

Raios X - Um breve histórico

Paulo R. Costa - IFUSP

De um ponto de vista histórico bastante simplificado, pode-se dividir a trajetória do desenvolvimento do conhecimento sobre a produção de raios X na natureza em três períodos principais, cada um deles de cerca de 25 anos (Dyson, 1990). O primeiro período vai desde a descoberta do fenômeno por Röntgen, até a compreensão completa do efeito Compton, ou seja, entre 1895 e 1922. Neste período, as leis fundamentais que explicam a fenomenologia relacionada à Física dos raios X foram descobertas e investigadas. Entre 1922 e 1945 os pesquisadores dedicaram-se à consolidação e ao estudo detalhado da espectroscopia dos raios X, com o desenvolvimento dos primeiros instrumentos suficientemente sensíveis para este tipo de investigação. Nestes anos foram realizados grandes avanços relacionados ao conhecimento sobre os níveis atômicos de energia, em especial à sua interpretação teórica, tendo por base resultados da recém desenvolvida cristalografia por raios X e análise de estruturas de materiais. Além disso, grandes desenvolvimentos relacionados às técnicas de fabricação de tubos de raios X foram realizados na primeira metade do século passado (Carvalho, 2006). Por fim, o terceiro período, que se estende desde 1945 até os dias de hoje, destaca-se pelo desenvolvimento das principais aplicações e suas consequências em termos tecnológicos (Webb, 1990, Christie and Tansey, 2006). Importantes pesquisas na área da física nuclear resultaram em grandes avanços na área de aplicações de radioisótopos em diferentes áreas da Indústria e da Medicina. Além disso, diversos avanços foram realizados na área da Física aplicada à Medicina, que serão abordadas de forma resumida a seguir neste capítulo.

Outros conhecimentos fundamentais referentes à Física dos raios X que ocorrem na natureza tiveram, e continuam tendo, avanços nesta fase contemporânea. Segundo Dyson (Dyson, 1990), neste período foram descobertos os raios X mesônicos (Johnson et al., 1962, Anderson et al., 1963, Fitch and Rainwater, 1953), além da descoberta e da ampliação dos conhecimentos sobre a emissão de raios X por corpos estelares (Orlando et al., 2000, Mandelštam, 1965). Foram também estudados e desenvolvidos neste

período equipamentos sofisticados para emissão de raios X de altas intensidades através da aceleração de elétrons com emissão de radiação síncrotron (Baldwin, 1975, Robinson, 2009).

Uma abordagem histórica completa do desenvolvimento da ciência e da tecnologia envolvendo os raios X extrapola os objetivos deste texto. Porém, alguns fatos relevantes devem ser citados por sua importância no entendimento do desenvolvimento da espectrometria dos raios X, especialmente de sua conexão com as aplicações em Medicina.

Os estágios anteriores à descoberta dos raios X estão pouco documentados e são de difícil correlação histórica com os experimentos de Röntgen (Etter, 1946). Por outro lado, relata-se que nos doze meses subsequentes à descoberta dos raios X, mais de 1000 comunicações foram publicadas, demonstrando o grande interesse da comunidade científica e a disposição dos pesquisadores em melhorar o entendimento do fenômeno recém-descoberto, bem como explorar a riqueza de suas possíveis aplicações.

Segundo o que se tem documentado, os raios X foram descobertos em 8 de novembro de 1895 no laboratório de Röntgen na Universidade de Wüzburg, Bavária. Desde o início, mostrou-se tanto um fenômeno importante para o aprofundamento dos conhecimentos sobre a natureza da matéria, quanto uma ferramenta até então imprevisível para apoiar o diagnóstico na Medicina. Após estudar o comportamento dos raios recém-descobertos utilizando diferentes materiais e configurações experimentais, no dia 22 de dezembro Röntgen chamou sua esposa, Anna Bertha, que até então não tinha conhecimento dos trabalhos de Röntgen sobre o novo fenômeno. Naquele dia, ele a convenceu a radiografar sua mão, realizando uma exposição de cerca de 15 minutos (Okuno and Yoshimura, 2010). Röntgen apresentou seus resultados e algumas fotografias relacionadas à sua descoberta no dia 28 de dezembro de 1896 em um artigo intitulado *On a new kind of rays*, enviado para publicação nos *Proceedings of the Physical-Medical Society* de Wüzburg. Curiosamente, enviou algumas cópias de seu artigo para amigos no dia de ano novo daquele ano (Dyson, 1990). É neste artigo que o fenômeno é batizado de raios X pela primeira vez (Arruda, 1996).

O impacto da descoberta foi tão grande que, mesmo com o primeiro trabalho impresso tendo sido publicado em Viena em 5 de janeiro de 1896, em 9 de

janeiro do mesmo ano já havia sido publicado um artigo em um jornal norte-americano e, no dia 12 de janeiro, foram realizados experimentos com radiografias no Davidson College, nos Estados Unidos. Na segunda metade do mês de janeiro daquele ano uma nota foi publicada na revista *Nature* e outros jornais anunciavam ofertas relacionadas a venda de slides com fotografias usando raios X. Os trabalhos de Röntgen estão amplamente documentados na literatura e seus artigos possuem traduções para o Inglês (Stanton, 1896, Kotzur, 1994) e para o Português (Carvalho, 2005). Um interessante estudo histórico, com fatos curiosos ocorridos logo após a descoberta dos raios X, foi realizado por Carvalho (Carvalho, 2006).

É importante ressaltar que o processo de experimentação em diferentes laboratórios se expandiu pela América e pela Europa nos anos que seguiram ao descobrimento dos raios X por Röntgen. Além disso, o surgimento de uma vasta oferta de “produtos” envolvendo raios X e de programas de pesquisa com a nova técnica empregada somente foram possíveis após o domínio da técnica de produção dos raios X. Isso ocorreu porque o equipamento necessário para gerar os raios X, o Tubo de Crookes (Figura 1), que já havia sido desenvolvido, já estava disponível na época da descoberta de Röntgen (Behling, 2015). Este tipo de equipamento vinha sendo utilizado na investigação dos raios catódicos e podia ser facilmente conectado a uma bobina de indução ou a um gerador eletrostático para fornecimento da alta tensão necessária para a aceleração dos elétrons e geração dos raios X. O sistema de Crookes foi, posteriormente, alterado por Reginald Jackson, em 1896 (Figura 2), com a introdução de um alvo de platina e um catodo emissor de elétrons com um formato que permitia focar os elétrons para que colidissem com uma área menor do alvo, semelhante aos tubos de raios X modernos. O vácuo no interior do tubo também foi melhorado nos anos subsequentes em especial por A.A.C. Swinton e J. J. Thomson. Estes pesquisadores incorporaram carbonato de potássio em uma das extremidades internas do vidro do tubo, que ajudava a reduzir a pressão de gases dentro do mesmo e, com isso, melhorar o rendimento da produção de raios X.



Figura 1 – Tubo de Crookes, em exposição no Science Museum de Londres
(Foto do autor)

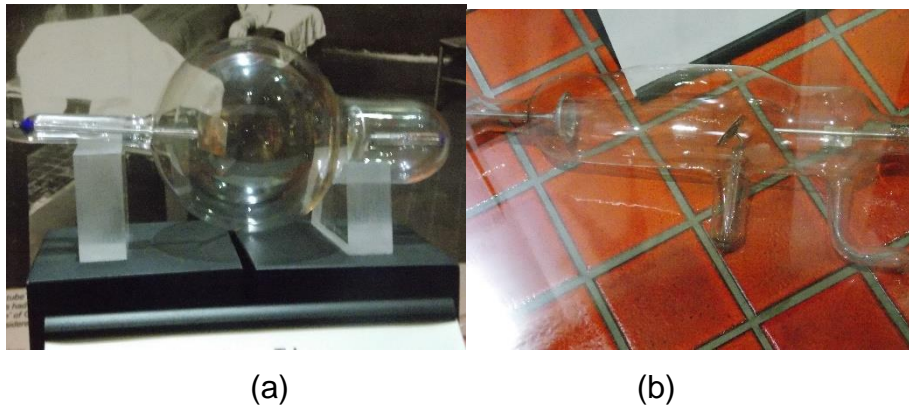


Figura 2 (a) Tubo de Jackson e (b) tubo com carbonato de potássio para melhoria do vácuo, ambos em exposição no Science Museum de Londres
(Fotos do autor)

Muitas aplicações apareceram com a melhoria do desempenho e simplificação de seus sistemas acessórios para aperfeiçoamento das condições operacionais. Em especial, a utilização destes novos sistemas como apoio ao diagnóstico de doenças passou a incorporar oficialmente a Medicina e a radiologia diagnóstica. Estas áreas tiveram seu primeiro jornal, o *Archives of Clinical Skiagraphy*, posteriormente chamado de *Archives of the Röntgen ray*, publicado na primavera de 1896. Keevil (Keevil, 2012) publicou um excelente relato dos desenvolvimentos conjuntos entre Física e Medicina, abordando as diversas contribuições destas duas ciências no último século*. Outro trabalho de grande

* Independentemente dos avanços na área radiológica, existem inúmeras contribuições da Física para a Medicina. De um ponto de vista histórico, é interessante a leitura das *Croonian Lectures ON SOME APPLICATIONS OF PHYSICS TO MEDICINE* publicadas nos volumes 113 e 114 da revista "The Lancet" (www.thelancet.com)

interesse foi publicado por Morris e Perkins (Morris and Perkins, 2012), abordando temas gerais do desenvolvimento da área do diagnóstico por imagem.

No Brasil, o primeiro equipamento de raios X que se tem relato foi trazido por José Carlos Ferreira Filho, médico mineiro formado pela Faculdade de Medicina do Rio de Janeiro que, junto com dois de seus filhos, montou um laboratório na cidade de Formiga (MG), onde realizou pesquisas nas áreas de química, microbiologia, fisiologia e anatomia patológica. Este equipamento, fabricado pela Siemens, chegou ao Brasil em 1898, passou a operar após algumas adaptações, tais como a conexão a um gerador movido a gasolina, pois na cidade de Formiga não havia energia elétrica naquela época (Okuno and Yoshimura, 2010). Outros interessantes relatos do desenvolvimento do uso dos raios X na Medicina no Brasil podem ser encontrados nos trabalhos de Santin Filho (Santin Filho, 1995) e de Francisco e col. (Francisco et al., 2005).

Os desenvolvimentos experimentais iniciais que levaram à compreensão dos fenômenos de produção e interação dos raios X com meios materiais estavam limitados a ensaios envolvendo sua absorção. Estes experimentos rudimentares, contudo, eram acompanhados de interpretações cuidadosas e sistemáticas, o que levou a grandes avanços nos primeiros anos do século passado no entendimento destes fenômenos. Um importante exemplo é o trabalho de Barkla, que permitiu a descoberta e a interpretação das linhas características K e L, exclusivamente utilizando métodos de absorção para investigar as propriedades espectrais e de polarização dos raios X (Barkla and Sadler, 1909, Barkla, 1920, Barkla, 1911). Estas e outras propriedades importantes que, atualmente, são estudadas através de sofisticados equipamentos de espectrometria, tiveram suas investigações iniciais nas primeiras décadas do século passado (Chapman, 1913, Beatty, 1913, Rutherford and McClung, 1900).

Contudo, foram os diversos trabalhos de Bragg publicados em 1913 (Bragg, 1913d, Bragg, 1913b, Bragg, 1913c, Bragg, 1913a, Bragg and Bragg, 1913, Bragg, 1913e, Bragg, 1913f) e outros subsequentes, bem como os de Moseley de 1913 e 1914 (Moseley, 1914a, Moseley and Darwin, 1913a, Moseley, 1913b, Moseley, 1913a, Moseley, 1914b, Moseley and Darwin, 1913b) que permitiram o desenvolvimento dos primeiros cristais de difração e, conseqüentemente, a obtenção experimental dos primeiros espectros de raios X (Lytle et al., 1982,

LaVilla, 1982, Blokhin, 1962). No mesmo ano aparecem os primeiros tubos de raios X com catodo aquecido, emitindo elétrons através do efeito termoiônico e aumentando enormemente a eficiência na produção dos raios X (Dyson, 1990, Behling, 2015).

O desenvolvimento de instrumentos capazes de medir as quantidades de fótons de raios X emitidos por tubos ou de raios gama emitidos por fontes radioativas com diferentes energias permitiu tanto o avanço da Física Nuclear quanto apoiou a compreensão de fenômenos na escala atômica. Em especial, os desenvolvimentos de contadores proporcionais e cintiladores que ocorreram nas décadas de 1940 e 1950 permitiram grandes avanços no entendimento desta área do conhecimento. Kulenkampff, (Kulenkampff, 1922, Kulenkampff, 1928, Kulenkampff, 1938, Kulenkampff and Schmidt, 1943, Kulenkampff, 1959, Kulenkampff et al., 1959) cujos estudos serão discutidos no próximo capítulo, trabalhou intensamente entre as décadas de 1920 e 1960 na elaboração de uma teoria consistente para explicar a ocorrência do espectro contínuo de raios X. As etapas experimentais de seus estudos utilizavam câmaras de ionização e contadores de descarga bastante rudimentares quando comparados aos instrumentos de medição modernos, utilizados nos laboratórios dedicados à Física das Radiações. Seus resultados, que tiveram como base o trabalho de Duane e Hunt de 1915 (Duane and Hunt, 1915), são ainda hoje fonte de inspiração para os modelos matemáticos para previsão do comportamento da radiação de *bremsstrahlung* emitida por tubos de raios X. Na primeira fase de seus estudos, Kulenkampff trabalhou com alvos finos que emitiam quantidades pequenas de fótons, o que era acompanhado de um grande desafio instrumental. A segunda fase dos trabalhos, que permitiram o desenvolvimento aprofundado da teoria referente à radiação de freamento, baseada em evidências experimentais com alvos espessos, fez uso de instrumentos utilizados em laboratórios de Física Nuclear da época, e que seriam os precursores dos espectrômetros modernos.

O entendimento e modelamento das radiações características emitidas por alvos após terem sido atingidos por elétrons ocorreram, também, durante a primeira metade do século passado, com os trabalhos de Webster (Webster, 1916a, Webster, 1916b, Webster and Clark, 1917, Webster, 1927, Webster, 1928a, Webster, 1928b, Webster et al., 1928, Webster, 1934) após as

observações de Barkla e Sadler (Behling, 2015). Contudo, a medição adequada destas linhas características e suas intensidades relativas foram objeto de investigação intensa após o desenvolvimento de instrumentos com resolução energética adequada.

Assim, foi na década de 1960 que as técnicas experimentais se aperfeiçoaram e, conseqüentemente, uma grande quantidade de trabalhos científicos foi publicada, com resultados e interpretações sobre a emissão característica por tubos de raios X. Destacam-se, em especial, os trabalhos de Worthington e Tomlin (Worthington and Tomlin, 1956) e de Green e Cosslett (Green and Cosslett, 1961, Green and Cosslett, 1968), baseados na teoria desenvolvida em 1930 por Bethe (Bethe, 1930). No final da década de 1960, Tothill (Tothill, 1968) utilizou contadores proporcionais e câmaras de ionização para melhorar as estimativas da razão entre radiação característica emitida pela camada K de tubos de raios X com anodo de tungstênio, enquanto Vignes e Dez (Vignes and Dez, 1968) estudaram estes fenômenos no titânio e no chumbo utilizando instrumentos semelhantes. Nesta mesma época surgiram importantes estudos teóricos sobre colisões de elétrons com átomos (Gryziński, 1965a, Gryziński, 1965b) e, mais tarde, abordagens empíricas sobre a emissão de linhas características (Casnati et al., 1982), estudos analíticos sobre fluorescência (Pella et al., 1985, Hombourger, 1998) e trabalhos teóricos e experimentos para determinação das seções de choque de interação de elétrons das camadas eletrônicas de átomos de interesse (Deutsch et al., 2000, Deutsch et al., 2004, Zhu et al., 2009, Talukder et al., 2008, Haque et al., 2009). Até hoje este tema vem sendo estudado e os modelos aperfeiçoados dada sua importância tanto para as aplicações em espectrometria quanto para o correto entendimento dos fenômenos físicos envolvidos nos processos de emissão das radiações características pela matéria (Lopez Gonzales et al., 2015, Bontempi et al., 2016).

Modelos teóricos/analíticos (Poludniowski and Evans, 2007, Poludniowski, 2007, Boone et al., 1997), semiempíricos (Boone and Seibert, 1997, Tucker et al., 1991), simulações pelo Método Monte Carlo (Taleei and Shahriari, 2009, Ay et al., 2004, Bontempi et al., 2010, Mohammad Reza and Habib, 2005, Llovet et al., 2003, Bahreyni Toossi et al., 2008, Magdalena and Frank, 2007, Mainegra-Hing and Kawrakow, 2006, Salehi et al., 2012, Hernández and Fernández, 2016) e estudos experimentais (Fewell and Shuping, 1977, Fewell and Shuping, 1978,

Terini et al., 1999, Künzel et al., 2004, Vieira et al., 2011, Miyajima et al., 2002) combinando os fenômenos de radiação de *bremstrahlung* e de emissão característica foram desenvolvidos e publicados, com maior frequência, nas últimas quatro décadas. Alguns desses códigos foram avaliados por Bhat et al. e por Caon et al. (Bhat et al., 1998, Caon et al., 1998, Bhat et al., 1999) e, mais recentemente, por Meyer et al. (Meyer et al., 2004).

Um número imenso de aplicações da espectrometria dos raios X nos mais diversos campos da ciência e da tecnologia surgiu, acompanhando o conhecimento adquirido e o aperfeiçoamento dos recursos experimentais. Os primeiros trabalhos sobre utilização destas ferramentas em espectrometria são de Lund et al. (Lund et al., 1964) e Mathies e Lund (Mathies and Lund, 1967) e datam de meados da década 1960. Uma abordagem completa desses desenvolvimentos foge ao escopo do presente trabalho, mas o leitor interessado pode verificar importantes aplicações da espectrometria na Medicina em uma edição especial da revista *X-ray spectrometry*, publicada em janeiro de 2008. Chettle faz um interessante resumo dos trabalhos publicados nesta edição especial (Chettle, 2008), que enfatiza aplicações de técnicas de fluorescência de raios X para análise da composição de tecidos biológicos *in vivo* e *in vitro*. Nos capítulos que seguem, sempre que pertinente, referências históricas ou citações de trabalhos de relevância serão realizadas quando os diferentes temas relacionados à espectrometria e suas aplicações em diagnóstico por imagem forem apresentados.

O conhecimento sobre a natureza da produção e das interações dos raios X com a matéria se deu, como ocorre com a maioria das ciências básicas, através de investigações teóricas e conceituais sobre os fundamentos destes fenômenos. Além disso, se apoiaram na criação e no uso de técnicas experimentais que pudessem, ao mesmo tempo, corroborar a teoria e trazer ingredientes para aperfeiçoá-las. Deve-se ressaltar, porém, que a evolução dos conhecimentos sobre a fenomenologia da produção e interação dos raios X se deu concomitantemente a uma intensa utilização para fins práticos, em especial na Medicina. Esta evolução se sobrepunha ao pungente período do desenvolvimento da Física Moderna, com contribuições de renomados cientistas que formaram os pilares desta nova área do conhecimento humano (Schmahl and von Weizsäcker, 1998).

No caso da produção dos raios X, as técnicas experimentais para sua determinação estão fortemente relacionadas às investigações empíricas associadas aos fenômenos de interferência e difração, desenvolvidas no final do século XIX e início do século XX. Foram estas técnicas que permitiram a criação dos instrumentos precursores dos espectrômetros modernos utilizados nas diversas aplicações que serão descritas no presente documento. Aos leitores interessados recomenda-se o livro de Bruce Wheaton, *The Tiger and the Shark: Empirical Roots of Wave-Particle Dualism* (Wheaton, 1991), em especial seu capítulo 8. Além desta referência, o capítulo 4 da segunda edição do livro *X-rays in atomic and nuclear physics* de Norman Dyson (Dyson, 1990) traz uma perspectiva das aplicações destas técnicas, sob o ponto de vista da época da publicação do livro (1990).

Bibliografia

- ANDERSON, H. L., JOHNSON, C. S. & HINCKS, E. P. 1963. Measurement of Mesonic X-Ray Energies and Nuclear Radii for Fourteen Elements from $Z=12$ to 50. *Physical Review*, 130, 2468-2480.
- ARRUDA, W. O. 1996. WILHELM CONRAD RÖNTGEN-100 anos da descoberta dos raios X. *Arq Neuropsiquiatr*, 45, 525-531.
- AY, M. R., SHAHRIARI, M., SARKAR, S., ADIB, M. & ZAIDI, H. 2004. Monte Carlo simulation of x-ray spectra in diagnostic radiology and mammography using MCNP4C. *Physics in Medicine and Biology*, 49, 4897-4917.
- BAHREYNI TOOSSI, M. T., MORADI, H. & ZARE, H. 2008. DXRaySMCS: a user-friendly interface developed for prediction of diagnostic radiology X-ray spectra produced by Monte Carlo (MCNP-4C) simulation. *Radiation Protection Dosimetry*, 132, 415-419.
- BALDWIN, G. C. 1975. Origin of Synchrotron Radiation,. *Physics Today*, 28.
- BARKLA, C. G. 1911. The spectra of the fluorescent Rontgen radiations. *Philosophical Magazine*, 22, 396-412.
- BARKLA, C. G. & SADLER, C. A. 1909. The absorption of Rontgen rays. *Philosophical Magazine*, 17, 739-760.
- BARKLA, K. 1920. Characteristic Röntgen radiation. *Nobel Lecture* [Online]. Available: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1917/barkla-lecture.pdf [Accessed 19/06/2016].
- BEATTY, R. T. 1913. The energy of rontgen rays. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 89, 314-327.
- BEHLING, R. 2015. *Modern Diagnostic X-Ray Sources: Technology, Manufacturing, Reliability*, CRC Press
- BETHE, H. 1930. Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie. *Annalen der Physik*, 397, 325-400.
- BHAT, M., PATTISON, J., BIBBO, G. & CAON, M. 1998. Diagnostic x-ray spectra: A comparison of spectra generated by different computational methods with a measured spectrum. *Medical Physics*, 25, 114-120.
- BHAT, M., PATTISON, J., BIBBO, G. & CAON, M. 1999. Off-axis x-ray spectra: A comparison of Monte Carlo simulated and computed x-ray spectra with measured spectra. *Medical Physics*, 26, 303-309.
- BLOKHIN, M. A. 1962. *X-ray Spectroscopy*, Delhi, India, Hindustan Publishing Co.
- BONTEMPI, M., ANDREANI, L., LABANTI, C., COSTA, P. R., ROSSI, P. L. & BALDAZZI, G. 2016. Semi-empirical model for fluorescence lines evaluation in diagnostic x-ray beams. *Applied Radiation and Isotopes*, 107, 152-159.
- BONTEMPI, M., ANDREANI, L., ROSSI, P. L. & VISANI, A. 2010. Monte Carlo simulator of realistic x-ray beam for diagnostic applications. *Medical Physics*, 37, 4201-4209.
- BOONE, J. M., FEWELL, T. R. & JENNINGS, R. J. 1997. Molybdenum, rhodium, and tungsten anode spectral models using interpolating polynomials with application to mammography. *Medical Physics*, 24, 1863-1874.

- BOONE, J. M. & SEIBERT, J. A. 1997. An accurate method for computer-generating tungsten anode x-ray spectra from 30 to 140 kV. *Medical Physics*, 24, 1661-1670.
- BRAGG, W. H. 1913a. On the Production of Fluorescent Rontgen Radiation To the Editors of the 'Philosophical Magazine.'. *Philosophical Magazine*, 25, 657-659.
- BRAGG, W. H. 1913b. The reflection of x-rays by crystals. (II.). *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 89, 246-248.
- BRAGG, W. H. 1913c. The structure of the diamond. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 89, 277-291.
- BRAGG, W. H. 1913d. X rays and crystals. *Nature*, 90, 219-219.
- BRAGG, W. H. & BRAGG, W. L. 1913. The reflection of X-rays by crystals. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 88, 428-438.
- BRAGG, W. L. 1913e. The specular reflection of X rays. *Nature*, 90, 410-410.
- BRAGG, W. L. 1913f. The structure of some crystals as indicated by their diffraction of x-rays. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 89, 248-277.
- CAON, M., BIBBO, G., PATTISON, J. & BHAT, M. 1998. The effect on dose to computed tomography phantoms of varying the theoretical x-ray spectrum: A comparison of four diagnostic x-ray spectrum calculating codes. *Medical Physics*, 25, 1021-1027.
- CARVALHO, A. C. P. 2005. Sobre uma nova espécie de raios. *Revista da Imagem*, 27, 287-293.
- CARVALHO, A. C. P. 2006. O mundo ao redor dos raios X. *Revista da Imagem*, 28, 209-217.
- CASNATI, E., TARTARI, A. & BARALDI, C. 1982. An empirical approach to K-shell ionisation cross section by electrons. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 15, 155.
- CHAPMAN, J. C. 1913. A comparison of the spectra of fluorescent rontgen radiations. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 88, 24-37.
- CHETTLE, D. 2008. X-ray spectroscopy in medicine. *X-Ray Spectrometry*, 37, 1-2.
- CHRISTIE, D. A. & TANSEY, E. M. 2006. Development of physics applied to medicine in the UK, 1945–90. In: CHRISTIE D A, T. E. M. E. (ed.) *Wellcome Witnesses to Twentieth Century Medicine - The Wellcome Trust Centre for the History of Medicine at UCL*. London.
- DEUTSCH, H., BECKER, K., MATT, S. & MÄRK, T. D. 2000. Theoretical determination of absolute electron-impact ionization cross sections of molecules. *International Journal of Mass Spectrometry*, 197, 37-69.
- DEUTSCH, H., SCHEIER, P., BECKER, K. & MÄRK, T. D. 2004. Revised high energy behavior of the Deutsch-Märk (DM) formula for the calculation of electron impact ionization cross sections of atoms. *International Journal of Mass Spectrometry*, 233, 13-17.
- DUANE, W. & HUNT, F. L. 1915. On X-Ray Wave-lengths. *Physical Review* 6 (2), 6, 166-172.

- DYSON, N. A. 1990. *X-rays in atomic and nuclear physics*, New York, Cambridge University Press.
- ETTER, L. E. 1946. Some historical data relating to the discovery of the Roentgen rays. *American Journal of Roentgenology*, 56, 220-231.
- FEWELL, T. R. & SHUPING, R. E. 1977. Photon energy distribution of some typical diagnostic x-ray beams. *Medical Physics*, 4, 187-197.
- FEWELL, T. R. & SHUPING, R. E. 1978. *Handbook of Mammographic X-Ray Spectra*. Rockville, MD: HEW.
- FITCH, V. L. & RAINWATER, J. 1953. Studies of X-Rays from Mu-Mesonic Atoms. *Physical Review*, 92, 789-800.
- FRANCISCO, F. C., MAYMONE, W., CARVALHO, A. C. P., FRANCISCO, V. F. M. & FRANCISCO, M. C. 2005. Radiologia: 110 anos de história. *Revista da Imagem*, 27, 281-286.
- GREEN, M. & COSSLETT, V. E. 1961. The Efficiency of Production of Characteristic X-radiation in Thick Targets of a Pure Element. *Proceedings of the Physical Society*, 78, 1206.
- GREEN, M. & COSSLETT, V. E. 1968. Measurements of K, L and M shell X-ray production efficiencies. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1, 425.
- GRYZIŃSKI, M. 1965a. Classical Theory of Atomic Collisions. I. Theory of Inelastic Collisions. *Physical Review*, 138, A336-A358.
- GRYZIŃSKI, M. 1965b. Two-Particle Collisions. II. Coulomb Collisions in the Laboratory System of Coordinates. *Physical Review*, 138, A322-A335.
- HAQUE, A. K. F., SARKER, M. S. I., PATOARY, M. A. R., SHAHJAHAN, M., HOSSAIN, M. I., UDDIN, M. A., BASAK, A. K. & SAHA, B. C. 2009. Modified version of revised Deutsch–Märk model for electron impact K-shell ionization cross-sections of atoms at relativistic energies. *International Journal of Quantum Chemistry*, 109, 1442-1450.
- HERNÁNDEZ, G. & FERNÁNDEZ, F. 2016. A model of tungsten anode x-ray spectra. *Medical Physics*, 43, 4655-4664.
- HOMBOURGER, C. 1998. An empirical expression for K-shell ionization cross section by electron impact. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 31, 3693.
- JOHNSON, C. S., HINCKS, E. P. & ANDERSON, H. L. 1962. Measurement of Mesonic X Rays in the Iron Region. *Physical Review*, 125, 2102-2111.
- KEEVIL, S. F. 2012. Physics and medicine: a historical perspective. *Lancet*, 379, 1517-1524.
- KOTZUR, E. M. 1994. W.C. Röntgen: a new type of ray. *Radiology*, 193, 329-332.
- KULENKAMPFF, H. 1922. Über das kontinuierliche Röntgenspektrum. *Annalen der Physik*, 374, 548-596.
- KULENKAMPFF, H. 1928. Untersuchungen der kontinuierlichen Röntgenstrahlung dünner Aluminiumfolien. *Annalen der Physik*, 392, 597-637.
- KULENKAMPFF, H. 1938. Betrachtungen zur Röntgenbremsstrahlung. *Annalen der Physik*, 425, 600-606.
- KULENKAMPFF, H. 1959. Eine einfache Ableitung für die Voreilung des Intensitäts-Maximums bei der Röntgen-Bremsstrahlung. *Zeitschrift für Physik*, 157, 282-285.

- KULENKAMPFF, H., SCHEER, M. & ZEITLER, E. 1959. Ergänzungen zur Sommerfeld'schen Theorie der Röntgen-Bremsstrahlung. *Zeitschrift für Physik*, 157, 275-281.
- KULENKAMPFF, H. & SCHMIDT, L. 1943. Die Energieverteilung im Spektrum der Röntgen-Bremsstrahlung. *Annalen der Physik*, 435, 494-512.
- KÜNZEL, R., HERDADE, S. B., TERINI, R. A. & COSTA, P. R. 2004. X-ray spectroscopy in mammography with a silicon PIN photodiode with application to the measurement of tube voltage. *Medical Physics*, 31, 2996-3003.
- LAVILLA, R. E. 1982. CHAPTER 14 - X-ray Spectra of Molecular Gases A2 - BONNELLE, C. In: MANDÉ, C. (ed.) *Advances in X-ray Spectroscopy*. Pergamon.
- LLOVET, X., SORBIER, L., CAMPOS, C. S., ACOSTA, E. & SALVAT, F. 2003. Monte Carlo simulation of x-ray spectra generated by kilo-electron-volt electrons. *Journal of Applied Physics*, 93, 3844-3851.
- LOPEZ GONZALES, A. H., TOMAL, A. & COSTA, P. R. 2015. Evaluation of characteristic-to-total spectrum ratio: Comparison between experimental and a semi-empirical model. *Applied Radiation and Isotopes*, 100, 27-31.
- LUND, P. K., MORNINGSTAR, D. A. & MATHIES, J. C. 1964. X-ray spectroscopy in biology and medicine. VI use of an ultra-soft X-ray source for the nondestructive detection of microgram amounts of sodium and magnesium. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 14, 177-182.
- LYTLE, F. W., SAYERS, D. E. & STERN, E. A. 1982. CHAPTER 16 - The History and Modern Practice of EXAFS Spectroscopy* A2 - BONNELLE, C. In: MANDÉ, C. (ed.) *Advances in X-ray Spectroscopy*. Pergamon.
- MAGDALENA, B. & FRANK, V. 2007. Monte Carlo simulation of a computed tomography x-ray tube. *Physics in Medicine and Biology*, 52, 5945.
- MAINEGRA-HING, E. & KAWRAKOW, I. 2006. Efficient x-ray tube simulations. *Medical Physics*, 33, 2683-2690.
- MANDEL'ŠTAM, S. L. 1965. X-Ray Emission of the Sun. *Space Science Reviews*, 4, 587-665.
- MATHIES, J. C. & LUND, P. K. 1967. X-Ray Spectroscopy in Biology and Medicine: VIII. Micro and Ultramicro Procedures for the Quantitative Determination of Calcium, Phosphorus, and Sulfur in Urinary Calculi. *Clinical Chemistry*, 13, 962-969.
- MEYER, P., BUFFARD, E., MERTZ, L., KENNEL, C., CONSTANTINESCO, A. & SIFFERT, P. 2004. Evaluation of the use of six diagnostic X-ray spectra computer codes. *British Journal of Radiology*, 77, 224-230.
- MIYAJIMA, S., IMAGAWA, K. & MATSUMOTO, M. 2002. CdZnTe detector in diagnostic x-ray spectroscopy. *Medical Physics*, 29, 1421-1429.
- MOHAMMAD REZA, A. & HABIB, Z. 2005. Development and validation of MCNP4C-based Monte Carlo simulator for fan- and cone-beam x-ray CT. *Physics in Medicine and Biology*, 50, 4863.
- MORRIS, P. & PERKINS, A. 2012. Diagnostic imaging. *The Lancet*, 379, 1525-1533.
- MOSELEY, H. 1914a. Atomic models and X-ray spectra. *Nature*, 92, 554-554.
- MOSELEY, H. & DARWIN, C. G. 1913a. The reflection of the X rays. *Nature*, 90, 594-594.

- MOSELEY, H. G. J. 1913a. The attainment of high potentials by the use of radium. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 88, 471-476.
- MOSELEY, H. G. J. 1913b. The High-Frequency Spectra of the Elements. *Philosophical Magazine*, 26, 1024-1034.
- MOSELEY, H. G. J. 1914b. The high-frequency spectra of the elements. Part II. *Philosophical Magazine*, 27, 703-713.
- MOSELEY, H. G. J. & DARWIN, C. G. 1913b. The Reflexion of the X-rays. *Philosophical Magazine*, 26, 210-232.
- OKUNO, E. & YOSHIMURA, E. M. 2010. Física das Radiações.
- ORLANDO, S., PERES, G. & REALE, F. 2000. The Sun as an X-ray star. I. Deriving the emission measure distribution versus temperature of the whole solar corona from the Yohkoh/Soft X-ray Telescope data. *Astrophysical Journal*, 528, 524-536.
- PELLA, P. A., FENG, L. & SMALL, J. A. 1985. An analytical algorithm for calculation of spectral distributions of x-ray tubes for quantitative x-ray fluorescence analysis. *X-Ray Spectrometry*, 14, 125-135.
- POLUDNIOWSKI, G. G. 2007. Calculation of x-ray spectra emerging from an x-ray tube. Part II. X-ray production and filtration in x-ray targets. *Medical Physics*, 34, 2175-2186.
- POLUDNIOWSKI, G. G. & EVANS, P. M. 2007. Calculation of x-ray spectra emerging from an x-ray tube. Part I. Electron penetration characteristics in x-ray targets. *Medical Physics*, 34, 2164-2174.
- ROBINSON, A. L. 2009. *History of Synchrotron Radiation* [Online]. Available: http://xdb.lbl.gov/Section2/Sec_2-2.html [Accessed 17/06/2016].
- RUTHERFORD, E. & MCCLUNG, R. K. 1900. Energy of rontgen and becquerel rays and the energy required to produce an ion of gases. *Proceedings of the Royal Society of London*, 67, 245-250.
- SALEHI, Z., YA ALI, N. K. & YUSOFF, A. L. 2012. X-ray spectra and quality parameters from Monte Carlo simulation and analytical filters. *Applied Radiation and Isotopes*, 70, 2586-2589.
- SANTIN FILHO, O. 1995. Breve histórico dos 100 da descoberta dos raios X: 1895-1995. *Quimica Nova*, 18, 574-583.
- SCHMAHL, F. W. & VON WEIZSÄCKER, C. F. 1998. Medicine and modern physics. *The Lancet*, 351, 1291-1292.
- STANTON, A. 1896. On a new kind of rays. By W.C. Rontgen. Translated by Arthur Stanton from the Sitzungsberichte der Würzburger Physic-med. Gesellschaft, 1895. *Nature*, 53, 274-277.
- TALEEI, R. & SHAHRIARI, M. 2009. Monte Carlo simulation of X-ray spectra and evaluation of filter effect using MCNP4C and FLUKA code. *Applied Radiation and Isotopes*, 67, 266-271.
- TALUKDER, M. R., BOSE, S. & TAKAMURA, S. 2008. Calculated electron impact K-shell ionization cross sections for atoms. *International Journal of Mass Spectrometry*, 269, 118-130.
- TERINI, R. A., COSTA, P. R., FURQUIM, T. A. C. & HERDADE, S. B. 1999. Measurements of discrete and continuous X-ray spectra with a photodiode at room temperature. *Applied Radiation and Isotopes*, 50, 343-353.
- TOTHILL, P. 1968. The ratio of K characteristic to total radiation emitted from a tungsten target X-ray tube. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1, 1093.

- TUCKER, D. M., BARNES, G. T. & CHAKRABORTY, D. P. 1991. Semiempirical model for generating tungsten target x-ray spectra. *Medical Physics*, 18, 211-218.
- VIEIRA, A. A., LINKE, A., YOSHIMURA, E. M., TERINI, R. A. & HERDADE, S. B. 2011. A portable Compton spectrometer for clinical X-ray beams in the energy range 20-150keV. *Applied Radiation and Isotopes*, 69, 350-357.
- VIGNES, A. & DEZ, G. 1968. Distribution in depth of the primary X-ray emission in anticathodes of titanium and lead. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1, 1309.
- WEBB, S. 1990. *From the Watching of Shadows: The Origins of Radiological Tomography*, CRC Press.
- WEBSTER, D. L. 1916a. The Emission Quanta of Characteristic X Rays. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2, 90-94.
- WEBSTER, D. L. 1916b. Experiments on the Emission Quanta of Characteristic X-Rays. *Physical Review*, 7, 599-613.
- WEBSTER, D. L. 1927. Direct and Indirect Production of Characteristic X-Rays. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 13, 445-456.
- WEBSTER, D. L. 1928a. Direct and Indirect Characteristic X-Rays: Their Ratio as a Function of Cathode-Ray Energy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 14, 330-339.
- WEBSTER, D. L. 1928b. K-Electron Ionization by Direct Impact of Cathode Rays. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 14, 339-344.
- WEBSTER, D. L. 1934. Current progress in X-ray physics *Science*, 79, 191-197.
- WEBSTER, D. L. & CLARK, H. 1917. The Intensities of X-Rays of the L Series. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 3, 181-185.
- WEBSTER, D. L., CLARK, H., YEATMAN, R. M. & HANSEN, W. W. 1928. Intensities of K-Series X-Rays from Thin Targets. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 14, 679-686.
- WHEATON, B. R. 1991. *The Tiger and the Shark Empirical Roots of Wave-Particle Dualism*, Berkeley, University of California.
- WORTHINGTON, C. R. & TOMLIN, S. G. 1956. The Intensity of Emission of Characteristic X-Radiation. *Proceedings of the Physical Society. Section A*, 69, 401.
- ZHU, J., AN, Z., LIU, M. & TIAN, L. 2009. Measurements of the K-shell ionization cross sections of Si by 3-25-keV electron impact using the thick-target method. *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 79.