

Esboço da Evolução Histórica do Princípio de Relatividade

José Lourenço Cindra

UNESP - Universidade Estadual Paulista

Campus de Guaratinguetá, Depto. de Física e Química

Trabalho recebido em 27 de Novembro de 1992

Resumo

Este trabalho é uma tentativa de apresentar uma visão geral e sucinta da história do princípio de relatividade, tendo em vista a sua importância para a compreensão dos fundamentos da física. É apresentado um esboço das concepções mais simples e ingênuas surgidas na Grécia antiga, passando pela época de estabelecimento da física clássica dos tempos modernos até chegar à Relatividade Geral de Albert Einstein.

Abstract

In this paper an attempt has been made in order to present a general survey of the history of the principle of relativity, mainly because of its importance for the understanding of the foundations of the physical science. This evolution was considered since the primitive and naive conceptions in ancient Greece, passing through the epoch that has given origin to the classical physics until the appearing of Albert Einstein's General Relativity.

I. Motivação

O princípio de relatividade é um dos princípios fundamentais da física clássica. E, como muitos outros princípios de grande importância para a física, ele passou por um processo de evolução e aprimoramento ao longo dos séculos. Este princípio tem portanto uma história. Embora, para muitos, quando se fala de relatividade, a primeira idéia seja associar este conceito com o nome do grande cientista Albert Einstein (1879-1955), é necessário ressaltar que muito antes de Einstein, de uma forma ou de outra, o postulado da relatividade do movimento retilíneo uniforme já havia sido introduzida no estudo da mecânica. E o mérito de Einstein consiste, principalmente, em conceder a este princípio uma presença mais marcante em toda a física, uma vez que ele postulou que, não apenas as leis da mecânica, mas sim todas as leis físicas deveriam concordar com um certo princípio de relatividade. Estas leis devem ser então invariantes em relação as transformações de Lo-

rentz. No entanto, como afirma Weinberg: "O grupo das transformações de Lorentz não é de forma alguma mais amplo que o de Galileu e, portanto, o princípio de relatividade não se originou com a teoria da relatividade restrita, mas foi restaurado por ela"^[1].

Para entendermos esta evolução, de um ponto de vista histórico, lembremos que já na Grécia antiga, uma certa noção de relatividade de caráter espacial era concebida devido ao formato da Terra. Ao se constatar que a Terra não era plana, e sim esférica, ficou também estabelecido que a noção de vertical era relativa, pois nesta concepção, estava, pelo menos implicitamente, aceita a hipótese da isotropia do espaço, do ponto de vista de um observador terrestre. Mesmo a idéia de que a Terra deveria estar animada de movimentos próprios de rotação e de translação em torno do Sol teve origem na Grécia antiga. Foi Aristarco de Samos (cerca de 310-230 a.C.) quem, inspirado nas concepções pitagóricas, levantou a hipótese de um sistema heliocêntrico. Esta

hipótese parece, contudo, não ter tido aceitação naquela época, sendo, séculos mais tarde, restabelecida pelo astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543). E foi a hipótese arrojada de Copérnico, afirmando que a Terra movia em volta do Sol, além de girar em torno de seu próprio eixo, a grande virada científica, que muito contribuiu para o surgimento de uma concepção física baseada na relatividade do movimento.

Além disso, vamos recordar, ainda que de modo sucinto, a problemática envolvida na concepção da imobilidade da Terra, concepção esta então predominante na época de Copérnico. Esta concepção estava arraigada no pensamento europeu, pelo menos desde os dias de Aristóteles. Para Aristóteles (384-322 a.C.) o movimento era inerente à matéria, sendo a natureza definida por ele como um "princípio de movimento e transformações"^[2]. Mas, apesar de tudo, em decorrência da lógica interna de sua filosofia, ele não pôde aceitar o movimento da Terra. Movimento, para ele, era algo bem mais abrangente que o simples movimento mecânico ou deslocamento no espaço. Quanto ao movimento mecânico, aliás o único que nos interessa aqui, Aristóteles dizia que o movimento natural de um corpo único e simples é simples. Um movimento simples tanto pode ser retilíneo como circular: retilíneo para cima, em se tratando de corpos "leves" como o ar ou a chama e retilíneo para baixo no caso dos corpos "pesados". Estes eram os movimentos naturais na região sublunar (a região dos fenômenos terrestres). Eram movimentos no sentido do centro da Terra - o centro do Cosmos aristotélico - ou no sentido contrário. O movimento circular em torno do centro do mundo era apanágio da região supralunar (movimentos dos corpos celestes). Outros possíveis movimentos nas proximidades da Terra eram considerados por ele movimentos violentos. Violento era assim, por exemplo, o movimento dos projéteis^[3]. Devemos salientar que, segundo Aristóteles, os movimentos dos corpos terrestres são essencialmente absolutos. Eles são caracterizados por um ponto de partida e um ponto de chegada, não havendo, portanto, o conceito de trajetória nem tampouco o de velocidade instantânea (ver 4,5). Esta concepção do movimento é, na opinião de Kouznetsov^[6], uma concepção não diferen-

cial, concepção "integral" num certo sentido. Quanto à Terra, ela deveria estar naturalmente em repouso, pois sendo o centro do mundo, não tinha para onde se mover.

A física de Aristóteles era uma física dos absolutos. Repouso e movimento eram considerados conceitos excludentes, já porque o movimento era considerado um processo e não um estado como viria, séculos mais tarde, estabelecer a física clássica. Por outro lado, aceitando a idéia errônea mas aparentemente correta, de que para se manter o movimento era necessária uma força atuante de modo permanente e que a velocidade do corpo esta relacionada ao coeficiente entre uma força eficiente e uma força de resistência do meio, na concepção do mundo de Aristóteles não havia lugar para o vazio. E assim, também não havia o princípio de inércia nem o princípio de relatividade do movimento.

II. O Princípio de Relatividade nos Tempos Modernos

E um fato bem conhecido que a noção de relatividade do movimento e o princípio de inércia estiveram intimamente ligados no processo histórico de formação da ciência clássica dos tempos modernos. Se Copérnico teve pelo menos a intuição da relatividade do movimento, sem a qual não se justificaria negar o movimento aparente do Sol em torno da Terra, o que era de fato uma violação dos sentidos, uma negação do empirismo ingênuo, foi Galileu Galilei (1564-1642) um dos primeiros a contestar a física de Aristóteles em sua totalidade, com o intuito de dar uma base de sustentação ao sistema de Copérnico. A partir de Galileu, foi se estabelecendo a convicção de que não podemos detectar o estado de movimento retilíneo uniforme (movimento inercial) a menos que tomemos outro corpo como referencial. Quanto a Galileu, é preciso deixar bem claro que ele ainda conservava algumas idéias quase-aristotélicas no tocante à natureza do movimento. Isto pode ser visto em algumas passagens do *Diálogo* de 1632. Galileu chegou bastante próximo à concepção moderna de movimento inercial em linha reta, sem contudo abandonar a idéia de que o movimento natural no universo deveria ser circular. Salviati diz: "... daqui concluo que somente movimento circular pode natural-

mente convir aos corpos naturais constituintes do universo e dispostos na ordem ótima, e que, do movimento retilíneo, o mais que se pode dizer é que ele foi conferido pela natureza aos corpos ou as partes dos corpos que, se encontrando fora dos seus locais próprios e em disposição desordenada, têm necessidade de retomar o seu estado natural pelo caminho mais curto. Parece-me portanto muito razoável pôr como última conclusão que para a manutenção da ordem perfeita entre as partes do mundo é preciso que os corpos se movam apenas segundo o movimento circular, ... somente o repouso e o movimento circular são próprios à conservação da ordem”^[7].

Por isso, Koyré^[8] alega que Galileu não formulou definitivamente o princípio de inércia, estando ele ainda preso à concepção de que o movimento circular seria inercial. De fato, Galileu foi vacilante em aceitar o movimento inercial em linha reta. Entretanto, na terceira jornada dos *Discursos* de 1638, ele parece mais propenso a conceber o movimento inercial em linha reta, afirmando textualmente que num plano horizontal o movimento seria eterno^[9]. Ainda mais, embora Galileu tenha descartado a leveza como propriedade fundamental dos corpos, ele considerava a ponderabilidade como algo de inerente a eles. Para Galileu todos os corpos são graves. Como observou Marie Tonnelat (1912-1980): “Uma intuição próxima a que leva Einstein à relatividade geral impede Galileu de limitar a validade do princípio de relatividade e de inércia. Apesar disso, esta concepção está mais próxima de uma inércia generalizada, onde a matéria, a gravidade e a inércia são inseparáveis”^[10]. Enquanto isso, René Descartes (1596-1650) considerava a extensão como o único atributo da matéria. Embora Descartes, à semelhança de Aristóteles, negasse a existência do vácuo, concebendo o éter a formar uma espécie de turbilhão universal responsável pelas interações entre os corpos e o movimento dos planetas, ele, partindo de algumas concepções metafísicas, chegou à conclusão de que o movimento inercial deveria ser uniforme e em linha reta. Entretanto, seria necessário enfatizar que, em linhas gerais, o desenvolvimento ulterior da física não seguiu bem a tradição cartesiana, que era uma concepção baseada numa imagem

cinemática do mundo. Por outro lado, não se pode negar a imensa importância de Descartes para a formação de uma visão mecanicista da natureza, que embora historicamente limitada, desempenhou um grande papel no sentido epistemológico, principalmente no tocante ao estabelecimento do método analítico de abordagem dos fenômenos naturais.

Para o estabelecimento da dinâmica propriamente dita foi ainda necessária a perspicácia de Isaac Newton (1642-1727) quem ao introduzir os conceitos quantitativos de massa, força e aceleração, muito contribuiu para dar uma base sólida à física como ciência. A teoria de Newton representava o triunfo de uma concepção física que vinha se formando desde Galileu e Descartes. Era uma abordagem dos fenômenos, baseada na relatividade do movimento inercial num espaço e num tempo homogêneos, infinitos e absolutos. Newton fazia distinção entre movimento relativo e movimento verdadeiro e absoluto com base nas forças exercidas sobre os corpos em movimento^[11]. O espaço passou a ser visto como a arena em que se desenvolvem os fenômenos e processos físicos. Havia apenas partículas materiais e espaço vazio. Parecia ser o triunfo do velho atomismo grego dos filósofos pré-socráticos como Demócrito e Leucipo. Entretanto, mas uma vez ressaltamos que a evolução dos conceitos e das idéias básicas da física, em geral, não constitui um processo linear, não havendo uma continuidade absoluta. Quase sempre, em qualquer etapa de seu desenvolvimento, há idéias conflitantes, significando que a predominância de uma ou outra concepção pode ser temporária. Pode acontecer que idéias aparentemente historicamente superadas voltem a despertar interesse em outra base conceitual. Em torno das concepções de Newton e de seus seguidores foi aos poucos se estabelecendo uma certa estrutura teórica bastante estável, que parecia refletir satisfatoriamente certos aspectos do mundo real, embora algumas controvérsias de caráter conceitual permanecessem insolúveis. Neste caso, podemos dizer que muitas questões foram endereçadas ao futuro. Mas, mesmo na época de Newton, o grande sábio Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) e o filósofo idealista George Berkeley (1685- 1753) não estavam satisfeitos com a con-

cepção de espaço e tempo absolutos. Por outro lado, os cartesianos não podiam aceitar uma concepção baseada na ação à distância e faziam uma severa crítica à teoria newtoniana da gravitação. Entretanto, de um modo geral, nenhum deles estavam em condições de oferecer uma alternativa construtiva em substituição às concepções de Newton. Foi então necessário transcorrer mais de um século para que essas questões ganhassem atualidade.

Consideremos, em primeiro lugar, o desenvolvimento do eletromagnetismo durante o século XIX. Como grande síntese teórica, surgia, em meados do século XIX, a eletrodinâmica clássica de James Clark Maxwell (1831-1879). Através de um sistema de equações em derivadas parciais, Maxwell conseguiu sintetizar todos os conhecimentos básicos até então adquiridos no tocante à eletricidade e o magnetismo, prevendo inclusive a existência de ondas eletromagnéticas se propagando com a velocidade da luz. Estas ondas foram de fato posteriormente observadas por Heinrich Hertz (1857-1894), sendo imediatamente vistas como uma confirmação decisiva da existência do campo eletromagnético. Parecia ser o triunfo de uma concepção diferencial do mundo. Era uma espécie de síntese dialética das concepções cartesianas. Havia, no entanto, serias dificuldades quanto à questão do referencial em que essas ondas deveriam ter a velocidade de aproximadamente 300 mil Km/s (a velocidade da luz no vácuo)^[12]. Acontece, que, de acordo com a mecânica newtoniana, satisfazendo as transformações de Galileu, a velocidade da luz deveria ser diferente em diferentes referenciais inerciais. Supunha-se então que a velocidade da luz constante, que aparecia nas equações de Maxwell, deveria ser a velocidade da luz em relação a um meio hipotético estacionário denominado éter^[13]. Esta hipótese de existência de um éter imóvel e imponderável, extremamente sutil, mas possuindo propriedades mecânicas próximas às dos sólidos, para suportar a propagação das ondas transversais da luz, vinha deste Augustin Jean Fresnel (1786-1853), hipótese muito controversa, mas que era um resquício muito forte do materialismo mecanicista da tradição cartesiana. Apesar de tudo, diversas tentativas feitas vi-

sando medir a velocidade da luz para fontes em movimento davam sempre resultados negativos. Não se observava a velocidade relativa da luz. Parecia ser algo de paradoxal: as transformações de Galileu não se aplicavam ao fenômeno de propagação da luz. Por outro lado, verificou-se que as equações de Maxwell não eram invariantes em relação às transformações de Galileu, havendo, no entanto, outro grupo de transformações que as deixavam invariantes. São as transformações de Lorentz, em homenagem ao grande físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), considerado um dos primeiros a obter estas transformações espaço-temporais de coordenadas, em 1904. Se bem que, de um ponto de vista totalmente formal, estas transformações já haviam sido descobertas por Wolde-mar Voigt (1850-1916), em 1887^[14,15]. Enquanto isso, o físico e filósofo austriaco Ernst Mach (1838-1916), em sua monografia *A Mecânica em seu Desenvolvimento Histórico*, publicada pela primeira vez em 1883, criticava muito as concepções de espaço, tempo e movimento da física newtoniana. Mach, em particular, mostrou que o tempo absoluto de Newton não existe. Se algo A varia no tempo, isto simplesmente significa que as condições de A dependem das condições de outra coisa B. Ele argumentava que todas as coisas são mutuamente interdependentes, de modo que não podemos medir o tempo absoluto^[16]. De acordo com Mach, toda espécie de movimento, tanto o de rotação como o de translação, são sempre relativos. No caso do movimento de rotação - para Newton, movimento absoluto em relação ao espaço absoluto - Mach dizia ser um movimento relativo às massas distantes do universo. Estas idéias foram denominadas por Einstein de princípio de Mach. Pode ser que se trate de um princípio de grande importância física, embora por enquanto matematicamente um tanto vago. Por isso, ele é simplesmente rejeitado por alguns físicos, levado em conta por outros, a espera de se encontrar uma formulação matemática adequada para ele. Para alguns, este princípio não passa de declarações mais ou menos filosóficas^[17].

III. A Teoria da Relatividade de Einstein

A discrepância entre a mecânica newtoniana e a ele-

trodinâmica de Maxwell motivou Einstein revisar os conceitos fundamentais de espaço e tempo, quando em 1905 eram publicados os princípios da Teoria da Relatividade Restrita. O leitmotiv para Einstein foi, antes de tudo, certas considerações que lhe pareciam estar ocultas na eletrodinâmica clássica (ver 14). "A harmonia oculta é superior à manifesta", já dizia Heráclito de Éfeso. Na elaboração desta teoria, além do postulado de equivalência de todos os sistemas de referências inerciais, Einstein tomou, como ponto de partida, a invariância da velocidade da luz no vácuo. As leis físicas, entendidas no sentido de leis objetivas da natureza, devem ser as mesmas em qualquer referencial inercial. A velocidade da luz no vácuo é uma constante universal. Uma das consequências imediatas destes dois postulados é a relatividade do espaço e do tempo, perdendo também seu caráter absoluto o conceito de simultaneidade para eventos separados no espaço. Outra consequência é a famosa relação entre massa e energia, às vezes chamada de equivalência entre massa e energia^[18]. O mais adequado, no entanto, do ponto de vista do formalismo tridimensional, é denominá-la de relação de proporcionalidade entre dois atributos da matéria. Massa é a medida de inércia - medida de um atributo da matéria. Energia é a medida de movimento - medida de outro atributo da matéria. Estes dois atributos estão relacionados pela famosa equação: $E = mc^2$ (ver [2]). Mas nem tudo é relativo na teoria da relatividade. Há muitas grandezas invariantes. Como exemplo típico, podemos citar a invariância de uma certa combinação do espaço e do tempo, matematicamente expressa através do chamado intervalo infinitesimal no espaço quadridimensional pseudoeuclidiano ou espaço de Minkowski. Por outro lado, as observações de Mach desempenharam um papel de princípio heurístico, motivando Einstein não só a revisar os conceitos fundamentais de espaço e tempo absolutos, como também da início à busca das equações do campo gravitacional. Mach concebia a inércia como grandeza relacional, oriunda da interação de um corpo aqui e agora com as massas longínquas do universo. Os primeiros passos decisivos de Einstein no sentido de encontrar uma abordagem relativística para o fenômeno da gravitação fo-

ram baseados na igualdade entre massa inercial e massa gravitacional^[19]. É um fato conhecido desde os tempos de Galileu que, num dado local do campo gravitacional, todos os corpos caem com a mesma aceleração. O que indica serem iguais (proporcionais) a massa inercial e a massa gravitacional. Experiências feitas por Loránd von Eötvös, em 1889, mostraram que m_g/m_i deveria diferir da unidade em menos de 10^{-9} , para diferentes materiais pesquisados. No âmbito da física newtoniana este fato não encontrava explicação, não passando de mera curiosidade. Einstein, por outro lado, impressionado com esta coincidência das duas massas, achava que ela deveria servir de postulado fundamental, análogo ao postulado da constância da velocidade da luz para a teoria da relatividade restrita. A partir de 1907, Einstein começa a discutir a questão de equivalência física entre referenciais em repouso num campo gravitacional homogêneo e e um referencial acelerado. Ele chamou este princípio de *princípio de equivalência*^[20,21,22]. Esta idéia de equivalência entre um referencial uniformemente acelerado e um campo gravitacional homogêneo serviu de leitmotiv para Einstein, no decorrer de vários anos, entre erros e acertos, finalmente obter as equações do campo gravitacional, em 1915. Num trabalho publicado em 1913, ele diz que o "experimento de Eötvös desempenhou um papel semelhante ao de Michelson no tocante a questão do movimento retilíneo uniforme"^[23].

Em síntese, podemos afirmar que a Teoria Geral da Relatividade, embora no caso limite dê os mesmos resultados previstos pela teoria newtoniana - e assim deve ser, visto que a teoria de Newton é basicamente correta, pelo menos no âmbito do sistema solar -, está baseada em conceitos totalmente distintos. Esta teoria rejeita tanto a existência de espaço e tempo absolutos como o de referencial privilegiado. Além disso, ela não faz distinção entre forças reais e as chamadas forças fictícias, rejeitando até mesmo a noção de força gravitacional, uma vez que a abordagem geométrica do campo gravitacional dispensa o próprio conceito de forças. A interpretação corrente destes fatos é a seguinte: a presença de matéria faz com que o espaço-tempo se curve. Aqui a matéria é tomada no sentido mais amplo possível, de

modo a incluir partículas massivas, campos não gravitacionais e partículas de massa nula (ver [2]).

A relatividade geral mostra haver uma profunda unidade dialética entre a matéria, o espaço e o tempo. E as equações de Einstein são bem mais complicadas que as de Maxwell, porque o campo eletromagnético não é portador de cargas, enquanto os campos gravitacionais são portadores de energia e momento, contribuindo assim para sua própria fonte. As equações do campo gravitacional são não lineares e a não linearidade representa o efeito da gravitação sobre si mesma (ver [1]) p. 151). Embora alguns aspectos desta teoria tenham uma certa semelhança com o princípio de Mach (19, pp. 100-103), ela não realiza o princípio de Mach, pelo menos se aceitarmos o ponto de vista mais radical de Mach, visando uma completa relativização das grandezas físicas. Principalmente, porque no espírito da relatividade geral, a inércia e a aceleração continuam sendo grandezas essencialmente absolutas. Além disso, resta o fato de que a teoria geral da relatividade é uma teoria de campo, enquanto o princípio de Mach sugere uma ação-a-distância.

IV. Conclusão

Vimos ao longo deste trabalho que a noção de relatividade, de uma forma ou de outra, sempre desempenhou um papel de grande importância na interpretação correta dos fenômenos naturais. Neste contexto, enfatizamos que, ao contrário do que alguns ingenuamente acreditam, a teoria da relatividade não concebe nenhum relativismo ontológico ou mesmo epistemológico. A teoria está longe de afirmar que "tudo é relativo". Na realidade, esta teoria tem alguns elementos essencialmente absolutos: *continuum spatii et temporis est absolutum*. Como afirma o grande físico alemão contemporâneo, Ernst Schmutzer^[24], se historicamente, quando a teoria estava sendo criada, a atenção tivesse sido dada a esses aspectos invariantes, ela bem poderia ser denominada teoria da absolutividade.

Como já foi mencionado acima, os especialistas divergem quanto ao significado do princípio de Mach. No que diz respeito à relação da relatividade geral com o princípio de Mach, parece que a resposta dada pelo

princípio de equivalência ao problema da inércia se encontra entre a de Newton e a de Mach. Em outras palavras: a relatividade geral não é tão relativística como Mach gostaria que fosse. Segundo Wolfgang Rindler^[25]: "A forma proposta por Mach para resolver as objeções contra o espaço absoluto, ou seja, abolindo o espaço como uma "coisa", pode ser demasiado radical. O status lógico da Relatividade Geral em relação ao princípio de Mach não foi ainda totalmente esclarecido. É às vezes sustentado que o princípio de Mach é fisicamente vazio, uma vez que não podemos fazer "experiências" com o universo, não podemos nunca decidir se o espaço absoluto ou as massas cósmicas que determinam a inércia, e portanto a escolha é mais filosófica que física". Apesar disso, algumas tentativas foram feitas, visando tornar as equações da Relatividade Geral mais consistentes com o princípio de Mach (a teoria de Brans-Dicke, ver, por exemplo, [1]). Por outro lado, A. K. T. Assis propôs, mais recentemente, uma teoria relacional para as forças gravitacionais e eletromagnéticas, cujo ponto de partida não é a relatividade geral, mas a teoria das forças do físico alemão Wilhelm Weber (1804-1891).

A importância do princípio de relatividade para o entendimento das leis que governam o mundo físico, e que são leis muito fundamentais, consiste, sobretudo, no fato de que partimos do princípio, segundo o qual, há classes de fenômenos que se manifestam independentemente da escolha do referencial. Neste caso, o princípio de relatividade é a garantia de objetividade das leis físicas, e como última instância, é um critério para a sua invariância. Quanto à Relatividade Geral, como uma etapa avançada da busca de compreensão da estrutura física do mundo real, ela é uma teoria bem sucedida, que estabelece uma interdependência entre espaço, tempo e matéria, mas não é a última palavra neste assunto.

Referências

1. S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, John Wiley & Sons, Inc. 1972, p. 19.
2. Eftichios Bitsakis. Mass, Matter, and Energy, A Relativistic Approach, in *Foundation of Physics*, v. 21. no. 1, 1991, pp. 63-81.

3. T. Kuhn, *A Revolução Copernicana*, Ed. 70, Lisboa, 1990, Cap. 3.
4. Yu. Vladimirov, N. Mitskievich, J. Horsky, *Space, Time, Gravitation*, Mir Pub., Moscow, 1987, pp. 12-14.
5. B. Kouznetsov, *GALILÉE*, Editions Mir, Moscou, 1973, Ch. VII.
6. B. Kouznetsov, *História da Filosofia para Físicos e Matemáticos*, Ed. Nauka, Moscou, 1974, pp. 139-140 (em russo).
7. Galileu Galilei. *Diálogo dos Grandes Sistemas* (primeira jornada) Gradiva, Lisboa.
8. A. Koyré, *Estudos Galilaicos*, Pub. Dom Quixote, Lisboa, 1986, pp. 260-262.
9. Galileu Galilei. *Dois Novas Ciências*, Nova Stella Editorial, S.P., 1988.
10. M. Tonnelat, *A renovação do Conceito de Relatividade na Física de Einstein*, na ed. russa de Coletâneas Einsteinianas, Ed. Nauka, Moscou, 1966, pp. 195-211.
11. I. Newton, *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, v. 1, Nova Stella Editorial, São Paulo, 1990.
12. R. Tepe, *Electrodynamics in the 19th century*, in Heinrich Hertz Commemorative Essays on the 100th Anniversary of his Pioneering Experiments on Electromagnetic Waves, Heinrich-Hertz-Institut, Berlin, 1988, pp. 23-40.
13. E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether & Electricity*, v.1 and 2, Dover Pub., New York, 1989.
14. H. Lorentz, A. Einstein, H. Minkowski, em *Textos Fundamentais da Física Moderna, O Princípio da Relatividade*, Fund. Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1983.
15. M. Born, *Physics and Reality*, Helvetica Physica Acta, Supplementum IV, 1956, pp. 244-260.
16. E. Mach, *A Mecânica em seu Desenvolvimento Histórico*, 1883 (ver também Albert Einstein e a Teoria da Gravitação, Edit. Mir, Moscou, 1979, pp. 49-72 (em russo).
17. C. W. Misner, K. S. Thorne, J. A. Wheeler, *Gravitation*, W. H. Freeman and Co. San Francisco, 1973, 21.12.
18. Marcelo Afonso Monteiro, *A Evolução da Física e a sua Relação com o Arcabouço Conceitual do Intelecto Ocidental*, Rev. Ensino de Física, v. 12, Dez. 1990, pp. 159-191.
19. A. Einstein, *The Meaning of Relativity*, Princeton Univ. Press, 1922, pp. 57-58 and 100-103.
20. Brown, G. Burniston, *Gravitational and Inertial Mass*, Am. J. Phys. 28, 1960, pp.475-83.
21. Ohanian, C. Hans, *What is the Principle of Equivalence ?* Amm. J. Phys., v.45, no. 10, 1977, pp. 903-909.
22. J. Norton, *What was Einstein's Principle of Equivalence?* St. Hist. Phil. Sci. 16, 1985, pp. 203-246.
23. A. Einstein, *Zum gegenwärtigen Stande des Gravitationsproblems* (Sobre o Estado Atual do Problema Gravitacional), Phys. Zeitschrift, no.25, 1913, pp. 1249-1265.
24. E. Schmutzer, *Relativitätstheorie - Aktuell*, Verlagsgesellschaft, Universität Jena, DDR, 1979, Abschnitt 3.
25. W. Rindler, *Essential Relativity*, Spring-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin, 1977, Chap. 1, 16.
26. A.K.T. Assis, *On Mach's Principle*, Found. of Physics Lett. 2, pp. 301-319, (1989).