

O Conceito de Massa. I. Introdução Histórica

(The concept of mass. I. Historical introduction)

Jorge António Valadares

Universidade Aberta, 1000 Lisboa, Portugal

Recebido para publicação em 20 de Janeiro de 1993; Aceito para publicação em 30 de Agosto de 1993

Resumo

Recorremos, neste primeiro artigo, a uns apontamentos da história da evolução das idéias relativistas para tentar mostrar como a idéia 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 ação 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 mal fundamentadas do domínio relativista.

Abstract

In this first paper, we appeal to some notes on the history of the evolution of relativistic ideas attempting to show that, from the historical point of view, the idea of relativistic mass is much less consistent than one could expect. We see that the concept of velocity dependent mass appeared, before Einstein, associated to other concepts which today are unacceptable, such as that bodies are dynamically deformed when they move at high speeds. We see that Einstein introduced the concept of velocity dependent mass due to reasons that we consider just historical, since he did not explore this concept anymore, and later on he renegated it. In a second paper we will present another kind of argument in favor of the suppression of the concept of relativistic mass, as well as of other conceptions badly grounded in the relativistic domain.

I. Introdução histórica

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 idéia de que apenas a massa em repouso deve ser considerada como medida da inércia. Distingue-se a massa própria como um caso particular da massa em repouso com 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 con-

ceituais, no segundo artigo, advoga-se a abolição do conceito histórico de massa relativista e das idéias de que a massa se converte em energia e vice-versa.

I.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 atua pela aceleração resultante: $m = F/a$ ¹ (Baierlein, 1991, p. 172).

No quadro conceitual 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 ação das forças. Da segunda grandeza depende proporcionalmente a força exercida pelo 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 Mecânica newtoniana apareceram diversos conceitos de massa inercial, cada uma das quais corresponde a um aspecto diferente que tem que ver com a inércia (Couderc, 1977, p.92).

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

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

Apareceram ainda outras massas na Física anterior a Einstein, por exemplo a *massa maupertuisiana*, definida por Henri Poincaré, a *massa cinética*, etc, mas o que é importante é que *todas as medidas até hoje efetuadas, a baixas velocidades comparadas com a da luz, das diversas massas de um corpo, conduziram sempre a igual valor*.²

O extraordinário poder preditivo da Mecânica new-

toniana e a sua elevada coerência interna conduziram à convicção da 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 relativamente aos 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. Segundo Mach, todas as coisas do mundo dependem umas das outras. O espaço e o tempo são grandezas eminentemente relativas e todas as massas estão relacionadas entre si desempenhando as acelerações um papel fundamental nessas relações.

Em 1904, Lorentz publicou a versão final e mais completa da sua *Eletrodinâmica dos corpos em movimento* onde considera o elétron como uma esfera carregada e deformável. Com esta teoria, Lorentz pretendia interpretar os resultados contraditórios de diversas experiências no quadro conceitual da Física clássica onde se admite a existência do éter luminífero e do referencial absoluto nele apoiado, com a conseqüente existência do espaço e tempo absolutos. Um dos resultados dessa teoria é que a massa longitudinal e a massa transversal do elétron dependem da sua velocidade, 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 elétron, e a sua carga, c a velocidade da luz no vácuo e k é uma constante numérica.

Estas grandezas são designadas por massas eletromagnéticas dado que, na base da dedução das suas expressões, está a teoria eletrodinâmica de Lorentz, teoria essa que pressupõe o elétron com uma estrutura e dimensões deformáveis por ação de forças de interação com o éter. Lorentz afirma que a massa de todas as partículas varia com a velocidade do mesmo modo que

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

²Estos realizou experiências com precisão 10^{-8} e Dicke atingiu a precisão de 10^{-11} .

o elétron, "desde que se admita que as suas massas são influenciadas por uma translação no mesmo grau em que o são as massas eletromagnéticas dos elétrons" (1972, p.38).

Nesse célebre artigo de 1904, Lorentz admite que, para além das massas transversal e longitudinal dependentes da velocidade, "não existe qualquer massa verdadeira ou material" (1972, p.30). Mas não foi ele o primeiro físico a propor a idéia 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 de Lorentz e Abraham só diferiam na parcela de ordem $(v/c)^2$, tornava-se experimentalmente difícil resolver o diferendo entre as duas teorias (Ron, 1983, p. 48).

É importante notarmos que em qualquer das teorias que referimos que previam a dependência da massa com a velocidade, as grandezas *massa e energia eram absolutamente distintas*.

Foi Poincaré, numa comunicação de 1900 intitulada *A teoria de Lorentz e o princípio da reação*, 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

$$m = E/c^2 \quad (\text{Okun, 1989, p.33}).$$

Que poderemos inferir 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 na Física clássica surgiram várias massas todas elas procurando traduzir a inércia dos corpos. Em segundo lugar que a idéia da existência de massa inercial variável com a velocidade surgiu antes de Einstein, no quadro conceitual da Mecânica clássica e com base em teorias que referiam alterações estrutu-

rais dos corpos. 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.

1.2. Evolução das idéias 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 Eletrodinâmica 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 conceitual 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 clássica. Dizemos de modo brilhante porque, baseada em dois pressupostos apenas, essa teoria veio explicar de maneira simples os resultados de experiências "rebel-des" 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...

O artigo de Einstein sobre a TRR começa com uma introdução onde Einstein formula os dois célebres postulados com base nos quais constrói toda a sua teoria, a saber:

- o princípio da relatividade, segundo o qual as leis da Física são as mesmas em todos os referenciais de inércia;
- o princípio da constância da velocidade da luz, segundo o qual a velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor em todos os referenciais inerciais.

Seguem-se duas partes, a *parte cinemática e a parte eletrodinâmica*. A última seção da segunda parte intitula-se *dinâmica do elétron* (lentamente acelerado). Nesta última seção, a determinada altura, Einstein "procura, cedendo a concepções habituais (o sublinhado é nosso), a *massa longitudinal* e a *massa transversal* do elétron". Que querará dizer Einstein com "ceder a concepções habituais"? Julgamos que Einstein cedeu, de fato, a concepções históricas, que têm que ver com a polêmica 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, acerca da natureza limite da velocidade da luz, como tantas vezes se vê fazer) e, mais tarde, viria mesmo a renegá-las, conforme veremos.

As fórmulas que Einstein deduziu são as seguintes (ver nota da p. 1)

$$\text{massa longitudinal} = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\text{massa transversal} = \frac{m}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Nestas fórmulas, m é a massa do elétron "enquanto o movimento for lento" (Einstein, 1972 p.81). Note-se que a fórmula da massa transversal nem está correta. 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".

Neste trabalho original, logo a seguir à apresentação das fórmulas das massas, Einstein calcula a energia cinética do elétron

$$E_c = mc^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right\}$$

e mostra que uma velocidade $v = c$ tornaria E_c infinitamente grande.

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 um corpo em repouso num referencial inercial a emitir 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. Considerando depois a mesma emissão do ponto de vista de um outro referencial inercial que se move com velocidade v 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 respeito ao referencial em que a sua velocidade é v , respectivamente antes e após a emissão da energia luminosa E . E conclui pois, 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 ordem e ordens superiores a essa, obtém

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

E conclui 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 direta 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 ex., os sais de rádio), se venha a encontrar uma prova a que esta teoria se possa sujeitar. Se a teoria corresponder aos fatos, 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 que aqui se reproduz no qual Einstein usa as letras L em vez de E e k em vez de E_c).

Os aspectos que nos interessa aqui realçar são os seguintes:

1. 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. A relação que ele estabelece é uma relação entre a variação da massa de um corpo num referencial em que está em repouso, m , e a variação do seu conteúdo de energia, isto é, da energia que o corpo possui independentemente de ter energia cinética ou não:

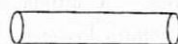
$$\Delta m = \Delta E_0/c^2$$

3. Einstein relaciona a radiação com a inércia pelo fato 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 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.

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).

Em 1906, Einstein analisa a célebre experiência conceitual 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 eletromagnética já permitira conhecer desde o século passado, e tendo em conta a lei da conservação do momento do sistema *total*, ele chega facilmente à seguinte conclusão: a extremidade que emite a luz diminui de massa e a extremidade que a absorve aumenta de massa sendo a medida de qualquer das variações dada por

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

cada vez que é transferida a energia luminosa ΔE .

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) são apresentados os resultados gerais da teoria. É lá que, após uma consideração acerca da importância que a relatividade teve para o conceito de massa, podemos ler o seguinte: "... 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." (p. 45). Em todo o estudo que faz acerca da massa, Einstein está a considerar um sistema de coordenadas solidário com o corpo, conforme refere em notas de rodapé. Torna-se pois evidente que Einstein não está a considerar outra massa que não seja a massa em repouso (sem sequer falar nesta designação pois não se vislumbra outra) e destaca-a bem da energia exterior aos corpos,

associando-a sempre à energia neles contida. Realce-mos acima de tudo o fato de Einstein também não se referir neste livro de índole didática 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 5ª 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 p.57, é tratado o tema massa, numa seção intitulada *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

$$I_x = \frac{mv_x}{\sqrt{1 - v^2}} \dots E = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2}}$$

em que \vec{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:

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

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

2º - refere mais uma vez a variação de massa com a energia e não com a velocidade.

Julgamos poder concluir que a idéia 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 idéia 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 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 idéias 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 adotar a definição clássica de momento $\vec{p} = m\vec{v}$ 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 seu 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, muitas obras, principalmente as 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 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 e, portanto, de adotar 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 aceitemos que alguns bons livros, e não muito antigos, abordam a TRR explorando a massa relativista (a última versão de Resnick e Halliday de um livro que publicaram sobre a Física relativista e a Física quântica, e que indicamos em referência, é disso um bom exemplo). A massa relativista é, quanto a nós, uma interpretação inaceitável, uma *misconception*, do conceito de massa, conforme tentaremos fundamentar por outra via no próximo artigo.

Agradecimentos

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

Bibliografia

- C. Adler, *Does mass really depend on velocity, dad?*
Am. J. Phys. 55 (8), August 1987.
- G. Alcaine, *Sobre masa y energía*, Revista Española de Física, 3, 1 1989.
- R. Baierlein, *Teaching $E = mc^2$* , The Physics Teacher, March 1991.
- A. Brotas, *O essencial sobre a teoria da relatividade*, INCM, Lisboa, 1988.
- P. Couderc, *La relativité*, Col. que sais-je?, P.U.F., 16^a ed., 1977.
- P. Couderc, F. Perrin, *a Relatividade*, edições 70, Lisboa, 1984.
- H. Couny, *Albert Einstein e a relatividade*, ed. Ulisseia, Lisboa, 1965.
- A. Einstein, *O significado da relatividade*, Ed. Arménio Amado, Coimbra, 1958.
- A. Einstein, *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*, in TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA, I volume - O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE, Fund. Calouste Gulbenkian, 1972
- A. Einstein, *A inércia de um corpo será dependente do seu conteúdo energético?*, in TEXTOS FUNDAMENTAIS DA FÍSICA MODERNA, I volume - O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE, Fund. Calouste Gulbenkian, 1972
- A. Einstein, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, Alianza Editorial, Madrid, 1984.
- A. Einstein, *Notas autobiográficas*, Alianza Editorial, Madrid, 1984.
- A. French, *Relatividade especial- MIT Physics Course*, Ed. Reverté, s.a. Barcelona, 1988.
- L. Infeld, *Albert Einstein*, Pub. Europa-América, Lisboa, s/d.

- M. Jammer, *Concepts of mass*, Harvard University Press, Cambridge-Massachusetts, 1961.
- B. Kuznetsov, *Albert Einstein*, 2 vol, Ed. Presença, Lisboa, s/d.
- La Teoría de la Relatividad*, Selección de L. Pearce Williams, Alianza Universidad, Madrid, 1984.
- L. Landau, Y. Rumer, *O que é a relatividade?*, Portugal Edit., Lisboa, 1965.
- L. Okun, *The concept of mass*, Physics Today, June 1989.
- A. Pais, *Subtil é o Senhor*, Edit. Gradiva, Lisboa, 1993.
- R. Resnick, *Introdução à relatividade especial*, Ed Univers. S. Paulo, 1971.
- R. Resnick, D. Halliday, *Basic concepts in relativity and early quantum theory*, sec. ed., John Wiley & Sons, New York, 1985.
- F. Rohrlich, *An elementary derivation of $E = mc^2$* , Am. J. Phys. 58(4), April 1990.
- J. Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad*, Alianza Universidad, Madrid, 1983.
- V. Silvestrini, *Introdução à teoria da relatividade*, Ed. notícias, Lisboa, s/d.
- J. Stachel, R. Torretti, *Einstein's first derivation of mass-energy equivalence*, Am. J. Phys. 50(8), Aug 1982.
- R. Stannard, *O tempo e o espaço do tio Alberto*, Ed. 70, Lisboa, 1991.
- THE PRINCIPLE OF RELATIVITY*, a collection of original papers on the special and general theory of relativity, Dover Publications, Inc, New York, s/d.