

A Crônica da Física do Estado Sólido: I. Do Tubo de Geissler às Válvulas a Vácuo*

(The Chronicle of Solid State Physics:

I. from the Geissler tube to vacuum tubes.)

José Maria Filardo Bassalo

Departamento de Física, Universidade Federal do Pará

66075-900, Guamá, Belém, Pará

Recebido em 01 de Setembro de 1992;

Aceito para publicação em 13 de Novembro de 1992

Resumo

Nesta primeira parte da Crônica da Física do Estado Sólido, mostramos como evoluíram seus principais conceitos no que se referem ao desenvolvimento dos tubos a vácuo. Começamos com os trabalhos sobre a técnica de rarefação através das bombas de vácuo (Torricelli, Pascal, von Guericke, Boyle, Geissler) e, em seguida, examinamos as experiências sobre descarga elétrica nos gases que levou ao entendimento dos raios catódicos (Plücker, Hittorf, Goldstein, Thomson) e à invenção da *ampola de Crookes*, *lâmpada elétrica de Edison*, *tubo de Braun*. Por fim, tratamos do desenvolvimento da *telegrafia sem fio (rádio)* (Branly, Marconi, Popov) e da *Engenharia de Telecomunicações (rádiotelegrafia, radiotelegrafia, radar, televisão)*, para a qual foi importante a invenção de dispositivos eletrônicos chamados genericamente de *válvulas a vácuo: diodo* (Fleming), *triodo* (De Forest, Arnold, Langmuir), *tetrodo* (Schottky), e *pentodo* (Jobst, Tellegen).

Projeto de Pesquisa - CONSEP 0959/83 - Textos em Física

Abstract

In this first part of the Chronicle of Solid State Physics we show how its main concepts evolved regarding the development of vacuum tubes. We start with the works on the rarefaction technique through vacuum jumps (Torricelli, Pascal, von Guericke, Boyle, Geissler) and, after that, we examine the experiments on electric discharge in gases which led to the understanding of the cathode rays (Plücker, Hittorf, Goldstein, Thomson) and to the invention of the Crookes' ampoule, Edison's light bulb, and Braun's tube. Finally, we deal with the development of the wireless telegraphy, (radio) (Branly, Marconi, Popov) and of the telecommunications engineering (radiotelephony, radiotelegraphy, radar, television), to which the invention of electronic devices usually called vacuum tubes was important: diode (Fleming), triode (De Forest, Arnold, Langmuir), tetrode (Schottky), and pentode (Tellegen).

Com este artigo, iniciamos a Crônica da Física do Estado Sólido, na qual vamos mostrar como evoluíram seus principais conceitos. Nesta primeira parte apresentamos o desenvolvimento dos primeiros tubos de vácuo, desde o tubo de Geissler até as *válvulas a vácuo* (diodo,

triodo, tetrodo, pentodo), bem como suas principais aplicações à Tecnologia da Telecomunicação.

A invenção dos tubos de vácuo tem sua principal origem no estudo da descarga elétrica nos gases rarefeitos, estudo esse que, para ser efetuado, foi necessário

*Este artigo é em homenagem a ORLANDO JOSÉ CARVALHO DE MOURA, professor da Universidade Federal do Pará, um dos primeiros físicos paraenses a fazer experiências com componentes eletrônicos.

desenvolver a técnica de rarefação através de bombas de vácuo. As primeiras experiências, nas quais se observou a possibilidade da obtenção de um certo vácuo, foram as realizadas pelos físicos, o italiano Evangelista Torricelli (1608-1647), em 1643, e o francês Blaise Pascal (1623-1662), em 1646, sobre a pressão atmosférica¹.

No entanto, o primeiro dispositivo usado como uma bomba de vácuo (bomba pneumática) foi construído, em 1650, pelo físico alemão Otto von Guericke (1602-1686), que o utilizou na célebre experiência dos *hemisférios de Magdeburgo*, na qual dois hemisférios de metal eram encaixados (um no outro) e expulso o ar de seu interior por intermédio de uma bomba de vácuo. Feito isso, tentou separá-los por intermédio de duas parrelhas compostas de oito cavalos. Essa experiência foi realizada em 1654, ao ar livre, por ocasião do Congresso Imperial de Ratisbon, na Alemanha, para mostrar ser o peso da atmosfera que mantinha a esfera fechada, pois em seu interior existia o vácuo. Quando o ar voltava ao interior dos dois hemisférios, ela, esfera, se abria espontaneamente.

Novas experiências com bombas de vácuo foram realizadas pelo físico e químico inglês Robert Boyle (1627-1691). Com efeito, informado em 1657 dos trabalhos de Torricelli e Guericke e assistido pelo físico inglês Robert Hooke (1635-1703), Boyle aperfeiçoou a bomba de vácuo de Guericke² colocando um barômetro em sua câmara de vácuo, com o qual podia fazer subir ou descer a coluna de mercúrio desse instrumento, bastando para isso alterar a pressão atmosférica. De posse desse instrumento, Boyle (ainda auxiliado por Hooke) realizou uma série de experiências, principalmente a que se tornou célebre e, na qual, ao medir o volume de ar sob várias pressões e à mesma temperatura, chegou à conclusão de que o produto desses volumes, pelas pressões correspondentes, permanece constante. Tal resultado foi apresentado à *Royal Society*, em 1661³.

Somente dois séculos depois da bomba de vácuo de Boyle-Guericke, o físico alemão (Johann) Heinrich (Wilhelm) Geissler (1814-1879) inventou, em 1855, uma nova bomba de vácuo sem partes móveis. Com efeito, movendo uma coluna de mercúrio para cima e para baixo, o vácuo acima da coluna poderia ser usado para

aspirar o ar de dentro de um recipiente, pouco a pouco, até que o vácuo obtido no mesmo se aproximasse do vácuo existente sobre a coluna de mercúrio. Com essa bomba, ele construiu tubos rarefeitos, denominados por seu colaborador, o físico e matemático alemão Julius Plücker (1801-1868), de *tubos de Geissler*⁴.

De posse de um *tubo de Geissler*, Plücker passou a realizar experiências sobre descarga elétrica⁵. Assim, em 1858, observou que os "raios" originários do catodo podiam ser desviados quando em presença de um campo magnético. Em 1869, o químico e físico alemão Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914), utilizando tubos de vácuo mais rarefeitos (graças ao aperfeiçoamento das bombas de mercúrio), confirmou essa observação de seu professor Plücker, ao notar a sombra projetada de um objeto colocado em frente ao catodo. Logo depois, em 1871, o físico inglês Cromwell Fleetwood Varley (1828-1883) obteve as primeiras evidências de que os mesmos eram carregados negativamente⁶. Por fim, em 1876, o físico alemão Eugen Goldstein (1850-1931) denominou de *raios catódicos* (*kathodenstrahlen*) a essas emanações provindas do catodo⁷.

Muito embora os cientistas não soubessem bem a natureza dos raios catódicos (pois havia dúvida se eram ondas ou partículas), as experiências com eles prosseguiram. Com efeito, o físico inglês William Crookes (1832-1919) fez, em 1879, experiências sistemáticas com esse tipo de "raios" (aos quais chamou de *matéria radiante*, por acreditar serem partículas), usando para isso tubos rarefeitos por intermédio de uma bomba de vácuo (que havia construído em 1875), chegando a obter nos mesmos uma pressão de ar 75000 vezes menor que a obtida em um tubo de Geissler. Esses dispositivos ficaram conhecidos como "ovos elétricos" ou *ampolas de Crookes*⁸.

Ainda em 1879, o inventor norte-americano Thomas Alva Edison (1847-1931) construiu a primeira *lâmpada elétrica* com filamento de carbono (fio de algodão) incandescente no vácuo⁹, que usava corrente contínua de um dínamo ou bateria elétrica. Apesar de seu imenso sucesso, essa invenção apresentava uma grande desvantagem, pois a lâmpada enegrecia com o uso. Desse modo, investigando esse defeito em 1883, Edison obser-

vou que, em certas condições de vácuo e em certas voltagens, havia um estranho clarão azulado na lâmpada, clarão esse causado por uma inexplicável corrente entre os dois fios que formavam o filamento da lâmpada. Essa corrente fluía na direção oposta à corrente principal que passava no filamento, ou seja, ia do catodo (-) para o anodo (+)¹⁰. Esse *efeito Edison* ou *termiônico* não foi explicado por seu descobridor, porém, a explicação ocorreu posteriormente, como veremos adiante.

Novas experiências com tubos de vácuo continuaram a ser realizadas. Por exemplo, Goldstein em 1886, tentando entender a intensa luminosidade junto ao catodo e acreditando ser a mesma devido ao impacto de algum agente nesse eletrodo, abriu neste uns buracos (canais) e verificou que havia, também, uma certa luminosidade por detrás desse mesmo eletrodo. Portanto, concluiu que algo havia passado por esses canais, razão pela qual os denominou de *raios canais*. Logo depois foi descoberto que esses raios eram capazes de provocar fluorescência¹¹ em uma placa colocada em seu trajeto ou até mesmo impressionar uma chapa fotográfica¹².

Por outro lado, as experiências sobre raios catódicos que se seguiram fizeram recrudescer a polêmica sobre a natureza dos mesmos, principalmente quando o físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), em 1892, afirmou ter uma prova experimental de que tais raios não eram partículas e, portanto, só poderiam ser ondas. Essa opinião foi corroborada por Goldstein e demais importantes cientistas alemães¹³. Por sua vez, os físicos ingleses, liderados por Crookes, continuaram a defender a hipótese corpuscular desses raios. Essa polêmica começou a pender fortemente para o lado da hipótese corpuscular quando, em 1895, o físico francês Jean-Baptiste Perrin (1870-1942; PNF, 1926) confirmou a evidência observada por Varley (conforme vimos) de que os raios catódicos eram partículas carregadas negativamente. Aliás, também em 1895, Perrin demonstrou que os *raios canais* eram partículas carregadas positivamente. Por fim, em 1897, a polêmica encerrou-se com a célebre experiência do físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) com a qual demonstrou ser os raios catódicos *elétrons*¹⁴, ocasião em que, inclusive, calculou a relação e/m , entre a carga (e) e a massa

(m) dessas partículas¹⁵. Convém esclarecer que, com essa experiência, foi conseguida pela primeira vez uma deflexão elétrica dos raios catódicos, graças a um bom vácuo obtido por Thomson, pois, um vácuo insuficiente sendo condutor, dificultava o estabelecimento de um campo elétrico estático¹⁶. (Aliás, usando essa mesma técnica, Thomson determinou em 1907, a relação (e/m) para os *raios canais*, ocasião em que os denominou de *raios positivos*¹⁷.)

Também em 1897, o físico alemão Karl Ferdinand Braun (1850-1918; PNF, 1909) inventou um dos primeiros *osciloscópios de raios catódicos*¹⁸, conhecido desde então como *tubo de Braun*. Com efeito, sabedor de que um feixe de elétrons poderia ser defletido por um campo magnético, Braun colocou no gargalo do tubo de raios catódicos (no qual um feixe de elétrons era emitido do catodo ao anodo), conjuntos de eletro-ímas geradores de corrente alternada. Desse modo, um desses conjuntos desviava o feixe para cima e para baixo, e um outro, desviava esse mesmo feixe para a direita e para a esquerda. Por outro lado, usando um "screen" fluorescente (por exemplo, o sulfeto de zinco (ZnS) encontrado no minério wurtzita) coberto de compostos fosfóricos e colocando o mesmo no interior do tubo que estava utilizando, Braun pôde observar o "caminho" dos elétrons como uma "incandescência" (*glowing*) no "screen". Essa invenção de Braun foi importante para o desenvolvimento do tubo de raios catódicos como um relevante equipamento de pesquisa, bem como para o desenvolvimento posterior da *televisão* e do *radar*¹⁹, conforme veremos mais adiante.

Uma outra contribuição importante de Braun ocorreu no campo da transmissão de ondas eletromagnéticas no ar, isto é, no campo da *telegrafia sem fio*. Vejamos como. Em 1865, o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) demonstrou ser a luz uma onda eletromagnética. Por seu lado, em 1887/8, Hertz produziu as primeiras radiações eletromagnéticas, hoje conhecidas como *microondas* ou *ondas hertzianas*. Usando uma corrente alternada de alta frequência gerada por uma *bobina de Ruhmkorff*²⁰, Hertz conseguiu produzir faíscas entre duas esferas de metal. Essas faíscas produziam radiação eletro-

magnética que podia ser detectada por um fio, na forma de um círculo incompleto, isto é, com uma pequena abertura. Assim, uma faísca saltava, através dessa abertura, sempre que o fio recebia radiação do "transmissor". Mais tarde, em 1890, o físico francês Edouard Branly (1844-1940) inventou o *radiocondutor*²¹ com o objetivo de detectar as "ondas hertzianas", ocasião em que, inclusive, chegou a detectá-las a uma distância de 150 metros. Em 1892, o físico inglês Oliver Joseph Lodge (1851-1940) usou, também, um *radiocondutor* (aperfeiçoado com cursor mecânico) como detector de "ondas hertzianas". (Foi nessa ocasião que Lodge denominou de *coesor* a esse dispositivo inventado por Branly. O *coesor* também ficou conhecido com o nome de *rund funk* ("chispa ao redor").) Por sua vez, o físico italiano Augusto Righi (1850-1920), em 1893, construiu um potente emissor de faísca "fracionada" para a produção dessas ondas²².

A idéia apresentada por Crookes, em 1892, de que as ondas hertzianas poderiam ser utilizadas na telegrafia sem fio, foi adotada pelo físico e inventor italiano Guglielmo Marconi (1874-1937; PNF, 1909). Com efeito, ao tomar conhecimento, em 1894, dos trabalhos de Hertz²³, Marconi começou a realizar experiências, sob a assistência de Righi, no sentido de tornar prática a *telegrafia sem fio*, que viria substituir a então *telegrafia com fio*²⁴. Inicialmente, Marconi usou equipamentos parecidos com os de Hertz, tais como a bobina de Ruhmkorff e as antenas dipolares com refletores parabólicos. Porém, substituiu o detector que Hertz utilizara, por um *coesor* de Branly-Lodge. Mais tarde, observou que para aumentar a distância de transmissão era necessário trabalhar com antenas maiores, quer na transmissão quanto na recepção das ondas eletromagnéticas. Assim, usando antenas aéreas constituídas de placas verticais metálicas conectadas à terra, Marconi conseguiu transmitir, em 1895²⁵, sinais Morse por uma distância de 2,4 km²⁶.

Nos primeiros anos em que Marconi começou a fazer a transmissão das ondas hertzianas, haviam dificuldades no sentido de aumentar a distância dessa transmissão além de 15 km. É nessa ocasião que entra em cena Braun. Assim, ao estudar os osciladores de Hertz,

Braun percebeu que esse alcance poderia ser ampliado apenas aumentando a potência da antena transmissora, isto é, se fosse alargada a abertura entre as esferas do transmissor onde ocorria a faísca. No entanto, Braun verificou que essa abertura tinha um limite além do qual a potência diminuía ao invés de aumentar. Foi, então, que teve a idéia de construir um circuito para a antena transmissora e que, todavia, não produzisse faísca. Ele o fez de tal modo que a potência do transmissor era obtida por intermédio desse circuito, por um efeito de indutância magnética, diferentemente do utilizado por Marconi. Esse tipo de antena foi por ele patenteada em 1899 e, graças a ela o alcance de transmissão *broadcasting* (*radiodifusão*) foi aumentado, o que permitiu um melhor desenvolvimento do *rádio* (incluindo *radiotelegrafia*, *radiotelegrafia*) e, posteriormente, também, do *radar e da televisão*²⁷.

Uma outra descoberta de Braun (importante para o desenvolvimento da indústria de telecomunicações), ele o fez em 1874, ocasião em que estudava os cristais de sulfetos metálicos como, por exemplo, o sulfeto de chumbo (PbS) - a *galena*. Descobriu que esses cristais conduzem corrente elétrica em uma só direção. No entanto, essa descoberta não teve imediata aplicação prática, até que o engenheiro elétrico norte-americano Greenleaf Whittier Pickard (1877-1956), em 1906, a utilizou como um receptor de rádio, ao descobrir que o contacto entre um fio metálico e a superfície de certos cristais (notadamente o silício) retificam e demodulam correntes alternadas de alta-freqüência, tais como as produzidas em uma antena receptora de ondas de rádio²⁸.

Antes do *crystal detector* de Pickard (o primeiro dispositivo eletrônico semicondutor), um dispositivo eletrônico usado como retificador foi inventado pelo engenheiro eletrônico inglês Sir John Ambrose Fleming (1849-1945)²⁹, em 1904, o chamado *diodo a vácuo*, *válvula* ou *tubo termiônico* (*kenotron*). Devido à pouca eficiência do *coesor* (vide nota (21)) usado como detector de sinais de telegrafia sem fio, Fleming, enquanto consultor da Companhia de Marconi (antes, ele havia sido também consultor da Companhia de Edison, em Londres), começou a pesquisar no sentido de melhorar

a recepção de sinais telegráficos.

Desse modo, Fleming tomou um tubo rarefeito e inseriu no mesmo duas placas metálicas: uma, o catodo, era eletricamente negativo em relação a outra placa, o anodo. Em seguida, o catodo era aquecido (por *efeito joule*), à incandescência, por uma bateria adequadamente colocada, de modo que os elétrons arrancados ao catodo (por *efeito Edison*) eram emitidos em um feixe contínuo para o anodo³⁰. Contudo, quando esse tubo era inserido no circuito de uma antena receptora de telegrafia sem fio, o anodo tornava-se alternadamente, positivo e negativo devido aos sinais de rádio de alta frequência recebidos. Em vista disso, os elétrons eram atraídos ao anodo no ciclo positivo e eram repelidos, no ciclo negativo. Em consequência disso, a *válvula termiônica* de Fleming (conforme ele próprio a denominou), funcionava como um retificador e, também, como um detector para radiofrequência. Então, a corrente assim retificada era capaz de operar um receptor telefônico ou outro qualquer dispositivo registrador³¹.

A procura da melhora na recepção de sinais telefônicos foi o que, também, levou o engenheiro eletrônico norte-americano Lee De Forest (1873-1961) a inventar em 1907, o *triódio a vácuo*. Inicialmente, começou a trabalhar com tubos rarefeitos contendo dois eletrodos, a semelhança de Fleming. Contudo, ao incorporar uma *grade* entre o catodo e o anodo e, ao conectá-la com o pólo negativo de uma bateria (para torná-la mais negativa que o catodo aterrado), observou que ela poderia controlar o fluxo de elétrons entre o catodo e o anodo³², melhor do que o diodo de Fleming, pois neste, esse controle era feito apenas aquecendo ou resfriando o catodo.

Quando De Forest conectou a antena receptora de telefonia sem fio à grade de seu dispositivo (ao qual denominou, na ocasião, de *tubo audion*), observou que o mesmo não só retificava os sinais de rádio de alta frequência recebidos, assim como, também, os *amplificava*³³. Mais tarde, em 1912, ao conectar seus *audions* em "cascata", obteve com eles maior amplificação do sinal de rádio, em relação ao que conseguira com apenas um deles: acabara, dessa maneira, de inventar a primeira *válvula amplificadora*. Ao continuar

suas pesquisas com o triódio, De Forest descobriu que, além de retificar e amplificar as ondas hertzianas, esse dispositivo poderia, também, atuar como oscilador, significando isso dizer que o mesmo poderia gerar ondas eletromagnéticas (hertzianas). Desse modo, construiu um circuito triódio oscilante, chamado por ele de *ultraudion*. Este, posteriormente, foi bastante usado pela Marinha dos Estados Unidos da América do Norte³⁴.

Apesar do grande sucesso das válvulas de Fleming e de De Forest em relação ao *coesor*, as mesmas apresentavam uma vida média curta, em torno de 50 horas. Em vista disso, o físico norte-americano Harold de Forest Arnold (1883-1933), então pertencente ao "staff" da *American Telephone and Telegraph Company*, deduziu que essa instabilidade das válvulas a vácuo devia-se à ionização do gás residual nas mesmas. Assim, em 1913, Arnold substituiu os catodos de tântalo (nos triodos usados por De Forest), por catodos de tungstênio revestidos de óxido de tório (para facilitar a emissão termiônica) e, ao produzir nesses triodos um alto vácuo, construiu um triódio cuja vida média era de 1000 horas. Com isso, Arnold tornou possível, e pela primeira vez, a telefonia de longa distância³⁵.

Ao mesmo tempo que Arnold, porém, independentemente, o químico e físico norte-americano Irving Langmuir (1881-1957; PNQ, 1932) ao estudar a emissão termiônica no vácuo, demonstrou ser "a emissão de elétrons por catodos metálicos incandescentes, uma propriedade do próprio metal de que é feito o catodo, e não apenas um efeito secundário devido à presença do gás"³⁶. Em vista disso, Langmuir inventou um triódio de alto vácuo (com filamento de tungstênio), que apresentava uma vida média longa, assim como, também, uma boa característica de emissão³⁷.

Em 1919³⁸, o físico suíço-alemão Walter Schottky inventou o *tetrodo* ao inserir uma nova grade - a *grade de blindagem* - entre a grade e o anodo no triódio de De Forest. Esse novo eletrodo tinha a finalidade de reduzir a capacitância parasita total (ruído) relativamente alta que ocorria entre a grade e o anodo³⁹. Os ruídos nas válvulas a vácuo também foram objeto de investigação por parte do físico norte-americano Albert Wallace Hull (1880-1966). Como Schottky, Hull também inseriu no

triodo uma placa "screen", para eliminar os indesejados ruídos. Além disso, uma outra invenção famosa de Hull⁴⁰ foi o *Thyratron*, ocorrida em 1929. Esse dispositivo eletrônico era composto de um tubo cheio de gás, e foi originalmente concebido para converter corrente alternada em corrente contínua, em transmissões de alta potência. No entanto, esse aparelho foi melhor utilizado no controle eletrônico em transmissões de média potência⁴¹. Em 1926, G. Jobst e B. D. H. Tellegen inventaram o pentodo ao inserirem uma nova grade - a *grade supressora* - entre a grade de blindagem e o anodo. O papel desse novo eletrodo era o de reduzir a emissão de elétrons secundários por parte do anodo quando esse dispositivo operasse em alta voltagem⁴².

Nas décadas de 1930 e 1940 novos eletrodos (como, por exemplo, a *conversora pentagrade*) foram inseridos nesses dispositivos eletrônicos genericamente chamados de *válvulas a vácuo*, com o objetivo de melhorar cada vez mais suas aplicabilidades nos circuitos eletrônicos. Contudo, essas *válvulas multi-eletródicas* (e, também, as *válvulas múltiplas*, que contém no mesmo envólucro, diodos e triodos) foram gradativamente substituídas pelos *dispositivos semicondutores*, descobertos em dezembro de 1947 (*transistores de ponta* ("bigode de gato"), pelos físicos norte-americanos John Bardeen (1908-1991; PNF, 1956, 1972) e Walter Houser Brattain (1902-1987; PNF, 1956)) e em janeiro de 1948 (*transistores de junção*, pelo físico norte-americano William Shockley (1910-1989; PNF, 1956)), os quais serão objeto de estudo em outra Crônica desta série que trata da Física do Estado Sólido⁴³.

Agradecimentos

Agradeço ao meu amigo Orlando José Carvalho de Moura, professor do Departamento de Física da Universidade Federal do Pará, pelas observações críticas feitas a este trabalho, e a minha mulher, Célia Coelho Bassalo, também professora da UFPA, pela leitura deste texto. Agradeço, também, ao Núcleo de Geofísica Aplicada Prospecção de Petróleo da UFPA, na pessoas de meus amigos, os professores Carlos Alberto Dias, seu Diretor, e André Luiz Oliveira, seu Secretário-Executivo, pelo uso e ensino do editor de texto

PCTEX, bem como pela impressão a laser deste texto. O seu conteúdo, contudo, é de minha inteira responsabilidade.

Notas e Referências Bibliográficas

1. Sobre as experiências de Torricelli e Pascal vejamos: KOYRÉ, A. 1982. *Estudos de História do Pensamento Científico*. Editora da Universidade de Brasília e Forense Universitária; BASSALO, J. M. F. 1992. *Crônicas da Física*. Tomo 3. GEU/UFPA; MARTINS, R. A. 1989. *Cad. Hist. Fil. Cienc.*, Série 2, Volume 1, Número Especial, 9: 47.
2. As experiências realizadas por von Guericke sobre vácuo, bem como a construção de sua bomba de vácuo, foram relatadas em seu livro *Otonis de Guericke Experimenta nova (ut vocantur) Magdeburgica de Vacuo Spatio*, editado em 1672. Sobre detalhes dessas experiências, assim como excertos desse livro, vejamos: MACH, E. 1974. *The Science of Mechanics*. The Open Court Publishing Company; MAGIE, W. F. (Editor). 1935. *A Source Book in Physics*. McGraw-Hill Book Company, Inc.
3. Boyle descreveu suas experiências sobre vácuo no livro *New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air and its Effects (Novas Experiências Físico-Mecânicas, Concernentes à Elasticidade do Ar e seus Efeitos)*, publicado, em primeira edição ocorrida em 1660 e, em 1662, em segunda edição. Aliás, foi no Apêndice da segunda edição desse livro que apresentou sua famosa *lei de Boyle*. Contudo, como o físico francês Edmé Mariotte (1620-1684) descreveu, em 1676, no artigo intitulado *Discours de la Nature de l'Air (Discurso sobre a Natureza do Ar)* (no qual cunhou a palavra *barômetro*), essa mesma lei, usando um aparelho de vácuo semelhante ao de Boyle, é hoje conhecida como *lei de Boyle-Mariotte*. (GIBERT, A. 1982. *Origens Históricas da Física Moderna*. Fundação Calouste Gulbenkian; BASSALO, op. cit.; MACH, op. cit.)

4. GIBERT, op. cit.
5. Parece haver sido o físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867) o primeiro a fazer experiências sobre descarga elétrica nos gases rarefeitos. Com efeito, em 1833, observou que "a rarefação do ar favorece extremamente fenômenos de incandescência". Aliás, foi nesse mesmo ano de 1833, que Faraday descobriu o fenômeno da *eletrólise*, ao observar que a corrente elétrica através de soluções químicas metálicas, faz com que os metais dissociados dessas soluções se depositem em barras metálicas nelas colocadas, barras essas denominadas pelo filósofo inglês William Whewell (1794-1866) de *eletrodos: anodo (+) e catodo (-)*. Mais tarde, em 1838, Faraday observou, também, uma região escura próxima ao anodo, região essa posteriormente conhecida como *espaço escuro de Faraday*. (É interessante ressaltar que o fenômeno da *eletrólise* só foi explicado pelo químico e físico sueco Svante August Arrhenius (1859-1927; PNQ, 1903) com a sua *teoria iônica*, desenvolvida em 1884, segundo a qual os íons constituintes da corrente elétrica através de uma solução eletrolítica, nada mais eram do que átomos carregados de eletricidade.) (SEGRÈ, E. 1987. *Dos Raios-X aos Quarks*. Editora da Universidade de Brasília; GIBERT, op. cit.)
6. WHER, M. R. e RICHARD Jr., A. 1965. *Física Átomo*. Ao Livro Técnico, S. A.
7. SEGRÈ, op. cit.
8. Segundo Segrè (op. cit.), o vácuo atingido por Crookes - (40×10^{-3} mm de Hg) era cerca de um milhão de vezes mais elevado do que o existente hoje nos grandes aceleradores modernos, o que lhe fez especular a maneira como Crookes o mediu. (É oportuno registrar que o físico alemão Wilhelm Konrad Roentgen (1845-1923, PNF, 1901) usou um dispositivo similar a *ampola de Crookes*, por ocasião da descoberta dos *raios-X*, em 1895.)
9. Muito embora Edison seja, pela mídia, historicamente considerado o inventor da lâmpada elétrica de filamento incandescente, a idéia sobre essa invenção já havia sido testada anteriormente. Com efeito, em 1854, o mecânico alemão Heinrich Göbel construiu a primeira lâmpada incandescente com filamento de bambu. Em 1877, o inventor norte-americano W. E. Sawyer patenteou esse mesmo tipo de lâmpada, porém, com filamento de madeira ou papel. Por fim, em 1878, o inventor inglês Joseph Wilson Swan (1824-1914) apresentou, numa reunião da Sociedade Química de Newcastle-on-Tyne, uma lâmpada com um fino filamento de carbono no vácuo. (DE BONO, E. (Editor). 1975. *Eureka!* Editorial Labor do Brasil, S. A.; HANDEL, S. 1967. *The Electronic Revolution*. Penguin Books; KISTNER, A. 1934. *Historia de la Física*. Editorial Labor, S. A.)
10. HANDEL, op. cit.
11. A *fluorescência* é um dos aspectos do fenômeno da *luminescência*, que é a re-emissão de radiação luminosa por parte de alguns corpos quando iluminados pela radiação eletromagnética. O outro aspecto desse fenômeno é a *fosforescência*. Esses dois aspectos diferem apenas no tempo que levam para re-emitir a luz: 10^{-8} s para a fluorescente e 10^{-3} s, dias ou mesmo anos, para a fosforescente. O nome *fluorescência* foi cunhado pelo físico e matemático inglês Sir George Gabriel Stokes (1819-1903), em 1852, ao observar que a fluorita (fluoreto de cálcio) emite luz violeta quando iluminada pela radiação ultravioleta. O nome *fosforescência* foi dado ao ser observada uma luminescência persistente no elemento fósforo. É oportuno enfatizar que a primeira observação de um fenômeno *luminescente* foi feita pelo sapateiro-alquimista italiano Vincenzo Cascariolo (1571-1624), ao observar a existência de uma luz persistente azul-púrpura nos resíduos de queima de um minério conhecido como barita (sulfato de bário). (BARROS, F. S. 1982. *Ciência Hoje*, 1(2):50-55.)
12. GIBERT, op. cit.
13. Por exemplo, o físico húngaro-alemão Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947; PNF, 1905) que era partidário da teoria corpuscular dos raios catódicos, começou suas experiências sobre esse tipo de raios, em 1894, ocasião em que cons-

- truiu na ampola de Crookes, janelas de alumínio - as conhecidas *janelas de Lenard* - pelas quais o catodo era iluminado com radiação eletromagnética e, também, pelas quais os raios catódicos saíam para o ar livre. É oportuno registrar que foi Lenard, em experiências realizadas entre 1899 e 1902, quem esclareceu o fenômeno *fotolétrico*, pelo qual uma radiação eletromagnética, ao incidir em certas substâncias, produz uma emissão de elétrons. Esse fenômeno havia sido observado em 1872 pelo físico russo Alexander Grigoryevich Stoletov (1839-1896) e confirmado por Hertz, em 1887. Mais tarde, em 1888, o físico alemão Wilhelm Hallwachs (1859-1922), também o observou. (GIBERT, op. cit.; KISTNER, op. cit.)
14. O nome *elétron* foi cunhado pelo físico irlandês George Johnstone Stoney (1826-1911), em 1891, ao calcular a quantidade mínima de carga elétrica, combinando a lei da *eletrólise* de Faraday (1833), o *número de Avogadro* (1811) e o *número de Loschmidt* (1865). (GIBERT, op. cit.)
 15. O físico alemão Emil Johann Wiechert (1861-1928) realizou, meses antes, uma experiência análoga a essa de Thomson. (HALLIDAY, D. e RESNICK, R. 1981. *Física 3*. Livros Técnicos e Científicos Editora.)
 16. SEGRÈ, op. cit.
 17. Foram esses *ratos positivos* que vieram a ser utilizados pelo químico e físico inglês Francis William Aston (1877-1945; PNQ, 1922) na invenção de seu *espectrógrafo de raio positivo* ou *espectrômetro de massa*, em 1919. (É oportuno registrar que o primeiro *espectrógrafo de massa* foi construído pelo físico norte-americano Arthur Jeffrey Dempster (1886-1950), em 1918.) (GIBERT, op. cit.; ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Micropaedia, Volume 4. The University of Chicago, 1988.)
 18. Antes, em 1893, o físico francês André-Eugène Blondel (1863-1938) havia inventado o *oscilógrafo eletromagnético*, um dispositivo que permitia medir a intensidade das correntes alternadas. Ele aperfeiçoou dois tipos: o "soft iron" (ferro doce) e o bifilar. (PAYEN, J. 1981. *Dictionary of Scientific Biography*. Charles Scribner's Sons, N. Y.; ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Micropaedia, Volume 2. The University of Chicago, 1988.)
 19. KURYLO, F. and SÜSSKIND, C. 1981. *Ferdinand Braun*. The MIT Press; HANDEL, op. cit.
 20. Essa bobina é um tipo de *bobina de indução* e foi inventada, em 1851, pelo mecânico e electricista alemão Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803-1877). (GIBERT, op. cit.)
 21. O *radiocondutor* de Branly era um tubo de vidro (cheio de limalhas de ferro e de alumínio) ligado a uma bateria e a um dispositivo para detectar corrente. Normalmente, nenhuma corrente poderia passar através dessas peças metálicas, devido ser alta a resistência oferecida pelas mesmas. Porém, essas peças se tornavam condutoras ao serem atingidas por ondas hertzianas (por exemplo, faíscas elétricas), permitindo, desse modo, amplificar o efeito. Contudo, a resistência desse dispositivo era restabelecida por intermédio de um choque mecânico, produzido por um eletro-íma, munido de uma peça chamada "martelo". (Registre-se que o físico italiano F. Calzecchi-Onesti (1853-1922), em 1885, já havia feito uma descoberta análoga a essa de Branly.) (EVANS, G. E. 1975. *Eureka!* Editorial Labor do Brasil, S.A.; SEDGWICK, W. T., TYLER, H.W. e BIGELOW, R. P. 1950. *História da Ciência*. Editora Globo; RADOVSKY, M. 1957. *Alexander Popov, Inventor of Radio*. Foreign Languages Publishing House; KISTNER, op. cit.)
 22. KISTNER, op. cit.; KURYLO and SÜSSKIND, op. cit.; SEDGWICK, TYLER e BIGELOW, op. cit.
 23. Existe, entre os historiadores da Ciência, uma certa controvérsia sobre o contacto de Marconi com os trabalhos de Hertz. Uns autores (por exemplo, WEBER, R. L. 1980. *Pioneers of Science: Nobel Prize Winners in Physics*. The Institute of Physics, Bristol and London; CHIPMAN, R. A. in *Dictionary of Scientific Biography*) consideram que Marconi trabalhou no laboratório de

Hertz. Outros (por exemplo, HANDEL, op. cit.) afirmam que Marconi leu, em um "Jornal Italiano sobre Eletricidade", sobre as experiências de Hertz.

24. A primeira tentativa (com certo êxito) de emitir sinais por meio da eletricidade foi obtida pelo inventor norte-americano Samuel Finley Breese Morse (1791-1872), em 1836, com a idéia básica de que um circuito elétrico estabelecido ou interrompido em um determinado ponto, é igualmente estabelecido ou interrompido nos demais pontos do circuito. Em 1838, o próprio Morse estabeleceu um código - o famoso *código Morse* constituído de pontos (.) e traços (-) para emitir sinais através do *telégrafo com fio*. Antes de Morse, várias tentativas foram feitas no sentido de inventar esse tipo de telégrafo, segundo nos contam KISTNER (op. cit.), SEDGWICK, TYLER e BIGELOW (op. cit.) e TAYLOR, G. R. (in *Eureka!*, op. cit.)
25. Nesse mesmo ano de 1895, o físico russo Alexander Stepanovich Popov (1859-1905) conseguiu detectar descargas elétricas atmosféricas usando, para isso, um coesor acoplado galvanicamente a um pára-raios. Em virtude disso, Popov é considerado o inventor da *primeira antena*. (Na Rússia, ele é conhecido como o inventor do *rádio*.) Por outro lado, em 1897, ao produzir ondas de faíscas elétricas, Popov pôde transmitir (sem fios) sinais de Morse por uma distância de 4 km e, com isso, conseguiu orientar os navios da Armada Russa, fazendo a comunicação dela com o litoral. (BAS-SALO, J. M. F. 1987. *Crônicas da Física*. Tomo 1. GEU/UFGA; KISTNER, op. cit.; RADOVSKY, op. cit.)
26. Marconi continuou com suas pesquisas no sentido de desenvolver a hoje conhecida *Telegrafia Sem Fio*. Com efeito, em 1897, auxiliado por seu primo irlandês Henry Jameson Davis, fundou a *Wireless Telegraph and Signal Company Ltd.*, a qual se transformou, em 1900, na *Marconi's Wireless Telegraph Company Ltd.* Em 1899, com uma antena de 45 metros de altura, conseguiu enviar mensagens telegráficas pelo ar, através do canal da Man-

cha, por uma distância de 51,2 km. Ao conseguir transmitir mensagens por uma distância de 240 km, em 1901, Marconi decidiu tentar uma transmissão transatlântica. Desse modo, construiu um potente transmissor em Poldhu, Cornwall, Inglaterra e, por sua vez, instalou uma antena bem alta em Cabo Cod, Massachusetts, nos Estados Unidos da América do Norte. No entanto, ansioso para vencer qualquer competidor (e, também, para refutar a hipótese levantada por muitos cientistas de que a transmissão de ondas eletromagnéticas (OEM) por longas distâncias só poderiam ser recebidas por antenas bastante altas (impraticáveis naquele momento), devido ser retilínea a trajetória seguida pela OEM), Marconi seguiu para St. John's Newfoundland, distante 2720 km de Poldhu, Cornwall. Ali, levantou, por intermédio de um "papagaio", um receptor telefônico tipo solari de carbono-aço e, no dia 12 de dezembro de 1901, recebeu a primeira comunicação sem fio e transatlântica: uma letra S em código Morse (...), enviada de Poldhu. (Em reconhecimento às suas pesquisas, o governo italiano concedeu a Marconi, em 1929, o título de Marquês. O Brasil também deve a Marconi um grande reconhecimento por haver ele, no dia 12 de outubro de 1931 e a bordo de seu iate *Electra*, fundeado no porto de Gênova, acionado pessoalmente o sistema de iluminação do Cristo Redentor, no Rio de Janeiro.) É oportuno esclarecer que os primeiros sucessos de Marconi, com relação à telegrafia sem fio, fizeram com que os físicos, o inglês Oliver Heaviside (1850-1925) e o norte-americano Arthur Edwin Kennelly (1861-1939), independentemente e, em 1902, formulassem a teoria de que havia uma camada refletora em torno da Terra - a hoje conhecida *camada Kennelly-Heaviside* ou *região E* - que permitiu a transmissão transatlântica feita por Marconi. Em 1925, o físico inglês Sir Edward Victor Appleton (1892-1965; PNF, 1947) demonstrou não só, a existência da *camada Kennelly-Heaviside*, mas, também, de outras abaixo e acima dela, que constituem o que hoje se denomina de

ionosfera. Essa camada, que se estende de 88 a 320 km, consiste, basicamente, de íons carregados positivamente e de elétrons livres. A descoberta dessa camada tornou possível o desenvolvimento do *radar*. (ASIMOV, I. 1972. *Gênios da Humanidade*. Bloch Editores; CHIPMAN, op. cit.; HANDEL, op. cit.; WEBER, op. cit.; ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Micropaedia, Volumes 1 e 6. The University of Chicago, 1988.)

27. Outras contribuições ao desenvolvimento do *rádio* (incluindo a *radiotelegrafia* e a *radiotelefonía*), devem-se ao físico canadense-norte-americano Reginald Aubrey Fessenden (1866-1932). Com efeito, em 1902, demonstrou ser o *princípio heteródino* (interferência de ondas de frequências diferentes produzindo pulsações (batimentos) usado na conversão de sinais de rádio de alta frequência em baixa frequência), mais facilmente controlado e amplificado. Logo depois, em 1903, Fessenden patenteou a invenção de um detector eletrolítico que era mais sensível do que os primitivos detectores de radiotelegrafia. Esses seus trabalhos levaram à invenção de *detectores heteródinos* e *superheteródinos* (estes (apoiados no *princípio superheteródino* sobre o qual se baseia a afinação de sinais de rádio) foram inventados pelo engenheiro eletricista norte-americano Edwin Howard Armstrong (1890-1954)). (É oportuno registrar que o físico sueco Nils Gustaf Dalén (1869-1937; PNF, 1912) inventou reguladores automáticos *Solventil* - válvula solar automática -, usados em conjunto com acumuladores gasosos, o que permitiu a sinalização costeira automática. Por essa razão, Dalén foi considerado o "benfeitor dos marinheiros".) Armstrong também inventou o *rádio FM* (frequência modulada), para eliminar problemas de interferência, depois de pesquisar esse assunto desde 1914 até 1933. Contudo, a FM apresentava uma grande dificuldade, já que funcionava apenas em altas frequências, o que limitava seu alcance. Devem-se ainda a Fessenden, as primeiras idéias (apresentadas em 1904) sobre a sondagem de objetos em profundidade através da emissão,

reflexão e recepção de pulsos de oscilações produzidos por dispositivos de radiotelegrafia. (Antes, em 1900, o inventor russo-norte-americano Nikola Tesla (1856-1943) havia sugerido que se poderia localizar navios em movimento por meio de um raio refletido neles.) Contudo, a possibilidade de se detectar objetos em movimento, só foi demonstrada pelo físico escocês Sir Robert Alexander Watson-Watt (1892-1973), na década de 1930. Por exemplo, em 1935, este físico foi capaz de detectar aviões a uma distância de 70 milhas, enviando ondas de rádio em sua direção e recebendo-as depois das respectivas reflexões. Essa distância foi obtida multiplicando-se a velocidade das ondas pela metade do tempo gasto entre a emissão, reflexão e recepção dessas mesmas ondas. Esse tipo de cálculo é o princípio do *radar* (RADio Detection And Ranging - nome cunhado pela Marinha dos Estados Unidos) e do *sonar* (SOund NAVigation Ranging). O sucesso de Watson-Watt levou à construção de uma cadeia de estações de radar cobrindo a zona oriental da Inglaterra, e provou sua eficácia no primeiro ataque aéreo alemão na "Segunda Guerra Mundial", quando um avião foi detectado e abatido, por ocasião da *Batalha da Inglaterra*, em 1940. Com relação à *televisão - TV*, uma das primeiras idéias de transmissão de imagens à distância foi apresentada pelo engenheiro alemão Paul Gottlieb Nipkow (1860-1940), em 1884, ao inventar um disco giratório o *disco de Nipkow* - para fazer a transmissão mecânica da imagem de um objeto. No entanto, a primeira transmissão (mecânica) prática de TV, somente foi feita pelo engenheiro escocês John Logie Baird (1888-1946), em 1925, ao transportar a imagem de uma habitação a uma outra contígua. Nessa transmissão, incluiu, também, rostos humanos. Em 1926, demonstrou a possibilidade de transmitir a imagem de objetos em movimento e, em 1928, apresentou um sistema de *televisão a cores*. Contudo, a *televisão moderna*, baseada na eletrônica, decorreu das pesquisas do engenheiro eletrônico e inventor russo-norte-americano Vladimir Kosma

- Zworykin (1889-1982). Em 1923, patenteou o *iconoscópio* (do grego: *eikon* - imagem e *skopein* - ver), que é um tubo termiônico captador de imagens, sendo estas focadas por uma lente sobre uma placa alvo, com propriedades fotoelétricas. Logo depois, em 1924, inventou o *cinescópio* (do grego: *kines* - movimento e *skopein* - ver), que é um tubo reprodutor de imagens e, em 1928, patenteou um sistema de *televisão a cores*. Em 1932, I. Shoenberg e A. D. Blumlein melhoraram o iconoscópio adaptando ao mesmo, uma câmara denominada de *Emitron*. É oportuno esclarecer que Zworykin também realizou melhorias no *microscópio eletrônico* que o engenheiro alemão Ernst August Friedrich Ruska (1906-; PNF, 1986) havia inventado em 1933. Ruska e Zworykin usaram o fato de que os elétrons apresentavam um caráter dual, *onda-partícula* (hipótese essa formulada em 1923, pelo físico francês, o Príncipe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987; PNF, 1929)) e, por isso, os elétrons poderiam ser usados para observar objetos, com mais detalhes, já que seu comprimento de onda era muito menor do que o da luz visível utilizada nos microscópios ópticos. Por volta de 1939, Zworykin usou um aparelho desse tipo que ampliava 50 vezes mais do que o mais potente dos microscópios ópticos. A esse tipo de microscópio, sucedeu o *microscópio de tunelamento de varredura*, inventado pelos físicos alemães, Gerd Binnig (1947-; PNF, 1986) e Heinrich Rohrer (1933-; PNF, 1986), em 1981. Esse microscópio, que ainda é baseado no caráter dual, *onda-partícula* do elétron, permite examinar a superfície de sólidos, átomo por átomo. (ASIMOV, I. 1984. *The History of Physics*. Walker and Company; ASIMOV (1974), op. cit.; SHARLIN, H. I. In: *Dictionary of Scientific Biography*, op. cit.; CALDER, R. In: *Eureka!*, op. cit.; MERGERISON, T. In: *Eureka!*, op. cit.; HANDEL, op. cit.; WEBER, op. cit.; ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. *Micropaedia*, Volumes 1, 2, 4, 8, 10, 12. The University of Chicago, 1988.)
28. ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. *Micropaedia*, Volumes 2 e 9. The University of Chicago, 1988; PROGRAMA DE CIÊNCIA EXITUS. ENCYCLOPÉDIA ILUSTRADA, Volume V. Companhia Melhoramentos de São Paulo, 1975; HANDEL, op. cit.
29. Fleming teve uma vida científica muito ativa. Por exemplo, leu seu primeiro trabalho por ocasião da fundação da *Royal Society of London*, em 1874, e seu último trabalho ainda nessa mesma Sociedade, em 1939. Recebeu várias honrarias, tais como a *Medalha Hughes da Royal Society*, em 1910; a *Medalha Faraday* do Instituto de Engenheiros Elétricos (1928) e a *Medalha de Ouro* do Instituto de Engenharia de Rádio (1933). Era também um excelente professor e, a *regra da mão direita*, pela qual se determina o sentido do campo magnético criado por uma corrente elétrica em um circuito, é atribuída a ele. (Segundo essa regra, envolve-se o circuito percorrido pela corrente com a mão direita, de tal modo que o dedo indicador aponte no sentido da corrente; então, o sentido do campo magnético é dado pela dobra dos demais dedos.) (SÜSSKIND, C. In: *Dictionary of Scientific Biography*, op. cit.)
30. O tubo de Fleming apresentava uma grande vantagem em relação ao *tubo de Crookes* pois, neste, a emissão de elétrons é devida ao *efeito de campo*, para a qual é necessária uma voltagem alta (da ordem de kilovolts). Por sua vez, no *tubo de Fleming*, a emissão de elétrons ocorre por *efeito Edison*, para a qual se necessita, apenas, de uma voltagem baixa (da ordem de volts).
31. ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. *Micropaedia*, Volume 4. The University of Chicago, 1988; HANDEL, op. cit.
32. O princípio da *grade* já havia sido utilizado por Leonard em suas pesquisas sobre movimento e natureza dos elétrons liberados de um catodo de zinco ao ser iluminado com luz ultravioleta. (HANDEL, op. cit.; KISTNER, op. cit.)
33. Em 1910, De Forest conseguiu transmitir a apresentação do grande tenor italiano Enrico Caruso (1873-1921), feita no *Metropolitan Opera Associ-*

- ation, de Nova York. (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Micropaedia, Volumes 2 e 3. The University of Chicago, 1988.)
34. ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Micropaedia, Volume 3. The University of Chicago, 1988; HANDEL, op. cit.; SÜSSKIND, op. cit.
 35. HANDEL, op. cit.; SÜSSKIND, op. cit.
 36. Ao estudar a emissão termiônica de elétrons em superfícies metálicas incandescentes, Langmuir demonstrou, em 1913, que a densidade de corrente elétrica (J) entre os eletrodos era proporcional à potência $3/2$ da voltagem (V) isto é: $J \propto V^{3/2}$, qualquer que fosse a forma dos eletrodos. Como anteriormente, em 1911, Clement Dexter Child havia também demonstrado uma relação semelhante para íons, essa equação é conhecida como equação de Child-Langmuir. Maiores detalhes sobre a emissão termiônica de elétrons serão vistos em outra parte desta Crônica da Física do Estado Sólido, quando tratarmos da Teoria dos Metais. (MARION, J. B. 1972. *Classical Electromagnetic Radiation*. Academic Press; SÜSSKIND, op. cit.)
 37. HANDEL, op. cit.
 38. SCHOTTKY, W. 1919. *Arch. f. Elektrot.*, 8 :1.
 39. Schottky deu outras contribuições à Física do Estado Sólido. Por exemplo, ao estudar a emissão termiônica, observou que a mesma é aumentada quando um campo elétrico atua na superfície emissora. Desse modo, a dependência da densidade de corrente (J) com o campo elétrico (E) é conhecida como efeito Schottky. Há, também, contribuições de Schottky no estudo de cristais, principalmente no que se relaciona à ausência de átomos numa estrutura cristalina (*vacâncias*) ou à presença de átomos estranhos na mesma (*defeitos*). Em 1930, Schottky e B. Lange explicaram teoricamente o efeito fotovoltáico, tornando-o prático. Schottky aperfeiçoou, também, a fotocélula (que P. H. Geiger havia construído, em 1926), aplicando-lhe uma película metálica transparente muito delgada. Detalhes desses trabalhos de Schottky serão estudados em outras partes desta Crônica da Física do Estado Sólido. (HARNWELL, G. P. 1966. *Principles of Electricity and Electromagnetism*. McGraw-Hill Book Company, Inc.; SPANGENBERG, K. R. 1957. *Fundamentals of Electron Devices*. McGraw-Hill Book Company, Inc.; KISTNER, op. cit.)
 40. Hull também ficou conhecido pelo trabalho sobre "o efeito do campo magnético uniforme sobre o movimento de elétrons entre cilindros coaxiais", publicado em 1921. Construiu, também, o *mag-netron*, um oscilador utilizado para gerar microondas. (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Micropaedia Volume 6. The University of Chicago, 1988; SÜSSKIND, op. cit.)
 41. SÜSSKIND, op. cit.
 42. HANDEL, op. cit.; SPANGENBERG, op. cit.
 43. HANDEL, op. cit.; WEBER, op. cit.