

INVESTIGANDO O INVISÍVEL: AS PESQUISAS SOBRE RAIOS X LOGO APÓS A SUA DESCOBERTA POR RÖNTGEN

ROBERTO DE ANDRADE MARTINS

RESUMO – Em janeiro de 1896, o primeiro, trabalho de Wilhelm Conrad Röntgen sobre raios X foi divulgado no mundo todo. A repercussão foi enorme e dezenas de pesquisadores se voltaram imediatamente à pesquisa do novo campo, repetindo e aprofundando os primeiros estudos de Röntgen. Este artigo analisa os primeiros meses de pesquisas sobre raios X, além de conter uma tradução comentada do artigo publicado por Röntgen em março de 1896.

ABSTRACT – In January 1896 Wilhelm Conrad Röntgen's first paper on X rays was made known all over the world. There was an immediate wide impact and dozens of researchers began at once to explore this new field, repeating and improving Röntgen's early work. This article analyses the early months of X rays researches and contains a commented translation of the paper published by Röntgen in March 1896.

Introdução

Em dezembro de 1895, após algumas semanas de intenso trabalho experimental, Wilhelm Conrad Röntgen redigiu e publicou a primeira descrição sobre um novo tipo de radiação, que denominou “raios X” por serem de natureza desconhecida (Röntgen, 1895). Ciente da importância de sua descoberta, Röntgen imediatamente enviou dezenas de separatas do seu artigo, acompanhadas de cópias de algumas radiografias¹, aos mais importantes físicos do mundo todo. Em poucas semanas, os raios X passaram a ser o mais importante tema científico, discutido em academias científicas, gerando novas pesquisas e sendo divulgado em jornais e revistas populares. Ao longo de 1896, foram publicados mais de 1.000 artigos sobre o assunto.

A notícia atingiu a imprensa da seguinte forma: Röntgen havia enviado uma de suas separatas com fotografias para o professor Franz Exner, de Viena. Este mostrou as fotografias e falou sobre a descoberta, em um jantar, no dia 4 de janeiro de 1896, a vários amigos, entre os quais estava o físico Ernst Lecher, cujo pai era editor do principal jornal de Viena: *Die Wiener Presse*. No dia seguinte (domingo, 5 de janeiro), esse jornal já estampava na primeira página a descoberta de Röntgen (Nitske, *The life of Wilhelm Conrad Röntgen*, p. 112). Um dia depois (6 de janeiro), a notícia apareceu na Inglaterra, no *London Daily Chronicle*. No dia 7 de janeiro, outro jornal inglês, o *Standard*, informou a descoberta. Em Paris, a notícia foi publicada por *Le Matin* apenas no dia 13 de janeiro (Nitske, *The life of Wilhelm Conrad Röntgen*, p. 115).

Depois de poucos dias, as revistas científicas começaram também a divulgar o trabalho de Röntgen: *The Electrician* (10 de janeiro), *Lancet* e *The British Medical Journal* (11 de janeiro), *Nature* (16 de janeiro). No dia 23 de janeiro, a revista *Nature* publicou uma tradução do artigo de Röntgen, que se tornou assim amplamente acessível (Morgan, 1995).

¹ O nome “radiografia” não existia ainda. Na época, as pessoas se referiam simplesmente às “fotografias de Röntgen” ou expressões semelhantes, mas para maior simplicidade e clareza este artigo vai utilizar o termo anacrônico “radiografia”.

Logo após a publicação da notícia pelos jornais, Röntgen foi convidado a fazer uma demonstração de sua descoberta diante da corte imperial (Nitske, *The life of Wilhelm Conrad Röntgen*, p. 101). A demonstração foi realizada com sucesso no domingo, dia 13 de janeiro, e o Kaiser condecorou Röntgen com a Ordem da Coroa da Prússia.

O primeiro artigo de Röntgen continha uma descrição bastante clara das principais propriedades qualitativas dos novos raios². Eles eram produzidos por tubos de raios catódicos, no ponto onde esses raios colidiam com a parede de vidro (ou qualquer outro sólido). Eram detectados inicialmente por sua propriedade de tornar certos materiais luminescentes (o primeiro material fluorescente utilizado por Röntgen foi platino-cianeto de bário). Eles se propagavam em linha reta, produzindo por isso sombras regulares (essa propagação retilínea foi o que levou a chamá-los de "raios"). Eram capazes de penetrar grandes espessuras de diversos materiais – especialmente no caso de materiais menos densos. Os metais – especialmente o chumbo e a platina – absorviam-no mais fortemente.

Por analogia com a luz, radiação ultravioleta e raios catódicos, Röntgen estudou várias outras propriedades. Os raios X eram capazes de sensibilizar chapas fotográficas, como essas radiações. Não podiam ser refletidos, nem refratados – o que os diferenciava da luz e da radiação ultravioleta, mas os aproximava dos raios catódicos. No entanto, eram muito mais penetrantes do que os raios catódicos, e, ao contrário desses, não podiam ser desviados por ímãs. Röntgen fez alguns testes, e não detectou fenômenos de interferência e polarização com os novos raios.

A natureza dos raios X era desconhecida, embora Röntgen estivesse inicialmente inclinado a interpretá-los como ondas eletromagnéticas *longitudinais*.

O presente artigo estuda a repercussão científica imediata do trabalho de Röntgen, analisando as pesquisas que foram realizadas logo após a divulgação de seu primeiro comunicado³.

O impacto imediato

Como já foi indicado acima, a divulgação do primeiro artigo de Röntgen foi feita de um modo muito especial: o autor enviou cópias de separatas de seu trabalho a cientistas influentes, como Boltzmann, Warburg, Kohlrausch, Lord Kelvin, Stokes, Poincaré, König, Wood, Lorentz, Lebedew e outros (NITSKE, *The life of Wilhelm Conrad Röntgen*, p. 102-4). Essas pessoas receberam um envelope contendo uma cópia do artigo, com uma dedicatória de Röntgen, e cópias de algumas das primeiras radiografias que ele havia feito. A leitura do artigo e o exame das estranhas fotografias teve um impacto imediato: tratava-se de algo novo, importante, espantoso⁴. Quem poderia imaginar que ali, em quase todos os laboratórios de física do mundo, era possível produzir esses raios invisíveis capazes de atravessar a matéria opaca à luz?

De acordo com Jauncey, houve 4 fases distintas na reação da comunidade científica ao trabalho de Röntgen:

1. Ficaram atônitos e incrédulos;
2. Os que tinham à sua disposição os materiais necessários, correram para seus laboratórios, repetiram os experimentos descritos por Röntgen e constataram que ele estava correto⁵;
3. Após essa confirmação, os físicos acharam que Röntgen havia feito um trabalho tão completo que não havia muito mais a fazer, exceto realizar medidas mais precisas;

2 Uma tradução comentada do primeiro artigo de Röntgen poderá ser encontrada em Martins, 1998.

3 Os trabalhos analisados neste artigo são, quase todos, do período de janeiro a março de 1896.

4 O professor Otto Lummer, de Berlin, comentando sobre sua primeira reação ao artigo de Röntgen, escreveu: "Não pude evitar pensar que estava lendo um conto de fadas quando li a 'Primeira comunicação' [de Röntgen], mas o nome do autor e sua provas sólidas logo me libertaram de qualquer ilusão desse tipo" (Lummer, citado por Nitske, *The life of Wilhelm Conrad Röntgen*, p. 99).

5 Por exemplo: no dia 7 de janeiro – o dia seguinte à divulgação no jornal inglês *Daily Chronicle* do trabalho de Röntgen – A. Campbell Swinton, baseando-se apenas nessa descrição, reproduziu alguns experimentos diante de amigos, e produziu uma radiografia de sua própria mão (Morgan, 1995).

4. Logo, no entanto, perceberam que Röntgen não havia encontrado tudo o que era possível saber sobre os raios X, surgindo então um período de forte competição e de rápido desenvolvimento (Jauncey, 1945, p. 374).

Vamos examinar essa repercussão nas primeiras semanas de 1896, subdividindo a análise nos seguintes pontos:

- Repetições e variações dos experimentos descritos por Röntgen;
- Estudo de aplicações práticas (principalmente médicas) dos raios X;
- Estudo das condições para produzir raios X e radiografias do modo mais eficiente possível;
- Discussões sobre a natureza dos raios X;
- Estudo de novos fenômenos.

Repetições e variações dos experimentos descritos por Röntgen

Na França, a divulgação da descoberta de Röntgen foi feita por Henri Poincaré, que apresentou à Academia de Ciências de Paris, no dia 20 de janeiro de 1896, um relato oral resumido sobre os raios X. Apresentou também a primeira reprodução francesa dos experimentos de Röntgen, por Oudin e Barthélemy. Estes utilizaram um tubo de Crookes em que o cátodo era um simples fio, que enviava os raios catódicos para todos os lados, de tal modo que todo o vidro ficava luminoso. Com esse tubo, ligado a uma bobina de indução, conseguiram produzir a radiografia de uma mão depois de uma exposição de 20 minutos (Poincaré, 1896, p. 53). Como todo o vidro (de 7 cm de diâmetro) emitia raios X, era difícil obter imagens nítidas com esse dispositivo. Poincaré recomendou o uso de tubos com cátodo côncavo, de modo a concentrar os raios catódicos e fazê-los atingir uma pequena região do vidro (Poincaré, 1896, p. 59).

Esses primeiros experimentos franceses ilustram muito bem aquilo que tornou os raios X mais populares: a facilidade de produzi-los, e a obtenção de radiografias que, para espanto de todos, permitiam ver os ossos de pessoas vivas. Embora o material fluorescente utilizado por Röntgen não fosse de alto custo, tratava-se de material pouco comum, enquanto que materiais fotográficos eram acessíveis a todos. Por isso, o método mais utilizado para estudar os novos raios era a fotografia.

Na Inglaterra, a publicação da primeira tradução do artigo de Röntgen, no dia 23 de janeiro de 1896, foi acompanhada por um artigo em que Swinton relatou uma repetição de alguns experimentos simples com raios X, dando especial ênfase à produção de radiografias (Swinton, 1896).

É também interessante descrever o trabalho apresentado por Jean Perrin à Academia de Ciências de Paris no dia 27 de janeiro (Perrin, 1896a) – uma semana após a divulgação do trabalho de Röntgen por Poincaré. Perrin não havia lido o trabalho de Röntgen, tendo apenas informações indiretas (obtidas em jornais), mas interessou-se imediatamente pelo assunto e começou a investigar o assunto⁶. Inicialmente, realizou um experimento que pensou ter constituído a descoberta de Röntgen: colocou sobre uma chapa fotográfica, guardada em seu suporte, diversos objetos, e ligou um tubo de Crookes em sua proximidade. Ao revelar a chapa, apareceu a silhueta dos objetos. Convenceu-se, assim, da existência dos raios, e também concluiu que eles eram diferentes dos raios catódicos, que não teriam conseguido atravessar o vidro do tubo.

Depois, Perrin comparou a transparência de diversos materiais. Estudou também a propagação retilínea dos raios X, utilizando dois diafragmas circulares de latão, e obtendo uma impressão fotográfica que mostrava sombra e penumbra, cujas dimensões concordavam bem com a hipótese de propagação retilínea. Baseando-se nesse resultado, Perrin começou a utilizar feixes colimados de raios X (algo que Röntgen não havia feito), e tentou refleti-los em superfícies de aço e de vidro (sem notar nenhum efeito); tentou refratá-los em parafina e cera, também sem notar desvio significativo; tentou difratá-los em uma fenda estreita,

⁶ Perrin já havia realizado experimentos com raios catódicos (Perrin, 1895), dispondo portanto da aparelhagem necessária para o estudo e estando familiarizado com as técnicas necessárias.

que produzia difração com a luz verde emitida pelo vidro do tubo, e não observou nenhum sinal de difração dos raios X (Perrin, 1896a, 1896b). Por fim, Perrin se dedicou a obter radiografias de pessoas e animais.

Esse primeiro trabalho de Perrin, que reproduziu e confirmou os resultados de Röntgen, ilustra bem aquilo que guiava a maior parte dos pesquisadores: eles eram guiados pela analogia entre os raios X e a luz, e por isso procuravam detectar fenômenos equivalentes aos estudados na óptica geométrica e física.

Ponto de origem dos raios X

Perrin e outros autores se preocuparam em determinar o ponto exato onde a radiação era produzida, no tubo de descarga. De um modo geral, concordaram com Röntgen, que havia afirmado que os raios X emanavam do ponto em que os raios catódicos atingiam o tubo de vidro ou algum outro obstáculo⁷.

Para localizar a origem exata dos raios X, Perrin fez fotografias utilizando uma placa de latão dotada de um furo de 1 mm interposta entre o tubo e a chapa fotográfica, e concluiu que eles provinham da colisão dos raios catódicos contra qualquer obstáculo sólido (Perrin, 1896c). Heen, interpondo uma folha de chumbo com vários furos entre o tubo de descarga e uma chapa fotográfica, concluiu que os raios não provinham do cátodo e sim do ânodo (Heen, 1896). Um experimento semelhante foi feito por Ralph Lawrence, com iguais resultados (Lawrence, 1896).

Outros pesquisadores investigaram o ponto de emissão dos raios X utilizando outras técnicas. Meslin colocou simplesmente um tijolo a meio caminho entre o tubo de descarga e a chapa fotográfica, e pela posição da mancha fotográfica concluiu que a radiação era proveniente do vidro (MESLIN 1896b) – um método evidentemente grosseiro. Imbert e Bertin-Sans utilizaram um feixe de tubos metálicos finos, colocado entre o tubo de descarga e a chapa fotográfica, de tal modo a poder detectar a direção de onde provinham os raios (Imbert & Bertin-Sans, 1896b), concluindo também que eles se originavam no vidro. Por outro lado, houve estudos que levaram a conclusões discordantes. Galitzine e Karnojitsky utilizaram uma tábua na qual haviam sido afixados pregos dispostos de forma regular. Colocando essa tábua entre o tubo e a chapa fotográfica e estudando a localização da sombra dos pregos, concluíram que o centro de emissão estava dentro do tubo, alguns milímetros antes do ponto onde os raios catódicos atingiam a parede de vidro (Galitzine & Karnojitsky, 1896a).

Reflexão e refração dos raios X

Tanto por motivos práticos (de utilização dos raios X) quanto por motivos científicos (discussão sobre a natureza dos raios) era importante testar se eles podiam ser refletidos e refratados. Imbert e Bertin-Sans tentaram refletir a radiação em superfícies metálicas e em parafina (Imbert & Bertin-Sans, 1896a). Não observaram uma reflexão regular, mas apenas raios X espalhados para todos os lados, comparável à difusão da luz em corpos translúcidos. Interpretaram o resultado como favorecendo a hipótese de que os raios X teriam pequeno comprimento de onda e as superfícies utilizadas, embora opticamente lisas, teriam produzido um efeito semelhante ao de superfícies irregulares.

Investigadores ingleses também se dedicaram a essa questão. Joly descreveu resultados *positivos* para a reflexão de raios X incidindo de forma rasante (com ângulos de incidência muito próximos a 90°) sobre superfícies de chumbo e de vidro (Anônimo, 1896b, p. 522). Por outro lado, Fitzgerald e Trouton tentaram refletir os raios X em cristais, com ângulo de incidência próximo a 90°, mas não obtiveram sucesso. Lord Blythwood, em 19 de março, relatou à *Royal Society* haver conseguido refletir regularmente os raios X utilizando um espelho de *speculum* (Anônimo, 1896b, p. 522), mas logo ficou claro que o efeito observado podia ser atribuído ao espalhamento irregular da radiação.

⁷ No entanto, Röntgen não havia indicado o processo pelo qual havia chegado a essa conclusão.

Alguns estudos bastante cuidadosos foram publicados em época posterior (maio de 1896) por Dwelshauvers-Dery. Esse pesquisador confirmou o resultado de Röntgen de que não ocorria reflexão regular (especular), mas parecia ocorrer reflexão difusa (Dwelshauvers-Dery, 1896a). Porém, estudando essa radiação espalhada pela matéria, Dwelshauvers-Dery observou que ela era menos penetrante do que os raios X originais. Não se tratava propriamente de reflexão e sim de produção de novos raios (transformação) dentro da substância, através de um fenômeno que parecia análogo à fluorescência. Por isso, ele sugeriu que os raios espalhados seriam de maior comprimento de onda (Dwelshauvers-Dery, 1896a, p. 486).

Röntgen não havia conseguido observar refração da radiação. Perrin e Joly confirmaram a falta de deflexão dos raios X por prismas (Perrin, 1896a). John Trowbridge também confirmou que os raios não eram refratados por prismas de madeira e de borracha vulcanizada (Anônimo, 1896a, p. 380).

Absorção

Vários pesquisadores repetiram e desenvolveram as comparações realizadas por Röntgen a respeito da absorção dos raios X por diferentes substâncias. Em 3 de fevereiro, Chabaud comunicou à Academia de Ciências de Paris diversas comparações desse tipo (Chabaud, 1896).

Além de estudos puramente físicos do processo de absorção, alguns autores se interessaram pela influência de diferenças químicas no fenômeno. Meslans, utilizando o método fotográfico, mostrou que o carbono, sob diversas formas (incluindo o diamante) era muito transparente, assim como todos os compostos orgânicos que só contivessem carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio (o que explicava a transparência dos músculos). No entanto, o enxofre, selênio, fósforo e iodo, isolados ou em compostos, mostravam grande opacidade (Meslans, 1896a). Esse tipo de conhecimento tinha grande importância nas aplicações práticas dos raios X.

Thomson, usando várias camadas de folhas metálicas, notou uma falta de homogeneidade da radiação: a absorção inicial era forte, depois se tornava mais fraca (Thomson, 1896a, p. 392). Benoist e Hurmuzescu chegaram também a conclusões semelhantes, e notaram além disso que a absorção dos raios X em uma mesma placa metálica dependia do tubo utilizado (Benoist & Hurmuzescu, 1896b). Sella e Majorana também notaram que o enfraquecimento não era uma função exponencial da espessura, o que indicava que a radiação não era homogênea (Raveau, 1896, p. 250). Havia, portanto, diferentes tipos de raios X.

Polarização e difração

J. J. Thomson relatou, na *Nature*, em 27 de fevereiro, que não tinha encontrado evidência de polarização. Ele procurou detectar alguma diferença de absorção dos raios X em turmalinas cruzadas e paralelas, através do método fotográfico, e não observou nenhuma diferença (Thomson, 1896a, p. 391; Thomson, 1896b, p. 61).

Conforme um relato publicado na revista *Nature* de 2 de abril, Alfred M. Mayer fez também experimentos sobre polarização, utilizando herapatita (um iodo-sulfato de quinino). Como nos experimentos de Thomson, não foi notada nenhuma diferença entre os polarizadores paralelos e cruzados, para os raios X (Anônimo, 1896b, p. 522).

Galitzine e Karnojitsky relataram haver obtido maior absorção com turmalinas cruzadas (Galitzine, & Karnojitsky, 1896b), concluindo que os raios X eram vibrações transversais. No entanto, Sagnac, Becquerel e Thomson não confirmaram esses resultados (Sagnac, 1896; Bouty, 1896, p. 616; Thomson, 1896b, p. 61; Thomson, 1896c, p. 581)⁸. Poderia haver, no entanto, uma diferença química importante entre diferentes

⁸ A pesquisa de Sagnac parece ter sido a mais cuidadosa. Ele procurou e não observou diferença de absorção de raios X comparando cristais paralelos e cruzados de quartzo, espato, mica, turmalina, e ferrocianeto de potássio.

cristais de turmalina, por isso Thomson não considerou impossível que Galitzine e Karnojistky tivessem realmente obtido os resultados positivos que descreveram.

A polarização dos raios X só foi efetivamente observada por Charles Glover Barkla, em 1905, mas com um método totalmente diferente, pois não se pode obter polarização desses raios com cristais.

Já foi mencionado acima que Perrin testou a existência de difração de raios X em uma fenda estreita, sem observar nenhum efeito (Perrin, 1896a, 1896b). Sagnac realizou um estudo muito mais significativo, utilizando um retículo formado por fios de platina, com 10 fios por milímetro. Observou um ligeiro alargamento do feixe, que indicava um comprimento de onda de, no máximo, 4 centésimos de micron, ou seja, 400 Å (Sagnac, 1896).

Ausência de influência por campos magnéticos

Röntgen havia descrito que, ao contrário dos raios catódicos, os raios X não sofriam influência de campos magnéticos. Lodge confirmou, através de experimentos muito sensíveis, que essa radiação não era desviada por ímãs (Thomson, 1896a, p. 391; Lodge, 1896).

No final de março, Lafay relatou que, passando os raios X por uma folha de prata conectada ao terminal negativo da bobina de indução, o feixe de radiação parecia ser desviado por um forte eletroímã (Lafay, 1896), mas estudos cuidadosos não confirmaram esse tipo de efeito.

Estudo de aplicações práticas dos raios X

Röntgen jamais se interessou pelas aplicações práticas dos raios X, mas foi o uso da nova radiação na Medicina que despertou maior interesse imediato por parte do público. Radiografar mão, pés e pequenos animais (como rãs) logo se tornou uma diversão em todo o mundo, e aplicações sérias não demoraram a surgir. A 27 janeiro de 1896, Lannelongue, Barthélemy e Oudin apresentaram à Academia de Ciências de Paris algumas radiografias que permitiam distinguir a destruição óssea de dentro para fora, em um caso de osteomielite (Lannelongue, Barthélemy & Oudin, 1896).

Poucas semanas depois, foram apresentados vários trabalhos comunicando a localização pelos raios X e extração cirúrgica de projéteis, fragmentos de vidro, agulhas e outros corpos (Londe, 1896; Zenger, 1896a; Delbet, 1896). Inicialmente, esses estudos eram feitos nos laboratórios de física, mas logo foram criados laboratórios radiológicos em hospitais. No primeiro semestre de 1896, foram publicados mais de 100 trabalhos sobre aplicações médicas dos raios X (ver Morgan, 1995).

Röntgen e os primeiros pesquisadores que se dedicaram ao estudo de raios X não tinham idéia de que a radiação poderia produzir danos à saúde. As radiografias demoravam um tempo longo (inicialmente, era necessária uma exposição de cerca de meia hora), e os investigadores ficavam ao lado de tubos de descarga, sem proteção radiológica, durante horas em seguida. Após alguns meses, foram observados efeitos como queimaduras e queda de cabelos em pessoas submetidas a altas doses de radiação, mas até um ano após a descoberta ainda não eram tomados cuidados regulares de proteção. Nesses primeiros anos de pesquisa, mais de 300 pessoas morreram por excesso de radiação (Nitske, *The life of Wilhelm Conrad Röntgen*, p. 181).

Outras aplicações práticas logo foram apontadas, tais como a detecção de falhas em peças metálicas. Uma curiosa utilidade dos raios X, indicada por Buguet e Gascard, foi a possibilidade de distinguir imediatamente os diamantes verdadeiros (transparentes aos raios X) das imitações, que eram opacas (Buguet & Gascard, 1896).

Condições para produzir raios X e radiografias do modo mais eficiente

A descrição de Röntgen não era muito detalhada, e logo os pesquisadores que tentaram reproduzir seus experimentos descobriram a necessidade tomar certos cuidados. Os tubos de descarga (geralmente, os chamados “tubos de Crookes”) não conservavam suas propriedades por muito tempo, pois com seu uso havia desprendimento de gases que aumentavam sua pressão interna e prejudicavam a produção dos raios catódicos. Era necessário ligar periodicamente o tubo a uma bomba de vácuo, para reestabelecer as condições de uso (Poincaré, 1896, p. 59). O próprio Röntgen indicou esse problema, em uma carta a um amigo (carta de Röntgen para Emil Warburg, 28 de janeiro de 1896, reproduzida em Krebs, 1973, p. 88).

Discutiu-se se era necessário um tubo de Crookes (ou algum tubo evacuado) para produzir raios X. Alguns alegaram ter produzido raios X com faíscas de uma bobina de indução, de uma máquina eletrostática ou com o arco elétrico (Moreau, 1896; Jauncey, 1945, p. 375).

No dia 5 de fevereiro, Lord Blythwood apresentou à *Glasgow Philosophical Society* fotografias obtidas sem tubo de Crookes, através de descargas elétricas no ar. John MacIntyre estudou o fenômeno, obtendo também resultados positivos, mas acabou por concluir que o efeito obtido era devido à passagem de eletricidade através da chapa fotográfica (Anônimo, 1896a). De modo semelhante, William Wallace e H. C. Pecklington, de Leeds, tentaram obter – aparentemente com sucesso – raios X utilizando uma lâmpada incandescente comum ligada a uma bobina de indução. Moreau utilizou uma bobina de indução sem nenhum tubo ligado a ela, e descreveu que a partir unicamente das faíscas obtidas era possível produzir raios X (Moreau, 1896).

Para finalidades práticas, era importante procurar reduzir o tempo de exposição exigido para se produzir uma radiografia. Por um lado, era possível utilizar chapas fotográficas mais sensíveis – e já em fevereiro de 1896, os irmãos Lumière e Albert Londe verificaram que as chapas “rápidas” para luz visível eram também mais sensíveis aos raios X (Lumière & Lumière, 1896; Londe, 1896). Por outro lado, foram tentadas várias modificações do tubo de descarga e do processo de estímulo elétrico dos raios catódicos para reduzir o tempo de exposição. Substituindo o interruptor comum por um interruptor de Foucault (que utilizava álcool), Chappuis conseguiu melhorar em cerca de 40 vezes a eficiência de um aparelho de descarga, conseguindo realizar radiografias em apenas um minuto (Chappuis, 1896)⁹.

Nos meses que se seguiram à descoberta de Röntgen, muitos investigadores se dedicaram a investigar as melhores condições experimentais para produzir os raios X e para realizar radiografias. Uma resenha apresentada em março de 1897 mostrou de forma bastante detalhada os cuidados que se descobriu serem necessários com relação à fonte de alta tensão, os tubos de vácuo, etc. (Macintyre, 1897).

Em 12 de março, J. W. Gifford anunciou que o melhor tubo para emissão de raios X era um tipo tubo de Crookes (já utilizado desde 1879) com cátodo côncavo, em que os raios catódicos são concentrados sobre uma placa de platina, que se torna incandescente. Outros investigadores confirmaram os estudos de Gifford, e em pouco tempo passaram a ser adotados tubos desse tipo, em que uma placa metálica de platina ou algum outro metal de alto ponto de fusão, dentro do tubo, era atingida pelos raios catódicos, formando um ângulo de 45° com o feixe (“tubos de foco”). Essa placa não era, normalmente, o ânodo, que ficava em uma posição lateral no tubo. Era chamada por isso de “anti-cátodo” (Macintyre, 1897, p. 272).

Discussões sobre a natureza dos raios X

Sabia-se, na época, que existiam muitos tipos diferentes de ondas eletromagnéticas transversais (ou, como se costumava dizer, ondas do éter), diferindo apenas por seu comprimento de onda: raios ultravioletas,

⁹ Nos interruptores comuns, a corrente era estabelecida ou rompida pelo contato entre duas placas metálicas. Os interruptores de mercúrio utilizavam uma pequena barra metálica que mergulhava ou saía de um recipiente de mercúrio líquido, estabelecendo ou quebrando o contato. Utilizava-se também amálgamas de mercúrio e platina, e colocava-se uma camada de álcool sobre o mercúrio, o que evitava a oxidação do sistema. Os pulsos obtidos eram muito mais intensos do que no caso dos interruptores sólidos (Macintyre, 1897, p. 271).

luz visível, infravermelho, ondas de rádio (ou “hertzianas”). Não se poderia aceitar que os raios X era um novo tipo de ondas eletromagnéticas, de alta frequência?

Existiam semelhanças muito grandes entre os raios X e os raios ultravioletas. Ambos, apesar de produzirem efeitos fotográficos e excitar fluorescência, não afetavam diretamente a retina, sendo invisíveis¹⁰. No caso dos raios ultravioletas, já se sabia que eles eram invisíveis porque eram absorvidos pelas substâncias existentes em um olho normal – principalmente pelo cristalino (Bouty, 1896, p. 613). Algumas pessoas que tinham sido operadas de catarata, com a remoção do cristalino, eram capazes de ter sensações visuais com os raios ultravioletas. Em 24 de fevereiro de 1896, Dariex e De Rochas relataram estudos realizados com olhos frescos de porco (que possuem dimensões semelhantes às do olho humano). Notaram que eles eram bastante opacos aos raios X. A parte interna do olho (humor aquoso) era a mais opaca. A córnea era a parte mais transparente aos raios X, seguida do cristalino – mas todos os tecidos que constituem o olho eram, segundo os autores, muito mais opacos a essa radiação do que a madeira, por exemplo (Dariex & De Rochas, 1896)¹¹.

Já se sabia desde 1880 que os raios ultravioletas eram capazes de atravessar finas películas de prata. Isso havia sido notado por Cornu, ao perceber que espelhos revestidos com prata não refletiam bem os raios ultravioletas. A partir dessa descoberta, o conde de Chardonnet espelhou com prata um cristal de rocha, de modo a criar uma película totalmente opaca à visão, e conseguiu fotografar através dela os carvões de um arco elétrico e, depois, a forma de uma estatueta de mármore (Chardonnet, 1882; Bouty, 1896, p. 613; Poincaré, 1896, p. 55).

Esses pontos de semelhança levaram imediatamente a pensar que os raios X poderiam ser semelhantes aos raios ultravioletas. No entanto, Röntgen havia recusado essa idéia, já no seu primeiro trabalho. O que impedia Röntgen de aceitar que os raios X fossem um novo tipo de ondas eletromagnéticas, de alta frequência? Basicamente, sua falta de refração. Na época, sabia-se que o índice de refração de uma dada substância ia *aumentando* à medida que o comprimento de onda diminuía. Se os raios X eram ondas eletromagnéticas, deviam ter pequeno comprimento de onda (pois não havia sido observada difração). Se fossem de comprimento de onda menor do que os raios ultravioletas, deveriam sofrer uma forte refração – e, pelo contrário, não tinham refração observável. Não podiam, portanto (de acordo com os conhecimentos da época) ser ondas eletromagnéticas de curto comprimento de onda – pelo menos, ondas *transversais* (Poincaré, 1896, p. 55).

Na revista *Nature* de 23 de janeiro de 1896, Arthur Schuster sugeriu um modo de conciliar ondas eletromagnéticas transversais com a ausência de refração e difração. Por um lado, a falta de difração poderia indicar apenas que os raios X, produzidos pelo impacto dos raios catódicos contra a parede do tubo, não possuem a regularidade ou homogeneidade necessária para mostrar efeitos de interferência¹². Por outro lado, quanto à refração, Schuster indicou que o índice de refração era fortemente alterado pela presença de bandas de absorção, “e como provavelmente toda a questão da refração se reduz a efeitos de ressonância, creio que não se pode pre-julgar a velocidade de propagação de ondas de comprimento muito pequeno. Se os raios de Röntgen contêm ondas de comprimento muito pequeno, as vibrações nas moléculas que correspondem a elas devem ser de uma ordem de grandeza diferente da que conhecemos até agora” (Schuster, 1896).

No seu primeiro artigo, Röntgen já fora capaz de estabelecer muitas propriedades físicas dos raios X, mas durante vários anos a natureza dessa radiação permaneceu desconhecida. As principais hipóteses (Poincaré, 1897) aventadas sobre a natureza desses raios eram:

(a) poderiam ser ondas eletromagnéticas transversais de pequeno comprimento de onda, semelhantes à radiação ultravioleta;

10 Embora invisíveis de forma direta, já existiam na época óculos feitos com vidro de urânio, que tornavam visível a luz ultravioleta (Bouty, 1896, p. 614).

11 Sabe-se atualmente que o principal motivo pelo qual os raios X são invisíveis é a pequena absorção dessa radiação pelas células da retina, que absorvendo pouca energia são pouco estimuladas e não emitem sinais reconhecíveis como luz.

12 George Stokes sugeriu, mais tarde, que os raios X poderiam ser *pulsos não periódicos*.

- (b) poderiam ser ondas eletromagnéticas longitudinais (hipótese levantada pelo próprio Röntgen)¹³;
- (c) poderiam ser pulsos não periódicos de radiação eletromagnética (hipótese proposta por Stokes);
- (d) poderiam, enfim, ser de natureza corpuscular, formados por raios catódicos modificados (neutros)¹⁴.

Um ano após a descoberta dos raios X, Poincaré comentou que “Todas as teorias propostas não passam de hipóteses que não se apoiam até aqui em nenhuma prova séria” (Poincaré, 1897, p. 78). No entanto, nesse artigo Poincaré reconheceu que seria admissível uma explicação dos raios X como ondas ultravioletas curtas, desde que se admitisse a teoria da dispersão de Hermann von Helmholtz, proposta em 1893, segundo a qual o índice de refração cresce com a frequência da onda até certo ponto, mas depois diminui, tendendo a se tornar igual a 1 (Poincaré, 1897, p. 78; Thomson, 1896d, p. 292)¹⁵.

Estudo de novos fenômenos

Raios X e luminescência

Nos primeiros experimentos de produção de raios X, o feixe de raios catódicos atingia o tubo de vidro, que se tornava luminescente, e era dessa região que se originavam os raios X. Ocorreu a várias pessoas que poderia existir uma correlação entre luminescência e emissão de raios X. Uma delas foi Poincaré, que ao apresentar o trabalho de Röntgen à Academia de Ciências de Paris, no dia 20 de janeiro de 1896, conjecturou que talvez houvesse alguma relação entre a emissão de raios X e a fluorescência do vidro. Poincaré não publicou sua hipótese nos *Comptes Rendus* da Academia, mas ela apareceu em uma revista científica popular (*Révue Générale des Sciences*) dez dias depois, tornando-se amplamente conhecida. Nesse artigo, Poincaré comentou:

“Portanto, é o vidro que emite os raios de Röntgen, e ele se torna fluorescente ao emití-los. Podemos nos perguntar se todos os corpos que possuem uma fluorescência suficientemente intensa não emitiriam os raios X de Röntgen, além de raios luminosos, seja qual for a causa de sua fluorescência. Nesse caso, o fenômeno não estaria associado a uma causa elétrica. Isso não é muito provável, mas é possível, e sem dúvida é fácil de verificar” (Poincaré, 1896, p. 56).

Vários pesquisadores franceses se dedicaram a testar essa hipótese. Na sessão da Academia de 10 de fevereiro de 1896, Charles Henry relatou o primeiro teste da conjectura de Poincaré (Henry, 1896). Ele relatou que era possível aumentar o efeito dos raios X produzidos por um tubo de Crookes utilizando sulfeto de zinco fosforescente, e também que era possível obter radiografias sem utilizar tubos de raios X, cobrindo o objeto a ser radiografado com uma camada de sulfeto de zinco e excitando sua fosforescência pela queima de uma tira de magnésio.

Na reunião da semana seguinte (17 de fevereiro de 1896), Gaston Henri Niewenglowski apresentou uma confirmação dos resultados de Charles Henry. Ele utilizou uma outra substância fosforescente – sulfeto de cálcio – e também relatou que esse material, excitado pela luz solar, emitia radiações penetrantes

13 A possibilidade de existência de ondas eletromagnéticas longitudinais já havia sido apontada em 1884 por Lord Kelvin (ver Bottomley, 1896). Lord Kelvin sugeriu em 10 de fevereiro de 1896 um processo de produção de ondas eletromagnéticas longitudinais, de modo a ser possível testar tal hipótese (Kelvin, 1896).

14 Albert Michelson propôs em abril de 1896 uma hipótese desse tipo, na qual não haveria uma distinção essencial entre raios catódicos e raios X (Michelson, 1896). Segundo Michelson, os raios X seriam formados por vórtices do éter – algo semelhante aos anéis de fumaça que podem ser formados no ar.

15 Em certo sentido, pode-se dizer que Helmholtz previu a existência dos raios X, pois em 1887 descreveu teoricamente como seria o comportamento de ondas eletromagnéticas de altíssima frequência, apontando que teriam baixa refração e reflexão (Nitske, *The life of Wilhelm Conrad Röntgen*, p. 157).

muito semelhantes aos raios X (Niewenglowski, 1896). Segundo ele, esse material fosforescente continuava a emitir radiação penetrante mesmo no escuro, após ter sido excitado pela luz solar.

Após mais uma semana, na reunião de 24 de fevereiro de 1896, Piltchikof relatou que era possível aumentar a intensidade dos raios X emitidos por um tubo de Crookes colocando um material fosforescente dentro do tubo evacuado, no lugar em que os raios catódicos atingem a parede de vidro (Piltchikof, 1896). Com os tubos comuns, era necessário expor as chapas fotográficas durante vários minutos para obter uma radiografia. Com o dispositivo de Piltchikof, o tempo era reduzido a 30 segundos. Essa era, portanto, uma nova confirmação (e aplicação tecnológica) da conjectura de Poincaré.

Todos esses resultados são incompatíveis com os conhecimentos atuais, sendo difícil compreender o que pode ter ocorrido nesses experimentos.

Na Inglaterra, J. J. Thomson havia chegado independentemente à conjectura de Poincaré¹⁶ e testou-a, com resultados negativos: não encontrou emissão de radiações penetrantes por corpos luminescentes (Thomson, 1896b, p. 60). Embora esses fenômenos descritos pelos pesquisadores franceses pareçam simples anomalias experimentais sem importância, é relevante citá-los, pois foi essa linha de estudos que levou Henri Becquerel à procura de radiação penetrante emitida por compostos luminescentes do urânio, conduzindo à descoberta da radioatividade¹⁷.

Efeito dos raios X sobre o radiômetro

Nos primeiros meses de 1896, vários efeitos curiosos dos raios X foram sendo descobertos. No dia 10 de fevereiro, Gossard e Chevalier relataram que um radiômetro de Crookes não era capaz de girar, quando colocado próximo a um tubo de descargas. A descoberta, inesperada, ocorreu quando os pesquisadores aproximaram o radiômetro do tubo, em uma demonstração pública, com o objetivo de mostrar o efeito do aquecimento que ocorria no tubo. Ao contrário da rápida rotação esperada, o sistema de pás do radiômetro parou de girar, oscilando um pouco para um lado e para o outro e, depois, parando (Gossard & Chevalier 1896).

Os investigadores notaram que esse efeito ocorria mesmo quando se colocava uma placa de material transparente aos raios X (como madeira) entre o tubo de descargas e o radiômetro, mas que o efeito era interrompido interpondo-se uma placa metálica (opaca aos raios X). A influência dependia da distância e da presença de campos elétricos e magnéticos. Mesmo depois de desligar o tubo de descarga, o radiômetro ficava inativo durante mais de 5 minutos. Os autores imaginaram que os raios X eram capazes de produzir algum efeito mecânico diretamente sobre as pás do radiômetro, e que esse fenômeno poderia ser utilizado como um modo sensível de detecção e medida da radiação. No mês seguinte, no entanto, Rydberg esclareceu que o fenômeno era devido simplesmente a forças eletrostáticas: a superfície do tubo de descargas se eletrizava, e essa carga exercia uma força sobre as pás do radiômetro superior às fraquíssimas forças radiométricas, inibindo assim seu movimento (Rydberg, 1896). Righi, por outro lado, mostrou que o fenômeno não ocorria quando se molhava a parede externa do radiômetro, e interpretou o efeito como sendo devido à formação de cargas elétricas na parede externa do próprio radiômetro (Righi, 1896b).

Descarga de eletroscópios por raios X

Já se sabia há vários anos que os raios ultravioletas eram capazes de descarregar eletroscópios. O fenômeno começou a ser estudado quando Hertz, em 1887, notou que a passagem de uma faísca entre dois

16 Ver Thomson, 1896a. Esse artigo foi lido no dia 27 de janeiro de 1896, e é improvável que Thomson pudesse ter recebido qualquer informação sobre a conjectura de Poincaré antes daquela data.

17 A primeira pesquisa de Becquerel sobre a relação entre raios X e luminescência foi apresentada à Academia de Ciências no dia 24 de fevereiro de 1896 (Becquerel, 1896). Nessa comunicação, fica claro que ele partiu da conjectura de Poincaré, e que conhecia os estudos anteriores de Charles Henry e Niewenglowski, que ele citou explicitamente, sem qualquer crítica ou restrição. A motivação do trabalho de Becquerel é discutida em Martins, 1997.

terminais era facilitada pela incidência de raios ultravioletas. Nos anos seguintes o fenômeno foi investigado por muitos pesquisadores, como Hallwachs, Elster e Geitel (Whittaker, *A history of the theories of aether and electricity*, v. 1, p. 356-7). O efeito ocorria apenas quando uma superfície metálica era atingida pelos raios ultravioletas, e dependia do metal utilizado (o efeito era maior com metais eletronegativos). Além disso, as observações indicavam que apenas os metais com carga negativa eram descarregados.

Poucos anos depois, Philipp Lenard conseguiu construir tubos de descarga dotados de uma fina janela de alumínio, de tal modo que os raios catódicos podiam sair do tubo e ser estudados no ar ou em outros gases (ver Romer, 1959, p. 276; Jauncey, 1945, p. 372). Esses raios podiam atingir uma distância de alguns poucos centímetros, no ar. Corpos luminescentes colocados perto do tubo se tornavam luminosos. Lenard observou também que esses raios eram capazes de sensibilizar chapas fotográficas e descarregar eletroscópios, mesmo a distâncias muito maiores do que a penetração dos raios de Lenard no ar: até 30 cm¹⁸.

Dadas as semelhanças entre os raios X e os raios ultravioletas, assim como sua relação com raios catódicos, era natural investigar se a nova radiação também era capaz de afetar eletroscópios. Em 3 de fevereiro de 1896, Benoist e Hurmuzescu relataram à Academia de Ciências de Paris que os raios X eram capazes de descarregar um eletroscópio (Benoist & Hurmuzescu, 1896a). Afirmaram que um eletroscópio com carga negativa se descarregava mais depressa do que com carga positiva, mas ambos se descarregavam, e depois, mesmo continuando a ser atingidos por raios X, não adquiriam nenhuma carga. Esses autores perceberam imediatamente que o fenômeno podia ser empregado como um método de detecção e medida de intensidade dos raios X, prestando-se muito melhor do que os métodos fotográfico e de luminescência a estudos quantitativos da radiação. Já nesse primeiro artigo, fizeram medidas de absorção da radiação, verificando que ela não era homogênea – já que não obedecia a uma lei exponencial de decréscimo de intensidade – e que, no ar, os raios se enfraqueciam com o inverso do quadrado da distância (Benoist & Hurmuzescu, 1896a; Bouty, 1896, p. 614). Nas semanas seguintes, Swynghedauw verificou que os raios X, como os raios ultravioletas, era capaz de facilitar a ocorrência de descargas elétricas entre dois condutores (Swynghedauw, 1896) e Dufour confirmou que ocorria descarga quando os raios X atingiam placas de ouro ou de alumínio, tanto carregadas positivamente quanto negativamente (Dufour, 1896).

Independentemente, no dia 13 de fevereiro, J. J. Thomson também relatou à *Royal Society* que os raios X descarregavam metais eletrizados (Thomson, 1896b, p. 61; Thomson, 1896d; ver também Anônimo, 1896a)¹⁹. As conclusões de Thomson foram muito parecidas às dos pesquisadores franceses. A descarga ocorria tanto no caso de cargas negativas quanto positivas²⁰. Se a placa estava inicialmente descarregada, não se notava o surgimento de qualquer carga. Ao contrário do que acontecia no caso da radiação ultravioleta, a descarga ocorria independentemente da natureza do metal, e mesmo quando os raios X não atingiam diretamente as placas do eletroscópio. J. J. Thomson interpretou o fenômeno como sendo devido à condução elétrica pelo ar: “O vazamento [*leakage*] de eletricidade através de não condutores é, penso, devido a um tipo de eletrólise, sendo a molécula do não-condutor bipartida, ou quase bipartida,

18 É provável que Lenard estivesse na verdade observando o efeito de raios X, mas ele não investigou o fenômeno. Seliger (1995) atribui a não-descoberta dos raios X por Lenard à sua falta de tempo ou de equipamento para pesquisas, na época: no início de 1894, Hertz (de quem Lenard era assistente) faleceu, e Lenard assumiu o cargo de Diretor do departamento de Física em Bonn, e dedicou-se à publicação dos trabalhos de Hertz. Depois, em 1895, Lenard aceitou um posto na Universidade de Breslau, onde não tinha a aparelhagem necessária para experimentos com raios catódicos. Apenas no início de 1896 ele conseguiu condições para reiniciar seus estudos sobre raios catódicos, mas então Röntgen já tinha feito sua descoberta.

19 O artigo de Thomson foi remetido à *Royal Society* no dia 7 de fevereiro, sendo portanto implausível que ele tivesse alguma informação sobre o trabalho de Benoist e Hurmuzescu. O próprio Thomson informou que suas primeiras experiências foram completadas no dia 29 de janeiro (Thomson, 1896b, p. 61).

20 Thomson estudou também a descarga produzida pelos raios X quando o condutor estava imerso em um líquido (óleo de parafina) ou em sólido (parafina, enxofre).

pelos raios de Röntgen, que fazem o papel do solvente em soluções eletrolíticas ordinárias” (Thomson, 1896a, p. 392). Mais tarde, Thomson passou a utilizar o termo “ionização” para descrever o fenômeno.

Além disso, Thomson também enfatizou a importância do fenômeno como método de estudo: “Quando o potencial ao qual está a placa é alto, a descarga da placa é um modo muito delicado de detectar esses raios, mais do que qualquer chapa fotográfica que eu conheça. (...) A placa carregada e um eletrômetro são muito mais práticos do que a chapa fotográfica e mais facilmente adaptáveis para medidas quantitativas” (Thomson, 1896d, p. 275).

Thomson, com a ajuda de McClelland, estudou a origem dos raios X pelo método elétrico, medindo a intensidade da radiação a várias distâncias e direções do tubo, e assumindo a lei do inverso do quadrado da distância, localizou o ponto a partir de onde os raios pareciam divergir. Em todos os casos, os raios X pareciam se originar de algum ponto onde os raios catódicos colidiam contra qualquer corpo sólido (Thomson, 1896c, p. 582).

Simultaneamente, Augusto Righi, na Itália, também fez experimentos sobre a ação dos raios X na descarga elétrica (Righi, 1896a). Porém, segundo ele, quando a carga era positiva, a descarga não era completa; com carga negativa, havia descarga completa, depois o eletrômetro adquiria uma pequena carga positiva. Borgman e Gerchun, pelo contrário, descreveram que o eletroscópio ficava com uma carga negativa (Borgman & Gerchun, 1896).

Os diversos pesquisadores apenas concordavam, inicialmente, que os corpos eletrizados se descarregavam sob ação dos raios X: os detalhes diferiam em cada experimento (Raveau, 1896, p. 250). Righi publicou novo artigo, reafirmando que os raios X não descarregavam totalmente os corpos positivos, e que produziam carga positiva em corpos inicialmente neutros (Righi, 1896b). Benoist e Hurmuzescu repetiram os experimentos, e reafirmaram por sua vez que a queda das folhas do eletroscópio era sempre total, não havendo carga residual (Benoist & Hurmuzescu, 1896c). É possível que as discrepâncias dependessem fundamentalmente da existência ou não de condutores aterrados próximos ao eletroscópio, bem como da circunstância de que os raios X podiam agir apenas sobre o ar ou também sobre as superfícies metálicas.

O estudo do efeito de ionização pelos raios X foi desenvolvido posteriormente por J. J. Thomson e seus colaboradores (especialmente C. T. R. Wilson e Ernest Rutherford) e conduziu aos mais importantes métodos de estudo das radiações.

Em seu primeiro artigo, Röntgen não mencionou a existência desse tipo de fenômeno. Teria sido natural que ele o estudasse, por analogia com a radiação ultravioleta e os raios catódicos, como ocorreu com os demais pesquisadores. Röntgen afirmou depois que já havia notado esse fenômeno desde o início. O segundo artigo de Röntgen sobre raios X, com data de 9 de março de 1896, tratou exatamente sobre isso (Röntgen, 1896).

A estratégia de pesquisa

Note-se que, apesar do grande número de pessoas envolvidas nas pesquisas sobre raios X, praticamente não foram produzidos resultados científicos novos importantes, no período inicial aqui tratado. As pesquisas experimentais eram orientadas basicamente por quatro tipos de estratégias:

- repetir e testar aquilo que Röntgen havia feito;
- aperfeiçoar equipamentos e técnicas;
- aplicar o novo fenômeno;
- investigar a possibilidade de novos fenômenos, partindo de analogias com propriedades conhecidas de outras radiações.

Quanto ao próprio Röntgen, suas investigações (após a descoberta propriamente dita) foram dirigidas basicamente pela quarta estratégia (analogias com outros fenômenos conhecidos).

Logo após a divulgação do seu primeiro artigo, Röntgen se viu impossibilitado de continuar a pesquisa

com raios X, pela enorme pressão que recebeu para apresentar conferências, receber repórteres, etc. Ele próprio descreveu isso em uma carta:

“Apenas no último domingo consegui começar de novo algum trabalho de verdade. A pressão de pedidos, visitas, etc. foi inacreditavelmente muito grande e foi impossível dar conta de tudo. Agora eu me enfiei em um “buraco de rato” e estou aproveitando mais a vida e o trabalho” (carta de Röntgen para Emil Warburg, 28 de janeiro de 1896, reproduzida em Krebs, 1973, p. 88).

Mas quando Röntgen conseguiu se voltar novamente para a pesquisa, era tarde demais. Os raios X haviam produzido um enorme impacto no mundo todo, e dezenas de pesquisadores já haviam se voltado para seu estudo. Röntgen foi atropelado por seu próprio sucesso. Ele deve ter sentido que não podia competir com centenas de outros investigadores, muitos deles dispendo de melhores equipamentos e equipes de pesquisa.

No segundo artigo (Röntgen, 1896) que publicou sobre raios X, Röntgen procurou esclarecer principalmente o processo de descarga de eletroscópios, analisando – como J. J. Thomson – o papel do próprio ar. Trata-se de um estudo experimental cuidadoso, importante por estudar um fenômeno que gerava controvérsia entre os pesquisadores, mas que não levou a nenhum conhecimento mais profundo sobre a própria natureza da radiação. Como já foi dito acima, foi através do trabalho do grupo de J. J. Thomson que o estudo da ionização dos gases levou a suas consequências mais importantes, introduzindo um novo método de estudo de radiações que foi fundamental na pesquisa da radioatividade.

Observações sobre a tradução

O texto apresentado a seguir contém a tradução completa do segundo trabalho de Röntgen sobre raios X (Röntgen, 1896)²¹. O artigo é dividido em partes numeradas, o que facilita a comparação entre esta tradução e o original, ou qualquer outra tradução.

Todas as indicações contidas entre colchetes [] na tradução foram adicionadas pelo tradutor. A tradução inclui também um grande número de comentários acrescentados pelo tradutor, em notas de rodapé, que comentam e esclarecem alguns pontos importantes ou difíceis de compreender do artigo de Röntgen.

21 A primeira tradução em inglês foi publicada na revista *The Electrician*, em 24 de abril de 1896, e reproduzida depois em vários periódicos norte-americanos. A tradução em inglês mais utilizada e reproduzida é a de George Barker, publicada pela primeira vez em 1898 e reproduzida em Watson, 1945 e outros lugares. No entanto, na opinião do presente autor, a melhor tradução inglesa é a contida em Feather, *X-rays and the electric conductivity of gases*.

TRADUÇÃO

[p. 11]²²

W. C. Röntgen: Sobre um novo tipo de raios²³

II. Comunicação

Como meu trabalho precisou ser interrompido durante várias semanas²⁴, permito-me apresentar a seguir alguns novos fenômenos que observei.

18.²⁵ Na época de minha primeira publicação eu sabia que os raios X são capazes de descarregar corpos eletrizados²⁶, [p. 12] e suspeitei que nos experimentos de Lenard eram também os raios X e não os raios catódicos que, passando pela janela de alumínio de seu aparelho sem sofrer alteração, produziam os efeitos descritos por ele sobre corpos eletrizados distantes²⁷. No entanto, adiei a publicação de meus experimentos até que pudesse apresentar resultados incontestáveis.

Tais resultados só podem ser obtidos quando as observações são feitas em um espaço que não apenas está completamente blindado contra forças eletrostáticas que emanam do tubo de vácuo, dos fios condutores, do aparelho de indução, etc., mas também está fechado ao ar que provém da vizinhança do aparelho de descarga.

Para isso, obtive uma caixa feita de folhas de zinco²⁸ soldadas, que é suficientemente grande para conter a mim e aos aparelhos necessários, vedada hermeticamente exceto por uma abertura que pode ser fechada por uma porta de zinco²⁹. A maior parte da parede oposta à porta era recoberta com chumbo; em um ponto próximo ao aparelho de descarga, colocado fora da caixa, a parede de zinco e a placa de chumbo que a recobre foram cortadas em uma largura de 4 cm³⁰, e a abertura foi fechada hermeticamente com uma fina folha de alumínio. Os raios X podem penetrar através dessa janela na câmara de observação.

Observei os seguintes fenômenos:

(a) Corpos eletrizados positiva ou negativamente colocados no ar são descarregados quando irradiados

22 [Ao longo da tradução, está indicado, entre colchetes, o início de cada página correspondente do original alemão.]

23 [Tradução completa do artigo: Röntgen, Wilhelm Conrad. Über eine neue Art von Strahlen (II Mitteilung). *Sitzungsberichte der physikalisch-medizinischen Gesellschaft zu Würzburg* v.1, p. 11-6; v.2, p. 17,9, 1896. Texto traduzido por Roberto de A. Martins. Todas as notas de rodapé são do tradutor, e estão entre colchetes.]

24 [A grande repercussão do primeiro trabalho de Röntgen impediu que ele continuasse imediatamente suas pesquisas. Os dois meses que se passaram entre a divulgação do seu primeiro artigo e a redação desse segundo produziram um número enorme de trabalhos em todo o mundo, e Röntgen passou a ser apenas um entre muitos físicos que estudavam as propriedades dos raios X.]

25 [Neste segundo artigo, Röntgen continuou a numeração das seções do artigo anterior.]

26 [No seu primeiro artigo sobre raios X, Röntgen não descreveu essa propriedade. As primeiras descrições sobre o efeito de descarga produzido pelos raios X foram publicadas por Benoist e Hurmuzescu e por J. J. Thomson, antes da publicação deste trabalho de Röntgen.]

27 [Lenard havia observado efeitos elétricos que atribuiu aos raios catódicos a distâncias de até 30 cm do tubo de descarga – enquanto que os efeitos de luminescência desapareciam a poucos centímetros do tubo.]

28 [A descrição de Röntgen indica claramente que a caixa era feita de zinco, embora Dam tenha descrito a caixa como sendo feita de estanho (ver nota seguinte).]

29 [Essa caixa já estava pronta quando Dam visitou Röntgen. Ele a descreveu da seguinte forma: “O objeto mais notável na sala, no entanto, era uma caixa grande e misteriosa de estanho com cerca de 7 pés de altura e quatro pés de base quadrada. (...) seu lado ficava talvez a cinco polegadas do tubo de Crookes. (...) Do lado da caixa de estanho, no ponto imediatamente junto ao tubo, havia uma lâmina circular de alumínio de 1 mm de espessura, e talvez 18 polegadas de diâmetro, soldada ao estanho (Dam, 1896, p. 411).]

30 [Conforme indicado na nota anterior, Dam descreveu a folha de alumínio como tendo cerca de 18 polegadas de diâmetro – 45 cm – o que é implausível. Provavelmente houve um erro na publicação: Dam deve ter escrito 1.8 polegadas.]

pelos raios X, e isso tanto mais rapidamente quanto mais intensos forem os raios³¹. A intensidade dos raios foi estimada por sua ação sobre uma tela fluorescente ou sobre uma chapa fotográfica³².

Em geral é indiferente se os corpos eletrizados são condutores ou isolantes. Até agora não encontrei diferença específica no comportamento de diferentes corpos com relação à rapidez de descarga; nem quanto ao comportamento da eletricidade positiva e negativa³³. Apesar disso não é impossível que possam existir pequenas diferenças.³⁴

[p. 15] (b) Se um condutor eletrizado não está circundado pelo ar mas por um isolante sólido, como parafina, a radiação tem o mesmo efeito que passar uma chama conectada à terra sobre o envoltório isolante³⁵.

(c) Se esse envoltório isolante estiver circundado e encostado a um condutor aterrado que, como o isolante, seja transparente aos raios X, a radiação não produz no condutor eletrizado interno qualquer ação que possa ser detectada pelo meu aparelho³⁶.

(d) As observações indicadas em (a), (b) e (c) indicam que o ar irradiado pelos raios X adquire o poder de descarregar os corpos eletrizados com os quais entra em contato.

(e) Se isso realmente ocorre e se, além disso, o ar mantém essa propriedade por algum tempo após ser exposto aos raios X, então deve ser possível descarregar corpos eletrizados que não foram expostos aos raios X, levando até eles o ar irradiado.

Podemos nos convencer de várias formas que essa conclusão é realmente válida. Descreverei um arranjo experimental, embora talvez não seja o mais simples.

Utilizei um tubo de latão com 3 cm de largura e 45 cm de comprimento; à distância de alguns centímetros de uma extremidade, foi cortada uma parte da parede do tubo e substituída por folha de alumínio fina; na outra extremidade foi colocada uma bola de latão presa a um bastão de metal, presa ao tubo por um isolante que o vedava. Entre a esfera e a extremidade fechada do tubo foi soldado um pequeno tubo lateral que pode ser conectado a um aparelho de sucção³⁷. Quando se aplica a sucção, a esfera fica sujeita a uma corrente de ar que passou pela janela de alumínio ao percorrer o tubo. A distância entre a janela e a esfera é de mais de 20 cm.

31 [Note-se que não há nenhum detalhe sobre o tipo de corpo eletrizado que era estudado, nem sobre o modo como ele era eletrizado, como se media essa eletrização, a ordem de grandeza do tempo de descarga, etc. Esta é uma falha de redação de Röntgen, difícil de explicar.]

32 [Era quase impossível fazer experimentos repetitivos: o tubo de descarga mudava seu comportamento ao longo do tempo, tanto por desgaste dos eletrodos quanto por mudanças da pressão do gás residual em seu interior; a tensão da bobina de indução variava muito; não era usado nenhum processo de medida nem da voltagem produzida pela bobina, nem da pressão do tubo de vácuo; também não havia modo de medir a própria radiação produzida: qualquer comparação entre as luminosidades em dois instantes diferentes era subjetiva, e a comparação de efeitos fotográficos era precária, pois era feita visualmente, podendo também ser influenciada por diferenças entre as chapas fotográficas, os processos de revelação, etc.]

33 [Provavelmente Röntgen estava fazendo uma comparação com os fenômenos observados com raios ultravioletas: eles eram capazes de descarregar apenas corpos carregados negativamente, e alguns metais se descarregavam muito mais facilmente do que outros, quando atingidos pela radiação.]

34 [Após a página 12, a revista intercalou uma folha contendo uma famosa radiografia da mão de Albert von Kölliker. Por isso, a numeração das páginas do texto do artigo salta de 12 para 15.]

35 [Sabia-se, na época, que uma chama era capaz de servir como condutor elétrico. Conectando-se uma chama a um fio ligado à terra, e aproximando essa chama de um condutor carregado, ele se descarregava. A condutividade elétrica de chamas já havia sido detectada no século XVII, e foi estudada em 1882 por W. Giese, que atribuiu essa condutividade à formação de íons, como em eletrólitos. Arthur Schuster, em 1884, também defendeu a idéia de que era necessária a dissociação de moléculas dos gases para que eles pudessem conduzir eletricidade (Whittaker, *A history of the theories of aether and electricity*, v. 1, p. 355).]

36 [Esse experimento e o anterior pareciam indicar que o efeito dos raios X era apenas superficial, ou seja, atuava apenas fora do isolante sólido. J. J. Thomson, pelo contrário, descreveu experimentos que pareciam indicar que mesmo os isolantes sólidos se tornavam condutores sob ação dos raios X.]

37 [Era muito comum, na época, utilizar as chamadas "trompas de vácuo" que utilizavam um fluxo de água para sugar o ar de um recipiente. Esse tipo de dispositivo é ainda utilizado em laboratórios de química, e em dispositivos de sucção utilizados em gabinetes odontológicos. No seu terceiro artigo sobre raios X, Röntgen se referiu explicitamente a "aspirador de água" (*Wasserstrahl-Luftpumpe*). Ver Röntgen, 1897, p. 577.]

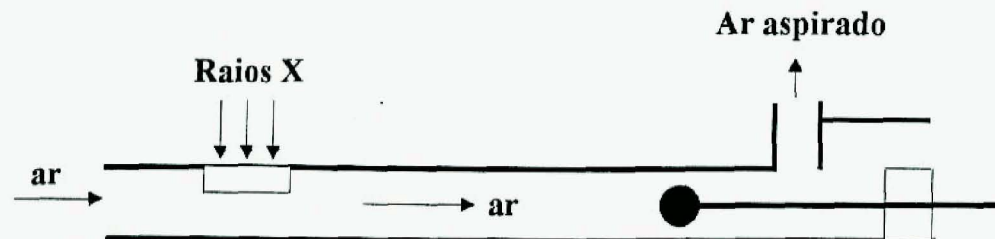


Fig. 1 – Esta figura, elaborada pelo tradutor a partir da descrição do artigo, mostra o dispositivo utilizado por Röntgen para estudar o efeito de descarga produzido pelo ar irradiado.

Coloquei esse tubo na caixa de zinco de tal modo que os raios X pudessem entrar pela janela de alumínio do tubo, perpendicularmente a seu eixo; a esfera isolada ficava fora da região desses raios, na sombra. O tubo [p. 16] e a caixa de zinco estavam em contato elétrico um com o outro e a esfera estava conectada a um eletroscópio de *Hankel*³⁸.

Foi observado então que uma carga (positiva ou negativa) transmitida à esfera não era afetada pelos raios X enquanto o ar no tubo permanecia parado, mas que a carga diminuía apreciavelmente logo que o ar irradiado era levado até a esfera por uma forte sucção. Quando a esfera era mantida a um potencial constante por conexão a acumuladores e o ar irradiado era continuamente sugado pelo tubo, era produzida uma corrente elétrica como se a esfera tivesse sido conectada à parede do tubo por um mau condutor³⁹.

(f) Surge a questão de saber como o ar pode perder a propriedade que lhe é transmitida pelos raios X⁴⁰. Ainda não está determinado se ele a perde espontaneamente com o passar do tempo, isto é, sem entrar em contato com outros corpos. Por outro lado, certamente um contato de longa duração com um corpo de grande superfície, que não precisa estar eletrizado, pode tornar o ar inativo. Se, por exemplo, for empurrado dentro do tubo um tampão de algodão suficientemente espesso, de tal modo que o ar irradiado tenha que passar pelo algodão antes de chegar à esfera eletrizada, a carga da esfera permanece imutável mesmo quando se aplica a sucção.

Se o tampão for colocado antes da janela de alumínio, ocorre o mesmo resultado que sem o algodão, o que prova que não são partículas de poeira que causam a descarga observada.

Telas de fio agem como o algodão; no entanto, a tela deve ser muito fina, e devem ser superpostas várias camadas para tornar inativo o ar irradiado que passa através dela. Se essas telas não estiverem aterradas, como se assumiu até agora, mas forem conectadas a uma fonte de eletricidade de potencial constante, observa-se sempre aquilo que eu esperava⁴¹. Esses experimentos, no entanto, ainda não estão completos.⁴²

[p. 17] (g) Se os corpos eletrizados estiverem em hidrogênio seco ao invés de ar, eles também se descarregam com os raios X. A descarga no hidrogênio me pareceu ocorrer um pouco mais devagar; mas

38 [Este eletroscópio inventado por Wilhelm Gottlieb Hankel contém uma única folha de ouro, dentro de um capacitor formado por duas placas metálicas paralelas. Essas placas são conectadas a uma bateria, de modo a criar um campo elétrico constante. A folha de ouro é conectada ao corpo cuja carga se quer medir, e seu movimento é medido por meio de uma escala. O eletroscópio de Kelvin foi um aperfeiçoamento posterior do eletroscópio de Hankel. O fato de que Röntgen ainda utilizava um eletroscópio de Hankel é uma indicação de quão pobre – e até desatualizado – era seu laboratório.]

39 [Isto é: a descarga era lenta.]

40 [Quando o aparelho que emitia radiação era desligado, o ar perdia a sua condutividade muito rapidamente.]

41 [O que Röntgen esperava? Qual era a previsão? O que foi observado? Não sabemos. A previsão mais razoável seria de que a esfera deveria adquirir uma carga de mesmo tipo que a tela.]

42 [Aqui terminam a página 16 do artigo e o primeiro fascículo da revista. Para aproveitar melhor o papel, era comum que as revistas tivessem fascículos com um múltiplo de 8 ou 16 páginas. A segunda parte do artigo começa na página 17, que é o início do fascículo seguinte.]

isso é incerto, por causa da dificuldade em obter a mesma intensidade de raios X em experimentos sucessivos⁴³.

O método de encher o aparelho com hidrogênio pode ser feito de modo a excluir a possibilidade de que a camada original de ar, condensada na superfície dos corpos, possa ter um papel importante na descarga.

(h) Em espaços altamente evacuados a descarga de um corpo atingido diretamente pelos raios X ocorre muito mais lentamente do que nos mesmos recipientes cheios com ar ou hidrogênio à pressão atmosférica – em um caso, por exemplo, cerca de setenta vezes mais devagar⁴⁴.

(i) Estão para ser realizados experimentos sobre o comportamento de uma mistura de cloro e hidrogênio sob a influência dos raios X⁴⁵.

[p. 18] (j) Finalmente, devo mencionar que os resultados de investigações sobre a ação de descarga dos raios X nos quais não se levou em conta a influência do gás ambiente, devem, em muitos casos, ser recebidos com muita cautela⁴⁶.

19. Em alguns casos é vantajoso incluir um aparelho de *Tesla* (condensador e transformador)⁴⁷ no circuito entre o aparelho de descarga, que produz os raios X, e a bobina de *Ruhmkorff*. Esse arranjo possui as seguintes vantagens: primeiramente, há menor risco de que os tubos de descarga furem e se aqueçam; em segundo lugar, o vácuo – pelo menos no aparelho que eu próprio construí – se mantém por um tempo mais longo; e em terceiro lugar, alguns tubos produzem assim raios X mais intensos. No caso de alguns tubos que estavam muito pouco evacuados ou evacuados demais para funcionar bem apenas com a bobina de *Ruhmkorff*, o uso do transformador de *Tesla* foi útil.

Surge naturalmente a questão – e posso, portanto, mencioná-la, sem por enquanto ser capaz de contribuir para respondê-la – se os raios X podem ser produzidos por uma descarga contínua sob um potencial de descarga constante, ou se são absolutamente necessárias flutuações desse potencial para sua produção⁴⁸.

20. No parágrafo 13 de minha primeira publicação, foi afirmado que os raios X podem se originar não apenas no vidro mas também no alumínio. Investigações posteriores sobre esse ponto não encontraram qualquer corpo sólido que fosse incapaz de gerar raios X sob a influência de raios catódicos. Além disso, não conheço nenhuma razão pela qual corpos líquidos e gasosos não devam se comportar do mesmo modo⁴⁹.

Por outro lado, foram encontradas diferenças quantitativas no comportamento de diferentes corpos. Se, por exemplo, os raios catódicos incidirem sobre uma placa com metade formada por uma folha de platina de 0,3 mm de espessura, e a outra metade por uma folha de alumínio de 1 mm de espessura, observa-se na imagem fotográfica da placa dupla, obtida com uma câmera de furo de alfinete, que a folha de platina emite muito mais raios X de seu lado anterior, que é atingido pelos raios catódicos, do que a

43 [Aqui, Röntgen se referiu explicitamente à dificuldade de repetição dos experimentos, que já comentamos.]

44 [Em condições normais, o ar é isolante, e poderia ocorrer que a descarga dos condutores fosse devida a alguma ação direta dos raios X sobre suas superfícies – como ocorre no caso do efeito fotoelétrico. Esse experimento, no entanto, mostrou que não se tratava de um efeito direto sobre o condutor, e sim de uma condução da eletricidade pelo ar.]

45 [Novamente, Röntgen parece estar se guiando por analogia com o comportamento dos raios ultravioletas, que são capazes de influenciar reações químicas – por exemplo, a síntese de HCl a partir de hidrogênio e cloro gasosos.]

46 [Ou seja: Röntgen colocou em dúvida experimentos realizados por outros pesquisadores.]

47 [Nikola Tesla foi um inventor de instrumentos elétricos que trabalhou inicialmente com Edison, depois montou um serviço próprio. O aparelho ao qual Röntgen se refere é um transformador cujo primário é um oscilador RLC de alta frequência – centenas de kilohertz – e que era capaz de gerar no secundário voltagens de até 500.000 volt.]

48 [O único modo de produzir uma corrente contínua de alta tensão, na época, era colocar em série alguns milhares de baterias ou pilhas químicas. Durante o século XIX foram montados conjuntos de pilhas desse tipo para experimentos científicos (na Inglaterra) e para utilização telegráfica, mas Röntgen não dispunha de recursos desse tipo. Sabia-se que as bobinas de Tesla, de alta frequência, produziam efeitos diferentes dos produzidos pelas bobinas de Ruhmkorff, por exemplo. Seria relevante, aparentemente, testar se uma corrente contínua também produziria raios X.]

49 [É claro que era difícil testar essa conjectura, pois era necessário que o líquido, colocado no tubo de descarga, não interferisse com o vácuo. Qualquer líquido bombardeado por raios catódicos sofreria evaporação e mudaria completamente a pressão dentro do tubo.]

folha de alumínio emite do mesmo lado. [p. 19] Por outro lado, praticamente não saem raios X do lado de trás da placa de platina, mas muitos do alumínio. Os últimos raios são produzidos nas camadas anteriores do alumínio, e atravessam a placa.

É fácil proporcionar uma explicação dessa observação, mas pode ser aconselhável tentar encontrar outras propriedades dos raios X antes disso⁵⁰.

Deve-se mencionar, no entanto, que há uma utilidade prática do fato encontrado. Até onde vai minha experiência atual, a platina é a mais adequada para gerar os raios X mais intensos possíveis. Utilizei durante algumas semanas, com sucesso, um aparelho de descarga no qual um espelho côncavo de alumínio atua como cátodo, e uma folha de platina colocada no centro de curvatura, com um ângulo de 45° em relação ao eixo do tubo, como ânodo.

21. Com esse aparelho, os raios X provêm do ânodo. Sou forçado a concluir, a partir de experimentos com aparelhos de diferentes formas, que é indiferente se esses raios são produzidos no ânodo ou não, quanto ao que se refere à sua intensidade⁵¹.

Para experimentos com as correntes alternadas do transformador de *Tesla*⁵², está sendo construído um tubo de descarga especial no qual ambos os eletrodos são espelhos côncavos de alumínio cujos eixos formam um ângulo reto entre si. Coloca-se uma placa de platina interceptando os raios catódicos no centro de curvatura comum a ambos. A utilidade desse aparelho será relatada posteriormente.

Concluído: 9 de março de 1896.

Würzburg. Instituto de Física da Universidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ANÔNIMO]. The Röntgen rays. *Nature* v. 53, p. 377-380, 1896 (a).

———. Recent work with Röntgen rays. *Nature* v. 53, p. 522-524, 1896 (b).

———. Recent researches on Röntgen rays. *Nature* v. 54, p. 109-12, 1896 (c).

BARKER, George F. *Röntgen rays – memoirs by Röntgen, Stokes, and J. J. Thomson*. New York: Harper, 1899.

BECQUEREL, Henri. Sur les radiations émises par phosphorescence. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 420-421, 1896.

BENOIST, L., **HURMUZESCU**, Dragomir. Nouvelles propriétés des rayons X. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 235-236, 1896 (a).

———. Nouvelles recherches sur les rayons X. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 379-381, 1896 (b).

———. Action des rayons X sur les corps électrisés. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 779-782, 1896 (c).

BORGMAN, J.-J., **GERCHUN**, A.-L. Action des rayons de M. Röntgen sur les charges électrostatiques et la distance explosive. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 378-379, 1896

50 [Esta frase ilustra a atitude geral de Röntgen, de dar pouca importância às especulações teóricas, concentrando sua atenção no estudo de propriedades acessíveis à experimentação.]

51 [Os raios catódicos não se deslocavam do cátodo para o ânodo, e sim em linha reta, perpendicularmente à superfície do cátodo, qualquer que fosse a posição do ânodo. Por isso, era possível dirigi-los de modo a colidir seja com a parede do tubo, seja com qualquer objeto colocado em seu interior.]

52 [No caso da bobina de Ruhmkorff, a corrente elétrica é pulsante, mas não é alternada, propriamente. A alta tensão é gerada no secundário apenas quando se rompe bruscamente a corrente no primário, e por isso tem sempre o mesmo sentido. Por esse motivo, é possível caracterizar qual o eletrodo que funciona como cátodo, e qual funciona como ânodo. Na bobina de Tesla, pelo contrário, o circuito oscilante produz correntes alternadas. Cada eletrodo funcionaria, portanto, alternadamente como cátodo e como ânodo – daí a proposta de Röntgen, destinada a aproveitar todo o ciclo da corrente produzida.]

- BOTTOMLEY, J. T.** [On Röntgen's rays]. *Nature* v. 53, p. 268-269, 1896.
- BOUTY, E.** Les rayons de Röntgen et la photographie à travers les corps opaques. *Revue Scientifique* [4] v. 5, p. 610-617, 1896.
- BUGUET, Abel, GASCARD, Albert.** Sur l'action des rayons X sur le diamant. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 457, 1896.
- CHABAUD, V.** Transparence des métaux pour les rayons X. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 237-238, 1896.
- CHAPPUIS, James.** Du temps de pose dans la photographie par les rayons X. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 777-779, 1896.
- CHARDONNET, de.** Sur la transformation actinique des miroirs Foucault et leurs applications en photographie. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 94, p. 1171-1173, 1882.
- DAM, H. J. W.** The new marvel in photography. *McClure's Magazine* v. 6, p. 402-415, abr. 1896. Reproduzido em: NITSKE, *The life of Wilhelm Conrad Röntgen*, p. 126-137.
- DARIEX, DE ROCHAS.** Sur la cause de l'invisibilité des rayons de Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 458-459, 1896.
- DELBET, Pierre.** Découverte et extraction, grâce à une photographie de Röntgen, d'une aiguille implantée dans la main. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 528, 1896.
- DUFOUR, H.** sur quelques propriétés des rayons X de M. Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 460, 1896.
- DWELSHAUVERS-DERY, F.-V.** La réflexion des rayons X. *Bulletin de l'Académie Royale des Sciences, des lettres et des Beaux-Arts de Belgique* [3] v. 31, p. 482-487, 1896.
- FEATHER, N. (ed.).** *X-rays and the electric conductivity of gases. Comprising papers by W. C. Röntgen (1895-1896), J. J. Thomson, and E. Rutherford (1896).* Edinburgh: E. & S. Livingstone, 1958. (Alem-bic Club Reprints, 22)
- GALITZINE, B., DE KARNOJITSKY, A.** Sur les centres d'émission des rayons X. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 608, 1896 (a).
- . Recherches concernant les propriétés des rayons X. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 717-718, 1896 (b).
- GOSSARD, CHEVALIER.** Sur une action mécanique émanant des tubes de Crookes analogue à l'action photogénique découverte par Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 316-318, 1896.
- HEEN, M. de.** Expérience montrant que les rayons X émanent de l'anode. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 383-384, 1896.
- HENRY, Charles.** Augmentation du rendement photographique des rayons Roentgen par le sulfure de zinc phosphorescent. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 312-314, 1896.
- IMBERT, A., BERTIN-SANS, H.** Diffusion des rayons de Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 524-525, 1896 (a).
- . Sur la technique de la photographie par les rayons X. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 605-607, 1896 (b).
- JAUNCEY, G. E. M.** The birth and early infancy of X-rays. *American Journal of Physics* v. 13, p. 362-379, 1945.
- KELVIN, Lord.** On the generation of longitudinal waves in ether. *Proceedings of the Royal Society of London* v. 59, p. 270-272, 1896.
- KLICKSTEIN, Herbert S.** *Wilhelm Conrad Röntgen: on a new kind of rays – a bibliographical study.* [s.l.]: Mallinckrodt, 1966.

- KREBS, Hans. Two letters by Wilhelm Conrad Röntgen. *Notes and Records of the Royal Society of London* v. 28, p. 83-92, 1973.
- LAFAY, A. Sur un moyen de communiquer aux rayons de Röntgen la propriété d'être déviés par l'aimant. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 713-715, 1896.
- LANNELONGUE, BARTHÉLEMY, OUDIN. De l'utilité des photographies par les rayons X dans la pathologie humaine. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 159-160, 1896.
- LANNELONGUE, OUDIN. Sur l'application des rayons de Röntgen au diagnostic chirurgical. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 283-285, 1896.
- LAWRENCE, Ralph R. The Röntgen rays. *Nature* v. 53, p. 436-437, 1896.
- LODGE, Oliver. Les hypothèses actuelles sur la nature des rayons de Roentgen. *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées* v. 7, p. 253-257, 1896.
- LONDE, Albert. Application de la méthode de M. Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 311-312, 1896.
- LUMIÈRE, Auguste, LUMIÈRE, Louis. Recherches photographiques sur les rayons de Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 382-383, 1896.
- MACINTYRE, John. A demonstration on the X rays. *Proceedings of the Philosophical Society of Glasgow* v. 28, p. 267-283, 1897.
- MARTINS, Roberto de Andrade. Becquerel and the choice of uranium compounds. *Archive for History of Exact Sciences* v. 51, p. 67-81, 1997.
- . A descoberta dos raios X: o primeiro comunicado de Röntgen. *Revista Brasileira de Ensino de Física* 1998 (a ser publicado)
- MESLANS, Maurice. Influence de la nature chimique des corps sur leur transparence aux rayons de Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 309-311, 1896 (a).
- MESLIN, Georges. Sur les rayons de Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 459, 1896 (b).
- MICHELSON, Albert A. A theory of the "X-rays". *American Journal of Science* [4] v. 1, p. 312-314, 1896.
- MOREAU, G. De la photographie des objets métalliques à travers des corps opaques, au moyen d'une aigrette d'une bobine d'induction. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 238-239, 1896.
- MORGAN, Peter. X-rays: the first six months. Pp. 2-4, em: HANCOCK, Nigel, HAWKINS, Desmond, MORGAN, Peter, THWAITE, Nicola, WEATHERALL, Mark. *On a new kind of rays*. Cambridge: University Library, 1995.
- NIEWENGLOWSKI, Gaston Henri. Sur la propriété qu'ont les radiations émises par les corps phosphorescents, de traverser certains corps opaques à la lumière solaire, et sur les expériences de M. G. Le Bon, sur la lumière noire. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 385-386, 1896.
- NITSKE, W. Robert. *The life of Wilhelm Conrad Röntgen, discoverer of the X-ray*. Tucson: University of Arizona Press, 1971.
- PERRIN, Jean. Nouvelles propriétés des rayons cathodiques. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 121, p. 1130-1134, 1895.
- . Quelques propriétés des rayons de Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 186-188, 1896 (a).
- . Sur les rayons de Röntgen: recherches expérimentales. *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées* v. 7, p. 66-67, 1896 (b).
- . Origine des rayons de Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 716-717, 1896 (c).
- Revista da SBHC, n. 17, p. 81-102, 1997

- . Rayons cathodiques et rayons de Röntgen. Étude expérimentale. *Annales de Chimie et de Physique* [7] v. 11, p. 496-554, 1897.
- PILTCHIKOF, N.** Sur l'émission des rayons de Röntgen, par un tube contenant une matière fluorescente. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 461, 1896.
- POINCARÉ, Henri.** Les rayons cathodiques et les rayons Roentgen. *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées* v. 7, p. 52-59, 1896.
- . Les rayons cathodiques et les rayons Roentgen. *Revue Scientifique* [4] v. 7, p. 72-81, 1897.
- RAVEAU, C.** Sur les rayons de Roentgen. *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées* v. 7, p. 249-253, 1896.
- RIGHI, Augusto.** Phénomènes électriques produites par les rayons de Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 376-378, 1896 (a).
- . Effets électriques des rayons de Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* v. 122, p. 601-602, 1896 (b).
- ROMER, Alfred.** Accident and professor Roentgen. *American Journal of Physics* v. 27, p. 275-277, 1959.
- RÖNTGEN, Wilhelm Conrad.** Über eine neue Art von Strahlen (Vorläufige Mittheilung). *Sitzungsberichte der physikalisch-medizinischen Gesellschaft zu Würzburg* n. 9, p. 132-141, 1895.⁵³
- . Über eine neue Art von Strahlen (II Mittheilung). *Sitzungsberichte der physikalisch-medizinischen Gesellschaft zu Würzburg* n. 1, p. 11-16; n. 2, p. 17-19, 1896.⁵⁴
- . Weitere Beobachtungen über die Eigenschaften der X-Strahlen. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* v. 23, p. 576-592, 1897.⁵⁵
- RYDBERG, J. R.** Sur l'action mécanique émanant des tubes de Crookes. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, v. 122, p. 715, 1896.
- SAGNAC, G.** Sur la diffraction et la polarisation des rayons de M. Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, v. 122, p. 783-785, 1896.
- SELIGER, Howard H.** Wilhelm Conrad Röntgen and the glimmer of light. *Physics Today*, v. 48, n. 11, p. 25-31, 1995.
- SCHUSTER, Arthur.** On Röntgen's rays. *Nature*, v. 53, p. 268, 1896.
- SWYNGEDAuw, R.** Sur l'abaissement des potentiels explosifs statiques et dynamiques par les radiations X. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, v. 122, p. 374-376, 1896.
- SWINTON, A. A. C.** Professor Röntgen's discovery. *Nature*, v. 53, p. 276-277, 1896.
- THOMSON, Joseph John.** The Röntgen rays. *Nature*, v. 53, p. 391-392, 1896 (a).
- . Longitudinal electric waves, and Röntgen's X rays. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, v. 9, p. 49-61, 1896 (b).
- . The Röntgen rays. *Nature*, v. 53, p. 581-583, 1896 (c).
- . On the discharge of electricity produced by the Röntgen rays, and the effects produced by these rays on dielectrics through which they pass. *Proceedings of the Royal Society*, v. 59, p. 274-276, 1896 (d).
- WATSON, E. C.** The discovery of X-rays. *American Journal of Physics*, v. 13, p. 281-291, 1945.

⁵³ Publicado sob forma de separata com o título: *Eine neue Art von Strahlen*. Würzburg: Verlag und Druck der Stahel'schen K. Hof- und Universitäts- Buch- and Kunsthdlgung, 1895. Reproduzido também em: *Annalen der Physik und Chemie* [2] 64, n. 1, p. 1-11, 1898.

⁵⁴ Publicado sob forma de separata com o título: *Eine neue Art von Strahlen. II. Mittheilung*. Würzburg: Verlag und Druck der Stahel'schen K. Hof- und Universitäts- Buch- and Kunsthdlgung, 1896. Reproduzido também em: *Annalen der Physik und Chemie* [2] 64, n. 1, p. 12-17, 1898. Tradução inglesa: On a new form of radiation. (Second communication). *The Electrician* 36, p. 850-851, 1896. Tradução francesa: Nouvelles recherches sur les propriétés et sur l'origine des rayons X. *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées* 7, p. 499-500.

⁵⁵ Reproduzido em: *Annalen der Physik und Chemie* [2] 64, n. 1, p. 18-37, 1898.

- WHITTAKER, E. T.** *A history of the theories of aether and electricity*. London: Nelson, 1951-1953; New York: Tomash Publishers, American Institute of Physics, 1987. 2 v.
- ZENGER, Ch.-V.** Épreuves photographiques obtenues au moyen des rayons X. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, v. 122, p. 315, 1896 (a).
- . Sur la production des silhouettes de M. Röntgen. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, v. 122, p. 456-457, 1896 (b).

Agradecimentos

O autor agradece o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através de uma bolsa de pesquisa, e o apoio recebido da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), através de uma bolsa de pós-doutoramento no exterior.

Roberto de Andrade Martins é doutor em Lógica e Filosofia da Ciência pela UNICAMP. É professor do Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia, Instituto de Física "Gleb Wataghin", UNICAMP.
Endereço: Grupo de História e Teoria da Ciência, UNICAMP, Caixa Postal 6059, CEP: 13081-970 Campinas, SP, Brasil.
Endereço eletrônico do autor: rmartins@ifi.unicamp.br.

Revista da SBHC, n. 17, p. 81-102, 1997