

Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), sua vida e sua obra

A. K. T. Assis*

RESUMO – É apresentada a vida de Weber, suas principais realizações experimentais e teóricas, e os desenvolvimentos recentes de sua teoria.

Introdução

Faz 100 anos que Wilhelm Weber morreu. Para marcar esta data significativa resolvemos escrever esta pequena biografia de Weber, detalhando um pouco mais suas realizações na área do eletromagnetismo experimental e teórico. Apesar da teoria de Weber ter sido um pouco esquecida durante este século, mostramos na parte final deste trabalho alguns motivos pelos quais ela tem retornado com grande vigor nos últimos anos. Esperamos com este trabalho contribuir para tornar Weber e sua obra mais conhecidos e difundidos.

Vida de Weber

Wilhelm Weber nasceu em Wittenberg, Alemanha, em 24 de outubro de 1804. Filho de um professor de teologia na Universidade de Wittenberg, Weber teve ao todo 11 irmãos, sendo que apenas ele, três outros irmãos, e uma irmã, chegaram à vida adulta. O mais velho dos irmãos se tornou pastor, enquanto Ernst Heirich Weber, quase 10 anos mais velho do que W. Weber, se tornou um professor famoso na Universidade de Leipzig, nas áreas de anatomia e fisiologia. Também seu irmão um ano e meio mais novo, Eduard, tornou-se professor de anatomia em Leipzig (Woodruff, 1980).

Passou sua infância em Wittenberg até mudar-se, juntamente com toda a família, para Halle em 1814, onde seu pai passou a lecionar

na universidade local. Foi aí que iniciou sua carreira científica e que desenvolveu seus exímios dotes de físico experimental que o tornariam famoso no futuro. Seu primeiro trabalho científico é publicado em 1825 e trata de investigações experimentais sobre ondas sonoras e acústicas realizadas com seu irmão Ernst Heinrich. Parte do trabalho experimental foi realizado antes que Weber entrasse na Universidade de Halle, fato ocorrido em 1822.

Cursou física e defendeu seu doutorado em 1826, sob a orientação do físico J. S. C. Schweigger. Seu trabalho de tese foi sobre a teoria do órgão feito de tubos de madeira, e em particular estudou o acoplamento da língua e das cavidades de ar nesses tubos. Obteve sua habilitação para exercer o cargo de professor universitário em 1827, com um trabalho sobre osciladores acoplados. Tanto neste trabalho quanto no de tese, Weber desenvolveu não apenas a teoria do processo físico envolvido mas principalmente realizou experimentos detalhados para testar as teorias e modelos.

Começa a dar aulas na Universidade de Halle, e logo se torna professor assistente, em 1828. No final deste ano foi a um congresso em Berlin, organizado por Alexander von Humboldt e lá apresentou seu trabalho de tese, que atraiu a atenção de Humboldt e Gauss. C. F. Gauss (1777-1855) já era então um matemático renomado internacionalmente, e há 20 anos professor na Universidade de Gottingen. Este foi o único congresso científico de que Gauss participou, e o detestou. Mas este congresso teve um aspecto muito importante, já que foi aí que Gauss e Weber se conheceram. Humboldt havia interessado Gauss em geomagnetismo e ambos viram no jovem e habilidoso físico experimental Weber, um grande aliado. Gauss tinha então praticamente o dobro da idade de Weber (54 e quase 27).

* Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia, Instituto de Física, Universidade Estadual de Campinas, Caixa Postal 6165 - 13081 - Campinas, SP.

Para que a colaboração entre ambos pudessem ser efetivada era necessário obter uma posição para Weber em Gottingen. Isto ocorreu em 1831 quando foi aberta uma vaga de professor com a morte de Tobias Mayer Jr. Durante seis anos, de 1831 a 1837, Weber ficou trabalhando em Gottingen juntamente com Gauss, e além do excelente relacionamento pessoal desenvolveram uma colaboração científica importantíssima, que descreveremos a seguir. A grande amizade que estabeleceram é curiosa, já que eram duas personalidades bem distintas. Gauss sempre foi descrito como uma pessoa ambiciosa, extremamente frio e glacial, sem amigos. Weber, por outro lado, sempre foi tido como uma pessoa modesta, amigável e sociável.

Em 1836, Weber publica com seu irmão Eduard um trabalho sobre a locomoção humana, em seus aspectos físicos e fisiológicos.

Em 1837, Victoria tornou-se rainha da Inglaterra, e seu tio, Ernst August, passou a governar Hannover. Imediatamente o novo rei, Ernst August, revogou a constituição liberal então existente e isto provocou uma reação de protesto por parte de alguns professores. Weber estava entre sete professores de Gottingen que assinaram uma declaração de protesto, e isto fez com que estes sete professores, a pedido do rei, perdessem seus cargos. Apesar dos esforços de Gauss e de Humboldt, Weber não retomou logo seu cargo, pois se recusou a fazer uma retratação pública.

Permaneceu morando e trabalhando em Gottingen em medições geomagnéticas, sem uma posição universitária até 1843, quando então assumiu o cargo de professor de física na Universidade de Leipzig, onde já trabalhavam seus dois irmãos. A vaga que ele ocupou era mantida por G. T. Fechner, físico e filósofo alemão, que era amigo da família Weber.

Fechner teve de deixar seu cargo por problemas na vista, que lhe causavam cegueira temporária, problemas estes ocasionados por experimentos psicofísicos que realizou em si mesmo. Fechner e o irmão de Weber, Ernst, haviam iniciado um trabalho pioneiro de psicologia empírica, denominada psicofísica por Fechner, no qual estudavam o aumento da resposta subjetiva de uma pessoa (por exemplo através da dor, ou percepção da intensidade luminosa), quando o estímulo objetivo externo é aumentado (Wise, 1981).

Weber permaneceu em Leipzig entre 1843 e 1848, sendo este o período em que desenvolve suas principais pesquisas teóricas em eletricidade. Parece que seu contato mais próximo com Fechner teve grande importância para isto, entre outras coisas por Fechner ser um ferrenho atomista, e é neste período que Weber desenvolve sua teoria corpuscular da eletricidade, das correntes elétricas e até mesmo do éter. Em 1846 publicou o primeiro dos seus *Elektrodynamische Maassbestimmungen* (Medições Eletrodinâmicas), no qual apresenta sua famosa lei de força entre cargas elétricas.

Esta lei é essencialmente a de Coulomb, adicionada de termos que dependem da velocidade e aceleração relativa entre as cargas interagentes. Com esta lei conseguiu deduzir a lei de Ampère para a força entre elementos de corrente, e também a lei de indução de Faraday.

Ao todo publicou, entre 1846 e 1878, sete grandes trabalhos com o título geral de "Medições Eletrodinâmicas", além de deixar mais um volume manuscrito, publicado postumamente.

A revolução de 1848 na Alemanha forçou uma liberalização maior do regime e Weber pôde voltar a seu antigo posto na Universidade de Gottingen. Bernhard Riemann (1826-1866) foi um de seus estudantes, assistente e amigo neste período, assim como Riemann também o foi de Gauss (Wise, 1981). Neste período, Weber tornou-se diretor do observatório astronômico e passou a trabalhar em colaboração mais ativa com Rudolph Kohlrausch, um antigo amigo. Com Kohlrausch mede, em 1856, a razão entre as unidades eletromagnéticas e eletrostáticas de carga, coisa que nunca havia sido feita antes. O valor obtido, 3.1×10^8 m/s, essencialmente o mesmo valor que a velocidade da luz, que já era conhecida desde os tempos de Roemer (1675), foi a primeira indicação quantitativa precisa sobre a ligação profunda que devia haver entre o eletromagnetismo e a óptica. Este valor foi usado por Maxwell em favor de sua própria teoria eletromagnética (Maxwell, 1954, v. 2, p. 417, 436). Isto porque a constante c que aparece na força de Weber, e que tem este valor, é a mesma introduzida por Maxwell em suas equações.

Weber continuou trabalhando com eletrodinâmica e a estrutura da matéria (origem da resistência e da condutividade elétrica, diamagnetismo, etc.) até se aposentar, na década de 1870-80.

Weber nunca se casou. Sempre gostou de longas caminhadas. Morreu aos 86 anos, em 23 de junho de 1891, enquanto passeava calmamente no jardim de sua casa em Gottingen.

As obras completas de Weber, em 6 volumes, foram coligidas e editadas entre 1892 e 94 (Weber, 1892).

Sua obra científica

Neste trabalho vamos nos concentrar nas pesquisas de Weber relacionadas com o eletromagnetismo. Não entraremos em detalhes nos seus trabalhos de hidrodinâmica, acústica e fisiologia.

Suas pesquisas em eletromagnetismo têm início com sua primeira estadia em Gottingen, no período de 1831 a 1837, com Gauss.

Em 1832 Gauss escreve um trabalho famoso, no qual foi auxiliado por Weber, e que introduz as unidades de medidas absolutas no magnetismo (Woodruff, 1980). Este é o nome que se dá a medidas da intensidade de uma propriedade magnética (por exemplo o campo magnético ou a intensidade de carga magnética – pólo) usando apenas medidas de comprimento, tempo, e massa. Com isto as medidas se tornam reproduzíveis em qualquer parte do mundo sem a necessidade de se ter um instrumento magnético pré-calibrado ou um padrão magnético (ou seja, não sendo necessário que se escolha um certo ímã como padrão, por exemplo).

E este foi um dos assuntos no qual Weber se tornou um grande especialista, sendo respeitado mundialmente. Em 1840 introduziu unidades absolutas de corrente elétrica e mediu a quantidade de água decomposta por uma unidade de corrente em um segundo. Já em 1852 definiu a unidade absoluta de resistência elétrica e mostrou porque isto era melhor do que o padrão de resistência preparado por M. H. Von Jacobi em 1846. O artigo em que descreve seu método é um de seus “Medições Eletrodinâmicas” e está traduzido para o inglês (Weber, 1861).

Weber iniciou com Gauss uma organização para criar uma rede de observatórios magnéticos (magnetismo terrestre). Além disto criaram em 1833 um telégrafo elétrico que foi o primeiro no mundo a ser operado regularmente (Atherton, 1989). Uma descrição simplificada se encontra no artigo de Atherton. Durante este período inicial em Gottingen, Weber desenvolve também

sensíveis magnetômetros e outros instrumentos de medidas magnéticas.

É a partir de sua ida a Leipzig, em 1843, que se inicia a fase mais importante e criativa da carreira científica de Weber. Já eram conhecidas na época a lei de Coulomb para a eletrostática (1785), a lei de Ampère para a força entre elementos de corrente (1823) – com a qual se pode derivar a famosa lei circuital de Ampère – e a lei de indução de Faraday (1831). A lei de Ampère, em particular, pode ser escrita como:

$$d\vec{F}_{21} = -\frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \frac{\hat{r}}{r^2} [2 (\vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2) + 3 (\hat{r} \cdot d\vec{l}_1) (\hat{r} \cdot d\vec{l}_2)].$$

Nesta expressão, $r \equiv |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$ é a distância entre os elementos de corrente $I_1 d\vec{l}_1$ e $I_2 d\vec{l}_2$; $\hat{r} \equiv (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)/r$ e $d\vec{F}_{21}$ é a força exercida pelo elemento 2 sobre o elemento 1. Na época de Weber não se sabia qual era a natureza íntima da corrente elétrica de condução em metais, e para muitos esta era um fluido elétrico que nada tinha a ver com a eletrostática.

Fechner publica então em 1845 um trabalho semiquantitativo onde mostra que as leis de Ampère e de Faraday podem ser deduzidas supondo-se que as correntes elétricas são constituídas de cargas positivas se movendo num sentido e negativas no outro, desde que se acrescente à lei de Coulomb termos dependentes da velocidade e da aceleração (Fechner, 1845). Neste mesmo trabalho anuncia o trabalho de Weber, que viria em seguida, provando detalhadamente estas idéias.

É em seu primeiro “Medições Eletrodinâmicas”, de 1846, que Weber anuncia sua famosa lei de força. Esta diz que a força de uma carga elétrica pontual q_2 sobre uma carga q_1 é dada por:

$$\vec{F}_{21} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0} \frac{\hat{r}}{r^2} \left[1 - \frac{\dot{r}^2}{2c^2} + \frac{r \ddot{r}}{c^2} \right]$$

Nesta expressão $\dot{r} \equiv dr/dt$ é a velocidade radial relativa entre as duas cargas, e $\ddot{r} \equiv d\dot{r}/dt = d^2r/dt^2$ é a aceleração radial relativa entre elas. Weber chegou nesta lei a partir da força de Ampère entre elementos de corrente, fazendo a suposição de que estes são cargas elétricas em movimento, isto é,

$$I_1 d\vec{l}_1 = q_{1+} \vec{v}_{1+} + q_{1-} \vec{v}_{1-} = q_{1+} (\vec{v}_{1+} - \vec{v}_{1-})$$

$$I_2 d\vec{l}_2 = q_{2+} \vec{v}_{2+} + q_{2-} \vec{v}_{2-} = q_{2+} (\vec{v}_{2+} - \vec{v}_{2-}).$$

Para obter a força de Ampère, a partir da lei de Weber, basta somar as quatro forças que existem entre as duas cargas de cada elemento:

$$d\vec{F}_{21} = \vec{F}_{2+,1+} + \vec{F}_{2+,1-} + \vec{F}_{2-,1+} + \vec{F}_{2-,1-}.$$

Supondo as duas leis no sistema internacional de unidades segue-se que a constante c que aparece na lei de Weber é dada por $(\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$.

Esta constante nunca havia sido medida, e em 1846 Weber a deixou indeterminada. Esta constante, a razão entre as unidades eletromagnéticas e eletrostáticas de carga, foi medida pela primeira vez pelo próprio Weber, com a colaboração de Kohlrausch, entre 1855 e 56. Este trabalho foi publicado em 1857, e mostrou que $(\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2} = 3,1 \times 10^8$ m/s, muito próximo ao valor da velocidade da luz, já conhecida na época. Este trabalho foi a primeira indicação clara e quantitativa da ligação íntima entre a óptica e o eletromagnetismo. É ainda no seu trabalho de 1846 que Weber introduz seu famoso eletrodinômetro, um instrumento desenvolvido para medidas precisas de forças elétricas com o qual testou e confirmou minuciosamente a força de Ampère. Ver uma fotografia do instrumento e maiores detalhes em (Harman, 1982, p. 32).

Ainda neste trabalho de 1846 Weber consegue derivar, a partir de sua força, a lei de indução de Faraday. Conseqüentemente, todo o eletromagnetismo conhecido na época (leis de Coulomb, Ampère e Faraday) podia ser derivado e deduzido, desde que se assumisse a lei de Weber.

A força de Weber foi a primeira a surgir na física com dependência não apenas da distância entre os corpos, mas também de suas velocidades e acelerações mútuas. Ela é anterior às formulações de Riemann, Clausius, Ritz e Lorentz, entre outras. Além disto, ela tem uma característica que a distingue de quase todas as formulações posteriores, já que estas últimas ou dependem da velocidade em relação a um meio ou éter, ou dependem da velocidade em relação ao observador, enquanto que a de Weber depende apenas das velocidades (e acelerações) relativas entre os corpos que estão interagindo. Para uma discussão aprofundada, detalhada e extremamente crítica destes aspectos, com uma comparação e análise das diversas formulações, sugerimos o excelente livro de O'Rahilly (1965).

Em 1848 Weber apresenta sua energia potencial generalizada, com a qual podia derivar sua força. Esta é dada por:

$$U = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0} \frac{1}{r} \left(1 - \frac{\dot{r}^2}{2c^2} \right).$$

Novamente esta é a precursora de todas as energias generalizadas, que dependem não apenas da distância entre os corpos mas também de suas velocidades. Weber apresenta também sua Lagrangeana, $L=T-V$, onde V é dada por:

$$V = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0} \frac{1}{r} \left(1 + \frac{\dot{r}^2}{2c^2} \right),$$

ou seja, é igual a U a menos do sinal no termo em \dot{r}^2 . Desta Lagrangiana se pode derivar a força de Weber seguindo o procedimento usual. Este artigo de 1848 também está traduzido para o inglês (Weber, 1848).

Apesar disto, durante muito tempo se acreditou que a lei de Weber não satisfazia ao princípio de conservação de energia. O principal motivo para esta crença é que em 1847 havia aparecido o grande trabalho de Helmholtz (1821-1894) sobre conservação de energia. Neste trabalho ele havia mostrado que forças que dependiam das posições e velocidades dos corpos não podiam satisfazer a este princípio. Só que a lei de Weber é mais geral do que as estudadas por Helmholtz, já que dependia também da aceleração entre os corpos.

Contudo, as dúvidas só foram sanadas completamente depois dos trabalhos de Weber de 1869 e 1871. Este último é seu sexto "Medições Eletrodinâmicas" e também está traduzido para o inglês (Weber, 1872). Neste trabalho Weber mostra que $T+U$ é uma constante. Aliás, as relações entre Weber e Helmholtz, as duas principais figuras do eletromagnetismo na Alemanha do século passado, sempre foram difíceis. Helmholtz não aceitava forças que dependiam da velocidade entre os corpos, e também não aceitava a teoria de campos eletromagnéticos de Maxwell. Em 1870 apresentou um artigo famoso no qual apresentava uma teoria alternativa à de Maxwell, mas que não teve sucesso, e foi através deste artigo que a maioria dos físicos do continente europeu passou a conhecer e entender a formulação de Maxwell (Wise, 1981).

Devido ao grande sucesso de seu eletrodinômetro, durante um bom tempo a unidade

de corrente elétrica foi chamada de "Weber". Isto perdurou até 1881, quando num congresso internacional sobre unidades elétricas, realizado em Paris, foi adotado o nome "Ampère" para esta medida. A sugestão para que isto ocorresse veio de Helmholtz, o chefe da delegação alemã. O termo "Weber" foi introduzido oficialmente como unidade de fluxo magnético em 1935 (Woodruff, 1980).

Weber sempre foi um atomista, e embora aceitasse a existência de um éter, também este era para ele composto de partículas que se moviam no espaço. Não gostava da idéia de um meio contínuo preenchendo todo o espaço vazio. Weber achava que o éter era composto de partículas elétricas se estendendo por todo o espaço, e esperava explicar a teoria ondulatória da luz com base nas oscilações deste éter, oscilações estas governadas por sua lei de força. Também a polarização da luz seria explicada com base neste éter granulado. Com base nestas idéias explicou, em 1848, com sucesso, o diamagnetismo, fenômeno que havia sido descoberto por Faraday em 1845 (Wise, 1981; Whitaker, 1873).

Weber também trabalhou com modelos para explicar a resistência elétrica, tentou reduzir a química a ações elétricas, assim como também tentou entender e modelar a condutividade térmica dos metais e a termoeletricidade através de sua lei de força e de um modelo de estrutura da matéria. Com isto esperava explicar todos os fenômenos físicos conhecidos dentro de uma visão coerente e simples, baseada em sua lei de força. Em 1875 tentou incluir até mesmo a gravitação neste contexto, supondo a massa das partículas elementares proporcionais a suas cargas elétricas e assumindo a hipótese de Aepinus e Mossotti de que a força entre cargas de mesmo sinal é um pouco menor do que a força entre cargas de sinais opostos. Com isto, dois átomos elementares neutros sofreriam uma atração equivalente à gravitacional.

Influências e Desenvolvimentos Posteriores

Pelo seu caráter pioneiro e por seu grande poder de síntese, as expressões de Weber para a força e energia entre duas cargas elétricas exerceram uma grande influência na física. Já em 1872 Tisserand estendia a lei de Newton da gravitação universal com termos que dependiam da velocidade e da aceleração entre as massas,

de maneira exatamente similar à lei de Weber (Tisserand, 1872). Recentemente, utilizamos esta mesma lei em um modelo para implementar quantitativamente o Princípio de Mach, de que a inércia de um corpo é devida à interação gravitacional deste com o restante do universo (Assis, 1989).

Apesar de ser extremamente poderosa (satisfaz os princípios de conservação de energia, de momento linear e angular; com ela se derivam as leis de Coulomb, Ampère e Faraday), e de ter sido muito utilizada no século passado, ela acabou sendo mais ou menos esquecida neste século. Parece-nos que houve dois motivos básicos para isto. O primeiro foi que Weber não conseguiu derivar a propagação de ondas eletromagnéticas a partir de sua lei, que é do tipo ação-à-distância. A partir da confirmação experimental por Hertz, entre 1885 e 1889, das ondas eletromagnéticas previstas pela teoria de Maxwell, esta última, uma teoria de campo, passou a ter precedência sobre a de Weber. O segundo motivo foi o sucesso da teoria da relatividade restrita, surgida em 1905, e que é baseada na força de Lorentz (1895). A força de Lorentz tem o mesmo papel que a de Weber, mas contém alguns termos diferentes.

Estes dois aspectos voltaram a ser questionados recentemente. No lado teórico, Wesley mostrou que com a introdução do tempo retardado na lei de Weber pode-se obter equações de onda para os potenciais escalar elétrico e vetor magnético da mesma forma que na teoria de Maxwell (Wesley, 1987). Independente deste aspecto, parece que a lei de Weber, sem o tempo retardado, já modela um retardamento na transmissão do potencial (Sokolskii & Sadovnikov, 1987). No lado experimental, temos os experimentos de Graneau, Pappas, Edwards e outros. Como já vimos, a lei de Weber surgiu a partir da força de Ampère. Por outro lado, com a força de Lorentz se chega apenas à força de Grassmann (1845) entre elementos de corrente. Para uma discussão detalhada, ver o grande livro de O'Rahilly (1965). A força de Grassmann é dada por:

$$d\vec{F}_{21} = I_1 d\vec{\ell}_1 \times d\vec{B}_2 = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 I_2}{r^2} \times$$

$$\times [(d\vec{\ell}_1 \cdot d\vec{\ell}_2) \hat{r} - (d\vec{\ell}_1 \cdot \hat{r})d\vec{\ell}_2]$$

onde $d\vec{B}_2$ é o campo magnético dado pela lei de Biot-Savart. Esta força não satisfaz o princípio de ação e reação, nem mesmo na forma fraca, a

não ser em alguns casos bem particulares. Esta é a única expressão que aparece nos livros didáticos hoje em dia, e quase nunca aparece a força de Ampère.

Pois bem, nos últimos 10 anos vêm realizando-se experiências para tentar distinguir entre estas duas leis, e a força de Ampère tem sido a única a se mostrar compatível quantitativamente com os resultados experimentais (Graneau, 1985, 1986; Pappas, 1983). Isto tem ocasionado, concomitantemente, um retorno da lei de Weber. Num outro tipo de experimento foi medido um campo elétrico gerado por uma corrente elétrica neutra estacionária (Eduards, Kenyon & Lemon, 1976). Este resultado é compatível com a lei de Weber, mas não era esperado de acordo com a lei de Lorentz.

Conclusão

Vamos terminar fazendo alguns comentários relativos a Maxwell e suas opiniões sobre tudo isto, já que a forma padrão da teoria eletromagnética aceita hoje em dia são as “equações de Maxwell”. Vamos sempre nos referir às palavras de Maxwell em sua maior obra, o *Tratado de Eletricidade e Magnetismo*. Como já vimos, Maxwell usou a medida original de Weber de 1856 em favor de sua própria teoria (Maxwell, 1954, v. 2, p. 417, 436). Maxwell chamou a força de Ampère entre elementos de corrente de lei cardinal (mais importante) da eletrodinâmica, e que esta deveria permanecer sempre assim (*ibid.*, artigo 528). Tinha tanta admiração por Ampère que o chamou de Newton da eletricidade (*ibid.*). Maxwell conhecia a força de Grassmann e, ao compará-la com a de Ampère, diz que a de Ampère é melhor, pois satisfaz ao princípio de ação e reação (*ibid.*, artigo 527). Maxwell dedica o último capítulo de sua obra máxima a discutir a teoria de Weber e a mostrar como que, com ela, se derivam as leis de Coulomb, Ampère e Faraday (ou seja, as “equações de Maxwell”, a menos da corrente de deslocamento). Propõe aos físicos e filósofos futuros a discussão de como duas teorias tão distintas (uma baseada na existência do éter e em equações de campo e outra baseada na ação-à-distância) podem dar os mesmos resultados.

Parece-nos alentador que a lei de Weber esteja voltando a ser considerada seriamente, no mínimo para enriquecer o nosso acervo de teo-

rias e modelos alternativos para os momentos de crise na ciência.

Agradecimentos

O autor deseja agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo apoio financeiro nos últimos anos.

LISTA BIBLIOGRÁFICA

- AMPÈRE, A. M. Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, v. 6, p. 175-388, 1823.
- . *Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques*. Paris: Blanchard, 1959.
- ASSIS, A. K. T. On Mach's Principle. *Foundations of Physics Letters*, v. 2, p. 301-318, 1989.
- ATHERTON, W. A. Gauss and Weber: an unlikely partnership. *Electronics and Wireless World*, May, p. 521-522, 1989.
- EDWARDS, W. F.; KENYON, C. S.; LEMON, D. K. Continuing investigation into possible electric fields arising from steady conduction currents. *Physical Review D*, v. 14, p. 922-938, 1976.
- FECHNER, G. T. Ueber die Verknüpfung... *Ann. d. Phys.*, v. 64, p. 337-345, 1845.
- GRANEAU, P. *Ampère - Neumann electrodynamicism of metals*. Nonantum: Hadrovic Press, 1985.
- . The Ampère - Neumann electrodynamicism of metallic conductors. *Fortschrift der Physik*, v. 34, p. 457-503, 1986.
- HARMAN, P. M. *Energy, force, and matter - The conceptual development of nineteenth - century physics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1982.
- MAXWELL, J. C. *A Treatise on electricity and magnetism*. New York: Dover, 1954. 2 v.
- O'RAHILLY, A. *Electromagnetic theory*. New York: Dover, 1965. 2 v.
- PAPPAS, P. T. The original Ampère force and Biot - Savart and Lorentz forces. *Nuovo Cimento B*, v. 76, p. 189-197, 1983.
- SOKOLSKII, A. G.; SADOVNIKOV, A. A. Lagrangian solutions for Weber's law of attraction. *Sov. Astron.*, v. 31, p. 90-93, 1987.
- TISSERAND, M. F. Sur le mouvement des planètes autor du Soleil, d'après la loi électrodynamique de Weber. *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences de Paris*, v. 75, p. 760-763, 1972.

WEBER, W. Elektrodynamische Maassbestimmungen, *Abhandl. der K. Sachs. Gesell. der Wiss. zu Leipzig*, p. 99-316, 1846.

_____ *Annalen der Physik*, v. 73, p. 193-229, 1848. Trad. para o inglês in: TAYLOR, R. (ed.), *Scientific Memoirs*. New York: Johnson's Reprints, 1966. V. 5, p. 489-529.

_____ On the measurement of electric resistance according to an absolute standard. *Philosophical Magazine*, v. 22, p. 226-240, 1961. Trad. do artigo de Weber de 1851 em *Annalen der Physik*, v. 82, p. 337.

_____ Electrodynamic measurements - Sixth Memoir, relating specially to the principle of conservation of energy. *Philosophical Magazine*, v. 43, p. 1-20, p. 119-149, 1872. Trad. do artigo de Weber de 1871 em *Abhandlungen der mathem.*

phys. Classe der Konigl. Sachsischen Gesellschaft der Wissenschaften, v. 10.

_____ *Werke*. Berlin, 1892-4. 6 v.

WESLEY, J. P. Weber electrodynamics extended to include radiation. *Speculations in Science and Technology*, v. 10, p. 47, 1987.

WHITTAKER, E. T. *A History of the theories of aether and electricity*. New York: Humanities Press, 1973. 2 v.

WISE, M. N. German concepts of force, energy, and the electromagnetic ether: 1845-1880. In: CANTOR, G. N.; HODGE, M. J. S. (eds.), *Conceptions of ether*. Cambridge: Cambridge University Press, 1981, p. 269-307.

WOODRUFF, A. E. Wilhelm Eduard Weber. In: GILLISPIE, C. C. (ed.), *Dictionary of Scientific Biography*. New York: Scribner, 1980, 16 v.

(Recebido em 21/11/90)