

Mais rápido que a luz?

J. Emílio Maiorino^(a) e Waldyr A. Rodrigues Jr.^(b)

^(a)Instituto de Física Gleb Wataghin - Unicamp

^(b)Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica - Unicamp

11/09/1998

Na camiseta dos estudantes de Física encontramos algumas vezes estampada uma versão interessante do terceiro versículo do livro de Gênesis. Ela se inicia com “E Deus disse...” Segue-se um conjunto de símbolos matemáticos que expressam as famosas equações de Maxwell, e a frase de conclusão: “E viu Deus que a luz era boa.”

No que segue, veremos que a paráfrase acima é apropriada. As equações de Maxwell, síntese do eletromagnetismo, são um conjunto de equações diferenciais a derivadas parciais que descrevem o comportamento dos campos elétrico e magnético gerados por distribuições de cargas e correntes. Estas equações também possuem soluções quando as distribuições de carga e corrente são nulas. As mais simples delas, descobertas pelo próprio Maxwell, descrevem configurações eletromagnéticas que chamaremos de soluções-luz (*SL*). As *SL* propagam-se no espaço vazio com uma velocidade característica representada pelo símbolo c (no sistema MKS de unidades, $c = 300.000$ km/s). As principais características das soluções de onda plana (*OP*), as mais simples entre as *SL*, são as seguintes:

- (i) São ondas transversais, nas quais \vec{E} e \vec{B} (respectivamente os campos elétrico e magnético) são ortogonais à direção de propagação, e oscilam com uma certa frequência.
- (ii) Os invariantes de campo são nulos. Os invariantes de campo são (em unidades apropriadas, onde $c = 1$) as quantidades $I_1 = \vec{E} \cdot \vec{B}$ e $I_2 = \vec{E}^2 - \vec{B}^2$. A fig. 1 representa uma *OP*.

A seguinte questão não pode ser evitada: Com relação a que sistema de referência as *SL* se propagam com velocidade c ? Para Maxwell e seus contemporâneos a resposta era óbvia. As *SL* se propagam com velocidade c

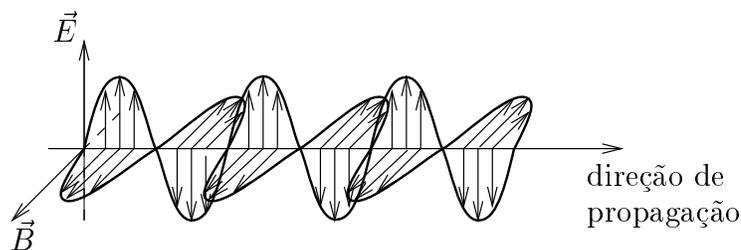


Figura 1: Aspecto dos campos elétrico e magnético de uma onda plana que se propaga na direção x .

em relação a um sistema de referência “materializado” por um meio especial chamado *éter* que é o seu “carregador”, isto é, as SL são vibrações no éter. O conceito de éter, contrariamente ao que se afirma na maioria dos livros-texto, não foi descartado por Einstein. De fato, ele escreveu diversos artigos afirmando que o éter é um conceito insubstituível. (Ver o artigo de L. Kostro, em M. C. Duffy (ed). *Physical Interpretations of Relativity Theory*, British Soc. Philosophy of Science, 1989).

A Terra, nosso lar cósmico, tem diversos movimentos facilmente detectáveis; em particular, o movimento de translação em relação ao Sol. Assim, ela não deve estar permanentemente em repouso em relação ao éter. Muitas experiências (a mais famosa é a de Michelson e Morley) foram realizadas para detectar o efeito do movimento da Terra na medida da velocidade da luz, sem sucesso. Tais resultados levaram eventualmente à formulação da teoria da relatividade especial por Lorentz, Poincaré e Einstein.

Antes de continuarmos é importante que examinemos com cuidado o conceito de velocidade. Note-se que para determinarmos experimentalmente a velocidade média de uma partícula que percorre uma dada distância L , de maneira tal que nossa experiência seja uma realização da definição matemática deste conceito, precisamos medir a distância L com régua padrões e precisamos de pelo menos dois relógios padrões. Um deles deve estar no início do comprimento L e o segundo no outro extremo. Ainda mais, os dois relógios precisam estar sincronizados, isto é, precisamos estar seguros de que quando o primeiro marca, digamos, o tempo $t = 0$, o segundo também estará marcando $t = 0$.

Uma das mais notáveis contribuições de Einstein foi perceber que o processo de sincronização depende de uma definição. Einstein adotou uma definição (dita sincronização “à l’Einstein”) que levava em conta o fato empírico

de que o tempo de percurso de um sinal luminoso¹ de um ponto qualquer A a um ponto qualquer B do espaço, ambos fixos em um dado sistema de referência inercial,² não depende da velocidade da fonte que emite o sinal luminoso. Ele propôs que os relógios em A e B (em qualquer sistema de referência inercial) devem ser sincronizados da seguinte maneira: O observador em A envia um sinal luminoso para B . Ali o sinal é instantaneamente refletido e volta para A . O observador em A determina com o seu relógio o tempo total τ do percurso $A \rightarrow B \rightarrow A$, e diz ao observador que se encontra em B para ele colocar como fase de seu relógio quando o sinal luminoso ali chegou metade do tempo total do percurso $A \rightarrow B \rightarrow A$, isto é, $\tau/2$. Pode-se mostrar que tal procedimento implica que a medida da velocidade da luz resulta ser sempre c , em qualquer sistema de referência inercial, desde que as réguas e relógios padrões tenham um comportamento diferente daqueles previstos pela teoria clássica. E de fato, o comportamento necessário para obter-se sempre o valor c é realmente aquele encontrado na Natureza, com uma aproximação muito boa. Em particular, como foi determinado empiricamente pelos físicos americanos J. C. Hafelle e T. E. Keating em 1968 (*Science* **177**, 166 (1968), *ibid.*, **177**, 168 (1968)), dados dois relógios atômicos que são sincronizados em um certo ponto do espaço, em um sistema inercial, se um deles realizar uma viagem e retornar ao ponto de partida, então ele estará registrando um tempo menor que o relógio que permaneceu em repouso, e a diferença será exatamente a necessária para que a medida da velocidade³ de qualquer SL sempre resulte c em qualquer sistema de referência inercial.

Se em dois sistemas de referência inerciais a localização dos eventos, i.e., acontecimentos espaço-temporais, é determinada por réguas padrões e relógios padrões sincronizados “à l’Einstein”, então as coordenadas de espaço-tempo de qualquer evento, como determinadas nos dois sistemas inerciais, encontram-se relacionadas pelas famosas transformações de Lorentz (fig. 2).

Todas estas idéias foram incorporadas por Poincaré, em 1904, e em 1905 também por Einstein no que é hoje conhecido como teoria da relatividade especial. Poincaré (e também Einstein) supôs a validade de um princípio universal, dito princípio de relatividade, que estabelece que os desenvolvimentos de todos os fenômenos naturais não dependem do estado de movi-

¹Sinais luminosos são particulares SL .

²Para uma definição rigorosa de sistema inercial ver, W. A. Rodrigues, Jr. e M. A. F. Rosa, *Found. Phys.* **19**, 705, (1989).

³Esta velocidade deve ser determinada por relógios sincronizados “à l’Einstein”.

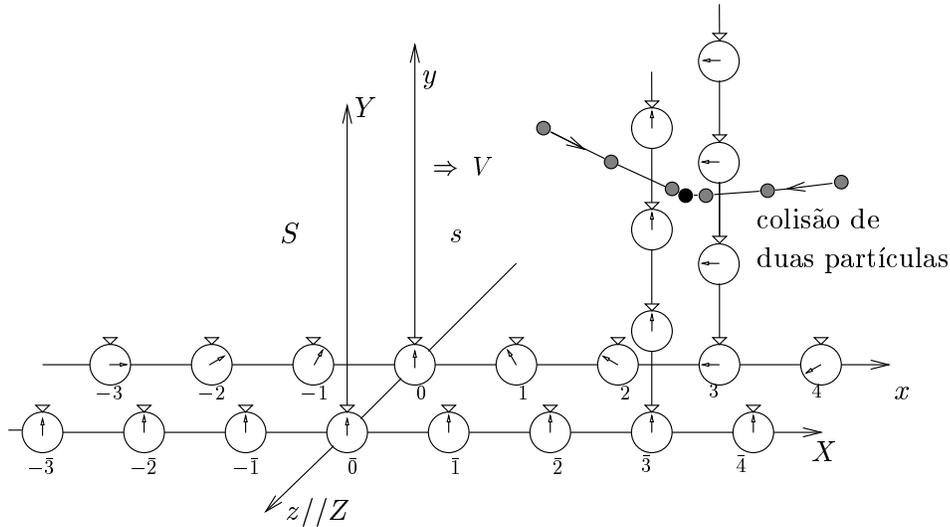


Figura 2:

Como é possível que a velocidade da luz seja sempre c em qualquer referencial inercial? Suponha que S e s são dois laboratórios inerciais que se movem com velocidade V um em relação ao outro. Ambos os laboratórios estão equipados com relógios padrões sincronizados “à l’Einstein”, e as origens de seus sistemas de coordenadas coincidem para $T = t = 0$. Em S , a equação de movimento para um sinal de luz emitido da origem em $T = t = 0$ é escrita $c^2T^2 - X^2 - Y^2 - Z^2 = 0$. Em s , a equação para o mesmo sinal é $c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = 0$. Estas equações (mais algumas hipóteses razoáveis) implicam que as relações entre t e T , por um lado, e entre x e X , por outro, não podem ser aquelas utilizadas na teoria newtoniana do espaço-tempo. De fato, pode-se mostrar que as transformações que relacionam as coordenadas de qualquer evento e (e.g. a colisão de duas partículas) nos sistemas S e s , para as quais ambas as equações para o sinal de luz são verdadeiras, são

$$t = \frac{T - VX/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad x = \frac{X - VT}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad y = Y, \quad z = Z;$$

$$T = \frac{t + Vx/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad X = \frac{x + Vt}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}, \quad Y = y, \quad Z = z.$$

Note-se que as coordenadas do evento e são $e = (T, X, Y, Z)$ em S e $e = (t, x, y, z)$ em s . Estas são as famosas transformações de Lorentz, que permitem calcular, a partir dos resultados de medidas feitas por um certo observador, os resultados que seriam obtidos por um outro observador, em movimento em relação ao primeiro, se este observasse o mesmo fenômeno. para $c \rightarrow \infty$ (ou para $V/c \ll 1$) estas transformações se reduzem às transformações de Galileu ($x = X - VT$, $t = T$, $y = Y$, $z = Z$) utilizadas na teoria newtoniana do espaço-tempo e em nossos cálculos quotidianos, que envolvem sistemas dotados de velocidades muito menores que a velocidade da luz.

mento uniforme do sistema de referência inercial onde eles ocorrem.⁴

Pode-se mostrar que, do ponto de vista matemático, isto implica que todos os fenômenos naturais precisam ser descritos por equações matemáticas que possuam o grupo de Lorentz como grupo de simetria. Em particular, pode-se mostrar que a validade do princípio de relatividade implica que nenhum processo de sincronização interna de relógios em um dado sistema de referência inercial (isto é, sincronização sem olhar para fora do laboratório) pode diferir da sincronização “à l’Einstein” (W. A. Rodrigues Jr. e J. Tiomno, *Found. Phys.* **15**, 945, (1985)).

Sobre sua tentativa de formular o princípio de relatividade Einstein nos diz em suas *Notas Autobiográficas*: “Após dez anos de reflexão um tal princípio resultou de um paradoxo que eu já havia encontrado com a idade de dezesseis anos: Se eu perseguir um feixe de luz com a velocidade c (velocidade da luz no vácuo), eu deveria observar o feixe de luz como um campo eletromagnético oscilatório espacialmente em repouso. Entretanto, não parece existir uma tal coisa, quer com base na experiência, quer com base nas equações de Maxwell. . .”

Ora, o fato é que Einstein estava *equivocado*. As equações de Maxwell são fontes de grandes surpresas. De fato, apenas dez anos depois da publicação do artigo fundamental de Einstein, o matemático americano H. Bateman, em seu livro *Electrical and Optical Motion* (Cambridge Univ. Press, 1915), mostrou que a equação de onda escalar possui soluções que descrevem um pacote não dispersivo que viaja com velocidade menor que a de qualquer *SL*!

A.O. Barut, professor na Universidade Boulder (recentemente falecido) publicou um artigo extraordinário (*Foundations of Physics* **22**, 1267 (1992)), onde mostrou que as equações de Maxwell sem fontes também possuem soluções em forma de pacotes de onda que viajam com velocidade *menor* que a das *SL*. Estes pacotes apresentam uma pequena dispersão, mas pode-se mostrar que em muitos casos o tempo de alargamento do pacote é comparável com a idade do universo. Tais pacotes poderiam eventualmente representar as partículas elementares, que então nada mais seriam que especiais configurações eletromagnéticas. Esta idéia foi desenvolvida em (W. A. Rodrigues Jr. e J. Y. Lu, *Found. Phys.* **27**, 435 (1997)) e justifica plenamente a citação do terceiro versículo do livro de Gênesis, mencionada no início do texto.

Mas será que as equações de Maxwell predizem a existência de alguma

⁴A precedência de Poincaré sobre Einstein está bem documentada. O leitor interessado deve consultar o artigo R. De La Taille, *Science et Vie* **951**, 114 (1995).

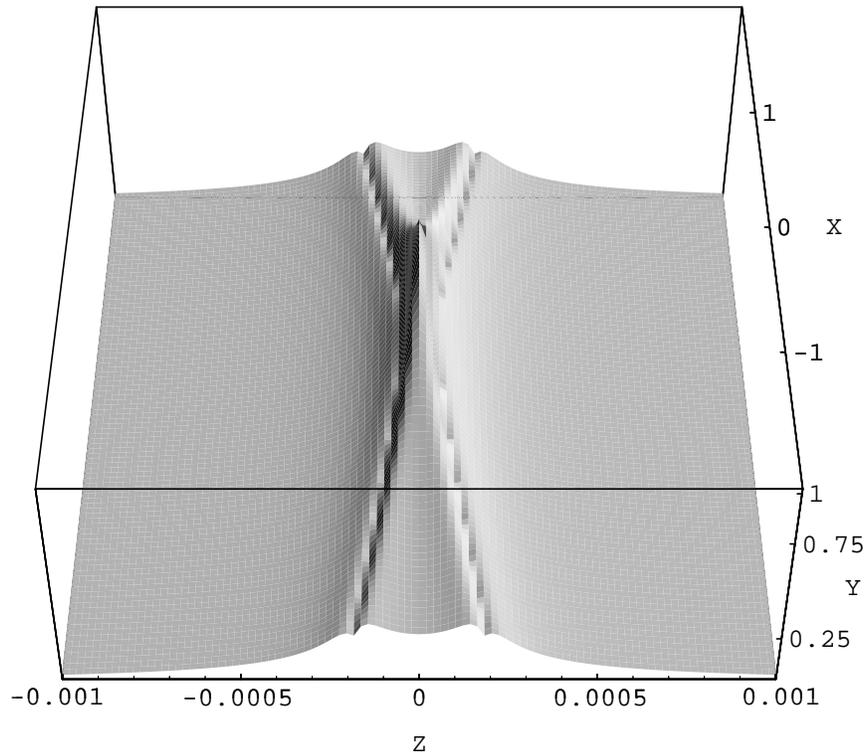


Figura 3: Solução de onda X exata da equação de onda homogênea. A solução é cilíndricamente simétrica em torno do eixo z ; a coordenada y da figura representa o valor da parte real da solução nos pontos do plano $y = 0$. Como se vê, a onda X apresenta um máximo na origem, e decai rapidamente nas direções z e x .

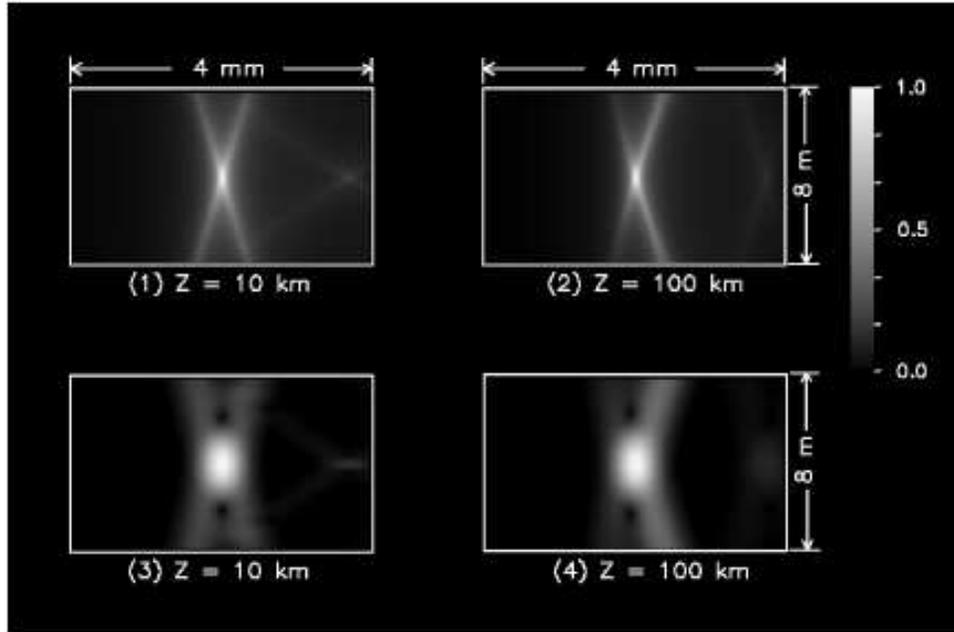


Figura 4: Parte real de uma onda X escalar (usada para gerar o potencial de Hertz), derivada da fórmula de difração de Rayleigh-Sommerfeld com um radiador de abertura finita de diâmetro $D = 20$ m. As figuras em (1) e (2) mostram a aproximação de abertura finita para uma solução exata da equação de onda (dita de banda larga de frequência); em (3) e (4) vemos a aproximação de abertura finita para outra solução exata (dita de banda limitada de frequência) da equação de onda.

configuração do campo eletromagnético que pode se propagar com velocidade maior que c ? A resposta surpreendente a esta questão é *sim*. Foi provado recentemente (W. A. Rodrigues Jr. e J. Vaz Jr, *Adv. Appl. Clifford Algebras*, **7** (S), 453 (1997); W. A. Rodrigues Jr. e J. Y. Lu, *Found. Phys.* **27**, 435 (1997); W. A. Rodrigues Jr. e J. E. Maiorino, *Random Oper. and Stoch. Equ.* **4**, 355, (1996)) que todas as equações de onda relativísticas (a equação de onda escalar, as equações de Maxwell, Klein-Gordon, Dirac e Weyl) possuem soluções que se propagam com velocidades arbitrárias $0 \leq v < \infty$. Assim, verifica-se (para espanto de muitos) que as equações de Maxwell, além das *SL*, possuem também soluções que correspondem a configurações eletromagnéticas propagando-se com velocidades superluminais no vácuo⁵. Uma particular solução superluminal é a chamada onda eletromagnética superluminal X , que não se distorce ao propagar-se. A fig. 3 mostra uma onda X propagando-se na direção do eixo z . As configurações eletromagnéticas que se movem (no vácuo) com velocidades $v \neq c$ possuem em geral uma componente longitudinal (elétrica e/ou magnética) e possuem pelo menos um dos invariantes de campo com valor diferente de zero. A onda eletromagnética X , que é uma solução exata das equações de Maxwell, possui energia infinita (como é o caso de qualquer solução de onda plana) e portanto não pode ser produzida na prática. Entretanto, simulações feitas em computador mostram que *aproximações de abertura finita* para a onda X também se propagam com velocidades superiores à das *SL* (fig. 4). Estas aproximações sofrem distorções ao se propagar, mas estas não são muito acentuadas como se vê na fig. 3.

No artigo de Rodrigues e Lu acima citado previu-se a possibilidade de lançar-se aproximações de abertura finita para ondas superluminais eletromagnéticas X . Naquela oportunidade uma das razões para se supor que tal fosse possível tinha a ver com a produção de ondas X acústicas (descritas no artigo de Rodrigues e Lu, citado acima). As ondas acústicas satisfazem uma equação de onda “escalar” onde o parâmetro c é substituído por c_s , a velocidade do som. Verificou-se assim que ondas X acústicas podem viajar com velocidades superiores a c_s . Foram também produzidas ondas acústicas, denominadas *pulsos de Bessel*, que viajam com velocidades inferiores a c_s (figs. 5 e 6).

Recentemente Saari e Reivelt do Laboratório de Óptica de Tartu, Estônia produziram uma onda superluminal eletromagnética X na faixa óptica (Phys. Rev. Lett. 21, 4135- (1997)).

⁵Veja também o artigo de R. Donnelly e R. Ziolkowski, *Proc. R. Soc. London A* **460**, 541,(1993).

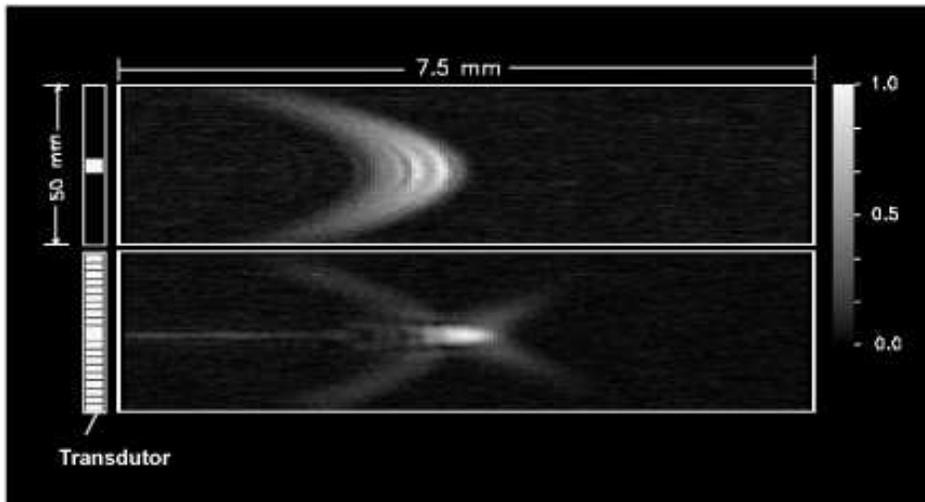


Figura 5: Comparação das velocidades de uma onda de som comum e de uma onda X acústica.

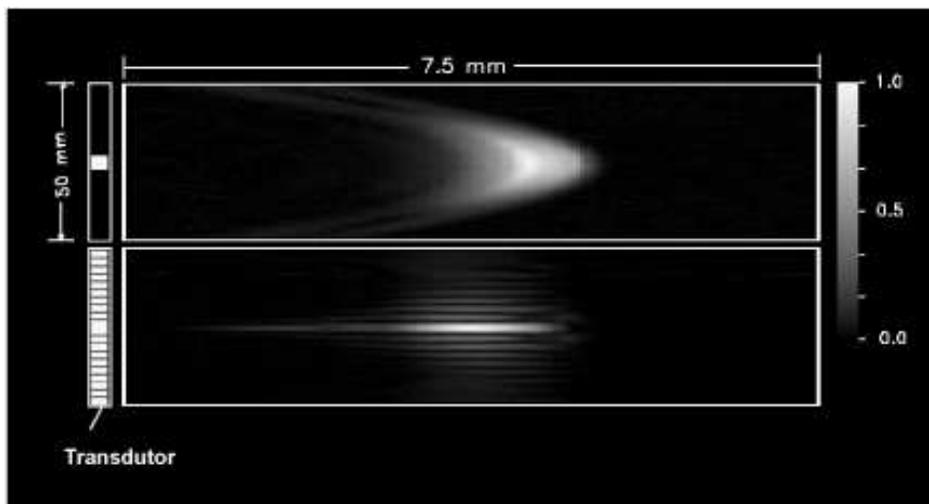


Figura 6: Comparação das velocidades de uma onda de som comum e de um pulso de Bessel acústico.

A possibilidade teórica e prática do lançamento de ondas eletromagnéticas superluminais tem deixado muitos cientistas (matemáticos e físicos) perplexos. Uma das razões é que apressadamente estes pensam que a propagação superluminal de sinais eletromagnéticos viola um resultado conhecido como *teorema das características* que afirma que um sinal com suporte compacto (isto é, aqueles que apresentam uma discontinuidade na função de definição ou em suas derivadas) viajam sobre a característica (no caso conhecida como cone de luz) e portanto com a velocidade da luz. Este problema das características nasce do famoso problema de Cauchy que trata da resolução da equação de onda com valores iniciais dados. Estes valores iniciais se referem no caso do campo eletromagnético aos valores das componentes do campo no instante $t = 0$ em uma região do espaço físico (a superfície de Cauchy). Ora, o procedimento para lançamento de uma onda X não tem nada a ver com o problema de Cauchy. De fato para se lançar uma onda X com o máximo do campo programado para nascer a uma certa distância ao longo do eixo de propagação deve-se acionar os diversos elementos da antena emissora em tempos diversos. A fig. 7 (E. Capelas de Oliveira and W. A. Rodrigues Jr., Superluminal Electromagnetic Waves in Free Space, em publicação no *Ann. der Physik* (1998)) mostra o nascimento de uma onda X usada para gerar o chamado potencial de Hertz, com o qual gera-se um campo eletromagnético que satisfaz as equações de Maxwell (para detalhes, ver o trabalho de Rodrigues e Lu acima citado). A sequência de imagens mostra o nascimento da onda X à medida que mais e mais partes da antena são acionadas. Este acionamento é feito de tal maneira que cada anel externo é acionado antes do anel interno anterior com uma defasagem temporal apropriada que é determinada teoricamente. Como não se fornece o valor da configuração do campo no instante $t = 0$ percebe-se claramente que a produção de uma onda X não tem nada a ver com o problema de Cauchy.

Teoricamente pode-se obter a predição de propagação superluminal de configurações eletromagnéticas também em diversas situações que envolvem problemas com condições de contorno. Como exemplo citamos:

- (i) As equações de Maxwell em algumas situações que levam em conta também a teoria quântica de campos. Se essas equações são resolvidas para o campo eletromagnético dentro do espaço limitado por dois espelhos perfeitamente refletivos, com superfícies condutoras, verifica-se que a velocidade do campo eletromagnético é maior que a velocidade das SL (no vácuo) na direção perpendicular à superfície dos espelhos. Tal solução foi obtida por G. Barton e K. Scharnhorst (*Journal of Physics A* **26**, 2037 (1993)).

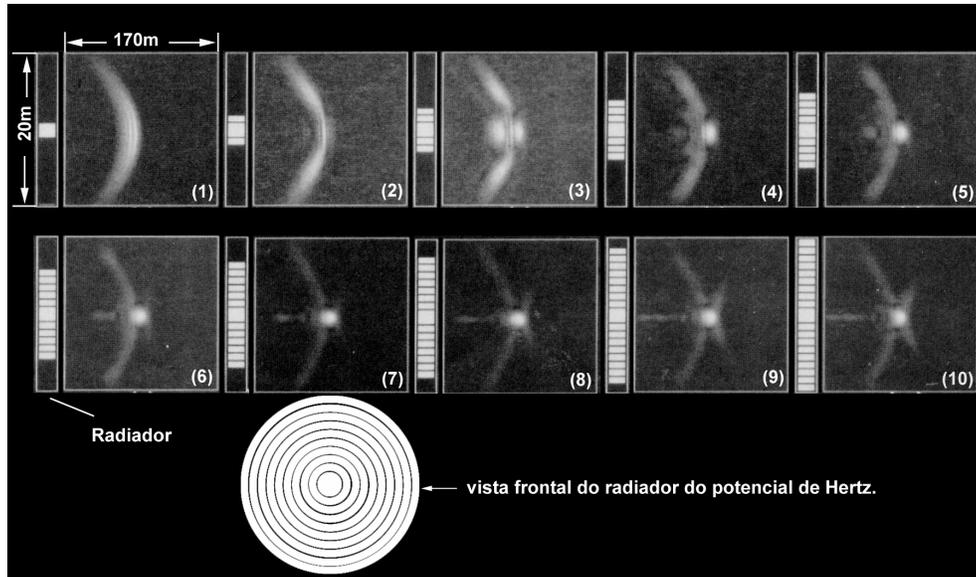


Figura 7: Simulação computacional para o nascimento programado da parte real de uma aproximação de abertura finita do potencial de Hertz, com pico em $z_0 = 68$ m, $D = 20$ m, $a_0 = 0.05$ mm, $\eta = 0.005^\circ$.

- (ii) Com *condições de contorno* apropriadas é possível mostrar que se pode gerar pacotes de onda com velocidade superluminais que se propagam no exterior de um cilindro condutor. Tal resultado foi descoberto pelo americano W. Band (*Foundations of Physics* **18**, 549, (1989)). Em 1988 os físicos P.T. Papas e A. G. Obolensky (*Electronics and Wireless World* **12**, 1162, (1988)), afirmaram ter enviado sinais em cabos coaxiais com velocidades até 100 vezes maior que a das *SL*. Entretanto, poucos acreditam naqueles resultados. Contudo, uma generalização da teoria de Band prediz a possibilidade de propagação superluminal em cabos coaxiais se as condições de contorno forem apropriadas.
- (iii) Além destes fatos, existem evidências de que foram lançadas no ar, através de antenas ‘de chifre’, microondas com velocidades em torno de $1,47c$, que se propagaram por aproximadamente 1 m. Para detalhes veja-se por exemplo, G. C. Giakos e T. K. Ishii, *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.* **1**, 1050 (1991); A. Ranfagni et al., *Phys. Rev. E* **48**, 1453 (1993).

Outra consideração teórica importante é a seguinte. Por mais de meio século, em uma série inumerável de trabalhos, investigou-se o problema de tunelamento de pacotes de onda em barreiras de potencial. Tal problema é importante porque o tunelamento de partículas elementares da matéria é uma previsão não trivial da mecânica quântica, reponsável entre outros pelo funcionamento de muitos dispositivos semicondutores que são fundamentais para a moderna tecnologia de computadores. (Para uma revisão ver V. S. Olkhovsky e E. Recami, *Physics Reports* **214**, 339 (1992)). A conclusão destes artigos é que no caso do tunelamento de pacotes de onda eletromagnéticos (que é formalmente igual ao problema mecânico quântico) a barreira de potencial pode ser fisicamente realizada por um guia de onda especial onde ocorrem naturalmente certos modos de propagação, chamados “evanescentes”.

Diversas experiências realizadas recentemente confirmaram a propagação superluminal em barreiras. Estes resultados foram publicados em prestigiosas revistas de Física como *Physical Review Letters*, *Physics Letters A*, *Journal of Applied Physics* e outras. Em particular, R. Chiao e colaboradores, da Universidade de Berkeley, observaram um único fóton (quantum do campo eletromagnético) atravessar uma barreira com velocidade $1,47$ vezes maior que a velocidade de qualquer *SL* (*Physical Review Letters* **71** 708, (1993)). G. Nimtz (*Phys. Lett. A* **196**, 154 (1994)) conseguiu transmitir a sinfonia 40 de Mozart entre dois pontos do espaço distantes $11,7$

cm (dentro de um guia de onda) com velocidade 4,7 vezes maior que a das SL . Recentemente S. Esposito (*Phys. Lett. A* **225**, 203, (1997)), usando uma generalização das soluções encontradas no trabalho de Rodrigues e Vaz citado acima, mostrou como obter configurações eletromagnéticas com velocidade de grupo superluminal em guias de onda. Seus resultados explicam qualitativamente diversos mistérios associados a estas experiências.

Estas realizações espetaculares, incluindo a produção de ondas superluminais eletromagnéticas X geraram uma grande discussão e foram o assunto de uma conferência (“Workshop on Superluminal(?) Velocities”) que ocorreu em junho próximo passado em Colonia, Alemanha. Será que tais resultados são incompatíveis com a teoria da relatividade especial? Será que encontramos o limite de validade da teoria? Ainda mais, quais são as implicações destes resultados para os fundamentos da mecânica quântica?⁶

Bem, consultando qualquer livro texto e também muitos artigos de pesquisa, vemos que a teoria da relatividade implica em que nenhum *signal* pode se propagar com velocidade *maior* que a das SL no vácuo. Tal afirmação também é conhecida como *princípio de causalidade* e sua aceitação deve-se principalmente a um argumento de Einstein. Aqui consideramos uma variante mais oportuna desse argumento. Consideremos dois sistemas inerciais S e S' que se movem com velocidade relativa V (ver fig. 8). Suponha que os observadores em S e S' podem gerar ondas eletromagnéticas X de velocidade $v > c$, como medidas em seus respectivos sistemas de referência, onde os relógios encontram-se sincronizados “à l’Einstein”. Suponhamos ainda que o observador em S combinou com seu colega em S' a seguinte experiência: “Se você receber um sinal meu até a hora zero do seu relógio (ponto t_0' na fig. 8), destrua o meu laboratório usando o canhão de ondas eletromagnéticas X na velocidade $v > c$ combinada.” Pode-se mostrar que se S' receber o sinal de S como combinado (emitido no instante t_e na fig. 8) e usar seu canhão de ondas X , ele destruirá o laboratório de S no instante t_d que é *anterior* a t_e , o que constitui um paradoxo lógico. Com base neste raciocínio Einstein concluiu: *não existe propagação de sinais superluminais*.

A conclusão de Einstein não resiste a uma análise mais cuidadosa. De

⁶Estas questões encontram-se discutidas no artigo: W. A. Rodrigues Jr. “ $0 \leq v < \infty$ Solutions of the Relativistic Wave Equations and the Foundations of Relativity and Quantum Mechanics”, (revised version) RP 36/98 IMECC-UNICAMP. A “opinião da maioria” é que as velocidades de grupo superluminais obtidas nas experiências de tunelamento podem ser explicadas por intermédio de um fenômeno conhecido como *reformatamento de pulso*, e que portanto as velocidades de grupo superluminais não estão em conflito com a Relatividade. Apesar de concordarmos que em muitas experiências de tunelamento o reformatamento de pulsos é uma explicação razoável para a “superluminaridade”, tal não é o caso para todas as experiências conhecidas, em particular a de Nimtz, acima citada.

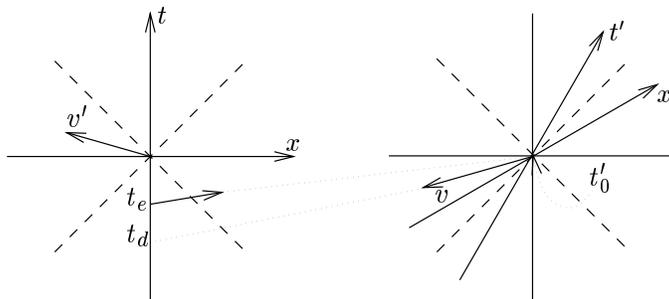


Figura 8: Ilustração do raciocínio de Einstein. O sinal superluminal de S' chegaria a S antes que o sinal de S fosse mandado.

fato, para sua validade é necessário a validade da teoria de relatividade. Ora, a existência de sinais superluminais implica que existem processos de sincronização de relógios em um dado sistema inercial que não concordam com a sincronização de Einstein. Em particular, a existência de um sinal superluminal transcendente (como no caso de algumas das experiências de tunelamento) pode ser eventualmente usada para a realização de uma sincronização Newtoniana, isto é, aquela que foi sempre adotada como a verdadeira na Física clássica, o que implica em falsificação do princípio de relatividade. A prova desta afirmação pode ser encontrada no artigo de Rodrigues e Lu já citado.

Existem muitos pontos delicados sobre estas questões que não podem ser aqui discutidos. Desejamos chamar a atenção dos leitores para o fato de que é incorreta a afirmação de alguns autores (e.g., E. Recami, *La Rivista del N. Cimento* **9**, 1 (1986)) de que não existem contradições entre o princípio de relatividade e a existência de sinais superluminais. Para uma discussão completa da questão o leitor interessado deve consultar o artigo de Rodrigues citado na nota de rodapé no. 6.

Antes de concluir desejamos ainda chamar a atenção para o fato que depois de mais de 150 anos de sua descoberta, as equações de Maxwell continuam fonte de surpresa. De fato, em uma série de artigos recentes (J. Vaz Jr. e W. A. Rodrigues Jr., *Int. J. Theor. Phys.* **32**, 945 (1993); W. A. Rodrigues Jr., J. Vaz Jr. e M. Pavsic, *Banach Center Publ., Polish Acad. Sciences* **37**, 295 (1996); W. A. Rodrigues Jr. e J. Vaz Jr., in V. Dietrich, K. Habetha and G.Jank (eds.) *Clifford Algebras and their Applications in Mathematical Physics*, pp 319-346, Kluwer Acad. Publ. (1997); W. A. Rodrigues Jr. e J. Vaz Jr., *Adv. Appl. Clifford Algebras* **7** (S), 369 (1997); W.

A. Rodrigues Jr and J. Vaz Jr, *Found. Phys.* **28**, 789-814(1998)) verificou-se que existe uma relação surpreendente entre as equações de Maxwell e a equação de Dirac, que é a equação que descreve o comportamento do elétron na teoria quântica relativística. A relação surpreendente envolve também a revelação de segredo geométrico da chamada supersimetria entre bósons e férmions.

Acreditamos que as experiências citadas acima e uma série de outras envolvendo os fundamentos da mecânica quântica (discutidas no livro *Non-locality in Quantum Physics*, de A. A. Grib e W. A. Rodrigues Jr., Plenum Publ. Co., New York, 1998), bem como os resultados teóricos mencionados, são as primeiras nuvens negras que aparecem nos fundamentos da Física neste fim de século. É possível que elas tenham efeitos mais importantes do que aqueles atribuídos a Lord Kelvin no fim do século passado quando se referia as experiências envolvendo a radiação do corpo negro (que deu origem à mecânica quântica) e a experiência de Michelson e Morley, que positivamente influenciou a criação da teoria da relatividade especial. Quem viver verá!