

Resenha de Livro

Bohr: O Arquiteto do Átomo, por M. C. Abdalla, Odysseus, São Paulo, 2003

Book review: Bohr: The Architect of the Atom, by M.C. Abdalla

V. Pleitez¹

Instituto de Física Teórica, Universidade Estadual Paulista

Rua Pamplona, 145, 01405-900, São Paulo, SP, Brazil

Recebido em 16 de maio, 2003. Aceito em 2 de junho, 2003

A maturidade da ciência em um país pode ser medida em termos da produção bibliográfica de temas científicos no próprio idioma, seja em livros técnicos ou de divulgação científica. Assim, a efervescência editorial de livros de divulgação no Brasil deve ser vista com otimismo e alegria por todos e com preocupação pelos autores: a tarefa de escrever para o grande público não é fácil.

No que se refere à literatura de divulgação científica cabe destacar que recentemente saíram os primeiros livros da série *Imortais da Ciência*, coordenada pelo físico Marcelo Gleiser e publicada pela editora Odysseus de São Paulo. Um deles, *Bohr, O Arquiteto do átomo*, de M. C. Abdalla [AB02] será o tema dessa resenha. Ainda que a série pareça dirigida para adolescentes, os professores destes também deverão lê-lo e, mais ainda, deverão ler mais um pouco sobre a obra científica de Bohr. Acredito que nesse ponto uma revista como a RBEF tem um papel importante fornecendo maior informação para professores do ensino médio e superior. A eles dirijo essa resenha.

Fazer uma lista de cientistas cujas contribuições à ciência os coloca na lista dos *Imortais* parece simples mas não é. Por exemplo, a maioria de nós estaria de acordo que Bohr deve, sem dúvida nenhuma, pertencer à lista. Mas na prática as coisas podem não ser triviais. Abraham Pais, que talvez seja o biógrafo mais autorizado de Bohr [PA91], e também de Einstein [PA95], conta que no início dos anos 80 teve a seguinte conversa com um amigo dele (segundo as suas próprias palavras esse amigo era “um dos melhores e mais conhecidos físicos da minha geração, a geração que se seguiu à de Heisenberg” [PA96, PA86]),

“Você conheceu muito bem o Bohr — disse ele. É verdade — concordei. Então diz-me — perguntou-me — o que fez efetivamente Bohr? Bem — repliquei-lhe —, em primeiro lugar, ele foi um dos pais fundadores da teoria quântica. Eu sei — respondeu ele —, mas esse trabalho foi suplantado pela mecânica quântica. — Com certeza, respondi-lhe. E continuei a explicar-lhe o papel de Bohr na mecânica quântica, em particular a sua introdução do conceito de complementaridade. Isto descobri, não era completamente claro para meu amigo. O que fez efetivamente Bohr? Por que razão não é a com-

plementaridade, que ele próprio considerava a sua maior contribuição, mencionada em alguns dos melhores manuais de física, como o de mecânica quântica escrito por Dirac...?”²

Vemos que uma escolha de *Imortais* pode não ser evidente para alguns. Por outro lado temos outros nomes que indiscutivelmente também estariam na lista de *Imortais* como Julian Schwinger ou Enrico Fermi mas que estão esquecidos [RA03]. No entanto, deixamos aos historiadores da ciência e editores a tarefa de recuperar mais nomes que podem estar, injustiçadamente, esquecidos.

O livro da Profa. Abdalla é sem dúvida de leitura fácil e agradável para um(a) estudante do ensino médio ou mesmo para um físico profissional. Por isso não duvido em recomendá-lo a professores e estudantes de qualquer nível de ensino que desejem saber um pouco mais de algumas das “peripécias” científicas e do dia-a-dia de um dos físicos mais influentes do século que passou, o chamado o *século da física*.³

Em geral uma das dificuldades de qualquer livro de divulgação da ciência é evitar a *mistificação* da ciência, ou seja a tendência comum a todos os cientistas de repensar a história, nas palavras do historiador da física Laurie Brown, “as it should have happened” [BR78]. Tem sempre um contexto histórico (idéias e preconceitos compartilhadas pela comunidade de cientistas), precursores e, mesmo no caso dos grandes cientistas, “o preconceito mora ao lado”, e estes podem ajudar ou retardar as descobertas científicas [PL96].

Isso é intrínseco a qualquer livro, devido à falta de espaço, não há dúvida que não é possível entrar em detalhes, o autor tem de escolher os assuntos. Por outro lado isso reflete também como é ensinada a ciência. A imagem que os cientistas têm da ciência (e por isso deles mesmos) vem dos manuais onde eles aprendem seu ofício. Segundo Kuhn esses livros “nos têm enganado em aspectos fundamentais” [KU72]. Uma maneira de diminuir essa deficiência, que insistimos, uma característica geral dos livros de texto ou de divulgação, é que existam revista como RBEF onde seja possível acrescentar discussões sobre aspectos levantados por aqueles.

Os aspectos da vida e obra de Bohr escolhidos pela autora de *Bohr* preenchem diversas exigências no sentido do

¹E-mail address: vicente@iftp.unesp.br

²Pais menciona também o livro de Tomonaga sobre mecânica quântica e o vol.3 das “Lectures” de R. Feynman.

³O ano de 2005 foi recentemente declarado pela IUPAC o ano internacional da física, em comemoração ao “ano miraculoso” de Einstein, ver <http://www.WYP2005.org>.

parágrafo anterior. Bohr acertou muito, e por isso está na lista de *Imortais* mas, como qualquer cientista, também errou. E essa é a imagem que temos que transmitir ao público. É por isso achei positivo encontrar no livro, junto com a menção das descobertas de Bohr, a observação sobre alguns preconceitos que Bohr teve com relação à aceitação do fóton de Einstein. Por exemplo, após comentar o sucesso de Bohr em 1923 para conseguir financiamento para seu Instituto em Copenhague, segue “Em física Bohr não teve a mesma sorte...” e continua com a exposição do trabalho de Bohr, em colaboração com Kramers e Slater, para evitar a introdução do conceito do fóton (*Bohr* pags. 75–77). Voltaremos a este trabalho mais adiante.

A resposta à pergunta do amigo de Pais “o que fez efetivamente Bohr” está resumido nos três capítulos de *Bohr: Arquitetando o modelo atômico (1912-1922), Arquitetando a Mecânica Quântica (1923-1932), e A Mecânica Quântica e as Forças Nucleares (1932-1939)*. Nos restantes capítulos se dá ênfase a outros aspectos da vida de Bohr como a criação do NORDITA, do CERN, seu engajamento nos movimentos pacifistas, etc. Todos esses aspectos são importantes e deixamos ao leitor se convencer disso pela própria leitura do livro.

O que agora conhecemos como “teoria atômica” passou a ser reconhecida como um campo de pesquisa à parte apenas após os trabalhos experimentais de Thomson, Rutherford, Bohr e outros. Para ter uma idéia dessa novidade, podemos dizer que o modelo atômico de Thomson de 1904 apareceu na *Fortschritte der Physik* como *físico-química*, os trabalhos de Rutherford como *radioatividade e raios de Becquerel* [HE77]. Ou seja não existia ainda uma área chamada “física atômica”.

No entanto de 1897 até o aparecimento do modelo de Bohr, muitas tentativas foram feitas no que seria chamado de “o átomo clássico” [FR65]. O chamado “Programa de Thomson” foi a tentativa mais sistemática para estudar a estrutura atômica. Ele colocou esse problema de maneira precisa. De certa maneira dele saíram os vários modelos do átomo inclusive os de Rutherford e Bohr. De fato, alguns resultados de Thomson foram importantes, como a tentativa de dar uma explicação à tabela periódica dos elementos químicos. Em 1904 um comentário da revista *Science* dizia sobre essa proposta de Thomson [FR04]:

It is, perhaps, the greatest contribution to theoretical physics during a decade.

Isso poderia se repetir para o modelo atômico de Bohr quase uma década depois.

No final do Sec. XIX os físicos (principalmente ingleses) já tinham percebido as dificuldades que um “arquiteto” do átomo deveria enfrentar [HE77b, BE43]:

- A natureza das cargas positivas necessárias para neutralizar os elétrons.
- Sir Joseph Larmor (1857-1942) e Olivier Lodge (1851-1940) falavam de “elétrons positivos”. Lembremos que na época (começo do Sec. XX) apenas a

carga elétrica elementar negativa (o elétron) tinha sido identificada. Mesmo o número de elétrons presentes no átomo era discutido, sendo que um número grande $\sim 1000 - 2000$ era o preferido se se aceita a existência de “elétrons positivos” [HE77d]. O “próton” seria descoberto por Rutherford apenas em 1920.

- O número de elétrons n . Este número deveria depender do peso atômico, A .

Se for usado apenas a informação das linhas espectrais poderiam existir milhares de elétrons e os respectivos elétrons positivos para neutralizar a carga elétrica negativa. Como mencionado acima o número n poderia ser de alguns milhares se apenas fosse levado em conta o número das linhas espectrais e se associarmos a cada uma delas um grau de liberdade (do Ferro já se conheciam mais de 4 mil linhas). Foram experiências realizadas por Thomson usando espalhamentos de raios-X pela matéria (elétrons) que mostraram que $n \approx A/2$, que é um resultado bom para os elementos leves.

- O tamanho do átomo.

O que fixava o tamanho do átomo? Bohr encontraria uma resposta usando a hipótese de quantização. Alguns precursores como Arthur Erich Haas (1884-1941) e John William Nicholson (1881-1955) já haviam usado a hipótese de quantização para resolver esse problema. Haas no modelo de Thomson e Nicholson no que agora chamaríamos de “toy models” do átomo, o *coronium* e o *nebulium* que Nicholson e outros acreditavam que existiam no Sol e em nebulosas (em 1927 o astrônomo Ira Bowen mostrou que as linhas observadas, e que eram interpretadas como evidência do *nebulium*, eram devidas a transições metaestáveis de estados de oxigênio e do nitrogênio. Já o *coronium* foi posteriormente identificado como sendo ferro altamente ionizado [PA86]). Voltaremos a este assunto mais adiante.

- O equilíbrio do átomo era estático ou dinâmico? Um assunto relacionado, mas independente era o colapso radiativo. Dependendo do número de elétrons era possível ter equilíbrio, e também diminuir até termos aceitáveis a perda de energia por radiação. Nicholson foi o primeiro a colocar que o momento angular de um átomo pode mudar apenas por quantidades discretas. (O trabalho de Nicholson é uma das referências de Bohr [HE77c]. No entanto num artigo de revisão de 1918 não é mais citado.) Mas Nicholson não explicou as séries espectrais.
- As linhas espectrais dependem de ν^2 , como Lord Rayleigh acreditava, ou ao invés de o de ν ?
- Quem é o radiador das linhas espectrais? Thomson sabia que qualquer teoria da estrutura atômica deveria

explicar a emissão das linhas espectrais. Uma das primeiras explicações foi a de Walter Ritz (1878-1909) e seu modelo do átomo magnético. Ele também calculou a constante de Rydberg e previu que o átomo de hidrogênio devia ter mais séries além da série de Balmer. Isso foi confirmado posteriormente quando foram descobertas mais quatro séries do hidrogênio. Ritz também observou que o efeito Zeeman poderia ser explicado no seu modelo. Os elétrons de Ritz eram magnetos girando sobre si mesmos (soa familiar?).

É interessante saber que os físicos obtiveram informação correta mesmo antes do modelo de Bohr. Mas, este último conseguiu explicar tudo isso e muito mais. É nesse contexto que o modelo atômico de Bohr foi proposto em 1913. Isso foi de fato uma das descobertas mais importantes da física do século XX e cujo processo culminaria brilhantemente com a formulação da mecânica quântica. Bohr deu um passo importante e isso já seria suficiente para colocá-lo numa lista dos *Imortais da Ciência*.

O modelo de Bohr deu força ao modelo atômico “planetário” de Rutherford proposto em 1911. O físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950) tinha proposto em 1904 um modelo tipo “Saturniano”, no qual o átomo é considerado como uma massa central atrativa rodeada por elétrons em anéis parecidos com os do planeta Saturno [NA04]. No entanto G. A. Schott mostrou no mesmo ano que esse sistema seria instável [PA91b], coisa que o próprio Bohr descobriria mais tarde também. O fato que forças que variam com o inverso do quadrado da distância não permitem equilíbrio estático foi mostrado pelo padre Samuel Earnshaw em 1842 [SC59].

Tanto o modelo de Thomson (que tinha um equilíbrio dinâmico e por isso a analogia com um “pudim” não é correta), como o de Rutherford são generalizações do modelo de Nagaoka. Este físico japonês estava na época no laboratório Cavendish e por isso seu modelo era bem conhecido. Por exemplo Rutherford o cita no seu trabalho sobre o seu modelo atômico [RU11]. Lembremos que este modelo colocou de maneira definitiva a existência do núcleo atômico. O problema era a estabilidade desse modelo.

O fato de que usando esse modelo *mais* a hipótese de quantização de Einstein-Planck, Bohr foi capaz de deduzir teoricamente a série de Balmer [em reconhecimento ao espectroscopista sueco Johann Jacob Balmer (1825-1898)] do espectro do átomo de hidrogênio. Os esforços dos físicos então, estavam no caminho certo.

O átomo de Thomson tinha um raio, o da esfera de electricidade positiva, mas esse raio não tinha um tamanho particular. Acontece que na física clássica não relativista não existem suficientes quantidades dimensionais com as quais um “comprimento” possa ser construído [CA95]. Apenas existem como parâmetros dimensionais a massa do elétron

m_e , a sua carga elétrica, e , que tem as seguintes dimensões

$$[e^2] = \frac{\text{massa} \times (\text{comprimento})^3}{(\text{tempo})^2}. \quad (1)$$

Na relatividade temos o comprimento $r_0 = e^2/m_e c^2 \approx 10^{-15}$ m que é o chamado “raio clássico do elétron” mas ele não ajuda a explicar a separação dos elétrons que estão ligados num átomo.

Talvez a contribuição mais importante de Bohr para a física foi seu trabalho de 1913 no qual ele propôs o modelo da estrutura do átomo. De maneira resumida podemos dizer que Bohr notou que usando a constante de Planck, h , a carga elétrica do elétron, e , e a massa do mesmo m_e poderia estimar um raio típico para o átomo de hidrogênio a_0 , e também a constante de Rydberg R_∞ .^{4, 5} Usando postulados que fugiam do contexto da física clássica e que podem ser encontrado em *Bohr* (pag.55), Bohr obteve

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m_e e^2}, \quad R_\infty = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{h^3} \quad (2)$$

e a fórmula de Balmer para as frequências de uma transição $m \rightarrow n$ do átomo de hidrogênio

$$\nu_{mn} = R_\infty \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (3)$$

em que $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$, sendo m também um inteiro e $m > n$. Usando os valores mais próximos dos atuais (e em unidades naturais) [HA02] $m_e = 0.51$ MeV, $h/2\pi = 6.58 \times 10^{-22}$ MeV · segundos, obtemos $a_0 = 2.82 \times 10^{-15}$ m, e $R_\infty = 13.6$ eV. Isso dava sustentação definitiva ao modelo de Rutherford.

Em 1922 Bohr ganhou o prêmio Nobel de física. Nessa ocasião o apresentador do Comitê Nobel da Academia Sueca de Ciências, S. A. Arrhenius (Nobel de química de 1903) apresentando o contexto no qual Bohr tinha proposto seu modelo disse [AR22]:

Consequently, either the atom model must be false, or else the classical theory of Maxwell must be incorrect in this case... Bohr had no need to hesitate in his choice: he assumed that Maxwell's theory does not hold good in the present case, but that the atom model of Rutherford is correct.

Vemos então qual foi a escolha de Bohr. No entanto, é curioso que nos anos que se seguiram a 1913 e talvez até a sua morte, Bohr considerava que a dinâmica de Maxwell devia ser válida. Essa idéia era motivada pelo *princípio de correspondência* (um dos tantos princípios colocados por Bohr). Ele foi muito repressor e, como menciona a autora de *Bohr*, “não era fácil para os jovens assistentes lutar contra o poder imenso da personalidade de Bohr” (*Bohr*, pag. 79). Esse aspecto é que Boya chama de “o lado escuro de Bohr” [BO02]. É curioso que Bohr num trabalho seminal em colaboração com Léon Rosenfeld (1904-1974) mostrou que [PA91c]

⁴Todas as constantes a seguir são bem conhecidas. Assim, por falta de espaço, não incluímos aqui a sua definição.

⁵Os livros de texto normalmente denotam a constante de Rydberg como R_y ou simplesmente R .

...thus quantum electrodynamics and quantum mechanics form two inseparable parts of a single body of the quantum theory...

ou seja, Bohr e Rosenfeld mostraram a necessidade de quantizar o campo eletromagnético. Mas, parece que Bohr não aceitou a eletrodinâmica quântica de Feynman, Schwinger, e Tomonaga. Pelo menos se for verdade a afirmação [NE96]

Feynman, Schwinger and Tomonaga shared the 1965 Nobel prize in physics. They could possibly have been that prize several years earlier, but Niels Bohr also suspected the new theory and his negative attitude deterred the Nobel Committee from acknowledging it. The decision to give the Nobel prize to the authors of QED was made only after Bohr's death.

É possível que isso fosse devido à rejeição de muitos dos fundadores da QED à maneira como os cálculos eram feitos, onde quantidades infinitas tinham de ser eliminadas por um processo chamado *renormalização*.

Mas o que é verdade é que até certo momento Bohr foi contra a idéia do fóton de Einstein. Em uma carta a Van der Waerden em 1964, Slater escreve [VA67b]

...the idea of statistical conservation of energy and momentum was put into the theory by Bohr and Kramers, quite against my better judgment. I had gone to Copenhagen with the idea that the field of the oscillators would be used to determine the behavior of photons, which I preferred to regard as real entities, satisfying conservation as we know that they did... Bohr and Kramers opposed this so vigorously that I saw that the only way to keep peace and get the main part of the suggestion published was to go along with them with the statistical idea.

Refere-se ao trabalho, mencionado acima, de Bohr, H. A. Kramers (1894-1952) e J. C. Slater (1900-1976) *The Quantum Theory of Radiation*, cuja versão inglesa foi publicada em Phil. Mag, [6] **47**, 785–802 (1924) e é reproduzida na Ref. [VA67], pags. 159–176. Este trabalho é comentado em *Bohr* (pags. 75–76). Uma das idéias deles é que a conservação da energia e do momento seriam válidas, nos domínios atômicos, apenas estatisticamente. Bohr insistiu de novo nessa hipótese no caso dos neutrinos em 1930. O trabalho com Kramers e Slater foi uma tentativa de reconciliar os efeitos descontínuos que ocorrem nos átomos (leia-se Planck) com o campo de radiação contínuo (leia-se Maxwell). A base dessa idéia era, de novo, o *princípio de correspondência* e a tentativa de prescindir do fóton de Einstein. Como dissemos acima, Bohr foi se afastando pouco a pouco do conceito do fóton de Einstein. Em 1921 dizia que “a radiação deve ser descrita pela teoria eletromagnética clássica” [PA91d]. Não é de se surpreender então encontrar no trabalho de Bohr, Kramers e Slater que [VA67c]

...this author [Einstein] put forward his well known theory of ‘light-quanta’, according to which radiation should not propagate through space as continuous trains of waves in the classical theory of light, but as entities, each of which contains the energy $h\nu$... Although the great heuristic value of this hypothesis is shown by the confirmation of Einstein's predictions concerning the photoelectric phenomenon, still the theory of light-quanta can obviously not be considered as a satisfactory solution of the problem of light propagation.

O debate sobre o que seria a “realidade física” sempre ocorreu entre diferentes correntes da física. Por exemplo, em 1900 Fitzgerald escreveu [HE77d]

To suppose that (electromagnetic) aether is at all like the model I am about to describe (which was made from tennis ball and rubber bands) would be almost as bad a mistake as to suppose a sphere at all like $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$ and to think that it must, in consequence, be made of paper and ink.

Na apresentação do livro de Stachel [ST01], o conhecido matemático inglês Roger Penrose comenta os dois primeiros trabalhos de Einstein (um sobre as dimensões moleculares e o outro sobre o movimento Browniano) e sobre porque Einstein teria sido deixado de lado pelos físicos que construíram a mecânica quântica, Penrose afirma que

Einstein estava diretamente preocupado em demonstrar a natureza das moléculas ... a natureza “atômica” da matéria estava, de fato, em primeiro plano.

Comparando a visão “realista” de Einstein com a de Bohr que avançou negando a própria existência de algo como a “realidade física” no nível quântico das moléculas, Penrose é enfático:

Será realmente verdade, em qualquer sentido razoável, que Einstein estava tão profundamente “errado” como poderiam sustentar os seguidores de Bohr? Não acredito nisso. Eu mesmo teria me colocado firmemente ao lado de Einstein na crença em uma realidade submicroscópica.

Outro aspecto enfatizado por Boya (e antes dele por Pais [PA91e]) é o fato de Bohr nunca ter proposto A. Sommerfeld (1868-1951) para o prêmio Nobel. Sommerfeld foi quase tão importante para tornar o modelo do átomo de Rutherford compatível com a espectroscopia quanto Bohr. A sua influência na comunidade dos físicos jovens também foi muito grande, como van der Waerden afirma no seu *Sources* [VA67c]

The historian should also consult Sommerfeld's *Atombau und Spektrallinien* (preferable the 4th ed., 1924),⁶ because it was mainly from this book that the young physicists who created Quantum Mechanics in 1925-1926 learnt Quantum Theory.

Não foi por acaso que de 1917 até pelo menos 1937 (menos em uma oportunidade) Sommerfeld foi proposto para o Nobel mas nenhuma vez pelo Bohr. Devemos completar esse ponto lembrando que muitos dos ganhadores do prêmio foram recomendados por Bohr. Diferente de Bohr e Einstein, Sommerfeld teve alunos de doutorados. Alguns deles foram Bethe, Debye, Heisenberg e Pauli.

Uma das conseqüências importantes do modelo de Bohr foi a relação do número atômico com a posição dos elementos da tabela periódica. No entanto, no trabalho em que Rutherford colocou a hipótese da existência do nêutron encontramos [RU20]

It was suggested by Van den Broek [*Phys. Zeit.* **14**, 32 (1913)] that the scattering of α -particles by atom was not inconsistent with the possibility that the charge on the nucleus was equal to the atomic number of the atom i.e., to the number of the atom when arranged in order of increasing atomic weight ...[it] was shown by the remarkable work of Moseley [*Phil. Mag.* **26**, 1024 (1926)] on the X rays spectra of the elements.

Ou seja, o holandês Antonius J. Van der Broek (1870-1926) se adiantou, pelo menos nesse aspecto, a Bohr [HE77e]:

Bohr undoubtedly arrive independently as simultaneously at a similar view...despite his scrupulous observation of van den Broek's priority, Bohr was annoyed by the unnecessary contribution from Amsterdam...

O ponto interessante é que van den Broek era advogado e físico amador!

Voltando às descobertas de Bohr. Em 1913 Bohr fez uma observação importante. Rutherford tinha sugerido um ano antes que o decaimento β nada mais era do que a expulsão de um elétron orbital. Se esse fosse o caso, notou Bohr, não haveria diferença nos raios β (elétrons) emitidos pelos isótopos de um mesmo elemento. Experimentalmente observava-se que havia uma diferença de velocidade nos raios β dos isótopos. Segundo Bohr, a radioatividade- β é um processo nuclear e não atômico. Então não apenas o átomo tem uma estrutura mas também o núcleo.

Uma outra observação. O termo "privatdocent" (ou privatdozent) significa [ME03]

an unsalaried university lecturer or teacher in German-speaking countries remunerated directly by student's fees.

Em muitas biografias de cientistas aparece em determinados lugares que "obteve uma posição de *privatdozent*" mas não deve comparar-se como nosso "livre docente".

Finalmente, gostaria de dizer que senti muita falta de um índice remissivo no Bohr. No entanto, o *Glossário* e a *Cronologia* no fim do livro preenchem, em parte, essa lacuna.

Agradecimentos

Agradeço ao CNPq pelo auxílio financeiro parcial.

Referências

- [AB02] M. C. Abdalla, *Bohr: O Arquiteto do Átomo*, Odysseus, São Paulo, 2002.
- [AR22] www.nobel.se/physics/laureates/1922/press.html.
- [BE43] C. E. Behrens, *Atomic Theory from 1904-1913*, *Am. J. Phys.* **11**, 60 (1943).
- [BO02] L. J. Boya, *Rejection of the Light Quantum: The Dark Side of Niels Bohr*, Palestra de abertura apresentada no 4º Workshop on Rigged Hilbert Space and Resonances, Espanha, junho de 2001, physics/0212090.
- [BR78] L. M. Brown, *The idea of Neutrino*, *Physics Today* **31**(9), 23 (1978).
- [CA95] R. N. Cahn e G. Goldhaber, *The Experimental Foundations of Particle Physics*, Cambridge University Press, New York, 1995.
- [FR04] W. S. Franklin, *The electron theory*, *Science* **19**, 896 (1904). Consultada nos arquivos JSTOR de *Science On line*.
- [FR65] F. L. Friedman e L. Sartori, *The Classical Atom*, Addison-Wesley, Reading, Mass. 1965.
- [HA02] K. Hagiwara *et al.* (Particle Data Group), *Phys. Rev. D* **66**, 1 (2002).
- [HE77] J. L. Heilbron, Lectures on the History of Atomic Physics 1900-1922, in C. Weiner (Ed.) *History of the Twentieth Century Physics*, Academic Press, New York, 1977, p. 48.
- [HE77b] Ref. [HE77] p. 45-46.
- [HE77c] Ref. [HE77] p. 46.
- [HE77d] Ref. [HE77], p. 42.
- [HE77e] Ref. [HE77] p. 62.
- [KU72] T. Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas*, Perspectiva, São Paulo, 1972, p.20.
- [NA04] H. Nagaoka, *Nature* **69**, 392 (1904); *Phi. Mag.* **7**, 445 (1904), citados na Ref. [PA91], p. 156. O segundo trabalho é citado no trabalho de Rutherford no qual ele propõe a existência de um núcleo atômico [RU11], p.130.
- [ME03] Merriam-Webster dictionary na *Encyclopaedia Britannica* on line.
- [NE96] Y. Nee'man e Y. Kirsh, *The Particle Hunters*, Cambridge University Press, Cambridge, 1996, segunda Edição, p.59.
- [PA91] A. Pais, *Niels Bohr's Time*, In *Physics, Philosophy, and Polity*, Clarendon Press, Oxford, 1991.

⁶Refere-se a *Atomic Structure and Spectral Lines*, publicado em 1919. A oitava edição saiu em 1960.

- [PA91b] Ref. [PA91], p. 145.
- [PA91c] Ref. [PA91], p. 14.
- [PA91d] Ref. [PA91], p. 3.
- [PA91e] Ref. [PA91], p. 214.
- [PA91f] Ref. [PA91], p. 362.
- [PA95] A. Pais, “Sutil é o Senhor...” *A Ciência e a Vida de Einstein*, Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1995.
- [PA96] A. Pais, *Eisntein viveu aqui*, Gradiva, Lisboa, 1996, p. 13.
- [PA86] A. Pais, *Inward Bound of Matter and Forces in the Physical World*, Claredon Pressm Oxford, 1986.
- [PL96] V. Pleitez, *O Acaso, o Preconceito e o Método Científico em Física*, Revista Brasileira de Ensino de Física **18**(4), 355–361 (1996).
- [RA03] M. Rabinowitz, *In Memory of Julian Schwinger*, Transactions of Fusion Technology **26**, 9 (1994); physics/0303078.
- [RU11] E. Rutherford, *The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom*, Magazine and Journal of Science, 6th séries, 21, 669 (1911). Reproduzido em R. T. Beyer (Ed.) *Selected Papers in Foundations of Nuclear Physics*, Dover, New York, 1949, p. 111–130.
- [RU20] E. Rutherford, *Nuclear Constitution of Atoms*, Proc. Roy. Soc. **A97**, 324 (1920), reproduzido parcialmente in V. V. Ezhela *et al.*, *Particle Physics, One Hundred Years of Discoveries*, American Insitute of Physics, Woodburg, New York, 1996; p.38–39.
- [SC59] W. T. Scott, *Who was Earnshaw?*, Am. J. Phys. **27**, 418 (1959).
- [ST01] J. Stachel, *O Ano Miraculoso de Einstein*, Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 2001, p.13-14.
- [VA67] B. L. Van der Waerden (Org.), *Sources of Quantum Mechanics*, Dover, New York, 1967; p. 3.
- [VA67b] Ref. [VA67], p. 13.
- [VA67c] Ref. [VA67], p. 161.