

A3. Cartas trocadas com o ex-Ministro Mário Henrique Simonsen

Exmo. Sr.
Professor José Maria Filardo Bassalo
Departamento de Física da UFPA
Campus Universitário do Guamá
66075-900 Belém, Pará

Rio de Janeiro, 23 de fevereiro de 1995.

Senhor Professor:

Acabo de receber da Editora da Fundação Getúlio Vargas sua carta de 4 de janeiro p.p., junto com suas críticas a meu livro *Ensaios Analíticos*, bem como suas missivas a respeito endereçadas ao jornal A FOLHA DE SÃO PAULO. Não me compete comentar a política do jornal em matéria de publicação das cartas de seus leitores. Quanto a meu livro, cabe um esclarecimento preliminar: pelo menos enquanto eu estiver vivo, nenhuma revisão ou reedição poderá ser feita sem meu consentimento. Isto posto, a sua sugestão de que a *revisão do novo texto seja feita por especialistas, uma vez que o autor, sendo um economista filósofo, não é obrigado a conhecer certas nuances conceituais da Física e da Matemática*, é inteiramente inaceitável. Por certo estou aberto a críticas e sugestões, mas a decisão final de aceitá-las ou não compete exclusivamente a mim.

Apesar disso agradeço a sua leitura atenciosa do texto, bem como as críticas, às vezes rudes, mas bem intencionadas. A listagem dos erros de impressão é de grande utilidade para mim, e certamente será levada em conta numa eventual próxima edição do livro. São erros que o leitor independente identifica muito mais facilmente do que o próprio autor, já que este lê o que pensou ter escrito, e não necessariamente o que está impresso. Na realidade há muitos outros erros de impressão além dos assinalados na sua lista mas, de qualquer forma, fico muito grato por sua paciente contribuição.

Quanto aos erros conceituais, permita-me discordar de suas opiniões, não obstante as suas credenciais como Doutor em Física e Professor Titular da UFPA.

Começemos pelo princípio das alavancas. O fato de o momento estático se conservar (nas alavancas em equilíbrio) não exclui a conservação do trabalho: quando se desloca um peso com uma alavanca, o trabalho aplicado à alavanca é igual ao que ela desenvolve sobre o peso, atrito à parte. A força menor movimenta um peso maior porque os trabalhos são iguais. É isso o que se diz na página 48, onde a conservação do trabalho surge como uma insinuação. É óbvio que a lei de conservação de energia não se deve a Arquimedes, só tendo surgido no século XIX.

Quanto ao cálculo vetorial e Galileu, vale um esclarecimento: é sabido que o cálculo vetorial, como hoje é conhecido, é uma construção matemática do século XIX. Mas a idéia fundamental desse cálculo, a adição de vetores pela regra do paralelograma, é exatamente a lei de adição de velocidades de Galileu. Concordo, no entanto, que vale esclarecer a questão, para que não pareça um erro histórico (embora não em erro conceitual).

Concordo que o que define força é a segunda lei de Newton, e não as duas primeiras leis. O que se pode dizer é que a primeira lei é consequência da segunda: na ausência de forças externas a aceleração de uma partícula é igual a zero, vale dizer, seu movimento é retilíneo uniforme. Esse é um pormenor a ser corrigido numa eventual próxima edição do livro.

Surpreende-me sua observação de que *na página 117 o autor faz uma soma vetorial de grandezas que não podem ser somadas, pois atuam em corpos distintos*. A objeção valeria se se tratasse de forças. Trata-se, no entanto, de um simples problema de cinemática, de composição de acelerações, daqueles que se sabem resolver desde os tempos de Galileu. O verbo *atuar* não se aplica ao caso.

Quanto à sua crítica aos meus comentários sobre a equação de Laplace, à página 154 do livro, ela resulta da pinçagem de uma frase pela metade. De fato, minha afirmação de que a única solução é $W=0$ é precedida pelo enunciado das condições de contorno correspondentes. Isto posto, é redundante dizer que, com outras condições de contorno, a equação admite soluções diferentes.

Da mesma forma, parece-me fora de foco sua crítica ao comentário à página 165, *só que as forças magnéticas, ao contrário das elétricas, não obedeciam à terceira lei de Newton*. Essa é uma observação feita no século XIX, logo após a descoberta das leis do eletromagnetismo, e relatada por inúmeros historiadores da Física, como George Gamow. É claro que a terceira lei de Newton pressupõe ação instantânea à distância, sem o que perde todo o sentido. Sabe-se hoje, também, que todas as forças da natureza se propagam com velocidade finita, o primeiro caso descoberto tendo sido o das forças eletromagnéticas, como aliás se diz na própria página 165. Só que isso não era sabido nos primórdios do eletromagnetismo, exatamente o contexto histórico a que se refere o início da página em questão.

Na página 200, quando falo da ausência de evidência empírica de aumento de massa com a velocidade, refiro-me ao contexto de 1905, o ano do artigo de Einstein sobre a relatividade restrita. As experiências de Bucherer só se tornaram conhecidas depois, e não influenciaram a descoberta de Einstein.

Do mesmo modo, quando digo na página 213 que a teoria da relatividade generalizada dispensa as forças fictícias, repito pura e simplesmente o que dizia o próprio Einstein e centenas de seus comentaristas. Não entro na discussão da existência ou não dessas forças, que é um tema metafísico. Na ótica relativista a existência ou não dessas forças depende da geometria que se adote.

Quanto aos erros históricos, a página 16 do livro matou Karl Popper com três anos de antecedência por um erro de impressão. Do mesmo modo Faraday foi transformado de Michael em Charles nas páginas 173 e 226. Além disso, na página 173 a experiência de Michelson-Morley está erradamente datada como tendo sido de 1881, quando na realidade foi de 1887. Agradeço-lhe por essas três correções.

Já quando afirmo que o ponto de partida de Einstein foi observar que a experiência de Michelson-Morley atirou no que viu mas acertou no que não viu, quero dizer o seguinte: i) a experiência pretendia medir a velocidade da Terra no éter, o que significava desmentir o princípio de Galileu; ii) ao concluir que a velocidade da luz era a mesma em todas as direções, a experiência exigiu a reformulação da cinemática clássica, baseada da lei da adição de velocidades pelo próprio Galileu. Em compensação, abriu a possibilidade de reconciliar o eletromagnetismo com o princípio da inércia, o que era impossível na física clássica. Foi isso que Einstein entendeu e que Lorentz não havia

percebido. Diante disso não subsiste a crítica segundo a qual *uma leitura mais atenta do célebre artigo de Einstein sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento mostra que esse físico usou a simetria das equações de Maxwell como ponto de partida desse famoso artigo*. Assimetria é apenas parte da história.

Quanto à escassez de referências bibliográficas, permita-me uma explicação: *Ensaio Analítico* foi um livro concebido como obra de divulgação, e não como texto acadêmico, já que nada contém de original. Isto posto, seria ridículo ornamentá-lo com aquelas habituais bibliografias dos escribas universitários, onde se lista tudo aquilo que o autor leu e sobretudo o que não leu, com índices remissivos de toda espécie. Mal comparando, é o mesmo que cobrar a bibliografia num romance sofisticado, como *O Nome da Rosa* de Umberto Eco. Admito que o texto seja excessivamente parcimonioso em matéria de referências e que estas devam ser ampliadas numa próxima edição. Mas não é minha intenção desfigurar *Ensaio Analítico*, vestindo o livro como se fosse uma tese acadêmica.

Atenciosamente

Mário Henrique Simonsen

Belém, 14 de março de 1995

Exmo. Sr. Prof. Mário Henrique Simonsen
Fundação ``Getúlio Vargas``
Caixa Postal 9052
20 000 – Rio de Janeiro – RJ

Senhor Professor:

Obrigado por sua carta de 23 de fevereiro p.p. Inicialmente, quero pedir-lhe desculpas por parecer que minha sugestão sobre uma nova edição de seu *Ensaio Analítico*, indicava que não houvesse sua participação ao fazê-la. Eu também não aceitaria que, enquanto vivo, uma nova edição de minhas *Crônicas da Física* fosse feita sem, no mínimo, a minha anuência.

Como o senhor se declara aberto a críticas e sugestões, tomei a liberdade de escrever esta carta para discutirmos um pouco mais, os temas em que não estamos de acordo. Não tome esta carta como uma tréplica, e sim, apenas um motivo a mais para uma reflexão por ocasião em que o senhor estiver disposto a apresentar uma nova edição de seu importante livro, pois, me parece, é o único livro no Brasil e, talvez no exterior, destinado, em princípio, a economistas, a mostrar que para compreender a Economia é necessário ter sensibilidade artística e conhecimento de Física e de Matemática. Assim, vamos às nossas discordâncias.

1. Princípio das alavancas. Na página 48 de seu livro, o senhor afirma: - ``Arquimedes (287-212 a.C.) foi um dos maiores gênios da humanidade. Na física, sua primeira grande descoberta foi o princípio das alavancas (figura 2): uma força menor F_1 poderia equilibrar uma força maior F_2 desde que os braços de alavanca a_1 e a_2 se compensassem, isto é, desde que $F_1 a_1 = F_2 a_2$ (segue a figura de uma alavanca interfixa onde estão registrados o ponto fixo, as forças F_1 e F_2 e os braços de alavanca a_1 e a_2). O princípio das alavancas levou à idéia de que há uma grandeza mecânica que se conserva (grifo meu) – o trabalho, isto é, força vezes espaço. E, subseqüentemente, ao conceito de energia, como tal entendida a capacidade de produzir trabalho``. Por outro lado, em sua carta o senhor afirma que: - ``O fato de o momento estático se conservar (nas alavancas em equilíbrio) não exclui a conservação do trabalho: quando se desloca um peso com uma alavanca, o trabalho aplicado à alavanca é igual ao que ela desenvolve sobre o peso, atrito à parte. A força menor movimentada um peso maior porque os trabalhos são iguais. É isso que se diz na página 48, onde a conservação do trabalho surge como uma insinuação``. O senhor há de convir que um leitor menos avisado, pensará que a igualdade que está no texto, é a própria igualdade entre os trabalhos, já que ele vê dois produtos de força por espaço sendo igualados. No seu texto não está claro que o trabalho realizado pelas forças só acontece quando a alavanca é deslocada, aproximadamente, na vertical, sendo que o produto de cada força por esse deslocamento quase vertical, é que representa o trabalho de cada uma. Além do mais, embora trabalho e momento estático sejam obtidos multiplicando-se a força por espaço, conceitualmente, eles são bem diferentes: o momento

estático é o módulo do *torque* \vec{N} , que é um produto vetorial ($\vec{N} = \vec{r} \times \vec{F}$) e o trabalho τ é uma grandeza escalar ($d\tau = \vec{F} \cdot d\vec{s}$). Observe-se, ainda, que as leis de conservação só se aplicam às grandezas físicas (energia: $E = T+V$; momento linear: $\vec{p} = m\vec{v}$; momento angular: $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$), e elas decorrem de simetrias (tempo \rightarrow energia; translação \rightarrow momento linear; rotação \rightarrow momento angular) apresentadas por um sistema físico, conforme Noether demonstrou em 1918.

2. Lei da adição de velocidades. Na página 104, o senhor afirma: - ``A segunda contribuição magistral de Galileu à física é a sua lei de adições de velocidades e acelerações. Trata-se da introdução do cálculo vetorial na cinemática''. Em sua carta, o senhor diz: - ``Quanto ao cálculo vetorial e Galileu, vale um esclarecimento: é sabido que o cálculo vetorial como hoje é conhecido, é uma construção matemática do século XIX. Mas a idéia fundamental desse cálculo, a adição de vetores pela regra do paralelograma (grifo meu), é exatamente a lei da adição de velocidades de Galileu''. Parece-me que há um equívoco nisso tudo. A lei de adição de velocidades (e nunca de acelerações!) de Galileu, referida em seu texto tem a ver com a composição de dois movimentos atuantes no mesmo corpo. Por exemplo, no lançamento oblíquo de um corpo (a partir de uma superfície horizontal), para se determinar a trajetória do mesmo, considera-se que a velocidade resultante é decorrente de uma composição entre um movimento uniforme horizontal (velocidade constante) e um movimento uniformemente retardado (velocidade variável). Pode-se até usar a *regra do paralelograma* para obter-se a velocidade resultante, contudo, seria uma injustiça histórica considerar Galileu como o precursor dessa regra, já que foi Varignon (1654-1722) quem efetivamente trabalhou com essa regra, de maneira prática, usando uma espécie de máquina simples que idealizou e construiu – o *funicular*, para obter a resultante de forças que atuam no mesmo instante em um corpo. Com isso, demonstrou o famoso *Teorema de Varignon*: - ``O momento da resultante é igual a soma dos momentos das componentes''. [Aliás, esse teorema foi muito importante para o desenvolvimento da *Estática das Construções*, básica para o cálculo de estruturas, e eu, na época em que exerci a profissão de engenheiro civil (metade da década de 1960) como calculista de estruturas, antes do advento do computador, usei-a muito em meus cálculos estruturais.]

Com relação à adição de velocidades de Galileu como *uma contribuição magistral* de seu gênio, parece-me que há um reparo a fazer. Em meu entendimento, uma das contribuições magistrais de Galileu, foi seu *princípio da relatividade dos movimentos*, hoje conhecido como *grupo de Galileu* (obtido por volta de 1624), pelo qual se conclui que a forma da trajetória de um corpo em queda livre, depende do observador. Por exemplo, se uma pessoa deixa cair um corpo do alto do mastro de um navio em movimento uniforme, ele parecerá descrever uma trajetória retilínea para observadores situados no tombadilho do navio; porém, observadores situados na margem do rib no qual o navio está se movimentando, verão uma trajetória curvilínea para a mesma. Na linguagem atual, esse princípio decorre de: $x' = x + Vt$, onde x' é a posição de um corpo em relação a um referencial O' em repouso e x é a posição desse mesmo corpo em relação a um referencial O em movimento retilíneo uniforme, com velocidade V constante em relação ao observador O' e paralelamente aos eixo dos x . Assim, derivando-se (conceito introduzido, independentemente, por Newton e Leibniz, na segunda metade do século XVII) a expressão acima, virá: $\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx}{dt} + V \frac{dt}{dt'}$. A expressão acima nos mostra que a adição de velocidades

de Galileu, derivada desse princípio, só é obtida se assumirmos que o tempo é absoluto, isto é: $t = t'$. (Essa afirmação, talvez, implícita no raciocínio de Galileu, só foi postulado por Newton, em seu *Principia Mathematica*, de 1687.) Aceito esse postulado, tem-se: $v'_x = v_x + V$. Contudo, essa lei de adição de velocidades não é a mesma usada quando se estuda o lançamento oblíquo de corpos.

3. Definição de força pelas duas leis de Newton. Na página 111, lê-se: - ``Na realidade essas três leis (de Newton), por mais veneráveis que sejam, são bem menos profundas do que parecem à primeira vista. As duas primeiras equivalem a definir força''. Em sua carta, o senhor modifica essa afirmação: - ``Concordo que o que define força é a segunda lei de Newton, e não as duas primeiras leis. O que se pode dizer é que a primeira lei é consequência da segunda: na ausência de forças externas a aceleração de uma partícula é igual a zero, vale dizer, seu movimento é retilíneo uniforme. Esse é um pormenor a ser corrigido numa eventual próxima edição do livro''. Em meu entendimento, creio não ser apenas um pormenor, pois já que envolve uma sutil questão conceitual. Vejamos porque. Vamos tomar a segunda lei de Newton na forma proposta por Euler, em 1750:

$F_x = ma_x = m \frac{d^2x}{dt^2}$. Se considerarmos $F_x = 0$, e integrando-se a equação resultante, teremos: $x = at + b$, que representa a equação de uma reta. Esse resultado indica o seguinte: se uma partícula estiver livre (numa região em que não existe nenhum potencial), a sua trajetória é uma reta. Pois bem, será que podemos afirmar que esse resultado traduz a primeira lei de Newton? Vamos ao enunciado apresentado pelo próprio Newton em seu *Mathematical Principles of Natural Philosophy*, vertido do latim para o inglês por Andrew Motte (*Great Books of the Western World*, Volume 34, Encyclopaedia Britannica, 1971): - ``LAW I: Every body continues in its state of rest, or of uniform motion in a right line, unless it is compelled to change that state by forces impressed upon it''. Traduzindo-se livremente para o português, temos: - ``Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado (grifo meu) a mudar aquele estado por forças imprimidas (grifo meu) sobre ele''. Parece-me que esse enunciado não significa dizer que se a força que atua num corpo é zero, sua trajetória é uma linha reta. Essa lei procura esclarecer o conceito de inércia, que começou com o *impetus* de Philoponos [475(?) - 565(?)], melhor elaborado por Buridan (c.1300-1358) e iniciado sua conceituação por Galileu, em suas experiências de pensamento sobre o movimento ascendente e descendente em planos inclinados, descritas em seu livro *Diálogos sobre os dois Sistemas*, de 1632.

4. Soma vetorial de grandezas que não podem ser somadas. Na página 117, está escrito: - ``A aceleração da Lua em torno da Terra será a resultante vetorial: $\mathbf{a} = \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_3$ ''. Mais adiante, na figura 7 o senhor indica essas acelerações: \mathbf{a}_1 , é a aceleração da Lua devido à atração exercida pelo Sol, \mathbf{a}_2 é a aceleração da Lua devido à atração exercida pela Terra, e \mathbf{a}_3 é a aceleração da Terra pela atração exercida pelo Sol. Em sua carta, lê-se: - ``Surpreende-me sua observação de que na página 117 o autor faz uma soma vetorial de grandezas que não podem ser somadas, pois atuam em corpos distintos. A objeção valeria se se tratasse de forças. Trata-se, no entanto, de um simples problema de cinemática, de composição de acelerações, daqueles que se sabem resolver desde os tempos de Galileu. O verbo *atuar* não se aplica ao caso''. Caro professor (será que lhe posso chamar de amigo, já que temos a mesma idade, somos também engenheiros civis, e estamos nos

correspondendo?), aqui há um outro equívoco, pois existe uma distinção muito grande entre cinemática e dinâmica, conforme o senhor bem sabe. A cinemática trata apenas de velocidades, que pode ser estudada com geometria (ou analítica, ou vetorial). Já a dinâmica se relaciona com acelerações que, depois de Newton e Euler, estão intrinsecamente ligadas com forças. O problema de estudar o movimento da Lua, considerando as atrações do Sol e da Terra, é um problema que até hoje não foi resolvido: o célebre problema de três corpos. Por isso é que Newton considerou apenas a aceleração exercida pela Terra sobre a Lua, desprezando a exercida pelo Sol, sobre a Lua. A soma apresentada pelo senhor está realmente equivocada, pode crer.

5. Sobre a equação de Laplace. Na página 154, o senhor afirma: - ``Aplicada a todo espaço, e com a restrição de soluções que tendem a zero no infinito, a equação de Laplace não chega a ser muito criativa (grifo meu), pois sua única solução é $W=0$. A equação interessa quando não se aplica a um número finito de singularidades, ou quando se refere apenas a uma região vazia do espaço. No primeiro caso, a equação descreve o potencial newtoniano com cargas pontuais. No segundo, como um potencial newtoniano se espalha pelo espaço vazio''. De sua carta, destaco: - ``Quanto à sua crítica aos meus comentários sobre a equação de Laplace, à página 154 do livro, ela resulta da pinçagem (grifo meu) de uma frase pela metade. De fato, minha afirmação de que a única solução é $W=0$ é precedida pelo enunciado das condições de contorno, a equação admite soluções diferentes''. Analisando a frase completa, a situação se torna mais equivocada, pois o senhor afirma o seguinte: - ``A equação interessa quando não se aplica a um número finito de singularidades, ou quando se refere apenas a uma região vazia do espaço. No primeiro caso, a equação descreve o potencial newtoniano com cargas pontuais. No segundo, como um potencial newtoniano se espalha pelo espaço vazio''. Primeiro: que cargas são essas? Gravitacionais ou elétricas? Se forem elétricas, como parece indicar o seu texto, trata-se de *potencial coulombiano* e não *newtoniano*, pois aquele envolve atração e repulsão, enquanto este envolve apenas atração. Segundo: as equações de Poisson e Laplace têm sua aplicabilidade distinta, e que não é só uma questão de condições de contorno. Por exemplo, suponha que tenhamos um cubo de paredes metálicas, tendo cinco de suas faces ligadas à terra e a restante ligada a uma bateria. Se quisermos saber qual o potencial dentro do cubo, teremos de usar a equação de Laplace. Contudo, se houver uma carga elétrica pontual no interior desse mesmo cubo, para calcular o potencial na região vazia restante, excluindo a carga, deveremos usar a equação de Poisson, muito embora as condições de contorno permaneçam as mesmas. Em vista disso, afirmar que a equação de Laplace não chega a ser muito criativa é um pouco temerário, mesmo dita por uma pessoa que não seja um especialista nesse assunto.

6. Forças elétricas e magnéticas e a terceira lei de Newton. Vejamos o que está escrito na página 65 de seu livro: - ``As três leis, sintetizadas nas fórmulas (3, 4 e 5), começaram a dar panos para mangas. Aparentemente havia dois tipos de forças: as elétricas, dadas pela lei de Coulomb, função das cargas e das distâncias; e as magnéticas, exercidas por cargas em movimento sobre outras cargas em movimento. Só que as forças magnéticas, ao contrário das elétricas, não obedeciam à terceira lei de Newton!'' Para rebater minha crítica sobre esse tema, o senhor assim se manifestou em sua carta: - ``da mesma forma, parece-me fora de foco sua crítica ao meu comentário à página 165, só que as forças magnéticas, ao contrário das forças elétricas, não obedeciam à terceira lei de

Newton. Essa é uma observação feita no século XIX, logo após a descoberta das leis do eletromagnetismo, e relatada por inúmeros historiadores da Física, como George Gamow. É claro que a terceira lei de Newton pressupõe ação instantânea à distância, sem o que perde todo o sentido. Sabe-se hoje, também, que todas as forças da natureza se propagam com velocidade finita, o primeiro caso descoberto tendo sido o das forças eletromagnéticas, como aliás se diz na própria página 165. Só que isso não era sabido nos primórdios do eletromagnetismo, exatamente o contexto histórico a que se refere o início da página em questão''. O senhor diz que a violação da terceira lei de Newton pelas forças magnéticas foi registrada por inúmeros historiadores da Física, como George Gamow. Pois bem, sou um grande admirador desse físico e li quase todos os livros que escreveu sobre a divulgação da Ciência, em particular da Física, como ocorre em seu livro *A Biografia da Física* (Zahar, 1963). Pensando que havia esquecido o que li nesse livro, reli o Capítulo V, no qual ele trata da *Era da Eletricidade*, e verifiquei que não há essa afirmação, pelo menos nessa edição. Gostaria de saber em qual de seus livros, ele a cita. Parece-me que há um equívoco em seu livro e em sua carta, pois a aparente descoberta da violação da terceira lei de Newton pelo campo eletromagnético [e não apenas pelo campo (e não força!) magnético] só foi questionada por ocasião do cálculo do famoso *potencial retardado*, obtido por Liénard, em 1898 e, independentemente, por Wiechert, em 1900. Nesse cálculo, há a determinação do potencial em um dado ponto do espaço devido ao movimento de um elétron. O potencial assim obtido mostra claramente que a ação do campo eletromagnético ``carregado pelo elétron'' (ou ``ancorado'' nele, segundo Gamow) só é ``sentido'' por uma outra carga elétrica situada num determinado ponto, num certo tempo depois, ou seja, não é instantâneo. Parece que esses *potenciais retardados* representam uma aparente violação da terceira lei de Newton. Na realidade, não há violação nenhuma, uma vez que o campo eletromagnético está interagindo a cada instante com o meio, e este reage, também, em cada instante, sobre o meio. O que causou surpresa aos físicos nos *primórdios do eletromagnetismo* foi o fato de ser observado (nas experiências de Oersted, Ampère, Arago, Biot e Savart, realizadas em 1820) que o *campo magnético* \vec{H} não era mais do tipo central como o *campo gravitacional* \vec{g} e o *campo elétrico* \vec{E} , isto é, na direção do vetor ($\vec{r} - \vec{s}$) (usando sua notação), e sim, era perpendicular a esse vetor.

7. Ausência de evidência empírica do aumento da massa com a velocidade, em 1905. Na página 200 dos *Ensaio Analíticos*, o senhor se expressa da seguinte maneira: - ``Em 1905, tanto a fórmula do aumento de massa com a velocidade quanto essa visão de massa e energia como grandezas físicas equivalentes eram extrapolações extremamente audaciosas e foram recebidas pela comunidade científica com ceticismo. Não havia evidência empírica (grifo meu) a favor dessas hipóteses, já que ninguém conseguira observar (grifo meu) aumentos de massa com a velocidade, nem liberação de energia pela destruição da matéria''. Em face de minha crítica sobre esse texto, o senhor se pronunciou, em sua carta, da seguinte maneira: - ``Na página 200, quando falo da ausência de evidência empírica do aumento de massa com a velocidade, refiro-me ao contexto de 1905, o ano do artigo de Einstein sobre a relatividade restrita. As experiências de Bucherer só se tornaram conhecidas depois, e não influenciaram a descoberta de Einstein''. Aqui, há uma série de equívocos, e um erro meu e seu. A variação da massa do elétron com a velocidade já havia sido demonstrada desde 1892 por Lorentz, em sua *Teoria do Elétron*. Com um modelo diferente do proposto por Lorentz para o elétron, Max Abraham, em 1902, encontrou novos

resultados sobre a não-rigidez do elétron. As experiências realizadas por Kaufmann (e não por Bucherer, conforme nós dois afirmamos) no período de 1901-1903, mostraram-se mais compatíveis com o modelo de Abraham. No entanto, em 1904, Lorentz mostrou num artigo que os resultados experimentais de Kaufmann eram mais compatíveis com o seu modelo, utilizando, para isso, alguns resultados dos cálculos feitos por Kaufmann. Em vista disso, em 1904, Bucherer apresentou um novo modelo para o elétron. Tentando encontrar algum resultado experimental que pudesse decidir entre os modelos rivais de Lorentz, Abraham e Bucherer, Kaufmann realizou mais duas experiências, no período 1905-1906. Nesse interim, Einstein publicou, em 1905, seu famoso trabalho *A eletrodinâmica dos corpos em movimento* (conhecida hoje como *Teoria da Relatividade Restrita*) que, conforme o senhor confirma, no início, não tinha nada a ver com esses modelos teóricos do elétron, e nem com a experiência de Michelson-Morley. Uma excelente discussão sobre esse tema, encontra-se em: James T. Cushing, *American Journal Physics* **49**: 1133 (1981); e em A. Villani, *O Confronto Lorentz-Einstein e suas interpretações*, *Revista do Ensino de Física* **3** (1981).

8. A Teoria da Relatividade Geral e as forças fictícias. Vejamos sua afirmação na página 213 de seu texto: - ``Associando essa métrica ao sistema acelerado, a teoria da relatividade dispensa as forças fictícias: as trajetórias observadas das partículas sobre as quais não incidem forças continuam sendo as linhas de menor separação. Só que esses trajetos não mais são movimentos retilíneos e uniformes no sentido euclidiano''. Sua resposta aos meus comentários: - ``Do mesmo modo, quando digo na página 213 que a teoria da relatividade generalizada dispensa as forças fictícias, repito pura e simplesmente o que dizia o próprio Einstein e centenas de seus comentaristas. Não entro na discussão da existência ou não dessas forças, que é um tema metafísico (grifo meu). Na ótica relativista a existência ou não dessas forças depende da geometria que se adote''. A existência das forças fictícias não é um tema metafísico e, sim, de alta indagação filosófica. Essa discussão surge desse quando Newton, em seu *Principia*, no Escólio depois de suas primeiras oito definições, trata da descrição do movimento da água contida em um balde: o chamado problema do *balde girante*. Para Newton, ao girarmos esse balde contendo água, a superfície livre desse líquido tomará a forma de um parabolóide, devido às forças de inércia (ou fictícias), forças essas, segundo Newton, exercidas pelo espaço absoluto. Logo em seguida, Leibniz criticou essa concepção newtoniana do espaço absoluto. No entanto, uma crítica mais consistente sobre essa questão foi apresentada por Mach, em seu célebre livro *A Ciência da Mecânica*, editado em 1883, no qual afirma que as forças inerciais (fictícias) decorrem da distribuição de massa no Universo (mais tarde conhecido como *princípio de Mach*), e não apenas de uma simples mudança de referencial (de inercial para não-inercial) como havia sido demonstrado por Clairaut, em 1742-1745. Mach chegou a afirmar que se fosse possível girar uma grande massa em torno do balde com água e em repouso, a superfície inicialmente horizontal da água, transformar-se-ia na forma parabolóide, devido à rotação da grande massa. Um experiência nesse sentido foi realizada, sem êxito, pelos irmãos B. e J. Friedlander, em 1894-1896. Pois bem, desde que Einstein, em 1915, postulou seu famoso *princípio da equivalência*: - `Um campo de forças é equivalente a um campo de gravitação', base de sua Teoria da Relatividade Geral, começou uma grande discussão filosófica e não metafísica, se o *princípio da equivalência* tem alguma relação com o *princípio de Mach*. É oportuno esclarecer que Einstein, conforme ele próprio declarou, foi bastante influenciado por aquele livro de Mach. Uma discussão sobre a obra de Einstein, principalmente a questão da existência física ou não das forças não-inerciais (fictícias),

pode ser vista no excelente livro de Michel Paty: *Einstein Philosophe*, Presses Universitaires de France, 1993, bem como nos livros de Abraham Pais: *'Subtle is the Lord...'* *The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1983, e *Einstein live here*, Clarendon Press e Oxford University Press, 1994.

9. Einstein e a experiência de Michelson-Morley. Em sua carta, o senhor faz o seguinte comentário: - ``Já quando afirmo que o ponto de partida de Einstein foi que a experiência de Michelson-Morley atirou no que viu mas acertou no que não viu, quero dizer o seguinte: i) a experiência pretendia medir a velocidade da Terra no éter, o que significava desmentir o princípio de Galileu; ii) ao concluir que a velocidade da luz era a mesma em todas as direções, a experiência exigiu a reformulação da cinemática clássica, baseada da lei da adição de velocidades pelo próprio Galileu, em compensação, abriu a possibilidade de reconciliar o eletromagnetismo com o princípio da inércia, o que era impossível na física clássica. Foi isso que Einstein entendeu e que Lorentz havia percebido. Diante disso não subsiste a crítica segundo a qual uma leitura mais atenta do célebre artigo de Einstein sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento mostra que esse físico usou a assimetria das equações de Maxwell como ponto de partida desse famoso artigo. A assimetria é apenas parte da história''. Creio que assimetria não é apenas uma parte da história, e sim a principal parte dessa história que levou Einstein a formular a Teoria da Relatividade Restrita. Parece-me que o objetivo dessa experiência não era só medir a velocidade da Terra no éter, mesmo porque já se conhecia a velocidade orbital da Terra em torno do Sol, valor esse usado, inclusive, para interpretar o resultado da mesma. A grande preocupação científica de Michelson era a determinação da velocidade da luz. Para isso, ele inventou o *interferômetro*, em 1881, com o qual, inclusive, fez a experiência de 1887, justamente com o químico (e não físico) norte-americano Morley e, durante todo o restante de sua vida, dedicou-se a melhorar cada vez mais, a determinação dessa velocidade, segundo nos conta Bernard Jaffe em seu livro *Michelson e a velocidade da luz*, EDART Livraria e Editora Ltda., 1967. Contudo, se quisermos apresentar um objetivo para a experiência de Michelson-Morley, podemos dizer que caso o resultado fosse positivo (observação do deslocamento da figura de interferência dos raios luminosos provindos dos braços ortogonais do interferômetro, depois que esse sofresse uma rotação de 90°), haveria comprovação da hipótese de Maxwell de que a luz, como uma onda eletromagnética, se propaga no *éter luminífero descartiano*, e que, também, as transformações de Galileu se aplicavam ao eletromagnetismo, além da Mecânica Newtoniana. Todavia, Einstein não estava preocupado com o resultado negativo dessa experiência, e sim, com a assimetria das equações de Maxwell e com a simultaneidade ou não, de eventos distanciados no espaço. Insisto nisso, porque é com a análise dessas questões que começa o seu célebre artigo de 1905: *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*. Após essa análise, postulou: 1) que as leis da Física (e não mais as da mecânica, segundo Galileu-Newton) são invariantes por uma transformação de Lorentz; 2) constância da velocidade da luz. De posse desses resultados, Einstein mostra como a Mecânica Newtoniana deverá se modificar para permanecer invariante por uma transformação de Lorentz, e não para reconciliar o eletromagnetismo com o princípio da inércia (o que isso significa?). Além do mais, o resultado dessa experiência, também não foi muito importante para que Lorentz desenvolvesse seu *program de pesquisa* (usando aqui o conceito de Lakatos) para tentar, a partir de 1892, a desenvolver a Teoria do Elétron, através da qual chegou à célebre *transformação de Lorentz* (nome dado por Poincaré). A preocupação de Lorentz era

entender (via o eletromagnetismo maxwelliano, em que era especialista, pois sua tese de doutoramento, em 1875, versou sobre o mesmo), o que Faraday não havia conseguido, em 1862, ou seja: encontrar mudanças no período ou no estado de polarização da luz emitida pela chama do sódio, quando esta era colocada em um campo magnético forte. Foi Zeeman, aluno de Lorentz, quem conseguiu em 1896/1897, entender o *efeito Faraday* ao observar, utilizando um equipamento melhor que o de Faraday (i. e., uma *bobina de ruhmkorff*, de 27 ampères, e uma *grade de difração de rowland*, de 44.983 linhas/polegada), que as duas linhas amarelas D do sódio eram alargadas quando examinadas sob a ação de um campo magnético forte: o famoso *efeito Zeeman*. Ainda em 1892, Lorentz explicou o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley, ao formular a hipótese de que uma régua se contrai de um fator γ^{-1} [$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$] na direção do movimento. Essa mesma hipótese foi apresentada por Fitzgerald, em 1893, razão pela qual essa contração chama-se *contração de Lorentz-Fitzgerald*. Como o senhor vê, Lorentz percebeu muito bem a experiência de Michelson-Morley. Como esse tópico de minha carta está um pouco compacto, o senhor poderá ver todo esse desenvolvimento histórico, e certamente melhor do que apresentei acima, no livro de Whittaker: *A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories* (Thomas Nelson and Sons, Ltd., 1951), principalmente o Capítulo XIII: Classical Theory in the Age of Lorentz. Aliás, quando apareceu a primeira edição do mesmo, em 1910, o autor foi bastante criticado por não conter nele, nenhuma referência a esse famoso trabalho de Einstein.

10. Referências bibliográficas. Sua carta registra o seguinte: - `` Quanto à escassez de referências bibliográficas, permita-me uma explicação; *Ensaios Analíticos* foi um livro concebido como obra de divulgação, e não como um texto acadêmico, já que nada contém de original. Isto posto, seria ridículo (grifo meu) ornamentá-lo com aquelas habituais bibliografias dos escribas universitários (grifo meu), onde se lista tudo aquilo que o autor leu e sobretudo o que não leu, com índices remissivos de toda espécie. Mal comparando, é o mesmo que cobrar a bibliografia num romance sofisticado, como *O Nome da Rosa* de Umberto Eco. Admito que o texto seja excessivamente parcimonioso em matéria de referências e que estas devam ser ampliadas numa próxima edição. Mas não é minha intenção desfigurar *Ensaios Analíticos*, vestindo o livro como se fosse uma tese acadêmica''. Como esse parágrafo está eivado de preconceitos, acho que merece uns comentários. Na introdução de *Ensaios Analíticos* o senhor diz: - `` Lecionei o curso (*Metodologia da pesquisa científica aplicada à economia*) na Escola de Pós-Graduação em Economia na Fundação Getúlio Vargas em duas turmas pequenas de alunos, uma em 1992, outra em 1993. As apostilas do curso se transformaram nos 15 capítulos deste livro de ensaios''. Embora seu texto não seja universitário (porque a Fundação não é uma Universidade), mas certamente é um texto acadêmico no sentido de Platão e, conseqüentemente, ele tem de apresentar referências bibliográficas, principalmente porque o senhor mesmo diz que ele nada contém de original. Não creio que os romances sofisticados devam prescindir de bibliografia, para que o autor não corra o risco de ser taxado de ridículo. Será que Carl Sagan em seu *Romance da Ciência* (Francisco Alves, 1982), ou mesmo Guy Sorman em seu excelente *O capital: Seqüência e Fins* (Francisco Alves, 1994), livros nem acadêmicos e nem universitários, podem ser considerados ridículos por haverem incluído neles, algumas referências bibliográficas? Em meu entendimento, todos os livros deveriam incluir, além de referências bibliográficas, índices

remissivos, para facilitar a consulta aos mesmos. Não creio ser criminoso por parte de autores que citam referências que não leram, pois, se assim o fosse, todos os autores que citaram Sócrates até hoje (e continuarão a citá-lo) seriam criminosos, já que é sobejamente sabido que ele não escreveu nada, mas discutiu bastante com seus discípulos, e graças a isso, estes puderam transmitir o seu pensamento. Será que sua aversão às teses acadêmicas, tem a ver com os desastres dos planos econômicos, aplicados nos últimos 30 anos nos países do Terceiro Mundo, quase todos oriundos de teses acadêmicas defendidas em Universidades norte-americanas? Olhe, pelo menos em Física, elas foram bem proveitosas, como o exemplo que dei de Lorentz!

11. Comentários finais. Creio que as críticas construtivas sobre o que é produzido, qualquer que seja o produto final (livro, obra de arte, plano econômico etc.) devem sempre existir; elas impedem que erros sejam propagados e que os autores reflitam mais sobre o que estão produzindo. Além do mais, faz bem ao ego deles, pois, ao serem criticados, significa que seu produto mereceu atenção. Não poderia concluir esta carta, sem fazer referência a um caso famoso que ocorreu com um livro de Física. Trata-se do livro: *Classical Electricity and Magnetism*, de Wolfgang Panofsky e Melba Phillips, editado pela Addison-Wesley Publishing Company, Inc. No prefácio de sua segunda edição (1962), os autores dizem que o objetivo da mesma é remediar erros e insuficiências da primeira edição. Ainda nesse prefácio, os autores afirmam que alguns tópicos foram reescritos e introduzidos novos conceitos. A sabedoria popular tem razão quando diz que Errar é uma condição humana, muito embora, qualquer autor não receba bem, em princípio, qualquer crítica, mesmo construtiva, porque ele se acha incapaz de errar.

Atenciosamente

José Maria Filardo Bassalo

Exmo. Sr. Prof. José Maria Filardo Bassalo
Departamento de Física da UFPA
Campus Universitário do Guamá
66075-900 – Belém, Pará

Rio de Janeiro, 28 de março de 1995

Prezado Professor:

Muito obrigado por sua carta de 14 de março. Antes de comentá-la, quero relatar as conseqüências práticas de sua carta anterior. Primeiro fiz uma errata, que a editora da Fundação Getúlio Vargas distribuirá como encarte aos livros já impressos mas ainda não vendidos. Segundo, preparei uma bibliografia, que será incorporada (junto com a errata), à próxima reimpressão do livro. As razões pela qual preparei a errata dispensam qualquer comentário. Quanto à bibliografia, a ela objetava por razões estéticas, além da natural preguiça. Só que esta foi superada pelo ócio do Carnaval, e o meu subjetivismo estético foi derrubado por um argumento de alguns amigos, na base do *quod abundat non nocet*: a bibliografia seria apreciada por muitos leitores e não irritaria ninguém. Isto posto quero esclarecer que não tenho nenhum preconceito contra trabalhos acadêmicos, até por que os publiquei abundantemente durante os quase trinta anos em que fui professor e diretor da Escola de Pós-Graduação em Economia da Fundação Getúlio Vargas. Continuo achando que *Ensaio Analítico* é apenas um livro sofisticado de divulgação, mas isso é uma discussão semântica que a nada leva. Fico particularmente honrado com a sua opinião de que se trata de um livro importante.

Estou anexando à presente carta a errata e a bibliografia. Numa próxima edição de *Ensaio Analítico* incorporarei algumas outras sugestões, suas e de outros (poucos) críticos, dando a todos os devidos créditos por suas contribuições, mas deixando claro que ninguém é responsável por minhas heresias conceituais e históricas.

Isto posto, voltemos à sua carta de 14 de março. De início quero agradecer-lhe a paciência em me dedicar um desfile de tantos pontos relevantes da História da Física. No que tange aos fatos históricos nossas divergências são facilmente sanáveis numa próxima edição (ou talvez mesmo antes, numa próxima errata). Assim, concordo em me referir à conservação do momento (e não do trabalho) no princípio das alavancas. Acho importante estabelecer uma conexão entre Galileu e a idéia de vetor, na cinemática, sem passar por Varignon e outros tantos, pois *Ensaio Analítico* não é um livro de História da Física. Mas concordo em fazer a passagem por meio do princípio da composição dos movimentos, sem deixar de me referir ao princípio da relatividade dos movimentos (de resto muito importante para que se entenda o capítulo posterior sobre Einstein).

No que diz respeito ao conflito entre o eletromagnetismo e a terceira lei de Newton, agradeço suas informações históricas, mas discordo das conclusões conceituais: sem ação instântanea à distância, a terceira lei de Newton perde o sentido. É certo que o campo eletromagnético interage com o meio, que por sua vez interage com o campo eletromagnético, mas a terceira lei de Newton envolve algo mais do que interação recíproca. Concordo, no entanto, que a referência do meu texto à incompatibilidade entre a terceira lei de Newton e as leis do eletromagnetismo comete um erro histórico, pois tal

incompatibilidade só foi percebida por Liénard, em 1898. Por isso, numa próxima edição, ao invés dessa referência, salientarei que a grande surpresa era o fato de o campo eletromagnético não ser do tipo central. Por último, em respeito aos fatos históricos relativos às evidências empíricas sobre os fenômenos relativistas em 1905, mudarei a frase do final da página 200 do livro para: *Havia pouca evidência empírica a favor dessas hipóteses: o aumento da massa com a velocidade só era corroborado por poucas experiências, e jamais se havia conseguido liberar energia pela destruição da matéria.*

Passemos agora aos problemas conceituais, onde nossas divergências ainda não foram sanadas. No que tange à *definição de força pelas duas primeiras leis de Newton*, respondi às críticas de sua carta anterior nos seguintes termos, aliás reproduzidos em sua carta de 14 de março: - *Concordo que o que define força é a segunda lei de Newton, e não as duas primeiras leis. O que se pode dizer, é que a primeira é consequência da segunda: na ausência de forças externas, a aceleração de uma partícula é igual a zero, vale dizer, seu movimento é retilíneo e uniforme. Esse é um pormenor a ser corrigido numa próxima edição.* Como meu prezado crítico pode observar, essa correção está feita na errata que circulará como encarte do livro. Isto posto, nossa discussão é saber se a primeira lei é ou não consequência da segunda. O senhor diz que não, eu digo que sim. Para isso limito-me a usar o seu próprio argumento: pela segunda lei de Newton, $\vec{F} = m d\vec{v}/dt$, onde a massa m se supõe constante, e onde \vec{F} e \vec{v} representam vetores. Se $\vec{F} = 0$, é imediato que \vec{v} é um vetor que não varia no tempo, exatamente o que diz a primeira lei de Newton. Que Newton não percebesse que sua primeira lei era consequência da segunda, é apenas um reparo estético, que em nada macula sua genialidade. Isto posto, não há que filosofar sobre o fato de a integral de zero ser constante.

Passemos ao item que mais me intrigou na sua primeira carta, a referência à *soma vetorial de grandezas que não podem ser somadas*, e na qual o prezado crítico insiste com uma sentença do tipo *magister dixit: a soma apresentada pelo senhor está equivocada, pode crer*. Não se trata, agora, de firulas semânticas ou de imprecisões históricas, mas de um problema de conceitos fundamentais da Física e da Matemática. Por isso apresento meus argumentos em defesa do que está escrito na página 117 de *Ensaio Analítico*.

Começo refutando a afirmação do primeiro parágrafo da página 4 de sua carta: O problema de estudar o movimento da Lua levando em consideração as atrações do Sol e da Terra, é um problema que até hoje não foi resolvido, o problema dos três corpos. Por isso é que Newton considerou apenas a atração da Terra sobre a Lua, desprezando a exercida pelo Sol sobre a Lua. Em minha modesta opinião, essa frase contém vários equívocos. O primeiro é não compreender que não há nenhuma dificuldade em equacionar o problema de três, quatro ou n corpos. A dificuldade é encontrar as soluções gerais das equações diferenciais que determinam as trajetórias desses corpos. Muitos casos particulares foram resolvidos por vários matemáticos, notadamente por Henri Poincaré. O do movimento da Lua, tendo em vista a atração tanto da Terra quanto do Sol, comporta muitas soluções aproximadas, dadas as diferenças, dadas as diferenças de massa dos três corpos. De resto, com o desenvolvimento dos métodos numéricos de aproximação das soluções de equações diferenciais, e com a revolução dos computadores, as trajetórias da Lua hoje podem ser estimadas levando em conta não apenas a influência do Sol e da Terra, mas de qualquer outro planeta. É óbvio que nada disso passou pela cabeça de Newton, mas a conclusão é que a dificuldade em resolver as equações diferenciais do problema dos três corpos nada tem a ver o caso.

Que Newton, no estudo do movimento da Lua, só levou em conta a atração da Terra, desprezando a influência do Sol, é fato histórico. O que se procura demonstrar, na página 117 de *Ensaio Analítico*, é que essa simplificação deu certo pelo fato de dois erros se compensarem: a) considerar desprezível a força de atração do Sol sobre a Lua, comparativamente à exercida sobre a Terra; b) aplicar a segunda lei de Newton a um sistema de coordenadas com origem no centro da Terra, ou seja, um sistema não inercial. Esse é um ponto muito importante, para o qual insisto em chamar sua atenção.

Em princípio, a força de atração do Sol sobre a Lua não pode ser desprezada em relação à da Terra. A distância do Sol à Lua é 390,6 vezes a da Terra ao seu satélite natural, mas, em compensação, a massa do Sol é 333.000 vezes a da Terra. Feitas as contas, a força de atração do Sol sobre a Lua é, em módulo, igual a $330.000/(390,6)^2 = 2,16$ vezes a força com que a Terra atrai o satélite.

Acontece que a lei *Força = massa x aceleração* só vale para um sistema de eixos inerciais, cuja origem pode ser o Sol, mas não a Terra. Isto posto, a combinação da lei da gravitação universal com a segunda lei de Newton só pode ser usada diretamente para se determinar a trajetória num sistema de eixos com o centro no Sol. Conclui-se, no caso, que a aceleração da Lua em relação ao Sol é dada pelo vetor $\vec{a}_1 + \vec{a}_2$ da figura 7 da página 117. Isto posto, designando por \vec{a}_3 a aceleração da Terra em relação ao Sol, a aceleração da Lua em relação à Terra será igual dada por $\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 - \vec{a}_3$. Essa é uma conclusão trivial, sobre a qual não vale a pena perder tempo filosofando sobre o problema de três corpos. Desde que se admita a existência do tempo absoluto, como em toda a Física Clássica, trata-se de um simples problema de translação de eixos em geometria analítica.

Há um outro raciocínio, logicamente equivalente ao anterior, e que conduz à mesma conclusão. Para estudar o movimento da Lua num sistema de eixos com origem no centro da Terra é preciso introduzir uma força fictícia sobre o satélite igual a $-m\vec{a}_3$, ou seja, igual à massa da Lua vezes a aceleração da Terra em torno do Sol com o sinal trocado. A combinação dessa força com as atrações exercidas pelo Sol e pela Terra determina a trajetória da Lua em relação a um sistema de eixos centrado em nosso planeta. Conclui-se, mais uma vez, que a aceleração da Lua em relação à Terra é dada por $\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 - \vec{a}_3$. E a moral da história é que a aproximação newtoniana $\vec{a} = \vec{a}_2$ é amplamente satisfatória, pois a ordem de grandeza de $\vec{a}_1 - \vec{a}_3$ é desprezível em comparação a \vec{a}_2 .

A conclusão desse raciocínio é que a gravitação do Sol sobre os corpos próximos à Terra pode ser desprezada, desde que se trate a Terra como o centro de um sistema inercial. Simplesmente porque a força de gravidade solar é muito próxima da força fictícia que deve ser introduzida para compensar a translação da Terra em torno do Sol. Isso, meu caro professor, não é invenção minha. É algo que apreendi no curso de Mecânica Racional da Escola Nacional de Engenharia em 1954.

Passemos à equação de Laplace. Numa próxima edição do livro a redação do terceiro parágrafo da página 154 deverá ser a seguinte: *Demonstra-se que $W=0$ é a única solução da equação de Laplace válida em todo o espaço, com a condição de que o potencial W tenda a zero no infinito. Fora isso, a equação revela como um potencial newtoniano se propaga pelos pontos do espaço com densidade nula de cargas.* Qualificar a equação como pouco criativa, é realmente uma impropriedade. Pouco criativa é a solução $W=0$, e não a equação. Mas a demonstração de que essa é a única solução da equação de Laplace é com as condições de contorno mencionadas é extremamente sutil. O resto da

frase se destina a descrever as outras soluções de interesse prático da equação de Laplace, sem entrar em pormenores que não cabem em *Ensaio Analítico*. Quanto à diferença entre potencial newtoniano e coulombiano ela me parece irrelevante para quem conheça as regras de sinais de multiplicação.

Considero estéril nossa discussão sobre qual foi o ponto de partida de Einstein na elaboração de seu artigo *Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*. Como o grande físico morreu em 1955, só poderemos desempatar o jogo no outro mundo. O que me parece importante salientar é que Einstein foi o primeiro físico a perceber que, desde que se substituisse a hipótese da existência do tempo absoluto pela da constância da velocidade da luz, era possível reconciliar o eletromagnetismo com o princípio da inércia de Galileu. (O que isso significa é muito simples: na cinemática relativista, ao contrário do que acontece na cinemática clássica, as equações do campo eletromagnético são invariantes a uma mudança de sistema inercial. Ou seja, na cinemática relativista desaparece a famosa assimetria das equações de Maxwell). Essa a grande superioridade da relatividade de Einstein sobre a de Lorentz-Poincaré. Se a experiência de Michelson-Morley tivesse medido a velocidade de deslocamento da Terra no Éter, estaria comprovada a existência do espaço absoluto, e portanto desmentido o princípio da inércia de Galileu. De fato, esse princípio andava em descrédito por volta de 1880, pois, com a cinemática clássica baseada no tempo absoluto, as equações de Maxwell não podiam ser válidas em diferentes sistemas inerciais. (Ou seja, não respeitavam as condições do grupo de Galileu). O que Einstein percebeu, ao contrário de Lorentz e Poincaré, é que a hipótese da constância da velocidade da luz, insinuada pela experiência de Michelson-Morley permitia reabilitar o princípio da inércia, pelo menos no que diz respeito ao eletromagnetismo. Ou seja, Einstein entendeu que a experiência em questão atirou no que viu (o princípio da inércia) e acertou no que não viu (a hipótese do tempo absoluto). Assim, o famoso artigo de 1905 começa pelo enunciado de dois postulados, o princípio da inércia de Galileu e a constância da velocidade da luz, e só na parte final demonstra que as equações do eletromagnetismo são invariantes em relação às transformações de Lorentz. Teço essas ponderações em retribuição às suas eruditas considerações sobre o assunto, mas considero pouco relevantes as nossas divergências sobre o tema.

Bem mais excitante é a nossa discussão sobre as forças fictícias. Em minha última carta afirmei que: - `` *Não entro na discussão da existência ou não dessas forças, que é um tema metafísico* ``. Em resposta, diz o prezado crítico que `` *a existência de forças fictícias não é um tema metafísico e, sim, de alta indagação filosófica* ``. Não gosto de perder tempo em controvérsias semânticas, mas sou obrigado a lembrar que todo tema metafísico envolve alta indagação filosófica. Só que não pode ser resolvido a partir dos conhecimentos de Física.

Isto posto, concentremo-nos na discussão das ditas forças. Dizer que elas não existem é ofender o bom sendo de quem já frequentou a montanha russa de um parque de diversões, assim como de quem já sentiu as partidas ou freiadas bruscas de um elevador, ou de um automóvel em alta velocidade. O que a mecânica newtoniana ensina é que as denominadas forças fictícias surgem quando nos referimos a sistemas não inerciais de coordenadas. Se a segunda lei de Newton vale para um determinado sistema, classificado como inercial, ela não pode valer para um outro sistema de coordenadas que não se desloque em translação com velocidade uniforme em relação ao primeiro. No sistema não inercial de coordenadas, é preciso introduzir forças fictícias que atuem sobre todos os corpos, e que se determinam por fórmulas matemáticas bem conhecidas, como a força

centrífuga, a de Coriolis etc. Uma característica importante dessas forças é que elas são proporcionais às massas dos corpos sobre os quais atuam, tais como as forças gravitacionais.

Para Newton, crente no espaço absoluto, a existência de sistemas inerciais de referência não era motivo capaz de causar nenhuma angústia filosófica. Tais seriam todos os sistemas de eixos em movimento de translação uniforme no espaço absoluto, incluindo-se nesse grupo um sistema com centro no Sol e com os eixos apontados para três estrelas fixas. Isto posto, embora a experiência física não conseguisse distinguir o movimento retilíneo uniforme do repouso absoluto, era possível falar em aceleração absoluta. Tudo isso parecia amplamente comprovado pela experiência. A rotação absoluta da Terra era comprovada pelo pêndulo de Foucault, e assim por diante.

Em meados do século passado filósofos e físicos começaram a se preocupar com os privilégios dos sistemas inerciais. Era a influência dos princípios da filosofia liberal e do iluminismo. Numa visão democrática do Universo, as leis da Física deveriam ser as mesmas em qualquer sistema de referência. Era esse o programa da relatividade geral.

As dificuldades para enfrentar o programa eram enormes, a começar pela reinterpretação das forças fictícias. Ernst Mach, em 1883, teve a bela intuição de procurar explicá-las pela distribuição espacial da matéria e de suas velocidades. Assim, a experiência do balde giratório de Newton poderia ser invertida. O balde se manteria fixo, mas uma massa descomunal giraria em torno dele. O resultado seria o mesmo: a superfície da água, de plana, se transformaria em parabolóide. Do mesmo modo, considerando a Terra fixa, a rotação da órbita do pêndulo de Foucault poderia explicar-se, pelos efeitos da rotação das massas do Universo. O princípio de Mach revela uma percepção genial. Faltou ao autor tempo, fôlego e matemática para completar o programa da relatividade generalizada. Mas abriu a trilha que iria ser amplamente explorada por Einstein.

A genialidade de Einstein foi perceber que o problema da relatividade geral precisaria ser resolvido em duas etapas complementares: a) o estabelecimento do princípio da equivalência; b) a descoberta de uma nova lei da gravitação compatível com a cinemática relativista (o que não era o caso da lei newtoniana da gravitação universal). E, com a assessoria do admirável matemático H. Minkowski, o grande físico encontrou a linguagem formal de que precisava para desenvolver a sua teoria: o cálculo tensorial aplicado à geometria de Riemann.

Mas voltemos ao objeto da nossa divergência, a frase da página 213 de *Ensaio Analítico* que diz que: - ``Associando essa métrica ao sistema acelerado, a teoria da relatividade dispensa as forças fictícias: as trajetórias das partículas sobre as quais não incidem forças continuam sendo as linhas de menor separação. Só que esses trajetos não mais são movimentos retilíneos uniformes no sentido euclidiano''. Disse o senhor, em sua carta à Folha de São Paulo de 29 de novembro de 1994 que: - ``Não é bem isso, a teoria da relatividade dá uma interpretação diferente para essas forças. Na teoria, elas são reais, diferentemente do que considerava Newton: forças que não tinham existência real''. Data vênica, insisto no fato de que é exatamente isso.

A frase em questão foi pinçada na seção 9.14 do capítulo referente à Teoria da Relatividade, intitulado *Sistemas Acelerados e Geometrias não Euclidianas*. O que se procura demonstrar, nessa seção, é que o movimento retilíneo uniforme num sistema inercial pode também ser interpretado como movimento retilíneo e uniforme num sistema acelerado, desde que se troque a geometria do sistema, de euclidiana para não euclidiana. Ao recorrer a essa mudança de geometria, as forças inerciais são dispensadas, exatamente

como se diz à página 213 do livro. Isso não chega a ser filosofia profunda nem grande descoberta física. É apenas habilidade matemática. Diga-se de passagem, essa substituição de forças fictícias por curvaturas do espaço-tempo é apenas o início da teoria geral da relatividade. O programa de Einstein era acabar com todas as forças, fictícias ou não, substituindo-as por deformações do espaço-tempo. Tratava-se do programa de geometrizar a Física, conseguido como teoria relativista da gravitação, mas até hoje incompleto, pela frustração da teoria do campo unificado.

O que se pode indagar é até que ponto o apelo às geometrias não euclidianas representa algo além de uma brilhante cambalhota matemática. Afinal, mudando-se convenientemente a métrica, qualquer trajetória se transforma numa geodésica. Essa é a dúvida filosófica que procuro transmitir no final da página 220 e o início da página 221 de *Ensaio Analítico*. Exercício intelectual à parte, talvez estejamos voltando às controvérsias escolásticas. Quem se aventurou numa montanha russa, sabe muito bem o que sentiu. Pela Física Clássica, foi agredido por forças fictícias. Pela relativista, entrou numa geometria a cuja métrica seu organismo não estava condicionado. Mas a sensação continua a mesma.

Agradecendo mais uma vez o seu paciente trabalho crítico subscrevo-me atenciosamente

Mário Henrique Simonsen

Belém, 17 de abril de 1995

Exmo. Sr. Prof. Mário Henrique Simonsen
Fundação ``Getúlio Vargas``
Caixa Postal 62 591
22 257-970 – Rio de Janeiro - RJ

Prezado Professor:

Muito obrigado por sua carta de 28 de março p.p. Ela revelou que o senhor é um autêntico *scholar* e, portanto, aberto a receber críticas construtivas, desde, é claro, que sejam pertinentes, como foram algumas que teci a respeito de seu *Ensaio Analítico*.

Como nessa sua carta o senhor diz que algumas de nossas divergências ainda não foram sanadas, daí porque tomei a liberdade de escrever-lhe para discutirmos um pouco mais sobre essas divergências. Embora tenha ficado satisfeito em saber que já houve conseqüências práticas de nossas divergências e, também, ficado lisonjeado por o senhor haver dito que irá se referir a mim numa próxima edição de *Ensaio*, insisto em nossa discussão pois considero seu livro muito importante e, portanto, quanto mais claro ele for, melhor será a formação de seus alunos-leitores, principalmente economistas, pois a maioria desses, via de regra, não tem, como o senhor, a visão clara da importância das ciências exatas para o desenvolvimento de um país.

Vamos às nossas enriquecedoras divergências. O senhor continua afirmando que a segunda lei de Newton é uma conseqüência da primeira. E para tal afirmação usou meu próprio argumento, pelo qual demonstrei que se a força for zero, o movimento resultante da integração da segunda lei de Newton, é uma reta. Isso, contudo (reafirmo o que disse anteriormente), não significa que esse resultado é uma demonstração da primeira. Caro professor, vamos admitir sua hipótese, qual seja, a de que a primeira lei é apenas uma conseqüência da segunda, segundo a demonstração acima. Ora, essa demonstração é conhecida desde que Euler, em 1752, apresentou a segunda lei de Newton na forma até hoje conhecida: $\vec{F} = m\vec{a} = m d^2\vec{r}/dt^2$. Se esse resultado tem mais de duzentos anos, por que então os livros textos de Física Básica (Halliday e Resnick, Tipler, Nussenzveig etc.) continuam apresentando as três leis de Newton como independentes? Não será por que a *lei da inércia*, a *lei da força* e a *lei da ação e reação* são de fato independentes? É claro que essas leis foram, e ainda são motivo de discussão entre os cientistas e/ou filósofos da ciência, como Mach, Eddington, Cortes Pla, Keynes e muitos outros. Porém, creio que uma leitura do livro *Estudos Newtonianos* (1965), do historiador e filósofo da ciência, Alexandre Koyré, poderá ajudar a verificar se, de fato, a sua assertiva é verdadeira. (É oportuno registrar que o Symon, em sua *Mechanics* [Addison-Wesley Publishing Company (1961) : p. 8, diz que se usarmos as duas primeiras leis de Newton para definir a força como produto da massa pela aceleração, elas perdem, então, o *status* de lei, e passam a ser ``meramente definições de um novo conceito a ser introduzido na teoria``.]

A questão em discussão sobre a *soma vetorial de grandezas que não podem ser somadas*, apresentada pelo senhor na página 117 de seus *Estudos*, também me deixou bastante intrigado, pois, como não consegui reproduzir a sua expressão, pensei que havia esquecido o que estudei no Symon. Vejamos quem está com a razão, sem usar *argumento de autoridade*, tipo *magister dixit*, e sim apenas argumento lógico. Assim, para explicar sua

expressão: $\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 - \vec{a}_3$, o senhor diz o seguinte em sua carta: - ``Acontece que a lei Força = massa X aceleração só vale para um sistema de eixos inerciais, cuja origem pode ser o Sol, mas não a Terra. Isto posto, a combinação da lei da gravitação universal com a segunda lei de Newton só pode ser usada diretamente para se determinar a trajetória da Lua num sistema de eixos com centro no Sol. Conclui-se, no caso, que a aceleração da Lua em relação ao Sol é dada pelo vetor $\vec{a}_1 + \vec{a}_2$ da figura 7 da página 117. Isto posto, designando por \vec{a}_3 a aceleração da Terra em relação ao Sol, a aceleração da Lua em relação à Terra será igual a dada por: $\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 - \vec{a}_3$. Essa é uma conclusão trivial, sobre a qual não vale a pena perder tempo filosofando sobre o problema de três corpos. Desde que se admita a existência do tempo absoluto, como em toda a Física Clássica, trata-se de um simples problema de translação de eixos em geometria analítica``.

Muito bem, vejamos, agora, os meus argumentos. O senhor diz que a expressão da página 117, foi obtida considerando um sistema de eixos inerciais centrado no Sol. Posto isso, o senhor descreve o movimento da Lua levando em consideração a atração exercida pelo Sol e pela Terra, sobre nosso satélite, respectivamente, \vec{a}_1 e \vec{a}_2 . Aí, o senhor afirma que: - ... `` a aceleração da Lua em relação à Terra será igual a dada por: $\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 - \vec{a}_3$ ``. Em vista disso, tentei entender `` essa conclusão trivial ... que decorre de um simples problema de translação de eixos em geometria analítica``. Para isso, revi o capítulo 7 do Symon, que trata de sistemas de coordenadas móveis. Assim, adaptemos o item 7.1, desse capítulo, para o caso estudado pelo senhor. Seja \vec{r} o vetor posição da Lua em relação ao Sol, \vec{r}^* o vetor posição da Lua em relação à Terra, e \vec{h} o vetor posição da Terra em relação ao Sol. Para essa situação, a Geometria Analítica nos diz que: $\vec{r} = \vec{r}^* + \vec{h}$. Agora, admitindo-se que $t = t^*$ (tempo absoluto), a derivada segunda em relação ao tempo dessa expressão, dará: $d^2\vec{r}/dt^2 = d^2\vec{r}^*/dt^{*2} + d^2\vec{h}/dt^{*2}$. Para o caso da figura 7 da página 117, tem-se: $\vec{a}_1 = \vec{a}_2 + \vec{a}_3$, que é diferente da expressão que o senhor obteve. Vamos prosseguir. Tomemos essa expressão, e multipliquemos pela massa m da Lua. Assim, teremos: $m\vec{a}_1 = m\vec{a}_2 + m\vec{a}_3$. Como o Sol foi considerado um sistema inercial pelo senhor, então, pela segunda lei de Newton, tem-se: $m\vec{a}_1 = \vec{F} = m\vec{a}_2 + m\vec{a}_3$. Desse modo, a força exercida pela Terra sobre a Lua, será: $m\vec{a}_2 = \vec{F} - m\vec{a}_3$. O termo $-m\vec{a}_3$ é chamada de *força fictícia*. (Veja como aparece a força fictícia sem usar ``um outro raciocínio, logicamente equivalente ao anterior``, conforme o senhor diz em sua carta .) Como o senhor vê, o resultado que obtive é diferente do obtido pelo senhor. Onde está meu erro? O que seria, para o senhor, a aceleração da Lua em relação à Terra? Não seria \vec{a}_2 ? Como o senhor obteve a sua expressão? Além do mais, o senhor afirma ainda que: - ``Isto posto, a combinação da lei da gravitação universal com a segunda lei de Newton só pode ser usada diretamente para se determinar a trajetória da Lua num sistema de eixos com o centro no Sol``. Creio que não seja tão fácil assim, obter a trajetória da Lua dessa maneira. Aí reside a importância do problema de três corpos.

Antes de analisarmos com mais detalhes o problema de três corpos, gostaria de ilustrar, através de um exemplo tirado do livro *Mecânica* do L. P. M. Maia, minha afirmativa de que ``só se pode somar (reais ou fictícias, no sentido newtoniano) que atuam num mesmo corpo``. Consideremos uma plataforma circular girante, contendo uma haste

vertical em seu centro, e na extremidade desta, um pêndulo simples (uma bolinha presa a uma corda). Inicialmente, quando a plataforma está em repouso, dois observadores (um colocado na plataforma e o outro fora dela) dizem que a bolinha do pêndulo se encontra em equilíbrio, porque o seu peso (atração gravitacional da Terra) é equilibrado pela tensão da corda. Agora, a plataforma começa a girar com uma velocidade angular ω constante. Então, o pêndulo se afasta da haste vertical (formando um certo ângulo com esta) e gira com a mesma velocidade angular ω . Vejamos, agora, como os dois observadores explicam esse movimento do pêndulo. O observador que está fora da plataforma, supostamente num referencial inercial, diz que a bolinha do pêndulo gira em movimento circular uniforme, porque ela está sujeita a uma força centrípeta, resultante da composição de seu peso com a tensão na corda. Por sua vez, o observador que se encontra na plataforma girante, que é um referencial não inercial, vê a bolinha parada em relação a si. Ora, diz ele, como o repouso significa força resultante nula, então, além do peso da bolinha e da tensão na corda que atuam sobre ela, deve atuar, também, na mesma, uma força centrífuga, igual e de sentido contrário à centrípeta. No entanto, enquanto a força centrípeta é uma força real, pois decorre da atração gravitacional e das forças internas da corda, a centrífuga é fictícia (segundo os newtonianos), pois ela derivou do fato de tentar descrever o movimento do pêndulo por intermédio de um referencial não inercial. [Aliás, esse raciocínio foi usado por d'Alembert, em seu famoso *Traité de Dynamique*, de 1743, através do *princípio das acelerações reversas* (mais tarde conhecido como *princípio de d'Alembert*) para resolver problemas práticos de Dinâmica, através da Estática, usando para isso as *forças de inércia* ($-m\vec{a}$), o que significa dizer que a segunda lei de Newton era escrita na forma: $\vec{F} + (-m\vec{a}) = 0$.]

Agora, vejamos o problema de três corpos. Em sua carta, o senhor afirma: - `` *Em minha modesta opinião, essa frase (referindo-se a minha afirmação de que o problema de três corpos ainda não foi resolvido), contém vários equívocos. O primeiro é não compreender que não há nenhuma dificuldade em equacionar o problema de três, quatro ou n corpos. A dificuldade é encontrar as soluções gerais das equações diferenciais que determinar as trajetórias desses corpos. Muitos casos particulares foram resolvidos por vários matemáticos, notadamente por Henri Poincaré. O do movimento da Lua, tendo em vista a atração tanto da Terra quanto do Sol, comporta muitas soluções aproximadas, dadas as diferenças, dadas as diferenças de massa dos três corpos. De resto, com o desenvolvimento dos métodos numéricos de aproximação das soluções de equações diferenciais, e com a revolução dos computadores, as trajetórias da Lua hoje podem ser estimadas levando em conta não apenas a influência do Sol e da Terra, mas de qualquer outro planeta*``. Está corretíssima essa sua afirmação. No entanto, o senhor acha que me equivoco ao afirmar que: - `` *O problema de três corpos até hoje ainda não foi resolvido*``. Não vejo nenhum equívoco nessa frase, já que não disse que ele não foi equacionado. Equacionado ele já está há muito tempo, através da famosa equação de Hamilton-Jacobi, de 1837. Quando se diz que ele ainda não foi resolvido, é porque não se pode tornar separável essa equação (Cf. Goldstein, p. 285), e com isso, encontrar uma solução fechada. Em vista disso, vários cientistas têm procurado encontrar soluções particulares, sendo Lagrange, em 1772, me parece, um dos primeiros a se preocupar com esse problema. Em vista da dificuldade em separar a equação de Hamilton-Jacobi, os cientistas passaram a resolver o problema de três corpos usando *teoria de perturbações*. Basicamente, a teoria das perturbações significa desenvolver em série o Hamiltoniano do sistema, e esta série,

contudo, é divergente. Assim, uma boa teoria da órbita da Lua, por exemplo, dependerá do número de termos dessa série. Daí, como o senhor muito bem observou, agora com a revolução dos computadores, teremos o movimento da Lua estudado com boa precisão, pois poderemos considerar muitos termos nessa série. Desse modo, teremos uma boa solução, por 100, 200, 300 ou milhares de anos. Mas apesar dessa precisão, o problema continua não resolvido. (É oportuno observar que meu Curso de *Mecânica Racional*, na então Escola de Engenharia do Pará, em 1955, não foi suficiente para que eu pudesse aprender bem essas coisas, apesar de haver estudado essa disciplina no Timoshenko. Contudo, só fui aprendê-las bem, em Brasília, em 1965, ao estudar o Symon e o Goldstein, quando comecei e terminei meu Bacharelado em Física.)

Nossa querela com relação ao ponto de partida de Einstein para elaborar seu artigo sobre a *Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*, poderia ser resolvida (sem necessidade de irmos para o outro mundo) em uma mesa de sessão espírita, desde que o espírito de Einstein estivesse disposto a abandonar seu gostoso “papo” com Galileu e Newton sobre a Relatividade, e descer para discutir com dois “pobres mortais”. Brincadeira à parte, creio que essa querela poderia ser desempatada com a leitura dos dois mais importantes biógrafos de Einstein, na atualidade: Abraham Pais, que escreveu os livros: *‘Subtle is the Lord...’: The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1982; *Einstein lived here*, Clarendon Press, Oxford University Press, 1994; e M. Paty, que escreveu *Einstein Philosophe*, Presses Universitaires, 1993. Nesses três livros, já referidos em minha carta anterior, há algo sobre como Einstein chegou à suas Relatividades.

Resolvida ou não essa querela, o que me intrigou em seu livro e nas duas cartas que me escreveu, foi a insistência na tese de que “*Einstein foi o primeiro físico a perceber que, desde que se substituísse a hipótese da existência do tempo absoluto pela constância da velocidade da luz, era possível reconciliar o eletromagnetismo com o princípio da inércia de Galileu*”. Nessa sua carta, em resposta ao meu questionamento sobre o significado dessa frase, o senhor diz: - “*O que isso significa é muito simples: na cinemática relativista, ao contrário do que acontece na cinemática clássica, as equações do campo eletromagnético são invariantes a uma mudança de referencial inercial (grifo meu). Ou seja, na cinemática relativista desaparece a famosa assimetria das equações de Maxwell*”. Aí reside o equívoco. As equações de Maxwell são invariantes por uma *transformação de Lorentz* (conforme o senhor aponta mais adiante em sua carta) e não mais por uma *transformação de Galileu*, como acontece com a mecânica newtoniana. Contudo, essas transformações não dizem respeito a um *princípio de inércia* e sim a um *princípio relativista*. A questão da inércia, que está ligada ao conceito de massa, relaciona-se com o *princípio da equivalência*, proposta por Einstein, em 1915, como base de sua Teoria da Relatividade Geral. Esse princípio afirma que a *massa inercial* é equivalente a *massa gravitacional*.

Ainda com relação a essa questão do *princípio da inércia*, creio que também há um equívoco na seguinte frase de sua carta: - “*Assim, o famoso artigo de 1905 começa pelo enunciado de dois postulados, o princípio da inércia de Galileu e a constância da velocidade da luz, e só na parte final demonstra que as equações do eletromagnetismo são invariantes às transformações de Lorentz. Teço essas ponderações em retribuição às suas eruditas considerações sobre o assunto, mas considero pouco relevantes as nossas divergências sobre o tema*”. Como o senhor demonstra um excelente conhecimento sobre nossas divergências, então, antes de responder às suas objeções, procuro me apoiar nas

leituras que fiz anteriormente, para não fazer uma afirmação sem apoio. Assim, fui reler esse célebre artigo de Einstein. Para isso, usei o livro *The Principle of Relativity*, editado pela Dover Publications, em 1952, no qual há uma versão em inglês desse trabalho. Parece-me que em nenhum momento desse artigo, há, explicitamente, a indicação desses dois princípios e, também, não há nenhuma referência ao princípio da inércia de Galileu. O que existe sobre esses princípios é a frase da página 45: - *“With the help this result we easily determine the quantities ϵ, η, ζ by expressing in equations that light [as required by the principle of the constancy of the velocity of light (grifo meu), in combination with the principle of relativity (grifo meu)] is also propagated with velocity c when measured in the moving system”*. Creio que, em virtude dessa frase, e de outras que existem nesse artigo, os estudiosos que divulgam a Teoria da Relatividade, afirmaram que ela é apoiada em dois princípios: Princípio da Relatividade - *“As leis pelas quais os sistemas físicos experimentam mudanças não são afetadas, se essas mudanças de estado são referidas a um ou outro de dois sistemas de coordenadas em movimento retilíneo uniforme”*; Constância da Velocidade da Luz - *“Qualquer raio de luz move-se em um sistema ‘estacionário’ de coordenadas com a velocidade determinada c , quer seja o raio emitido por um corpo estacionário ou em movimento”*. Portanto, meu caro professor, não seria melhor dizer que Einstein atirou no que viu (princípio da relatividade) e acertou no que não viu (a hipótese do tempo absoluto)? E, também, que Einstein tentou reconciliar o eletromagnetismo com o princípio da relatividade?

Por fim, vejamos sua frase da página 231 de seus *Ensaio*s: - *“Associando essa métrica ao sistema acelerado, a teoria da relatividade dispensa as forças fictícias: as trajetórias das partículas sobre as quais incidem forças continuam sendo as linhas de menor separação. Só que esses trajetetos não mais são movimentos retilíneos uniformes no sentido euclidiano”*. Com relação ao meu comentário sobre o fato de que a Relatividade Geral dar uma interpretação às forças fictícias, eis a sua reação: - *“A frase em questão foi pinçada na secção 9.14 do capítulo referente à teoria da Relatividade, intitulado ‘Sistemas Acelerados e Geometrias não Euclidianas’. O que se procura demonstrar, nessa secção, é que o movimento retilíneo uniforme num sistema inercial pode também ser interpretado como movimento retilíneo e uniforme num sistema acelerado, desde que se troque a geometria do sistema, de euclidiana para não euclidiana. Ao recorrer a essa mudança de geometria, as forças inerciais são dispensadas, exatamente com se diz à página 213 do livro. Isso não chega a ser filosofia profunda nem grande descoberta física. É apenas habilidade matemática. Diga-se de passagem, essa substituição de forças fictícias por curvaturas do espaço-tempo é apenas o início da teoria geral da relatividade. O programa de Einstein era acabar com todas as forças, fictícias ou não, substituindo-as por deformações do espaço-tempo. Tratava-se do programa de geometrizar a Física, conseguido coma teoria relativista da gravitação, mas até hoje incompleto, pela frustração da teoria do campo unificado. O que se pode indagar é até que ponto o apelo às geometrias não euclidianas representa algo além de uma brilhante cambalhota matemática. Afinal, mudando-se convenientemente a métrica, qualquer trajetória se transforma numa geodésica. Essa é a dúvida filosófica que procuro transmitir no final da página 220 e o início da página 221 de Ensaio*s Analíticos”

A análise da citação acima requer uma outra carta, no entanto, vou fazer apenas alguns comentários para concluir esta carta, o que não significa interromper nossa correspondência sobre seu *Ensaio*s Analíticos. Não creio que apenas a mudança de

geometria euclidiana para não euclidiana, como o senhor afirma, acabe com a questão das forças fictícias, e nem que seja ``*apenas uma habilidade matemática* ou ``*uma brilhante cambalhota matemática*’’. É uma questão mais séria, conforme escrevi em carta anterior. Tanto é séria, que o próprio Einstein, em 1918, ao apresentar seu famoso *Universo Estático*, concordou com o que Mach dissera dessas forças, afirmando que ``*a inércia de um corpo é influenciada pela matéria (a distâncias finitas), mas não determinada (os grifos são de Einstein)*’’. Nessa ocasião, inclusive, Einstein denominou de *Princípio de Mach* a essa *lei da inércia de Mach*. (**En passant**, é oportuno dizer-lhe que a idéia de geometrizar a Física, conforme era o desejo de Einstein, ainda não frustrou-se. Apenas não se usa mais o caminho que Einstein queria, qual seja, o de encontrar um tensor geométrico capaz de explicar a força eletromagnética, como ele havia encontrado o tensor geométrico de Ricci, que explicou a gravitação. Hoje, a unificação entre as quatro forças da natureza: forte, fraca, eletromagnética e gravitacional, é buscada através das *teorias de `gauge`*, que são, num certo sentido, espécies de geometrizações. Até o presente momento, apenas a unificação entre a força fraca e a eletromagnética (*força eletrofraca*), já está comprovada. Especula-se a unificação entre essa força e a forte, por intermédio das chamadas *teorias de grande unificação*, bem como procura-se uma teoria unificada mais geral, incluindo a gravidade, usando-se a *teoria da supergravidade*.)

Bem, prezado professor, até o momento tenho sido ``baladeira’’ de sua ``vidraça’’. Junto com esta carta, estou-lhe enviando o Tomo 4 de minhas *Crônicas da Física*, esperando, com prazer, suas ``baladas’’.

Receba um afetuoso abraço do amigo

José Maria Filardo Bassalo

Exmo. Sr. Prof. José Maria Filardo Bassalo
Departamento de Física da UFPA
Campus Universitário do Guamá
66075-970-Belém, Pará

Rio de Janeiro, 12 de maio de 1995

Prezado Professor:

Muito obrigado por sua carta de 27 de abril p.p. e o envio do Tomo 4 de suas excelentes *Crônicas da Física*. Vou saboreá-las com muita atenção e, se encontrar alguma oportunidade, exercitarei meu modesto estilingue com a sua bem temperada vidraça. Por enquanto, continuarei tentando recompor meus cacos.

Nossas divergências quanto às leis de Newton devem ser analisadas em duas etapas. Primeiro, saber se a segunda lei apenas define força, ou tem sentido mais amplo. A questão depende da postura filosófica que se adote, idealista ou positivista. A postura idealista trata força, massa e aceleração como categorias preexistentes. Isto posto, a segunda lei realmente deve ser entendida como lei da Física. Na postura positivista (não a do velho positivismo de Auguste Comte, mas a do positivismo lógico de Whitehead e Russell) força é conceito a ser definido em termos de massa, vetor posição e suas derivadas em relação ao tempo. Nesse caso, a segunda lei de Newton apenas define força. É exatamente isso o que diz Symon em *Mechanics*, no trecho citado em sua carta.

A segunda etapa é saber se a primeira lei é ou não consequência da segunda, e aí basta repetir o raciocínio de Euler. Se $\vec{F} = m\vec{a}$, então $\vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{a} = 0 \Rightarrow \vec{v} = \text{constante}$. Ou seja, a primeira lei obtém-se como caso particular da segunda para o caso em que $\vec{F} = 0$. Por certo, há trezentos anos os livros de Física enunciam as três leis de Newton por respeito à tradição, mas poucos são os que dizem que elas são independentes. O que se pode dizer é que a gênese da primeira lei é anterior à da segunda, e que o princípio da inércia já havia sido identificado por Galileu.

Quanto à composição de acelerações da página 117 de *Ensaio Analítico*, a leitura de sua carta me convenceu de duas coisas: a) meu raciocínio, assim como minha conclusão estão rigorosamente certos; b) minha explicação está confusa, a ponto de induzir em erro um emérito professor de Física. Agrava essa confusão um erro na figura 7 da página. Vamos ao assunto.

Newton, como se sabe, ao estudar o movimento da Lua considerou apenas a gravitação sobre ela exercida pela Terra, ignorando a exercida pelo Sol. O objetivo da discussão da página 117, como procurei esclarecer em minha carta de 28 de março p.p., é mostrar que essa aproximação era aceitável, não porque a atração do Sol sobre a Lua fosse desprezível, mas porque ela praticamente se cancelava com a força inercial que deveria ser introduzida quando se tomasse um sistema de eixos coordenados com origem no centro da Terra.

Isto posto, tomemos um sistema de eixos inercial, com centro no Sol. Nesse sistema, a Lua, cuja massa designaremos por m , está sujeita a duas forças gravitacionais: $m\vec{a}_1$ exercida pelo Sol, e $m\vec{a}_2$ exercida pela Terra, primeira na direção Lua-Sol, a segunda na direção Lua-Terra. A resultante é a força $m(\vec{a}_1 + \vec{a}_2)$ (soma vetorial de duas forças que

incidem sobre a Lua). Logo, a aceleração da Lua em relação a um sistema inercial é igual a $\vec{a}_1 + \vec{a}_2$. E, conseqüentemente, a aceleração da Lua em relação à Terra, é dada por $\vec{a} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 - \vec{a}_3$, onde \vec{a}_3 indica a aceleração da Terra em relação ao Sol. Chega-se à mesma conclusão usando um sistema com eixos no centro da Terra e introduzindo a força inercial $-m\vec{a}_3$ sobre a Lua.

O engano de seu raciocínio é admitir que a aceleração da Lua em relação ao Sol seja dada pelo vetor \vec{a}_1 , na direção Lua-Sol. Se isso fosse verdade, realmente concluiríamos que $\vec{a}_1 = \vec{a}_2 + \vec{a}_3$, como na sua carta. Acontece que, com isso estaríamos desprezando a atração da Terra sobre a Lua, o que não é admissível. De fato, a aceleração da Lua em relação ao Sol só se alinha na direção Lua-Sol quando os três corpos estão em linha reta, ou seja, durante os eclipses.

Concordo, no entanto, que a explicação do início da página 117 não é das mais claras, quando digo que *Sobre a Lua incidem duas forças gravitacionais relevantes, a do Sol e a da Terra. A primeira imprime à Lua uma aceleração igual a \vec{a}_1 , a segunda uma aceleração igual a \vec{a}_2 , como na figura 7. Assim, a aceleração da Lua em relação ao Sol é igual a $\vec{a}_1 + \vec{a}_2$* . O problema é a ambigüidade da expressão imprime. Fica mais claro combinar as duas forças gravitacionais sobre a Lua, como na explicação acima, e daí determinar a sua aceleração em relação ao Sol. Para aumentar a confusão, na figura 7, o vetor \vec{a}_2 se confunde com o segmento Terra-Lua sem uma seta, sequer, para indicar o seu sentido. A versão correta da figura 7 é a que se segue:

Espero que os argumentos acima convençam o prezado professor de que nada havia de errado naquilo que apreendi no curso de Mecânica Racional da Escola Nacional de Engenharia em 1954, quando estudei não só o Synge and Griffith e o Timoshenko, mas também o livro do Goldstein. (Se não estiver convencido, não hesite em acionar a sua baladeira). De qualquer forma agradeço a discussão, graças à qual, numa próxima edição, a explicação da página 117 de *Ensaio Analítico* se tornará mais clara, inclusive pela correção da figura 7.

Passemos à relatividade. Deve-se a Galileu o princípio de que a experiência física não permite que um observador distinga se está em repouso absoluto ou em movimento retilíneo uniforme. Esse é o chamada princípio da inércia, ou princípio da relatividade de Galileu, cuja conseqüência imediata é a primeira lei de Newton. Tanto

Galileu quanto Newton acreditavam na existência do espaço absoluto mas, pelo princípio da relatividade, as leis da Física seriam as mesmas para qualquer sistema de coordenadas em translação uniforme no espaço absoluto. Esses seriam os sistemas inerciais de referência, entre os quais Newton distinguiu o sistema com origem no Sol e com os eixos apontados para três estrelas fixas distantes.

O programa da relatividade geral, construir uma Física cujas leis independessem do sistema de eixos de referência, era inconcebível no século XVII. A principal razão é que a segunda lei de Newton, sendo válida para os sistemas inerciais, não podia valer para outros sistemas. Nestes últimos, era preciso introduzir as forças inerciais (também denominadas forças de reação, ou forças fictícias), cujas expressões analíticas foram descobertas nos séculos XVIII e XIX, por Clairaut e outros físicos e matemáticos. Isto posto, a teoria heliocêntrica impunha-se sobre a geocêntrica pelo fato de o Sol, ao contrário da Terra podia ser comprovada pelo pêndulo de Foucault. De resto, pelo menos no século XIX, a existência de sistemas de coordenadas privilegiados não era motivo de inquietação filosófica.

O desenvolvimento do eletromagnetismo, no século XIX, pôs em cheque o princípio da relatividade de Galileu. Com efeito, as equações de Maxwell não podiam ser válidas simultaneamente para todos os sistemas inerciais, tal constituindo a famosa *assimetria das equações do eletromagnetismo*. A solução encontrada foi apelar para o éter, o suposto meio pelo qual se propagariam as ondas eletromagnéticas. As equações de Maxwell valeriam apenas para os sistemas fixos no éter, que era o espaço absoluto na versão do século XIX.

A experiência de Michelson-Morley propôs-se a determinar a velocidade da Terra em relação ao éter. A experiência concluiu-se que, das duas uma: ou a Terra era fixa no éter, ou a velocidade de propagação da luz independia do movimento do observador. No século XVII, a única interpretação cabível teria sido a primeira, encampável pela Inquisição como prova cabal da verdade da teoria geocêntrica. Pelos paradigmas do século XIX, a única leitura aceitável era a segunda, embora envolvesse a derrubada do conceito de tempo absoluto.

Lorentz foi o primeiro físico a construir uma nova cinemática compatível com a constância da velocidade da luz. As suas transformações explicavam fenômenos surpreendentes, como a contração de Fitzgerald, o atraso dos relógios e a possibilidade de dois eventos simultâneos num sistema inercial de referência serem não simultâneos em outro. O que Lorentz não percebeu é que as equações de Maxwell eram invariantes às suas transformações. Ou seja, que uma vez aceita a sua cinemática, as equações do eletromagnetismo passavam a valer para todos os sistemas inerciais de referência. E que isso acabava com a suposta incompatibilidade entre a teoria eletromagnética e o princípio da relatividade de Galileu.

No famoso artigo de 1905 *Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*, Einstein desatou todos esses nós num só golpe de gênio. O artigo se inicia com o enunciado de dois postulados fundamentais da Física, o princípio da relatividade restrita (ou de Galileu) e o da constância da velocidade da luz. Daí Einstein chega à mesma cinemática de Lorentz, mas por uma cadeia dedutiva bem mais rigorosa. [Analiticamente, a constância da velocidade da luz leva apenas à conclusão de que quando se passa de um sistema inercial para outro, $(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2 - c^2(dt)^2 = k(x, y, z, t)[(dx')^2 + (dy')^2 + (dz')^2 - c^2(dt')^2]$].

Do princípio da relatividade restrita é que se conclui que $k(x, y, z, t) = 1$]. E prova que as equações de Maxwell são invariantes em relação a essa cinemática.

Mas voltemos ao ponto de nossa controvérsia, cuja origem é a frase do quarto parágrafo da página 184 de *Ensaio Analítico*: - *O ponto de partida de Einstein foi observar que a experiência de Michelson-Morley atirou no que viu e acertou no que não viu. O alvo era o princípio da inércia de Galileu, segundo o qual a experiência física seria incapaz de distinguir o repouso absoluto do movimento retilíneo uniforme. Mas a vítima foi a hipótese de existência do tempo absoluto, incompatível com a cinemática da velocidade constante da luz em todas as direções.* Segundo meu eminente crítico, o ponto de partida foi outro, a observação das assimetrias da equação do eletromagnetismo. Na impossibilidade de resolvermos o impasse via sessão espírita, concordemos pelo menos num ponto: nossa divergência não chega a ser substantiva. De qualquer forma, permita-me alinhar um argumento a favor de minha interpretação.

Se o ponto de partida de Einstein tivesse sido apenas a observação das assimetrias da equação de Maxwell, o famoso artigo de 1905 poderia ter sido muito mais simples. Bastaria provar que as equações do eletromagnetismo eram invariantes em relação às transformações de Lorentz, já bem conhecidas na época. Einstein, no entanto, inicia seu artigo combinando o princípio da relatividade de Galileu com a constância da velocidade da luz, para aí sim, obter tudo o mais como consequência. Ou seja, seu objetivo era reabilitar o princípio da relatividade, abalado pelo desenvolvimento do eletromagnetismo.

Passemos agora ao tema fascinante das forças inerciais. *Ensaio Analítico* é um livro de escopo limitado, e por isso só passei de raspão sobre o tema. Há três níveis de discussão sobre o tema: a) saber se a sua existência é real ou fictícia; b) saber se elas podem ser dispensadas por uma mudança de geometria; c) saber o que distingue um sistema inercial de um não inercial.

O primeiro problema já está mais do que resolvido: existência não é um conceito absoluto, mas dependente do sistema de referência. Para quem se situa num sistema não inercial as forças de reação existem, o que explica as sensações de quem experimenta uma montanha russa num parque de diversões, assim com a imponderabilidade dos astronautas em órbita em torno da Terra. Para um observador centrado num sistema inercial essas forças não existem, sendo simples contrapartidas de aceleração. Ou seja, o que o viajante sente como força centrífuga é o que o observador fixo interpreta como efeito da aceleração centrípeta, e assim por diante.

O segundo problema, habilmente resolvido por Einstein e Minkowski, constitui o núcleo de nossa divergência provocada pela afirmação da página 213 de *Ensaio Analítico* a respeito de uma mudança conveniente de geometria: *Associando essa métrica ao sistema acelerado, a teoria da relatividade dispensa as forças fictícias.* Dispensar não significa negar a sua existência. Significa apenas dar-lhes uma interpretação alternativa. A demonstração dessa possibilidade matemática é muito simples, e está apresentada na página 212 de *Ensaio Analítico*. Com essa mudança de geometria, a primeira lei de Newton passa a valer em qualquer sistema de referência, inercial ou não. O privilégio dos sistemas inerciais é que são os únicos em que a geometria natural é a euclidiana. Foi associando essa observação com o princípio da equivalência que Einstein partiu para reconstruir a teoria gravitacional em termos de encurvamento do espaço-tempo.

O terceiro problema é muito mais profundo, e nos leva ao cerne da teoria de Mach: por que o sistema de coordenadas com origem no Sol e com eixos dirigidos para três

estrelas fixas distantes possui o privilégio de ser um sistema inercial? Pelo princípio de Mach isso implica supor que as galáxias distantes estejam aproximadamente em repouso ou em movimento retilíneo uniforme, sem o que haveria forças de reação universais. Isso deve considerar-se fato empírico, ou imposição lógica da cosmogonia? A primeira reação de qualquer popperiano é admitir que se trata de um fato empírico, que assim como é, poderia não ser. Há no entanto dois fortes argumentos a favor da contingência cosmogônica. O primeiro é a teoria da relatividade restrita: como nenhum corpo pode mover-se a velocidade superior à velocidade c da luz, a velocidade angular de rotação das galáxias distantes não pode ser superior a $\omega = c/R$, onde R é o raio do universo. Do mesmo modo, a sua aceleração média não pode ultrapassar $\gamma = c/T$, sendo T a idade do universo. Os valores assim determinados de ω e γ são ínfimos, corroborando a hipótese de que o movimento das galáxias distantes seja aproximadamente retilíneo e uniforme. (Na teoria da relatividade geral, as conclusões são mais complicadas, pois a geometria não é mais euclidiana). O segundo argumento diz respeito à própria capacidade humana de medição do espaço e do tempo. Especificamente, que sentido haveria em falar em rotação do universo, já que não há referencial externo possível? Do mesmo modo, como observou Mach, se o tempo, cuja percepção deriva da mudança das coisas, é usado para medir a própria mudança de coisas, que sentido há em movimento acelerado do universo como um todo? Esses são temas de discussão fascinantes, mas cujo alcance vai muito além do que se propõe meu livro *Ensaio Analítico*.

Agradecendo mais uma vez a sua valiosa colaboração crítica, subscrevo-me cordialmente

Mario Henrique Simonsen

Belém, 30 de maio de 1995

Exmo. Sr. Prof. Mário Henrique Simonsen
Fundação ``Getúlio Vargas``
Caixa Postal 65.591
22.257-970 – Rio de Janeiro – RJ

Prezado Professor:

Mais uma vez, muito obrigado por sua carta de 12 de maio p.p. Conforme o senhor mesmo sugere, agora, nossas divergências são, basicamente, adjetivas e, como a escolha de um *adjetivo* é pessoal, tais divergências só poderão ser resolvidas numa conversa ``tête-à-tête``. Desse modo, isso só poderá acontecer, quando nos encontrarmos em Belém ou no Rio de Janeiro, caso', é claro, haja interesse de sua parte, uma vez que terei um grande prazer de conversar com o senhor.

Receba um afetuoso abraço do amigo

José Maria Filardo Bassalo