

# O CONCEITO FÍSICO DE MASSA

## I. INTRODUÇÃO HISTÓRICA

JORGE VALADARES

Universidade Aberta, Palácio Seia, 1300 Lisboa

*Este é o primeiro de dois artigos acerca do conceito de massa. Pretende-se, com eles, alertar os professores para a necessidade de alterar algumas concepções tradicionais acerca do conceito de massa, defendendo a ideia de que apenas a massa em repouso deve ser considerada medida da inércia. Distingue-se massa em repouso e massa própria, em que apenas esta deverá ter o estatuto de propriedade das partículas, e também se procura clarificar o significado de massa de um sistema. Partindo de considerações históricas, no primeiro artigo, e através de novos significados conceptuais, no segundo artigo, advoga-se a abolição do conceito histórico de massa relativista e das ideias de que a massa se converte em energia e vice-versa.*

### 1. Evolução do conceito antes de Einstein

Desde a antiguidade que a palavra massa representa vulgarmente um pedaço de um material, preferencialmente na forma de pasta. Isaac Newton atribuiu à palavra massa o significado de quantidade de matéria (Newton, 1990, p. 1) definindo a massa de um corpo pelo produto do seu volume pela densidade da substância que o constitui.

Esta definição de massa constitui um ciclo vicioso já que a densidade é ela própria definida a partir da massa. Embora Newton tenha estabelecido de modo claro o conceito de inércia de um corpo e associado este à sua massa, foi Leonhard Euler quem primeiro definiu operacionalmente a *massa*, como medida da inércia de um corpo, através do quociente da força que nele actua pela aceleração resultante:

$$m = F/a \quad (\text{Baierlein, 1991, p. 172}). \quad (1)$$

No quadro conceptual da mecânica newtoniana, esta *massa inercial* de um corpo nada tem que ver com a sua *massa gravitacional*. A primeira destas duas grandezas quantifica a inércia do corpo, isto é, a oposição que ele oferece à mudança da velocidade por acção de forças. Da segunda grandeza depende

proporcionalmente a força exercida por um campo gravitacional no corpo. A primeira mede-se por um processo dinâmico, dividindo uma força aplicada ao corpo pela aceleração nele produzida. A segunda mede-se por um processo estático através do equilíbrio de forças numa balança de pratos.

Na Física newtoniana apareceram diversas massas inerciais, cada uma das quais corresponde a um aspecto diferente que tem a ver com a inércia (Couderc, 1977, p. 92).

Assim, por exemplo, se a força actua num corpo na direcção da velocidade, esta só muda de valor mas não de direcção. A resistência a essa mudança do valor da velocidade é medida pela chamada *massa longitudinal*.

Se a força actuar perpendicularmente à velocidade, apenas faz variar a direcção desta. A resistência a esta mudança de direcção é medida pela *massa transversal*.

É importante realçar-se que todas as medidas que puderem ser efectuadas das diversas massas de um corpo, a baixas velocidades comparadas com a velo-

O conceito de massa antes de Einstein

Idelas Einsteinianas



(1) Para garantir o máximo de homogeneidade de notação, não respeitaremos as letras que os diversos autores citados utilizam para representar as várias grandezas físicas.

cidade da luz, conduziram sempre a um mesmo valor. (2)

O extraordinário poder preditivo da mecânica newtoniana e a sua elevada coerência interna conduziram à convicção na maioria dos físicos do século passado de que a referida mecânica era um edifício praticamente acabado e imune a qualquer crítica. Muito poucos se aperceberam das debilidades dos seus fundamentos. Um dos críticos mais perspicazes dos fundamentos da mecânica newtoniana foi o físico e filósofo neo-positivista austríaco Ernest Mach (1838-1916). Criticando as concepções newtonianas de espaço e tempo absolutos, viria a exercer uma enorme influência no pensamento de Albert Einstein.

Em 1904, Lorentz publicou a versão final e mais completa da sua *Electrodinâmica dos corpos em movimento*. Com esta teoria, pretendeu interpretar os resultados contraditórios de algumas experiências cruciais no quadro conceptual da Física newtoniana, onde se admite a existência do éter luminífero e do referencial absoluto nele apoiado, com a consequente existência do espaço e tempo absolutos. Uma das mais célebres, a experiência interferencial de Michelson, tinha conduzido Lorentz e Fitzgerald a admitirem que *as dimensões das corpos rígidos se modificam longitudinalmente quando em movimento através do éter*. Nessa última versão da electrodinâmica, Lorentz toma como ponto de partida as equações fundamentais da teoria dos electrões, publicada na *Mathematischen Encyklopadie*, e considera o electrão, no estado de repouso, como uma esfera carregada de raio  $R$ , mas deformável, quando em movimento, por acção de forças de interacção com o éter. E alcança a conclusão teórica importante de que *a massa longitudinal e a massa transversal do electrão dependem da sua velocidade* ( $v$ ), sendo essas dependências traduzidas pelas expressões

$$m_l = k \cdot (e^2/Rc^2) \cdot 1/(1-v^2/c^2)^{3/2}$$

$$m_t = k \cdot (e^2/Rc^2) \cdot 1/(1-v^2/c^2)^{1/2}$$

onde  $R$  representa o raio do electrão,  $e$  a sua carga,  $c$  a velocidade da luz no vácuo e  $k = 1/6\pi$  (Lorentz, 1972, pp. 30 e 34).

Nesse mesmo artigo de 1904, Lorentz afirma também que a massa de todas as partículas varia com a velocidade do mesmo modo que o electrão, «desde que se admita que as suas massas são influenciadas por uma translação no mesmo grau em que o são as massas electromagnéticas dos electrões» (1972, p. 38). E admite que, para além das massas transversal e longitudinal dependentes da velocidade, «não existe qualquer massa verdadeira ou material» (1972, p. 30).

Mas é importante afirmar que não foi Lorentz o primeiro físico a propôr a ideia de dependência da massa com a velocidade. Já em 1903 Max Abraham tinha

proposto uma outra teoria que previa dependências da massa com a velocidade diferentes da de Lorentz.

Como, para baixas velocidades, as previsões dos dois físicos só diferem na parcela de ordem  $(v/c)^2$ , tornava-se experimentalmente difícil resolver o diferendo entre as duas teorias. O próprio Lorentz terminou o seu artigo mostrando que os resultados experimentais então conhecidos coincidiam tão bem com as suas conclusões teóricas como com as de Abraham (3), (1972, pp. 39 a 43).

Para o objectivo que nos propomos neste artigo é importante notarmos que em qualquer das teorias que referimos, e que previam a dependência da massa com a velocidade, a grandeza massa nunca apareceu associada à grandeza energia, isto é, as grandezas *massa e energia eram absolutamente distintas*.

Foi Poincaré, numa comunicação de 1900 intitulada «*A teoria de Lorentz e o princípio da reacção*», quem pela primeira vez caracterizou a energia como «um fluido impregnado de inércia» (Jammer, 1961, p. 175). Tendo em conta a relação maxwelliana entre a quantidade de movimento e a energia de uma pequena porção de luz

$$p = E/c$$

e definindo newtonianamente a quantidade de movimento dessa porção por  $p = mc$ , Poincaré concluiu que a referida porção de luz deveria possuir a massa inercial

$$m = E/c^2 \quad (\text{Okun, 1989, p. 3}).$$

Que poderemos salientar deste período histórico pré-relativista de que acabamos de dar um pequeno esboço relativo apenas à parte que aqui nos interessa?

Em primeiro lugar, que no quadro conceptual da Física pré-einsteiniana foram surgindo várias massas para traduzir a inércia dos corpos além da massa gravitacional. A equivalência entre essas massas era um facto meramente experimental (ao contrário do que vem a suceder na teoria da relatividade geral com uma identificação essencial entre massa gravitacional e massa inercial). Em 1904, subsistiam na electrodinâmica duas massas inerciais, a massa transversal e a massa longitudinal, com expressões distintas conforme a teoria que estava por trás da sua dedução, e as medições experimentais das mesmas revelavam-se incapazes de confirmar qualquer dessas expressões em detrimento de outras.

Em segundo lugar, que a ideia da existência de massa inercial variável com a velocidade surgiu antes de Einstein com base em teorias que referiam alterações estruturais dos corpos.

(2) Eötvös realizou experiências com precisão  $10^{-8}$  e Dicke atingiu a precisão  $10^{-11}$ .

(3) Esses resultados experimentais, obtidos por Kaufmann, baseavam-se nos desvios sofridos, sob acção de campos eléctricos e magnéticos, pelas radiações emitidas por fontes radioactivas.

E, finalmente, que a legendaria fórmula

$$E = mc^2,$$

que Okun considera «um elemento de cultura de massas» (1989, p. 35), também foi introduzida antes de Einstein com um significado limitativo, e não com o significado que mais tarde Einstein viria a atribuir-lhe e a que nos referiremos na secção seguinte.

## 2. Evolução das ideias einsteinianas sobre a massa na TRR

Em 1905, Einstein publicou nos *Annalen der Physik* alguns artigos notáveis. Um deles, intitulado «Zur Elektrodynamik bewegter Körper» (Sobre a Electrodinâmica dos corpos em movimento), contém um corpo teórico conhecido como *Teoria da Relatividade Restrita* (TRR) e que veio resolver, de modo brilhante e revolucionário, o conflito conceptual entre o princípio da relatividade, as rigorosas equações de Maxwell e as fórmulas de transformação de Galileu, conflito esse que constituía uma das grandes dificuldades com que se debatia a Física. Dizemos de modo brilhante porque, baseada em dois pressupostos apenas, essa teoria veio explicar de maneira simples os resultados de experiências «rebeldes» no que se refere à física newtoniana (tais como as experiências de Michelson-Morley e de Fizeau) e prever um grande número de resultados que, de então para cá, foram sendo sobejamente confirmados. E de modo revolucionário porque envolveu uma reformulação dos pilares da mecânica, esse maravilhoso «edifício» que nos finais do século passado parecia praticamente definitivo mas que afinal estava bem longe disso...

Na segunda parte (a *parte electrodinâmica*) desse artigo fundamental, mais concretamente no parágrafo 10, intitulado «*dinâmica do electrão (lentamente acelerado)*», Einstein, a determinada altura, procura, cedendo a concepções habituais (o sublinhado é nosso), a «massa longitudinal» e a «massa transversal» do electrão:

Que quererá dizer Einstein com «ceder a concepções habituais»? Julgamos que Einstein cedeu, de facto, a concepções históricas, que têm a ver com a polémica entre teorias rivais (a de Lorentz e a de Abraham) que referiam mais que uma massa inercial, dependente da velocidade, com expressões diferentes para essa dependência. Mas Einstein parece não estar muito convencido da verdadeira fundamentação científica dessas fórmulas de definição já que nunca mais, nesses famosos artigos, ele se refere a elas ou delas tira qualquer consequência, por exemplo, sobre natureza limite da velocidade da luz (à semelhança do que tantas vezes se vê fazer) <sup>(4)</sup> e, mais tarde, viria mesmo a renegar tais fórmulas, conforme veremos.

As expressões que Einstein estabeleceu para as massas longitudinal e transversal, são as seguintes (ver nota da p. 9):

$$m_l = \frac{m}{\left[ \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right]^3}$$

$$m_t = \frac{m}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Nestas fórmulas,  $m$  é a massa do electrão «enquanto o movimento for lento» (Einstein, 1972, p. 81), isto é, não é mais do que a massa inercial definida na mecânica newtoniana. Note-se que a fórmula da massa transversal nem está correcta. Foi Planck que a apresentou corrigida em 1906 (Adler, 1987, p. 742).

Após a apresentação destas fórmulas, Einstein escreveu: «É claro que se obteriam outros valores para as massas se se empregassem outras definições para a força e para a aceleração».

No mesmo número dos *Annalen der Physik*, Einstein apresenta um outro importante artigo: «*Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?*» (A inércia de um corpo depende do seu conteúdo energético?). Neste artigo Einstein considera a seguinte experiência conceptual: um corpo em repouso num referencial inercial emite duas ondas luminosas transportando cada uma a energia  $E/2$  em sentidos opostos. Dado que as emissões são simétricas, o corpo perde energia mas o seu momento conserva-se, permanecendo, pois, em repouso nesse referencial. Analisando depois a mesma emissão do ponto de vista de um outro referencial inercial que se move com uma velocidade  $v$  *qualquer* em relação ao primeiro, Einstein acaba por atingir, com base no princípio da relatividade, a expressão

$$E_{c0} - E_{c1} = E \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right)$$

onde  $E_{c0}$  e  $E_{c1}$  são as energias cinéticas do corpo com velocidade constante  $v$ , respectivamente antes e após a emissão da energia luminosa  $E$ . E conclui, que a energia cinética do corpo, no referencial em que se move com a velocidade  $v$ , diminui em consequência da emissão da energia luminosa  $E$ . Desprezando quantidades de quarta

<sup>(4)</sup> Einstein deduz, logo na página seguinte àquela em que apresenta as fórmulas das massas transversal e longitudinal, a expressão da energia cinética do electrão e af, sim, mostra uma vez mais a coerência com a natureza limite da velocidade da luz no vácuo.

ordem e ordens superiores a casa, obtém

$$E_{c0} - E_{c1} = \frac{E}{c^2} \frac{v^2}{2}$$

A termina esse importante artigo escrevendo:

«Se um corpo perder a energia  $E$  em forma de radiação, a sua massa sofre a diminuição  $E/c^2$ .

É claro que nada importa ser ou não directa a transformação da energia saída do corpo em energia de radiação, de modo que somos assim conduzidos às seguintes conclusões gerais:

A massa de um corpo é uma medida do seu conteúdo energético; se a energia sofrer uma variação igual a  $E$ , a sua massa sofrerá, no mesmo sentido, uma variação igual a  $E / 9.10^{20}$  [note-se que no sistema de unidades CGS a velocidade da luz tem o valor  $3.10^{10}$  cm/s].

Não está fora do possível que, em corpos de conteúdo energético altamente variável (por exemplo, os sais de rádio), se venha a encontrar uma prova a que esta teoria se possa sujeitar. Se a teoria corresponder aos factos, então a radiação é um veículo de inércia entre os corpos emissores e os absorventes» (os sublinhados e a referência ao sistema CGS não constam do texto original que aqui se reproduz).

Os aspectos que nos interessa aqui realçar são os seguintes:

1.º — Einstein afirma que *a massa inercial de um corpo varia* não porque varia a sua velocidade mas sim *porque varia a energia que ele contém*.

2.º — A relação que Einstein estabelece é uma *relação entre a variação da massa de um corpo,  $m$ , tal como é definida na Mecânica newtoniana, e a variação do seu conteúdo de energia*, isto é, da energia que o corpo possui independentemente de ter energia cinética ou não:

$$\Delta m = \Delta E_0/c^2$$

3.º — Einstein relaciona a radiação com a inércia pelo facto de a energia radiante, como qualquer energia fornecida (ou retirada) a um corpo, aumentar (ou diminuir) a massa inercial desse corpo. Mas *não refere* em parte alguma deste artigo *que a radiação tem inércia e muito menos que tem massa*. Sabemos o que se passa quando um corpo emite calor para outro: a energia interna de um aumenta, a energia interna do outro diminui, mas o calor que transita não é energia interna. Porque não aceitar não aceitar algo de análogo quando um corpo emite luz para outro? A massa do corpo emissor diminui, a do corpo receptor aumenta, mas isso não obriga a que a luz seja energia com massa <sup>(5)</sup>.

Em 1906, Einstein analisa a célebre experiência conceptual do cilindro oco que emite um «flash» de luz

de uma das suas extremidades e o absorve na outra.



Considerando o momento

$$p = E/c,$$

que a teoria electromagnética já conhecia desde o século passado, e tendo em conta a lei da conservação do momento do sistema *total*, ele chega facilmente à conclusão de que a luz com energia  $E$  transfere massa

$$m = E/c^2$$

e daí infere que qualquer energia  $E$  *corresponde* à massa  $E/c^2$ .

A palavra *corresponde* não é muito esclarecedora, mas, em coerência com os resultados anteriores, só poderemos concluir desta situação conceptual que a parede que emite a energia  $E$  diminui a sua massa de um valor  $E/c^2$  a que recebe a energia  $E$  aumenta a sua massa de igual valor.

Em 1916, Einstein escreveu uma obra particularmente destinada a quem, «sem dominar o aparato matemático da Física teórica, tem interesse na teoria do ponto de vista científico e filosófico» (Einstein, 1916, prólogo). No parágrafo 15 da primeira parte dessa obra, dedicada à teoria da relatividade restrita (a segunda parte diz respeito à teoria da relatividade geral), Einstein apresenta os resultados gerais da teoria. E afirma que «o resultado mais importante de índole geral a que conduz a teoria de relatividade especial diz respeito ao conceito de massa» (p. 43). E um pouco mais adiante (p. 45) escreve: «Cabe portanto dizer: se um corpo absorve a energia  $E_0$ , a sua massa inercial cresce de  $E_0/c^2$ ; a massa inercial de um corpo não é uma constante mas sim variável segundo a modificação da sua energia. A massa inercial de um sistema de corpos deve ser encarada precisamente como uma medida da sua energia. O postulado da conservação da massa de um sistema coincide com o da conservação da energia e só é válido na medida em que o sistema não absorve nem emite energia» (os sublinhados, mais uma vez, são nossos).

Em todo este estudo está a considerar um sistema de coordenadas solidário com o corpo, conforme refere em notas de rodapé. Torna-se pois evidente que não está a considerar outra massa que não seja a *massa newtoniana*, aquela que os corpos possuem quando em repouso, que

(5) A demonstração que Einstein apresentou para a equivalência entre a massa de um corpo e o seu conteúdo energético tem sido apelidada de falaciosa por diversos físicos. John Stachel e Roberto Torretti mostram que tal não é verdade (remetemos o leitor interessado nesta questão para o artigo destes dois físicos referido na bibliografia).

resulta da equivalência entre massa inercial e massa gravítica (acidental na mecânica newtoniana, e fundamental na relatividade geral) e que tanto se pode medir em repouso, com a balança, como em movimento lento, pelo quociente entre a força aplicada e a aceleração produzida. Além disso, Einstein destaca nitidamente a massa da energia exterior aos corpos, associando-a sempre à energia neles contida,  $E_0$ . Realçemos acima de tudo o facto de ele também não se referir neste livro de índole didáctica à variação da massa com a velocidade.

Mas é na sua última fase de vida que a posição de Einstein acerca da massa se torna ainda mais explícita. Assim, por exemplo, numa carta a Lincoln Barnett declara o seguinte: «Não é bom introduzir-se o conceito de massa

$$M = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

de um corpo em movimento para o qual nenhuma definição clara pode ser dada. É melhor não introduzir outro conceito de massa a não ser o de massa em repouso  $m$ . Em vez de introduzir  $M$  é melhor mencionar a expressão para o momento e energia de um corpo em movimento» (Okun, 1989, p. 32 e Adler, 1981, p. 742).

Um dos mais notáveis livros que Einstein escreveu e que esgotou várias edições e imensas reimpressões intitula-se *O Significado da Relatividade*. A sua 5.<sup>a</sup> edição constitui, no dizer do Prof. Mário Silva, que a traduziu para a língua portuguesa, «a derradeira mensagem que Einstein dirigiu, ainda em pleno vigor da sua capacidade intelectual» (introdução à edição portuguesa). Na página 57, Einstein trata do tema massa, numa secção que intitula *Massa e energia*. Trabalhando no espaço de Minkowski, portanto a quatro dimensões, e num sistema de unidades em que  $c = 1$ , Einstein deduz as componentes do tensor momento-energia

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{mv_x}{\sqrt{1 - v^2}} & I_y &= \frac{mv_y}{\sqrt{1 - v^2}} \\ I_z &= \frac{mv_z}{\sqrt{1 - v^2}} & E &= \frac{m}{\sqrt{1 - v^2}} \end{aligned}$$

em que  $v$  é a velocidade. E faz, a seguir, duas observações:

— que estas componentes da quantidade de movimento coincidem com as da mecânica clássica para velocidades pequenas quando comparadas com a da luz;

— que considerando uma partícula em repouso ( $v = 0$ ) vemos que a energia  $E_0$  de um corpo em repouso é igual à sua massa.

E prossegue: «Se tivéssemos escolhido o segundo como a nossa unidade de tempo teríamos obtido

$$E_0 = mc^2$$

Massa e energia são portanto essencialmente idênticas; elas são apenas expressões diferentes da mesma entidade. A massa de um corpo não é uma constante; varia com as variações da sua energia».

Importa realçar que Einstein:

1.º — associa a massa ao conteúdo energético das partículas quando em repouso, escrevendo

$$E_0 = mc^2 \quad \text{e não} \quad E = mc^2;$$

2.º — refere uma vez a *variação de massa com a energia* e não com a velocidade.

Julgamos poder concluir que a ideia mais importante e perene que Einstein estabeleceu acerca da *massa* é a de que esta grandeza constitui uma *propriedade do corpo que é essencialmente idêntica à energia que ele contém* e que mede a sua inércia. A ideia de que a massa depende da velocidade apareceu em Einstein como um resquício histórico de que mais tarde se libertou.

Se a massa de um corpo é uma propriedade do corpo que mede a sua inércia e equivale ao conteúdo de energia que contém, poderá ela ser outra que não a massa em repouso (ou, se preferirmos, a massa quando a velocidade é do domínio newtoniano)? Julgamos que não e esforçar-nos-emos por fundamentá-lo de outro modo no artigo seguinte. Mas antes vamos referir, sucintamente, algumas ideias pós-relativistas de outros físicos acerca da massa.

Como tantas vezes tem sucedido na história da ciência, outros físicos são muito mais responsáveis que Einstein por determinadas ideias «einsteinianas». Entre estas conta-se a de que a massa aumenta com a velocidade.

Em 1912, Tolman não hesitou em adoptar a definição clássica de momento  $p = mv$  ao domínio relativista e, assim, foi conduzido à expressão

$$M = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

O mesmo fez Pauli em 1921, quando ainda era um brilhante estudante de 21 anos de idade, com a agravante de este seu trabalho ter sido dos mais utilizados por muitos físicos devido à reputação do autor.

Os grandes físicos soviéticos Landau e Lifshitz, na importante obra *Teoria Clássica dos Campos*, aboliram completamente a noção de massa relativista tão divulgada em muitas obras desde sempre e, segundo Okun, teriam

sido pioneiros nessa sua atitude (1989, p. 35). De então para cá, muitos livros, principalmente os que fazem abordagens mais formais baseadas na geometria espaço-temporal, aboliram totalmente a massa relativista ou massa dependente da velocidade. E os mais recentes cursos que temos consultado, mesmo a níveis introdutórios, ou não falam dela ou referem-na apenas para a criticar.

Os físicos de altas energias que mais poderiam trabalhar com a massa relativista não o fazem. É caso para dizer-se que para eles «massa só há uma: a massa em repouso e mais nenhuma».

Na opinião de Baierlein, a decisão de escolher a definição de massa  $m$ , portanto, de adoptar ou não a massa relativista, é uma questão semântica (1989, p. 172). Na opinião de R. Resnick e D. Halliday é uma questão de gosto (1985, p. 98). Também A. French o considera uma questão de preferência (1988, p. 25). Em nossa opinião não é apenas uma questão de gosto ou semântica ainda que reconheçamos que alguns bons livros, e não muito antigos, abordam a TRR explorando a massa relativista (a última versão do livro de Resnick e Halliday sobre a Física relativista e Física quântica, que indicamos em referência, é disso um bom exemplo). A massa relativista é, quanto a nós, uma interpretação inaceitável, uma «misconception», conforme tentaremos fundamentar por outra via no próximo artigo.

### 3. Síntese final

Recorremos a alguns apontamentos da história das ideias relativistas para tentar mostrar como a ideia de massa relativista é muito menos consistente do ponto de vista histórico do que se poderá julgar. Vimos como o conceito de massa dependente da velocidade apareceu, antes de Einstein, interligado com outros conceitos hoje inaceitáveis, como seja, por exemplo, o de os corpos serem deformáveis dinamicamente por acção de forças quando se movem a altas velocidades. Vimos como Einstein só introduziu o conceito de massa dependente da velocidade por razões que julgamos serem apenas históricas, já que não mais explorou esse conceito, e veio mais tarde a renegá-lo. Num segundo artigo apresentaremos outro tipo de argumentos a favor da eliminação da massa relativista e de outras concepções relativistas.

### Agradecimentos

Desejo manifestar a minha gratidão aos Professores Armando Rocha Trindade, Carlos Fiolhais, Helena Caldeira, Luís Silva e Teresa Gonçalves pelas críticas e sugestões a estes dois artigos sobre o conceito de massa.

## BIBLIOGRAFIA

### 1 — Livros em português

- BROTAS, A. — *O essencial sobre a teoria da relatividade*, INCM, Lisboa, 1988.
- COUDERC, P.; PERRIN, F. — *A relatividade*, Edições 70, Lisboa, 1984.
- CUNY, H. — *Albert Einstein e a relatividade*, Ulisseia, Lisboa, 1965.
- EINSTEIN, A. — *O significado da relatividade*, Arménio Amado, Coimbra, 1958.
- INFELD, L. — *Albert Einstein*, Europa- América, Lisboa, s/d.
- KUZNETSOV, B. — *Albert Einstein*, 2 vol., Presença, Lisboa, s/d.
- LANDAU, L.; RUMER, Y. — *O que é a relatividade?*, Portugalia, Lisboa, 1965.
- PAIS, A. — *Subtil é o Senhor — Vida e pensamento de Albert Einstein*, Gradiva, Lisboa, 1993.
- RESNICK, R. — *Introdução à relatividade especial*, Univers. S. Paulo, 1971.
- SILVESTRINI, V. — *Introdução à teoria da relatividade*, Notícias, Lisboa, s/d.
- STANNARD, R. — *O tempo e o espaço do tio Alberto*, Edições 70, Lisboa, 1991.
- TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA, 1 volume — *O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1972.

### 2 — Livros estrangeiros

- COUDERC, P. — *La relativité*, P.U.F., 16.<sup>a</sup> ed., 1977.
- EINSTEIN, A. — *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Alianza, Madrid, 1984.
- EINSTEIN, A. — *Notas autobiográficas*, Alianza, Madrid, 1984.
- FRENCH, A. — *Relatividad especial- Mit Physics Course*. Reverté, Barcelona, 1988.
- JAMMER, M. — *Concepts of mass*, Harvard University Press, Cambridge-Massachusetts, 1961.
- LA TEORIA DE LA RELATIVIDAD, Selection de L. Pearce Williams, Alianza, Madrid, 1984.
- NOVAK, J.; GOWIN, D. — *Learning how to learn*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- RESNICK, R.; HALLIDAY, D. — *Basic concepts un relativity and early quantum theory*, 2.<sup>a</sup> edição, John Wiley, New York, 1985.
- RON, J. — *El origen y desarrollo de la relatividad*, Alianza, Madrid, 1983.
- THE PRINCIPLE OF RELATIVITY, a collection of original papers on the special and general theory of relativity, New York, s/d.

### 3 — Comunicações científicas

- ALDER, C. — *Does mass really depend on velocity, dad?*, Am. J. Phys. 55 (8), August 1987.
- ALCAINE, G. — *Sobre masa y energia*, Revista Española de Física, 3, 1, 1989.
- BAIERLEIN, R. — *Teaching  $E = mc^2$* , The Physics Teacher, March 1991.
- OKUN, L. — *The concept of mass*, Physics Today, June 1989.
- ROHRLICH, F. — *An elementary derivation of  $E = mc^2$* , Am. J. Phys. 58 (4), April 1990.
- STACHEL, J., TORRETTI, R. — *Einstein's first derivation of mass-energy equivalence*, Am. J. Phys. 50 (8), August 1982.