

Física Moderna, Física Contemporânea e Aplicações Tecnológicas

Texto para a disciplina Marcos no Desenvolvimento
da Física

MNPEF - UFERSA

Praticamente toda a literatura historiográfica e a educacional definem o início da física moderna em 1900, quando Max Planck (1858-1947) propôs a quantização da energia. Esse início também está fortemente associado aos trabalhos de Albert Einstein (1879-1955), publicados em 1905, quando ele se inspira na ideia de Planck e explica o efeito fotoelétrico a partir da ideia de que o comportamento da luz é corpuscular. O corpúsculo de luz, ou quantum de luz, ou fóton, como seria denominado em 1925, possui energia igual ao produto da constante de Planck pela frequência da luz. Em outro artigo naquele ano ele apresentou a sua teoria da relatividade restrita. Dez anos depois ele apresentou a teoria da relatividade geral. Esses trabalhos de Planck e de Einstein formaram a base da física no século 20, que desembocou na mecânica quântica. Da mecânica quântica para a física contemporânea foi um salto, e o resultado prático foi o surgimento de aplicações tecnológicas que marcam nossas vidas atualmente.

No entanto, em nossa opinião, a física moderna começa com a descoberta do efeito fotoelétrico, em 1887, que despertou o retorno aos estudos dos raios catódicos, iniciados por Michael Faraday (1791-1867) nos anos 1830. Os estudos experimentais do efeito fotoelétrico e dos raios catódicos levaram à descoberta dos raios-X, no final de 1895. No início de 1896, uma discussão sobre a descoberta dos raios-X, na Academia de Ciências de Paris, levou à descoberta da radioatividade. Um ano depois o elétron foi descoberto. No mesmo período, estudos termodinâmicos levaram à solução de Planck para a radiação do corpo negro, de onde emergiu sua proposta de quantização da energia.

No nosso entendimento, todo este cenário demarca o início da física moderna. Outros estudiosos entendem que este período define a transição da física clássica para a física moderna. De acordo com o nosso entendimento, o mapa mental referente à física moderna é este apresentado na figura 7.1.

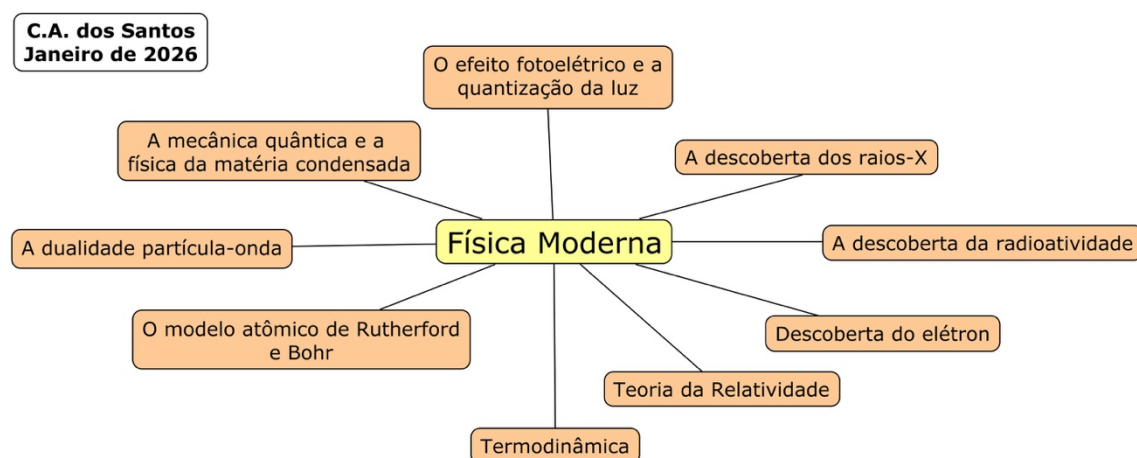


Figura 7.1 – Mapa mental dos tópicos pertinentes à física moderna.

Esses tópicos serão discutidos nos textos seguintes, excetuando a termodinâmica que já foi discutida em texto anterior. No presente texto apresentaremos um cenário qualitativo a título de contextualização para a discussão temática mais detalhada nos textos seguintes.

Raios catódicos, a semente para o surgimento da física moderna*

Desde os anos 1820, Faraday vinha realizando vários experimentos sobre eletricidade e magnetismo. Por volta de 1838 ele começou a investigar descargas elétricas em gases rarefeitos, ligando definitivamente seu nome à descoberta dos raios catódicos. Todavia, devido às dificuldades técnicas com a produção de vácuo de boa qualidade, esses trabalhos só tiveram novo impulso vinte anos depois. Essa nova fase, iniciada por volta de 1858, pelo físico alemão Julius Plücker (1801-1868), produziu resultados que desafiaram a inteligência humana durante quase quarenta anos, até que um bom entendimento do fenômeno fosse obtido. A denominação *raios catódicos* (*Kathodenstrahlen*) foi introduzida pelo físico alemão Eugen Goldstein (1850-1931), em 1876, ocasião em que ele apresentou a interpretação de que esses raios eram ondas no *éter*. Uma interpretação contrária, defendida pelos ingleses, também chamava a atenção do mundo científico da época. Para William Crookes (1832-1919), os raios catódicos eram moléculas carregadas, as quais constituíam o *quarto estado da matéria* (essa denominação é hoje usada quando nos referimos ao plasma, que é exatamente o que se tem quando se produz uma descarga elétrica num gás rarefeito!). Em 1897, dois anos depois da descoberta dos raios-X, Joseph John Thomson (1856-1940) encerrou a polêmica, demonstrando que os raios catódicos eram elétrons.

Onze anos depois de Goldstein sugerir a denominação raios catódicos, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) tentava produzir e detectar ondas eletromagnéticas previstas por James Clerk Maxwell (1831-1879), quando, por acaso, descobriu o que logo seria denominado efeito fotoelétrico. Hertz publicou um pequeno artigo descrevendo a descoberta e voltou para suas investigações sobre as ondas eletromagnéticas. Deixou a cargo de seu assistente, Phillip Lenard (1862-1947) a responsabilidade pelas pesquisas sobre o efeito fotoelétrico. Lenard já era conhecido pelas suas investigações a respeito dos raios catódicos, pelas quais foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física de 1905. Até o início do século, os principais resultados experimentais sobre o efeito fotoelétrico são de sua autoria. No ano que ele ganhou o Nobel, Einstein publicou um artigo teórico, incluindo, entre outros temas, uma explicação do efeito fotoelétrico. Pela sua

* Adaptado da minha página no IF-UFRGS: <https://www.if.ufrgs.br/~cas/>.

equação contida na explicação do efeito fotoelétrico, Einstein ganhou o Prêmio Nobel de Física de 1921.

Depois de 1905, muitos estudiosos investigaram a validade da equação de Einstein. Alguns duvidavam da sua validade, e praticamente todos rejeitavam a hipótese do quantum de luz, que Einstein usou para formular sua equação. Entre todos os envolvidos nessas investigações, o mais bem sucedido foi Robert Andrews Millikan (1868-1953). Com seus colaboradores, Millikan realizou cuidadosas medidas durante 11 anos, para finalmente validar a equação de Einstein. No entanto, durante muitos anos Millikan permaneceu cético quanto à validade da teoria do quantum de luz. Por esse trabalho sobre o efeito fotoelétrico e pela medida da carga do elétron ele ganhou o Nobel de 1923. Na conferência que ministrou em 1924, na ocasião da premiação, Millikan ainda não acreditava que a teoria estava correta. As discussões em torno do quantum de luz serão apresentadas no próximo texto.

Paralelamente às investigações do efeito fotoelétrico, o ex-reitor da universidade de Würzburg, Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923) decidiu também investigar os raios catódicos. Comprou alguns tubos de vácuo, incluindo um inventado por Lenard, e começou a fazer seus experimentos em agosto-setembro de 1894. No dia 8 de novembro ele descobriu os raios-X. Foi um sucesso mundial imediato.

Raios-X desembocam na radioatividade, é o início da virada da física clássica para a física moderna

Em uma sessão da Academia de Ciências de Paris, em janeiro de 1896, Jules Henri Poincaré (1854-1912) apresentou a descoberta de Roentgen e fez uma conjectura de que os raios-X eram produzidos pela fosforescência dos elementos químicos nas paredes do tubo de vácuo, quando eram atingidos pelos raios catódicos. Presente na sessão, Antoine-Henri Becquerel (1852-1908), renomado especialista em materiais fosforescentes, resolveu testar a hipótese de Poincaré. Becquerel realizou vários experimentos com diferentes materiais fosforescentes, incluindo alguns compostos de urânio, e observou um fenômeno até então desconhecido. O composto que continha urânio emitia uma radiação mesmo que não fosse excitado pela luz. Outros pesquisadores realizaram experimentos similares. Becquerel tentou explicar o fenômeno com base no que se sabia sobre fosforescência. Depois de quatro meses de tentativas infrutíferas, o tema foi abandonado.

Um ano e meio depois, exatamente em dezembro de 1897, procurando um tema para sua tese de doutorado, Marie Skłodowska-Curie (1867-1934) descobriu, nos anais da Academia, o tema que era conhecido como raios de

Becquerel, ou raios urânicos. Era um tema ideal para uma tese. Era recente, instigante, e havia sido abandonado por quem o descobrira. Orientada pelo seu marido, Pierre Curie (1859-1906), Marie começou investigando o efeito de ionização do ar dos raios urânicos, com equipamentos que Pierre tinha em seu laboratório. Em seis meses Marie explicou o fenômeno, que ela denominou radioatividade, sendo radioativos todos os elementos que o apresentavam. Além de urânio, ela descobriu que o tório também era radioativo. Em junho de 1898, o casal Curie descobriu dois novos elementos químicos: polônio e urânio. Por esses trabalhos, eles dividiram o Nobel de física de 1903.

Era o início da radioatividade. No início de 1899, Ernest Rutherford (1871-1937) mostrou que a radiação emitida pelos elementos radioativos era de dois tipos: um mais penetrante do que o outro. A radiação mais penetrante foi denominada radiação beta, enquanto a menos penetrante foi denominada radiação alfa. Em 1900, Paul Villard (1860-1934) identificou uma radiação ainda mais penetrante, que Rutherford denominou de raios gama, em 1903. Anos depois, Rutherford e seus colaboradores descobriram que os raios alfa eram núcleos do hélio, os raios beta eram elétrons, e os raios gama eram uma espécie de radiação eletromagnética.

Rutherford começa a transformar a radioatividade em física nuclear

Em termos epistemológicos, consideramos que Marie Curie é a personalidade central da radioatividade, mas em termos da quantidade de descobertas não temos dúvida em afirmar que a personalidade mais importante é Rutherford, que ganhou o Nobel de química de 1908 pelas suas investigações a respeito da desintegração dos elementos e a química das substâncias radioativas.

Na primeira década do século 20, Rutherford e seus colaboradores examinaram vários materiais bombardeando-os com partículas alfa emitidas por núcleos de rádio. Entre 1908 e 1911, ao bombardear lâminas de ouro, eles observaram um comportamento anômalo nas direções das partículas espalhadas. Para explicar esses resultados, Rutherford propôs o modelo atômico que um ano depois foi elaborado por Niels Henrik David Bohr (1885-1962).

Um pouco antes de 1920, Rutherford bombardeou núcleos de nitrogênio com partículas alfa, e obteve núcleos de oxigênio e de hidrogênio. Esse resultado revelou duas novidades. Foi a primeira vez que a transmutação nuclear (nitrogênio transformado em oxigênio) foi observada, e o núcleo de hidrogênio foi denominado próton. Estava se formando o átomo como hoje o conhecemos. Pelo modelo Rutherford-Bohr, o átomo seria constituído de um núcleo, em volta do qual orbitavam elétrons. Estes já tinham sido identificados em 1897, por Thom-

son. Agora, Rutherford começa a detalhar a composição do núcleo. Quando ele apresentou a descoberta do próton, em uma conferência na Inglaterra, ele sugeriu que deveria haver no interior do núcleo uma partícula neutra.

Durante uma década, poucos levaram em conta essa previsão de Rutherford, mas muitos pesquisadores começaram a realizar experimentos similares para observar o fenômeno da transmutação nuclear, até que em 1930 os alemães Walther Bothe (1891-1957) e Herbert Becker* bombardearam com partículas alfa núcleos de elementos leves. No caso do berílio, eles obtiveram como resultado, núcleos de carbono e uma radiação muito energética, cuja natureza era desconhecida.

O casal Irène Joliot-Curie (1897-1956) e Frédéric Joliot-Curie (1900-1958) sugeriu que a radiação seria um tipo de raio gama, mas a energia medida era muito alta para esse tipo de radiação. Foi então que Rutherford sugeriu que seu assistente, James Chadwick (1891-1974), repetisse os experimentos e o explicasse supondo que a radiação seria um feixe de partículas neutras com massa similar à do próton, algo como aquela partícula que ele havia sugerido em 1920. Foi assim que surgiu o nêutron, em 1932. Por essa descoberta, Chadwick ganhou o Nobel de física de 1935, e o casal Joliot-Curie ganhou o Nobel de química do mesmo ano.

Muitos imaginaram que o núcleo estava definido como uma mistura de prótons e nêutrons, mas o que acabamos de relatar era apenas o começo da física nuclear, que estava surgindo naquele início dos anos 1930.

A transição da física moderna para a física contemporânea

Conforme mostramos na figura 7.1, consideramos que a física moderna consiste nos estudos realizados com o efeito fotoelétrico, os raios-X, a radioatividade, a teoria da relatividade, o modelo de Rutherford-Bohr e a teoria quântica. Tudo isso ocorreu entre 1887 e 1930, sendo 1925 o ano-chave para a transição. Nesse ano, os três fundadores da mecânica quântica, Werner Karl Heisenberg (1901-1976), Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984) e Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961) publicaram seus estudos sobre o movimento de elétrons em torno do núcleo. Pelos seus trabalhos foram agraciados com o Nobel de física. Heisenberg em 1932, e Dirac e Schrödinger em 1933. Os trabalhos de Heisenberg, Dirac e Schrödinger referiam-se ao que hoje conhecemos como física atômica, e foram concebidos para resolver os problemas que o modelo de Rutherford teorizado por Bohr não conseguia. Nos anos 1920, a teoria de Bohr era conhecida como *velha teoria quântica*, enquanto os trabalhos de Heisenberg,

* A literatura não é precisa quanto às datas de nascimento e morte de Becker. As datas prováveis são, respectivamente, 1900 e 1955.

Dirac e Schrödinger compunham o que passou a ser chamado de *nova teoria quântica*. Poucos anos depois consolidou-se a denominação *mecânica quântica*.

Nessa área de trabalho, a transição da física moderna para a física contemporânea se dá pelas aplicações da mecânica quântica a problemas de física do estado sólido, aquilo que hoje é conhecida como física da matéria condensada, e pela introdução da teoria da relatividade na investigação de problemas de física atômica. As aplicações da mecânica quântica concentravam-se na nascente tecnologia de semicondutores.

Paralelamente aos estudos de mecânica quântica, avançavam os estudos da radioatividade descritos na seção anterior. No final dos anos 1920, em paralelo aos estudos referentes à transmutação nuclear, alguns pesquisadores, principalmente Enrico Fermi (1901-1954), investigavam o decaimento beta, ou seja, detectavam e mediam as energias dos raios beta emitidos por compostos radioativos. Veremos no próximo texto que esses resultados eram aparentemente contraditórios. Parecia que a conservação de energia não era válida nos fenômenos nucleares. A questão foi resolvida com a hipótese de que no processo do decaimento beta havia uma partícula neutra e com massa praticamente nula. Era o neutrino. Então, além de prótons e nêutrons, havia no núcleo mais uma partícula. A estrutura nuclear passou a ser sistematicamente investigada por experimentalistas e teóricos. Alguns anos depois surgiram as partículas elementares e a radioatividade deu origem à física nuclear.

No início dos anos 1940, as investigações básicas da física e suas aplicações deram origem à física contemporânea e à tecnologia de nossos dias.