estatístico, e os decaimentos que envolvem menor diferença de energia têm maior probabilidade de acontecer. Por isso na Figura 6 temos o pico correspondente à radiação  $K_{\alpha}$  maior do que o pico correspondente à radiação  $K_{\beta}$ .

Acabamos de ver que há dois tipos de radiação X: os raios X contínuos, que não dependem do material do alvo usado e os raios X característicos, que dependem do material de que é feito o alvo. Desde a sua “descoberta”, já foi observado que esta radiação é bem mais penetrante do que a luz visível, ou seja, que os raios X têm energia bem maior do que a luz visível (maior também do que as ondas de rádio e micro-ondas), da ordem de keV (quiloeltronvolts, menor). Isso significa também que sua frequência é maior, e seu comprimento de onda menor do que as ondas citadas. Seu comprimento de onda é da ordem de bilionésimos de metro, ou seja, de nanômetros, cerca de dez mil vezes menor que o comprimento de onda da luz visível.

Os raios X ainda são produzidos em laboratórios em tubos como o exibido na Figura 5, embora melhorados com o tempo. Porém, o avanço da ciência permitiu o desenvolvimento de uma potente fonte de raios X: o síncrotron. O síncrotron é um anel com diâmetro de algumas centenas de metro, ao longo do qual os elétrons se movem com alta velocidade. Para mantê-los em movimento circular, são utilizados ímãs muito potentes. Quando a direção da trajetória dos elétrons é mudada, eles emitem radiação. Como eles se movem dentro do anel com velocidade muito alta, emitem radiação com alta energia e comprimento de onda dos raios X.

### *A descoberta dos raios X e seus efeitos*

A notícia da descoberta dos raios X foi amplamente divulgada em todos os jornais e revistas da época, trazendo imediata popularidade para Röntgen. Em 1896, um ano depois dessa descoberta, Henry Becquerel percebeu que sais de urânio emitiam uma radiação semelhante aos raios X. Ele começou a estudar esse fenômeno, embora não fosse capaz de compreender sua origem. Marie Curie interessou-se pelo tema e iniciou seu trabalho de doutorado sob a orientação de Becquerel. Ela chamou esse efeito de radioatividade e percebeu que se originava no interior do átomo. Foi além em sua investigação, “descobrimo”<sup>4</sup> que havia outros elementos radioativos, assim “descobriu” os elementos rádio e polônio. O casal Curie, Becquerel e o cientista neozelandês Ernest Rutherford estudaram em detalhe as radiações emitidas por vários elementos e as classificaram de acordo com seu poder de penetração, chamando-as de radiações alfa, beta e gama.

<sup>4</sup> O termo “descobrir” é usado neste texto com aspas para indicar que não se refere à noção ingênua de que leis, fenômenos e propriedades na Física são desvelados, mas no sentido de que o cientista constrói a ciência.

Na época ainda não se sabia de todos os efeitos causados pela radiação. Hoje sabemos que todos esses tipos de radiação, tanto naturais (emitidas espontaneamente como alfa, beta e gama) ou produzidas artificialmente (como os raios X ou radiação produzida em reações nucleares), transportam uma enorme quantidade de energia que, quando atinge qualquer material, é capaz de arrancar elétrons deste, gerando íons. Íons são partículas carregadas eletricamente, como um átomo que perde elétrons e deixa de ser neutro. Por essa razão são chamadas de radiações ionizantes.

Quando a radiação incide nos tecidos de qualquer órgão de seres vivos também arranca elétrons e deixa os átomos que formam os tecidos carregados eletricamente, causando-lhes danos. Os efeitos causados pela radiação vão desde queimaduras leves até grandes alterações dos tecidos, provocando câncer ou alterando o material genético. A primeira vítima de câncer devido à exposição excessiva a radiação foi Clarence Dally, assistente de Thomas Edison em seus trabalhos com raios X. Röntgen, no entanto, havia construído uma cabine de estanho e chumbo para impedir a entrada de luz no tubo de raios X, e esta cabine também não permitia a saída de raios X da câmara. Dessa forma, nunca sofreu nenhuma queimadura ou consequência por efeito de radiação.

Marie Curie morreu de leucemia, com 67 anos, provavelmente devido à exposição que sofreu às radiações durante a sua vida. Pierre Curie, no entanto, morreu atropelado, 20 anos mais jovem, possivelmente cedo para que os efeitos da radiação se manifestassem.

Becquerel, depois de carregar uma amostra de rádio no bolso durante seis horas, teve sua pele queimada, mas apesar do longo tempo levado para a cicatrização, não desenvolveu o câncer.

A utilização e a exposição a um fenômeno novo e desconhecido pode representar um grande risco. O maior exemplo disso é a bomba atômica, lançada sobre Hiroshima com o objetivo apenas de ser uma bomba potente. Porém, seus efeitos causaram imensa surpresa e revelou enorme poder de destruição. Os efeitos das reações nucleares, por um lado são nocivos, por outro são explorados para tratamento de doenças, pois pode tanto destruir células sadias como células cancerígenas. Em outras palavras, apesar de poder ser muito perigosa, a radiação não é uma grande vilã. Além disso, os danos são causados quando o corpo absorve uma grande quantidade de radiação em curto período de tempo, mas pequenas doses, espaçadas de um longo tempo, não chegam a ser nocivas. Convém também lembrar que estamos permanentemente sujeitos à radiação natural proveniente de elementos presentes no solo, em rochas, e à radiação cósmica, não devendo os raios X e a radiação usada na medicina nuclear serem vistas negativamente.

### *Aplicações dos raios X na ciência*

Como mencionado anteriormente, a radiografia foi a primeira aplicação “descoberta” para os raios X. Isto porque eles são absorvidos por materiais densos (ossos, por exemplo) e atravessam materiais menos densos como os tecidos. Outra aplicação, muito importante para a ciência, foi verificada alguns anos depois de sua “descoberta”, por Max von Laue. Para compreender essa outra utilização dos raios X vamos antes recorrer às ondas mecânicas.

### *Interferência entre ondas*

Quando produzimos uma onda na superfície da água, geramos uma perturbação (onda) que se propaga em círculos, que se afastam do ponto onde a onda foi gerada (Figura 7 (a)). Se colocarmos um obstáculo com uma fenda no caminho dessa onda, uma nova onda será formada a partir da fenda e se propagará igualmente em círculos. Se colocarmos um obstáculo com duas fendas no caminho da onda, duas ondas serão geradas, uma em cada fenda (Figura 7 (b)). Essas duas ondas se encontram e interferem umas com as outras, de modo que seus efeitos se somam,

formando uma onda resultante. Nos lugares em que os topos das duas ondas se encontram, temos um máximo de intensidade. Onde o topo de uma delas se encontra com o ponto mais baixo da outra, a soma se anula. Em situações intermediárias, temos intensidades intermediárias. A esse efeito chamamos interferência.



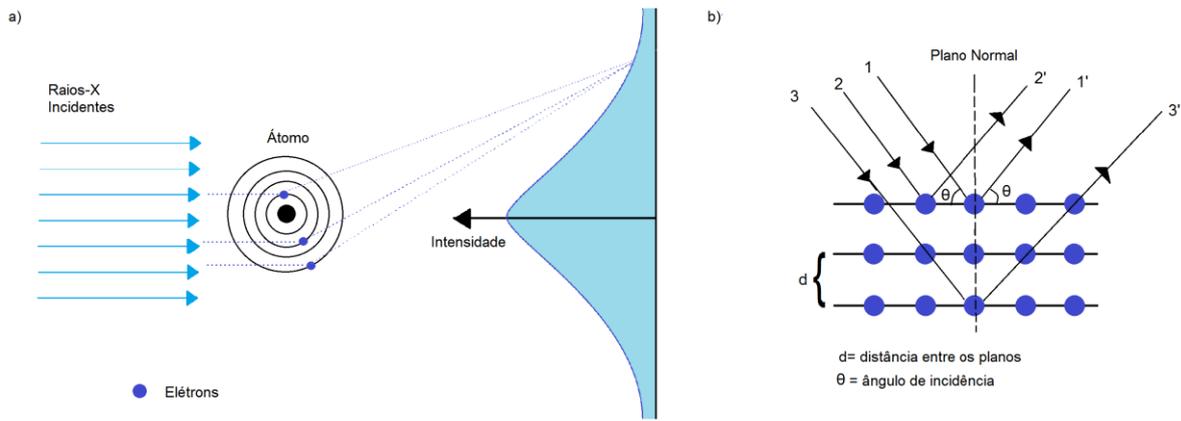
**Figura 7:** Representação de uma onda na água utilizando o simulador para interferência de ondas desenvolvido por PhET Interactive Simulations: (a) ao passar por uma fenda em um anteparo; (b) ao passar por duas fendas em um anteparo, gerando interferência.

A interferência é um fenômeno característico do comportamento ondulatório, ocorrendo para todos os tipos de onda, inclusive as ondas eletromagnéticas. Para que duas fendas (ou obstáculos) produzam interferência detectável, a distância entre elas deve ser da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da onda em questão. No caso dos raios X, são os elétrons presentes na estrutura da matéria que fazem o papel das fendas. Esta foi a descoberta de Max von Laue: os raios X interagem com os elétrons e novas ondas são geradas a partir de cada elétron (Figura 8). Esse fenômeno chama-se *espalhamento de raios X*. As novas ondas geradas interferem entre si, gerando uma onda resultante, com máximos e mínimos.

Diferente das ondas geradas na superfície da água, não podemos ver as ondas de raios X. Para observá-las é necessário usar detectores, que contam a quantidade de fótons que os atingem. A intensidade é proporcional ao número de fótons contados. Como a distribuição da intensidade de raios X resultante depende de como os elétrons estão distribuídos, a sua medida nos fornece informação sobre a distribuição de elétrons (chamada densidade eletrônica) do material.

### *Aplicação do espalhamento de raios X*

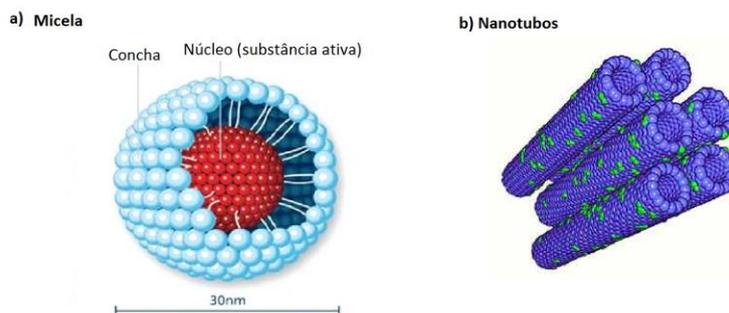
A informação sobre a distribuição de densidade eletrônica de uma amostra de matéria, obtida a partir da análise da intensidade espalhada de raios X, nos fornece conhecimento sobre a estrutura das partículas ali presentes. Isso é de grande utilidade para se estudar a estrutura, a nível nanométrico, de materiais. No campo da ciência dos materiais, por exemplo, diversos materiais novos são sintetizados e modificados, e o conhecimento da estrutura interna dos produtos gerados é imprescindível para que se possa traçar rotas eficazes de síntese.



**Figura 8:** a. Distribuição de intensidade de raios X após sua interação com elétrons; b. Diversos feixes incidentes e espalhados após interagir com elétrons em um cristal.

Nas indústrias farmacêutica e de cosméticos, por exemplo, há uma constante busca de medicamentos que sejam mais eficazes e menos tóxicos. Além dos remédios já existentes, novos vírus surgem constantemente e novas vacinas devem ser desenvolvidas. O fármaco deve ser transportado até a parte do corpo adequada onde possa agir no organismo. Para isso, deve ser envolvido por uma estrutura que seja estável durante o transporte e se rompa, ou deixe escapar o ingrediente ativo, no local adequado (Figura 9 (a)). A pesquisa da ação desejada de tais materiais requer o conhecimento de sua estrutura, de sua estabilidade nas condições do meio por onde será transportado, e de sua interação com o ingrediente ativo. Além de assegurar o transporte e a liberação do princípio ativo no órgão (local do corpo) adequado, é imprescindível que este ingrediente tenha a ação desejada, porém sem causar irritabilidade nem danos para o corpo ou pele. Assim, é necessário também conhecer a interação do fármaco (ou cosmético) e de sua estrutura transportadora com as membranas que formam os tecidos do organismo. Os efeitos dessa interação se fazem sentir diretamente na estrutura das membranas, sendo possível relacionar modificações nestas membranas com possíveis efeitos tóxicos ou não tóxicos. Esses estudos são altamente beneficiados pela análise da intensidade de raios X espalhada pelos elétrons presentes nesses materiais e membranas.

Aqui foi citado um exemplo da aplicação dos raios X na área de desenvolvimento de medicamentos, mas essa técnica é largamente utilizada em outras áreas, como no desenvolvimento de materiais semicondutores (usados na indústria de microeletrônica), de nanotubos (tubos muito pequenos que têm diversas propriedades e estão na moda) (Figura 9 (b)) e na pesquisa e desenvolvimento de novos materiais. Toda estrutura que esteja na ordem de nanômetros pode ser estudada através da sua interação com os raios X.



**Figura 9:** a. Exemplo de substância (ingrediente ativo) encapsulado dentro de uma estrutura micelar; b. Nanotubos

Fontes: a) Gupta A, A. et al. (2012) b) Yarris, L. (2000)

Neste artigo foi possível discutir um pouco da Física envolvida na formação dos raios X, ter uma ideia sobre os efeitos que podem causar e de sua utilidade na ciência, que vai além de seu emprego mais popular, a radiografia.

### *Considerações Finais*

Este texto que busca introduzir os raios X (origens, aplicações e interações com a matéria, especialmente com os seres vivos) é uma tentativa de oferecer um material acessível para que os professores de Física se sintam motivados a tratar temas de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Isto se alinha com os objetivos da nova educação defendida em documentos oficiais há anos (LDB 9.394/96, PCNs, PCN+ e a nova Base Nacional Comum Curricular – BNC, em construção) cuja meta é superar o antigo projeto pedagógico, que visava transmitir conhecimentos disciplinares de forma padronizada e estanque. Desta forma, este trabalho pretende contribuir para que seja possível encaminhar um ensino capaz de alcançar a compreensão de processos e do desenvolvimento da ciência como um campo dinâmico, em permanente evolução, através da leitura, discussão e momentos de reflexão crítica junto aos alunos como forma de prepará-los para o efetivo exercício da cidadania.

### **Referências:**

BRASIL. *Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional*, Lei no 9.394, de 20 dezembro de 1996.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação (MEC), Secretaria de Educação Média e Tecnológica (Semtec). *Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio*. Brasília: MEC/Semtec, 1999.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação (MEC), Secretaria de Educação Média e Tecnológica (Semtec). *PCN + Ensino médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*. Brasília: MEC/Semtec, 2002.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação (MEC). Secretaria da Educação Básica. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília: MEC, 2016, 2ª versão.

Gupta A, A A, Menakshi A, Sehgal A & Sehgal R. Nanotechnology and Its Applications in Drug Delivery: A Review. *WebmedCentral MEDICAL EDUCATION* 2012;3(1). Acesso em 25 jul, [https://www.webmedcentral.com/article\\_view/2867](https://www.webmedcentral.com/article_view/2867)

Huray, P.G., *Maxwell's equations*, Wiley-IEEE Press, DOI: 10.1002/9780470549919.fmatter, 2011

PhET Interactive Simulations, University of Colorado Boulder . Acesso em 21 mar, 2016. <http://phet.colorado.edu>

Schenberg, M. *Pensando a Física*. São Paulo: Landy Editora, 2001, 5ª ed.

Staguhn, G. *Breve storia dell'atomo*. Milão: Salani Editore, 2011.

Yarris, L. Nanotubes: Surprising Sensitivity to Oxygen Opens New Possibilities Acesso em 25 jul, <http://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/zettl-nanotubes.html>

**Bibliografia consultada**

Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J., *Fundamentals of Physics*, Volumes 1-4, Cleveland State: John Wiley and Sons Inc, 2008, 8ª ed.

Hewitt, P. G. *Física Conceitual*, Porto Alegre: Bookman, 2011, 11ª ed.

Young, H.D., Freedman, R.A., Sears & Zemansky *Física*, Volumes 1-4, tradução Yamamoto, S.M. São Paulo, Pearson Ed. 2009, 12ª ed.

Cullity, B.D., *Elements of X-ray diffraction*, Reading, Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1956