

Este arquivo contém o texto completo do seguinte trabalho:

MARTINS, Roberto de Andrade. O princípio de antecendência das causas na teoria da relatividade. *Anais da ANPOF* 1 (1): 51-72, 1986.

Este arquivo foi copiado da biblioteca eletrônica do Grupo de História e Teoria da Ciência <<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/>> da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), do seguinte endereço eletrônico (URL):

<<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-29.pdf>>

Esta cópia eletrônica do trabalho acima mencionado está sendo fornecida para uso individual, para fins de pesquisa. É proibida a reprodução e fornecimento de cópias a outras pessoas. Os direitos autorais permanecem sob propriedade dos autores e das editoras das publicações originais.

This file contains the full text of the following paper:

MARTINS, Roberto de Andrade. O princípio de antecendência das causas na teoria da relatividade. *Anais da ANPOF* 1 (1): 51-72, 1986.

This file was downloaded from the electronic library of the Group of History and Theory of Science <<http://www.ifi.unicamp.br/~ghtc/>> of the State University of Campinas (UNICAMP), Brazil, from following electronic address (URL):

<<http://ghtc.ifi.unicamp.br/pdf/ram-29.pdf>>

This electronic copy of the aforementioned work is hereby provided for exclusive individual research use. The reproduction and forwarding of copies to third parties is hereby forbidden. Copyright of this work belongs to the authors and publishers of the original publication.

CDU 115:122

:530.12

CDD 115.4

O PRINCÍPIO DE ANTECEDÊNCIA DAS CAUSAS NA TEORIA DA RELATIVIDADE

ROBERTO DE A. MARTINS

Universidade Estadual de Campinas

Resumo:

O princípio de antecedência das causas — ou princípio da causalidade retardada — afirma que uma causa sempre ocorre antes ou simultaneamente com seu efeito. Esse princípio foi utilizado na teoria da relatividade restrita para dar objetividade à sequência temporal de cadeias causais e para negar a possibilidade de sinais com velocidade superior à da luz — que permitiriam, no contexto dessa teoria, o envio de sinais para o passado. No entanto, a formulação de modelos cosmológicos com rotação (GÖDEL) e o estudo do campo gravitacional de corpos colapsados em rotação (CARTER) mostraram que a teoria da relatividade geral permite situações em que um sistema físico pode viajar para o passado e produzir efeitos anteriores às suas causas. No presente trabalho, descreve-se a evolução histórica do princípio de antecedência das causas na teoria da relatividade e discute-se o atual dilema de rejeitar o princípio — com todas as profundas mudanças conceituais que isso acarretaria — ou modificar a teoria física atualmente aceita.

Palavras-chave: causalidade, tempo, teoria da relatividade.

*Ecoam na memória as passadas
Pela passagem que jamais tomamos
Em direção à porta que nunca abrimos
Para o roseiral.*
(ELIOT, "Burnt Norton", *Collected poems*,
pp. 183-91)

1 INTRODUÇÃO

A teoria da relatividade de Einstein, como é bem sabido, introduziu algumas importantes mudanças em nossas concepções sobre o tempo. Dessas alterações, as mais conhecidas são as de que diferentes observadores físicos (ou, mais exatamente, diferentes sistemas de referência)

em movimento relativo produzem estimativas conflitantes sobre o instante em que ocorreu um fenômeno ou sobre a sua duração. O tempo já não flui da mesma forma para todos os observadores.

Parece, no entanto, que para o filósofo não-iniciado na teoria da relatividade essas mudanças na concepção do tempo assemelham-se a puras técnicas e que elas não alteram muito nossa visão de mundo, pois não entram em jogo no nosso dia-a-dia. Em parte, isso é verdade. Quase todos os efeitos físicos previstos pela teoria da relatividade especial de Einstein são de pequena importância, a menos que velocidades muito altas estejam em jogo — velocidades comparáveis à velocidade da luz, que é de cerca de um bilhão de quilômetros por hora. Como raramente ou nunca se coloca na vida prática o problema de comparar avaliações sobre o tempo produzidas por dois observadores em movimento relativo de alta velocidade, não só o leigo mas também o físico teórico e o próprio Einstein continuam a ver o tempo de forma muito semelhante à de Newton, no dia-a-dia.

No entanto, por trás das técnicas das equações relativísticas sobre o tempo, ocultam-se consequências e problemas bem mais graves do que se pensa. De uma maneira um pouco grosseira, que será esclarecida mais tarde, pode-se dizer que nas últimas décadas descobriu-se que a teoria da relatividade prevê a possibilidade e indica o modo de realizarem-se viagens no tempo. E isso é algo realmente revolucionário.

Todos os que já se detiveram um pouco a imaginar o significado e as consequências de uma viagem no tempo sabem que tal idéia é incompatível com nossa visão de mundo usual¹. A idéia de máquina do tempo foi sugerida por H. G. Wells (*The time machine*), em um famoso romance, antes do desenvolvimento da teoria da relatividade. E foram os escritores de *science-fiction* que exploraram, pela primeira vez, os problemas básicos da idéia de uma viagem no tempo². Esses problemas podem ser exemplificados de uma forma dramática no seguinte caso: suponha que existam máquinas do tempo; suponha que uma pessoa entre numa dessas máquinas, volte ao passado (digamos, um ano antes da viagem no tempo), procure e mate a si mesma. Ora, se ela foi morta um ano antes de entrar na máquina do tempo, é claro que não poderia entrar na má-

¹ É importante enfatizar desde o início que a idéia de viagens no tempo não é absurda ou logicamente contraditória. Ela exigiria profundas mudanças conceituais, mas não é inconcebível (ver REICHENBACH, *Space and time*, GRAVES e ROPER 1965, EARMAN 1967, LEWIS 1976).

² Pode-se encontrar uma boa descrição do material de ficção científica pertinente ao problema em Sodré (*Ficção do tempo*) e Carneiro (*Estudo da "science fiction"*). Veja-se também o belo ensaio filosófico-literário de Umberto Eco (1967).

quina do tempo e, portanto, não poderia matar a si própria. Dentro de nossa concepção de mundo, a situação descrita é absurda e impossível. Se fosse possível voltar ao passado, seria possível mudar o passado e a história e evitar ou produzir coisas que sabemos que ocorreram (ou não ocorreram) no passado; ou, então, o viajante do tempo ver-se-ia impossibilitado — por razões que não conseguimos imaginar — de alterar o passado, mesmo se pudesse presenciá-lo. Todas as alternativas até hoje sugeridas com relação às viagens no tempo são estranhas e difíceis de aceitar.

Ora, se é verdade que, como afirmei, a teoria da relatividade estabelece a possibilidade de viagens no tempo, coloca-se um problema muito grave que deve ser encarado por físicos e filósofos: ou o avanço da ciência exige de nós uma mudança radical da visão de mundo que possuímos — uma mudança dentro de alternativas que serão descritas mais tarde e com a qual poucos de nós iriam sentir-se satisfeitos; ou as consequências extremas da teoria da relatividade são inaceitáveis e, portanto, a teoria deve ser rejeitada — o que poucos físicos, atualmente, gostariam de aceitar.

Este é o problema básico, exposto em toda a sua crueza. Nosso objetivo aqui não é o de solucionar esse problema, mas apenas o de expô-lo e analisá-lo. Parece-nos importante chamar a atenção sobre este problema, já que, embora fundamental e prenhe de consequências, ele tem sido ignorado mesmo pelos filósofos que se dedicam ao espaço e tempo e pelos físicos relativistas. Como toda a problemática está ligada ao princípio de antecedência das causas, vamos começar por discutir esse princípio e sua conexão com a teoria da relatividade.

2 ANTECEDÊNCIA DAS CAUSAS NA RELATIVIDADE RESTRITA

Voltemos no tempo — em pensamento — até Aristóteles. De acordo com a concepção aristotélica, uma causa eficiente sempre é contígua, no espaço e no tempo, ao seu efeito imediato. No pensamento aristotélico não existe ação eficiente à distância e, por isso, toda influência iniciada em um ponto no espaço e que atue em um outro ponto distante deve servir-se de uma cadeia física de influências locais ou do transporte espacial de alguma substância. Nesses casos, como uma velocidade infinita é aristotelicamente inconcebível, o efeito mediato e distante de uma causa sempre começará a ocorrer algum tempo após o início da ação da causa. Portanto, a causa eficiente nunca é posterior ao seu efeito (imediato ou mediato), mas sempre o antecede³.

³Na *Análítica posterior* (II. 12), Aristóteles (*Works*) afirma que a causa eficiente e seu efeito são simultâneos e contíguos. Também na *Física* (II. 3) ele indica que a causa existe e cessa de existir juntamente com seu efeito, e no livro

No desenrolar da história da filosofia, o conceito de causa foi muito discutido, mas, para todos os filósofos que aceitavam a existência de causas eficientes, o princípio de antecendência das causas impunha-se naturalmente⁴. Tão grande é o poder desse princípio, que Kant procurou utilizá-lo como critério de objetividade de uma relação temporal: podemos afirmar objetivamente que *A* é anterior a *B* se e somente se *B* é um efeito necessário de *A*, ou seja, se *B* segue-se regularmente a *A*⁵.

Também no desenvolvimento da teoria da relatividade especial, procurou-se manter certa objetividade ou universalidade na relação antes-depois por meio do princípio de antecendência da causalidade. No entanto, como veremos, a teoria acabou por trair seu propósito original.

Na teoria da relatividade restrita de Einstein, o conceito de tempo é introduzido de forma operacional, através da descrição do processo pelo qual ele é medido (EINSTEIN 1905; GUTTING 1972). E o processo de medida do tempo é determinado, em grande parte, pelos postulados da teoria. Utiliza-se, em particular, o princípio de constância da velocidade da luz, o que faz que essa velocidade tenha papel fundamental na teoria.

A partir da análise do processo de medida de tempo, Einstein mostrou que o conceito de simultaneidade de dois acontecimentos distantes não é absoluto: acontecimentos que são considerados simultâneos em relação a um sistema de referência podem não ser simultâneos em rela-

Sobre a geração e a corrupção (I. 6) indica que a causa e o efeito só podem ocorrer entre coisas que se tocam. No entanto, Aristóteles admite efeitos à distância através de um intermediário: o fogo não age só quando em contato, mas também de uma distância, pois o fogo aquece o ar, e o ar aquece o corpo distante (*Sobre a geração e a corrupção*, I. 9). Nesses casos, o efeito distante deve demorar um certo tempo para começar a ocorrer, pois todo movimento local exige tempo, ou seja, não pode ocorrer em um momento (*Física*, IV. 8 e VI. 3).

⁴Uma boa descrição histórica desse princípio na filosofia moderna pré e pós-relativística é apresentada por Mehlberg (1935). Algumas pessoas sentem esse princípio como tão evidente, que Flew (1967) chega a descrevê-lo como uma *verdade necessária*; Whitrow (*Natural philosophy of time*), ao citar Flew, concorda com ele. Max (1956) procurou provar que, sempre que se tentasse descrever um efeito que ocorresse antes de sua causa, seria possível alterar os nomes e sempre considerar como causa aquilo que ocorre antes e como efeito aquilo que ocorre depois. Scriven (1956), no entanto, mostra claramente que o princípio não é simplesmente uma proposição analítica, dedutível das definições de causa e efeito, e que poderia ser violado na natureza, em princípio.

⁵Em 1716, Leibniz (*Philosophical papers*, pp. 666-74) já sugeriu a utilização desse princípio como base de uma teoria causal da ordem temporal; mas foi apenas através da *Crítica da razão pura* de Kant que essa idéia difundiu-se (ver KEMP SMITH, *Kant's critique*, p. 130).

ção a outro referencial. Se e_1 e e_2 são dois acontecimentos distantes, simultâneos em relação a um referencial S , sempre será possível escolher um outro referencial em relação ao qual e_1 ocorre antes ou depois de e_2 .

À primeira vista isso parece romper toda a concepção de uma sequência temporal absoluta entre os acontecimentos. Em certos casos, uma mudança de referencial altera a ordem dos acontecimentos: aquilo que havia ocorrido antes, para um referencial, ocorreu depois, para outro referencial. Parece, assim, tornar-se impossível indicar se uma coisa ocorreu antes ou depois de outra, sem qualificar o sistema de referência adotado. Mas, na verdade, a ruptura com a concepção clássica não é tão radical assim. As equações da teoria da relatividade especial mostram que nem todas as seqüências temporais podem ser invertidas: apenas algumas delas alteram-se quando se muda o referencial.

A condição básica é a seguinte: suponhamos que, em relação a um referencial, um acontecimento e_1 ocorra antes de outro acontecimento distante e_2 . Suponhamos também que, no mesmo instante em que e_1 ocorre, é emitido de seu ponto um sinal luminoso em direção ao local onde ocorrerá e_2 . Se o sinal luminoso chegar a esse local antes que e_2 aconteça, então, de acordo com as equações da teoria da relatividade especial, todos os sistemas de referência concordarão que e_2 ocorreu depois de e_1 . Se, pelo contrário, o acontecimento e_2 acontecer antes da chegada do sinal luminoso, sempre haverá sistemas de referência para os quais a seqüência temporal entre os eventos é invertida. Portanto, em alguns casos, a seqüência temporal é absoluta, ou seja, é sempre a mesma, para todos os observadores; enquanto, em outros casos, ela é relativa.

Suponhamos agora, como hipótese de trabalho, que algum tipo de influência física possa propagar-se com velocidade maior do que a da luz. Suponhamos que o evento e_1 é o apertar de um botão em um certo ponto e que, ao apertar-se esse botão, é enviado pelo espaço um sinal com velocidade maior do que a da luz, que vai ser captado em um ponto distante e produzir a detonação de uma bomba nesse ponto. A detonação da bomba é o acontecimento e_2 . Ora, como essa influência é, por hipótese, mais rápida que a luz, o acontecimento e_2 ocorre antes que um sinal luminoso emitido em e_1 possa chegar ao local da bomba. Assim sendo, como já foi explicado, haverá sistemas de referência para os quais o acontecimento e_2 ocorreu antes que o acontecimento e_1 , ou seja, a bomba explodiu antes que o botão fosse apertado; o efeito aconteceu antes de sua causa⁶.

⁶ Este argumento é discutido detalhadamente por Tolman (1917).

Este tipo de raciocínio coloca-nos diante de três alternativas: ou o princípio de antecedência das causas é violado para alguns sistemas de referência; ou não é possível criarem-se influências que se propaguem mais depressa do que a luz; ou a teoria da relatividade restrita em que foi baseada a análise está errada. Einstein, que foi o autor dessa análise, em 1907, não poderia, é claro, desistir de sua teoria. Restavam-lhe duas alternativas, e ele optou por manter o princípio de antecedência das causas, rejeitando a possibilidade de influências que se propaguem com velocidade maior do que a da luz⁷. É importante frisar que os postulados da teoria da relatividade não proíbem diretamente velocidades superiores à da luz; apenas se introduzimos, além deles, o princípio de antecedência das causas, ficam proibidas influências que se propaguem com velocidade supraluminal.

Ocorreu, no entanto, uma situação histórica curiosa: na época em que Einstein chegou a essas conclusões, existiam na física certas coisas que se propagavam com velocidade supraluminal. A velocidade da luz que aparece nas equações da teoria da relatividade é a velocidade que a luz tem no vácuo. De um modo geral, a velocidade da luz em meios transparentes (ar, água, vidro) é menor do que no vácuo. No entanto, ocorre que a propagação de luz colorida (por exemplo vermelha) em um material transparente também colorido e que absorve fortemente aquela cor (vermelha, no caso), pode ocorrer com uma velocidade maior do que a da luz no vácuo⁸.

A lembrança da existência dessas velocidades supraluminais produziu imediatamente problemas para a teoria de Einstein; mas o físico Sommerfeld (1907) defendeu a teoria, tentando provar que não se poderiam enviar *sinais* de um ponto até outro a velocidades superiores à da luz no vácuo. Os argumentos iniciais de Sommerfeld parecem não ter sido muito convincentes, e vários outros físicos procuraram, na época, mostrar a possibilidade física de enviarem-se sinais mais rápidos do que a velocidade da luz no vácuo. Aos poucos, a posição dos relativistas foi vencendo e, em 1920, pode-se dizer que os físicos estavam convencidos de que não era possível enviarem-se sinais ou influências supraluminais de um ponto a outro⁹. Isso permitia manter, ao mesmo tempo, a teoria

⁷ Einstein (1907) nem mesmo chega a apontar e discutir as outras alternativas.

⁸ Veja-se, por exemplo, o artigo de von Laue (1905), onde é bem descrito o estado da teoria na época em que surgiu a teoria da relatividade restrita.

⁹ O físico Ignatowsky procurou defender a possibilidade de velocidades superiores à da luz no vácuo (IGNATOWSKY 1910 e 1911). Foi atacado por defensores da teoria da relatividade, como Max Born e von Laue. Em 1914, foi publicada

da relatividade e o princípio de antecedência das causas. Quando, em 1923, Louis de Broglie introduziu a sua mecânica ondulatória, em que apareciam ondas com velocidade superior à da luz no vácuo, interpretaram-se essas ondas como algo imaterial ou fictício, que não poderia servir para o envio de sinais, pois a teoria da relatividade e o princípio de antecedência das causas o proibiam (DE BROGLIE 1923a e 1923b; BROWN e MARTINS 1984).

Após algum tempo, a proibição de cadeias causais propagando-se com uma velocidade superior à da luz tornou-se um artigo de fé na teoria da relatividade especial. Tornou-se, pois, tão difícil separar a teoria do princípio de antecedência das causas, que muitos físicos e mesmo filósofos da ciência — como Mario Bunge — passaram a afirmar que a teoria da relatividade em si mesma proíbe a existência de propagação de influências com velocidade superior à da luz no vácuo¹⁰.

3 VELOCIDADES SUPERIORES À DA LUZ

Tendo em vista esse mal-entendido bastante difundido, é importante esclarecer melhor a situação de velocidades superiores à da luz na teoria da relatividade restrita. Essa questão somente foi completamente esclarecida após 1960. Nessa década, os físicos Bilaniuk, Deshpande e Sudarshan (1962) propuseram uma teoria de que existiam partículas com velocidade superior à da luz no vácuo, a qual é compatível com a relatividade restrita. Essas partículas hipotéticas — nunca encontradas experimentalmente — foram depois batizadas *táquions* (que significa, basicamente, *partícula veloz*)¹¹.

O estudo da teoria dos táquions logo mostrou que, se fossem partículas semelhantes às conhecidas, podendo ser produzidas e detectadas de forma regular como qualquer outra partícula, seria possível utilizá-las para enviar influências causais a uma velocidade maior do que a da luz e, portanto, de acordo com a teoria da relatividade especial, poderiam ser produzidos efeitos que ocorressem antes de suas causas (CSONKA 1970). Se isso fosse possível, os táquions poderiam ser uti-

a demonstração clássica de que não se podem enviar sinais eletromagnéticos em meios dispersivos com a velocidade superior à da luz no vácuo (BRILLOUIN 1914 e SOMMERFELD 1914).

¹⁰Ver Bunge (*Causalidad*). Também Grünbaum (*Philosophical problems*), Reichenbach (1957 e 1971) e Van Fraassen (*Philosophy of time and space*) consideram o princípio de antecedência das causas como básico na teoria da relatividade. Veja-se, no entanto, a lúcida crítica de Nerlich (1982).

¹¹O nome "táquion" (em inglês: *tachyon*) foi introduzido por Feinberg (1967).

lizados para construir os chamados "antitelefones" (BENFORD, BOOK e NEWCOMB 1970), que seriam instrumentos de comunicação capazes de enviar uma informação que chega ao seu destino antes de ser emitida. Desde que se utilizassem distâncias bastante grandes (de ordem astronômica), seria possível, por exemplo, enviar uma notícia pelo antitelefone de tal forma que seu destinatário a recebesse uma hora antes de ser emitida. E, se esse aparelho enviasse de volta a informação ao seu remetente, ocorreria um fenômeno aparentemente absurdo: antes de emitir uma informação, a pessoa já a teria recebido de volta. Suponhamos, então, que um sistema de antitelefones fosse montado e transmitisse sempre os resultados da loteria, para um ponto distante do espaço e recebesse de volta a retransmissão da notícia dois dias antes do envio da mesma. Seria possível utilizar esse sistema para apostar nos números que seriam sorteados dois dias depois, de uma maneira segura.

Ocorreriam, no entanto, problemas estranhos, se isso fosse possível, pois o recebimento de um sinal antes de sua emissão poderia gerar os chamados *ciclos causais*¹², do seguinte tipo: suponhamos que a sala onde está montado o sistema de emissão e recepção de sinais contenha uma bomba que explode quando o sinal é recebido e que só explode nesse caso. Suponhamos que o sinal sempre é recebido uma hora antes de ser emitido. E suponhamos que em certo instante uma pessoa entra na sala e emite o sinal. Ora, se o sinal foi emitido, então ele foi recebido uma hora antes, e a sala já terá explodido antes que a pessoa tente emitir o sinal. Se a sala não explodiu, então isso é uma indicação de que o sinal não foi emitido; mas o que poderia impedir a pessoa de emitir o sinal?

Vemos que os ciclos causais criam situações que em nossa visão de mundo são absurdas, inconcebíveis — do mesmo tipo das que surgem com a hipótese da máquina do tempo¹³.

Tendo em vista esses problemas causais, os criadores da teoria dos táquions introduziram na teoria o assim chamado *princípio de reinterpretação*¹⁴. Com o uso desse princípio, quando em relação a um cer-

¹² Os ciclos causais da teoria de táquions são discutidos por Bohm (*Relativity*) e Newton (1970).

¹³ Earman (1972) descreve os ciclos causais como contradições lógicas. Na verdade, não se trata de um problema lógico. O surgimento dessas contradições aparentes apenas indica que *algo* (a teoria da relatividade ou nossa visão de mundo) precisaria ser mudado se os táquions fossem descobertos e pudessem ser usados para enviar sinais. Este ponto é claramente elucidado por Newton (1970).

¹⁴ (ver BILANIUK et al. 1962 e FEINBERG 1967). Vários autores, no entanto, não acreditam que o princípio da reinterpretação seja suficiente para resolver os problemas ou que sempre possa ser aplicado (NEWTON 1967; ROLNICK 1969; BENFORD et al. 1970; ROLNICK 1972).

to referencial, deve ocorrer uma inversão causal e o efeito deve ocorrer antes da causa, esse observador interpreta a causa como efeito e vice-versa. A emissão de sinal é reinterpretada como um recebimento de sinal e vice-versa. Assim, para todos os observadores, é mantido o princípio de antecedência das causas, e os paradoxos causais são evitados.

Um dos grandes teóricos dos táquions, o físico italiano Recami (RECAMI e MIGNANI 1974; CALDIROLA e RECAMI 1977), deu ao princípio de reinterpretação o nome de "terceiro princípio da teoria da relatividade restrita". De certa forma, o nome é adequado, pois enfatiza, em primeiro lugar, que o princípio de antecedência das causas é independente dos outros postulados da teoria e que ele é necessário para evitarem-se problemas como os indicados acima. A teoria da relatividade da forma como foi desenvolvida por Einstein não é capaz de proibir esse tipo de situações anômalas.

Assumindo-se o princípio de reinterpretação, é aparentemente possível desenvolver uma teoria de táquions perfeitamente coerente, consistente com a teoria da relatividade e livre de anomalias causais. No entanto isso limita bastante as propriedades físicas admissíveis para os táquions. A principal consequência é que eles devem ser praticamente incontroláveis: não podem ser emitidos ou absorvidos regularmente, como as partículas comuns, e por isso não podem ser utilizados para enviar sinais supraluminais¹⁵.

É importante frisar o seguinte: no desenvolvimento da teoria dos táquions, o surgimento de violações do princípio de antecedência das causas parecia um golpe mortal contra essa hipótese e só foi possível desenvolver uma teoria de táquions aceitável pelos físicos quando se introduziu, como um postulado adicional, um novo princípio que é equivalente ao princípio de antecedência das causas e que reestabelece a normalidade causal da teoria.

Nesse episódio do desenvolvimento da teoria da relatividade, portanto, foi possível contornar o surgimento de efeitos anteriores às causas, apesar da introdução de velocidades supraluminais e sem rejeitar a teoria da relatividade. A situação não é tão simples, no entanto, em um outro campo: no caso em que a situação envolve campos gravitacionais fortes e em que é necessário utilizar a teoria geral da relatividade, sur-

¹⁵ Há autores que ainda consideram impossível uma teoria de táquions sem violação do princípio de antecedência das causas. Pode-se estudar algumas discussões recentes sobre o assunto nos artigos seguintes: PAVSIC e RECAMI 1976; BASANO 1977; RECAMI e PAVSIC 1978; RECAMI 1978; MAUND 1979; BASANO 1980; MACCARRONE e RECAMI 1980.

gem outros tipos de anomalias causais que não são tão fáceis de evitar¹⁶.

4 RELATIVIDADE GERAL E AS MÁQUINAS DO TEMPO

Em 1949, quando Einstein completava 70 anos de idade, Schilpp organizou em sua homenagem a publicação do livro *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*. Uma das pessoas convidadas para escrever um dos capítulos do livro em honra a Einstein foi o famoso matemático e lógico Gödel (1949a; 1949b; 1950). A contribuição de Gödel foi aquilo que poderíamos talvez chamar “o pesadelo de Einstein”. Gödel mostrou que a teoria da relatividade geral de Einstein permite a elaboração de um modelo global do universo de um tipo especial (depois chamado “universo de Gödel”) que apresenta anomalias causais: nesses universos, seria possível partir de um ponto, percorrer uma curva fechada e retornar ao ponto de origem em um instante anterior ao instante de partida. Ou seja, nesse tipo de universo, é possível realizarem-se viagens no tempo.

O artigo de Gödel deve ter aborrecido muito a Einstein. Em um curto comentário ao trabalho de Gödel, Einstein (1949) pergunta se o modelo cosmológico de Gödel não deveria ser excluído como não-físico. Ou seja, se não haveria alguma forma de proibir a existência desses modelos anômalos.

Atualmente aceita-se que o modelo de Gödel é certamente um dos modelos compatíveis com a teoria da relatividade geral de Einstein e também se aceita que a consequência indicada por Gödel — a existência de anomalias causais nesse tipo de universo — é inevitável¹⁷. O que poderia ser proposto, no caso, seria adicionar à relatividade geral o princípio de antecendência das causas, a fim de proibir a existência do universo de Gödel. Mas a questão não é tão simples. O universo de Gödel não é uma simples especulação vazia, pois poderia corresponder ao nosso universo real. E isso pode ser testado experimentalmente. Basicamente, se em nosso universo a direção do eixo de um giroscópio sem a-

¹⁶ Podem aparecer, em campos gravitacionais especiais, fenômenos de propagação de sinais com propriedades semelhantes às dos táquions (MARTINS 1980 e 1984).

¹⁷ Chandrasekhar e Wright (1961) tentaram enfraquecer a relevância do trabalho de Gödel e mostraram que para os tipos de trajetórias mais naturais (geodésicas) no universo de Gödel não ocorrem violações do princípio de antecendência das causas. Mas isso em nada se contrapõe às propriedades apontadas por Gödel, como foi mostrado por Earman (1967) e Stein (1970).

trito tiver um movimento de precessão em relação às galáxias distantes, isso indica que o nosso universo apresenta um certo tipo de rotação; se esse fato fosse observado e se quiséssemos utilizar a teoria da relatividade geral, seríamos quase inevitavelmente levados ao modelo de Gödel, como foi mostrado pelos físicos teóricos¹⁸. Se a experiência do giroscópio fosse realizada e desse resultados positivos e se quiséssemos ao mesmo tempo manter o princípio de antecedência das causas, seria necessário rejeitar a teoria da relatividade geral. Essa conclusão, no entanto, jamais é apontada pelos físicos.

Mesmo assim pode-se talvez pensar que o problema seja perfeitamente contornável: tanto no caso dos táquions como no caso do universo de Gödel, somente surgem problemas se forem descobertas partículas ainda desconhecidas ou fenômenos cosmológicos também desconhecidos — e pode ser que a mãe Natureza, sabendo dos problemas que seriam criados se essas coisas existissem, resolveu eliminá-los do universo. Ou seja, a Natureza preferiu evitar os táquions e os universos de Gödel e manter a teoria da relatividade e o princípio de antecedência das causas, ao invés de desistir de um desses¹⁹.

Vamos mais além. Em 1966, Carter mostrou que a teoria da relatividade geral também leva a anomalias causais em outros tipos de situações. Os estudos de Carter e outros estudos posteriores mostraram que um *buraco negro* pode ser utilizado como máquina do tempo.

Atualmente, os veículos de divulgação científica já tornaram popular a idéia de buraco negro (THORNE 1967; RUFFINI e WHEELER 1971). Basicamente, quando um estrela durante sua evolução atinge um certo estágio de contração, e seu raio torna-se inferior a um certo limite, o campo gravitacional à sua volta torna-se tão forte que a luz já não consegue ultrapassar certos limites. Por isso, mesmo se ela continuar a emitir luz, essa luz não pode ser vista por observadores distantes. Essa estrela colapsada é capaz, além disso, de “engolir” matéria e energia, que desaparecem de vista. Daí o nome de “buraco negro”.

Pois bem, Carter provou que sempre que o buraco negro é criado por uma estrela em rotação (e quase todas as estrelas giram), é possível partir de um ponto distante, penetrar na região anômala do espaço em vol-

¹⁸Na verdade, o resultado da experiência não levaria *inevitavelmente* a aceitar o modelo de Gödel. Há outros possíveis modelos cosmológicos relativísticos com rotação, e pelo menos em um deles parece não haver anomalias causais (OZSVÁTH e SCHÖCKING 1962). Mas a maior parte dos modelos cosmológicos relativísticos com rotação parece levar a anomalias causais (OZSVÁTH 1967; SOM e RAYCHAUDHURI 1968; NOVELLO e REBOUÇAS 1979; REBOUÇAS 1979).

¹⁹Esta é a “solução” aceita, por exemplo, por Whitrow (*Natural philosophy of time*).

ta do buraco negro, sair dela e retornar ao ponto de origem, chegando de volta ao ponto de partida antes do instante de saída. Ou seja, desde que se disponha de um buraco negro gerado por uma estrela em rotação, deve ser possível realizar viagens no tempo e retornar ao passado²⁰.

Ora, no caso dos buracos negros, a situação é bem diferente da que existe no caso dos táquions e do universo de Gödel. A teoria da relatividade geral leva naturalmente à previsão de buracos negros²¹, e os astrônomos parecem já haver localizado vários corpos desse tipo (aparentemente o centro das galáxias é a região onde mais facilmente se encontram buracos negros)²². Portanto, nesse caso, os objetos em questão parecem existir e, se esses objetos existem e a teoria da relatividade geral é verdadeira, somos levados inevitavelmente a concluir que é possível

²⁰ Carter (1966a, 1966b e 1968) e Calvani et al. (1978) mostraram que, assim como no caso do modelo de Gödel, as trajetórias mais naturais em torno de uma singularidade em rotação não levam a violações da causalidade. Mas isso apenas faz que seja necessário utilizar uma nave espacial dotada de foguetes para realizar a "viagem no tempo" em torno da singularidade. É importante também não confundir os trabalhos de Carter com as especulações de Wheeler (*Geometrodynamics*) sobre "buracos de minhoca" (*wormholes*) nos buracos negros, que permitiriam a conexão entre dois mundos diferentes ou, talvez, violações de causalidade (a idéia de Wheeler é descrita em MISNER et al. 1973 e criticada em BIRREL e DAVIES 1978 e HELLER e REINHARDT 1976). Os resultados de Carter mostram que, assim como no caso dos modelos cosmológicos em rotação citados acima, também campos gravitacionais produzidos por objetos limitados em rotação podem levar a anomalias causais. Outros exemplos semelhantes são o campo em torno de um cilindro em rotação (descrito em VON STOCKUM 1937 e analisado em TIPLER 1974); e o campo de uma singularidade em rotação (TOMIMATSU e SATO 1972, analisada em GIBBONS e RUSSELL-CLARK 1973). Recentemente, referindo-se aos trabalhos de Gödel e Carter, Weingard (1979) enfatizou que não há nada fisicamente impossível nas viagens no tempo, se adotarmos a teoria da relatividade geral.

²¹ Hawking (1970) provou que, no contexto da teoria da relatividade geral se a energia e a pressão da matéria em contração não violam certas condições fisicamente plausíveis, garantidas pela física atualmente aceita, a formação de singularidades é inevitável logo que o campo gravitacional se torne tão forte a ponto de capturar a luz. Tipler (1976 e 1977) mostrou que, em universos normais (sem rotação), as anomalias causais ocorrem se e somente se houver singularidades do campo gravitacional — com matéria normal, antes do colapso, seria impossível produzir "máquinas do tempo".

²² O mais antigo candidato a buraco negro é o objeto Cygnus X-1 — HDE 226868 (BOWYER et al. 1964; BOLTON 1975; ODA 1977). Outro candidato é V 1343 Aquilae — SS 433 (MILGRON 1981). Em muitos núcleos de galáxias parecem existir buracos negros. E, em particular, em todas as galáxias Seyfert de tipo 1 parecem estar presentes buracos negros (DIBAI e TSVETANOV 1980).

realizar viagens no tempo, o que permite produzir efeitos anteriores às suas causas e gerar todos os tipos de problemas causais já apontados. Em particular, uma pessoa poderia sair da Terra, circular em volta de um buraco negro, retornar à Terra em um instante anterior ao início da viagem, encontrar a si próprio e matar-se. Mas se a pessoa matar-se antes de iniciar a viagem, ela não pode ter realizado a viagem e não pode, portanto, ter retornado e matado a si própria. Temos aí um ciclo causal que gera aparentes contradições.

Repetindo: parecem existir no universo certos tipos de corpos, os buracos negros, cujas propriedades, previstas pela teoria da relatividade geral, indicam que eles poderiam ser utilizados como máquina do tempo e gerar violações do princípio de antecedência das causas.

— “E agora, José?”

Há três alternativas: ou mais uma vez a mãe Natureza vem em socorro dos físicos e filósofos e proíbe a existência dos buracos negros, estando todos os astrônomos enganados quando pensam haver descoberto esses corpos; ou a teoria geral da relatividade deve ser rejeitada; ou podem ocorrer na natureza violações do princípio de antecedência das causas, e o universo tem propriedades incompreensíveis segundo o nosso ponto de vista atual²³.

Como dissemos, foi a própria teoria geral da relatividade que levou à previsão da existência dos buracos negros. Se eles não existem, há algo de errado com a própria relatividade geral. Portanto só há, na verdade, duas alternativas: ou a física atualmente aceita está errada, ou podem ser criadas violações do princípio de antecedência das causas.

5 DILEMA ATUAL

Pensemos, agora, na estranha situação histórica: os físicos relativistas procuraram, até hoje, manter o princípio de antecedência das causas e, em certos casos, associaram às bases da teoria da relatividade algo equivalente a esse princípio como um postulado adicional. Dessa forma, o princípio foi utilizado por muito tempo pelos físicos relativistas, para proibir a existência de sinais com velocidade superior à da luz. Agora, no entanto, esse casamento tão fértil durante décadas precisa ser rompido. É preciso desistir, ou da teoria, ou do princípio. No entanto, essa situação de necessidade de escolha, essa encruzilhada, tal como está

²³O físico Møller, autor de um clássico texto avançado sobre a teoria da relatividade (*Theory of relativity*) começou recentemente a combater a teoria da relatividade geral e a propor uma nova teoria da gravitação em que não surgem singularidades (MØLLER 1978).

sendo aqui colocada, não é encarada de frente pelos físicos ou pelos filósofos. Talvez voluntariamente cegos, como um casal que tenta manter a aparência de um casamento que já ruiu há muito tempo, todos se comportam como se nada de novo estivesse ocorrendo.

Através de meu contato pessoal com os físicos que trabalham com a teoria da relatividade geral, tenho notado que eles não se preocupam com o problema ou simplesmente pensam que é possível desistir do princípio de antecedência das causas sem grandes problemas. Eles nem de longe pensam em desistir de sua teoria. Os filósofos, por outro lado, às vezes desatualizados, às vezes imaginando que a teoria da relatividade pode voltar atrás e impedir de alguma maneira as consequências que são, na verdade, inevitáveis, continuam de modo geral a afirmar que o princípio de antecedência das causas é uma das bases da teoria da relatividade. Dos dois lados, a atitude é inconsequente.

Uma vez que haja conscientização do problema, é provável que cada lado se feche em torno de uma posição. Para os filósofos, será mais fácil atacar a teoria da relatividade geral e dizer que, se ela leva à possibilidade de máquinas do tempo, ela é absurda e deve ser rejeitada. Mas e se a teoria não estiver errada? E se de fato, dentro de algum tempo, for possível realizar viagens no tempo? Não é difícil prever a mudança que isso exigiria em nossas concepções básicas. Vou descrever, de modo bem simples, duas das principais alternativas possíveis e será fácil ver por que a máquina do tempo é o verdadeiro pesadelo dos filósofos²⁴.

Se as máquinas do tempo são possíveis e se o universo é compreensível e não-contraditório sob o ponto de vista lógico, será preciso alterar nossas concepções sobre liberdade e determinismo²⁵. Poderíamos, por exemplo, assumir que o universo é completamente determinista, que nenhuma ação é livre e que, portanto, uma vez que o passado é dado, é impossível alterá-lo. Nesse caso, um viajante do tempo poderá voltar ao passado e agir no passado, mas suas ações serão de tal forma limitadas

²⁴ Muitos filósofos já se ocuparam com as consequências filosóficas de uma possível violação do princípio de antecedência das causas. Às vezes, esses estudos foram motivados pela preocupação com a paranormalidade (pré-cognição); às vezes, foram inspirados pela ficção científica e, outras vezes, por modelos físicos — como a teoria dos pósitrons de Feynman, que não foi discutida aqui. Mas em todos esses trabalhos nunca se encarou a violação do princípio como uma possível imposição da física. (Dentre os muitos trabalhos filosóficos existentes, além dos já citados neste artigo, sugiro às pessoas interessadas a leitura de: PEARS 1957; FLEW 1957; CHISHOLM e TAYLOR 1960; DRAY 1960; DUMMETT 1964; MACKIE 1966).

²⁵ Ver por exemplo o artigo de Lewis (1976), que analisa as duas alternativas apontadas a seguir.

que ele será incapaz de alterar tudo aquilo que se sabe haver ocorrido de fato no passado. A pessoa poderia até ter a sensação de ser livre e de estar alterando o passado, mas estaria apenas agindo da forma que precisaria agir para que nada se alterasse²⁶.

Outra possibilidade, igualmente estranha, é a de que o passado pode ser alterado, pois o viajante do tempo é livre; nesse caso, ele pode fazer que algo que ocorreu deixe de ocorrer, e o passado é, portanto, indeterminado. Há uma interessante especulação relacionada a essa possibilidade, que parece ter sido apontada pela primeira vez pelo pensador russo Ouspensky (*Enseignement inconnu; Tertium organum*), que já foi aproveitada na ficção científica e utilizada em um conto de Jorge Luís Borges ("O jardim dos caminhos que se bifurcam"), tendo chegado à física através do trabalho de Everett sobre os fundamentos da mecânica quântica²⁷. A idéia é a seguinte: o tempo não é linear mas pluridimensional. Em cada instante, há sempre uma variedade de resultados que podem acontecer, e todos eles acontecem em correntes distintas de tempo²⁸. Em uma dessas correntes de tempo, eu venho a Diamantina e leio para vocês esse trabalho. Em outra das correntes de tempo, eu sou impedido de vir, e este trabalho fica guardado em uma gaveta. Em outra corrente ainda, nós não chegamos a nascer. Essas correntes bifurcam-se e entrelaçam-se, formando uma rede complexa. Se, ao voltar ao passado, o viajante do tempo alterar o seu passado, ele ver-se-á lançado em uma nova corrente de tempo desconhecida para ele e será incapaz de retornar ao futuro de onde ele partiu. Mas ele é totalmente livre, e o passado, assim como o futuro, totalmente indeterminado.

Essas são duas das alternativas, se de fato as máquinas do tempo são possíveis: ou indeterminismo radical, ou determinismo igualmente radical. Outras alternativas possíveis não são menos estranhas.

²⁶Esta é a solução defendida por Horwich (1975) e Geach (1965) para tornar plausível a viagem no tempo. A idéia de um universo completamente determinista não é estranha aos filósofos da teoria da relatividade, que algumas vezes sugeriram que o fluir do tempo e nossas ações seriam apenas uma ilusão e que a realidade cósmica é um todo dado, imutável, em quatro dimensões (WEYL *Philosophy*, p. 116; CAPEK 1975).

²⁷(EVERETT 1957; WHEELER 1957; DE WITT 1970; ALLEN 1971; DE WITT e GRAHAM, *Many-worlds interpretation*). Esta última referência contém, na página VI, uma citação do conto de Borges.

²⁸Uma idéia semelhante a esta aparece em Bradley (*Appearance and reality*), Dunne (*Experiment with time*) e Broad (1953), que discutem as seqüências temporais dos sonhos e possíveis modelos temporais compatíveis com a pré-cognição.

Será talvez necessário mudar completamente nossa visão de mundo e adotar uma concepção como essas? Ou será necessário abandonar uma das teorias fundamentais da física? Não sei. Como disse a princípio, não pretendo aqui resolver o problema; queria apenas expô-lo e mostrar que este é talvez um dos mais importantes problemas da filosofia da física, atualmente.

AGRADECIMENTO

Sou grato ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que tem subvencionado o meu trabalho nos últimos anos.

LISTA BIBLIOGRÁFICA

- 1 ALLEN, R. E. Remarks on the Everett-Wheeler interpretation of quantum mechanics. *American Journal of Physics*. 39: 842-3, 1971.
- 2 ARISTÓTELES. *The works of Aristotle*. Chicago, Encyclopaedia Britannica, 1952.
- 3 BASANO, L. Information flow, causality, and the classical theory of tachyons. *International Journal of theoretical Physics*. 16: 715-20, 1977.
- 4 ——. Farewell to tachyons? *Foundations of Physics*. 10: 937-48, 1980.
- 5 BENFORD, G. A., Book, D.L. and Newcomb, W.A. The tachyonic antitelephone. *Physical Review D*. 2: 263-5, 1970.
- 6 BILANIUK, O. M. P., Deshpande, V. K. and Sudarshan, E. C. G. "Meta" relativity. *American Journal of Physics*. 30: 718-23, 1962.
- 7 BIRRELL, N. D. and Davies, P. C. W. On falling through a black hole into another universe. *Nature*. 272: 35-7, 1978.
- 8 BLACK, M. Why cannot an effect precede its cause? *Analysis*. 16: 49-58, 1956.
- 9 BOHN, David. *Relativity*. New York, Benjamin, p. 155, 1965.
- 10 BOLTON, C. T. Orbital elements and an analysis of models for HDE 226868 = Cygnus X-1. *Astrophysical Journal*. 200: 269-77, 1975.
- 11 BOWYER, S., Byram, E. T., Chubb, T. A. and Firedman, H. Lunar occultation of X-ray emission from the Crab nebula. *Science*. 146: 912-6, 1964.
- 12 BRADLEY, F. H. *Appearance and reality*. London, Swan Sonnenschein, 1902, p. 211.
- 13 BRILLOUIN, L. Über die Fortpflanzung des Lichtes in dispergierenden Medien. *Annalen der Physik*. [4] 44: 203-40, 1914.

- 14 BROAD, C. D. Mr. Dunne's theory of time in "An Experiment with Time". *Philosophy*. 10: 168-85, 1935.
- 15 DE BROGLIE, L. Ondes et quanta. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*. 177: 507-10, 1923(a).
- 16 — . Quanta Lumière, diffraction et interférence. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*. 177: 548-50, 1923(b).
- 17 BROWN, H. R. and Martins, R. de A. De Broglie's relativistic phase waves and wave groups. *American Journal of Physics*. 52:1.130-40, 1984.
- 18 BUNGE, Mario. *Causalidad – El Principio de Causalidad en la Ciencia Moderna*. 3.^a ed. Buenos Aires, Eudeba, 1972.
- 19 CALDIROLA, P. and Recami, E. Causality and tachyons in relativity. *Report Istituto nazionale di Fisica nucleare*. INFN/AE – 77/4, 1977.
- 20 CALVANI, M., De Felice, F., Muchotrzeb, B. and Salmistraro, F. Time Machine and geodesic motion in Kerr metric. *General Relativity and Gravitation*. 9: 155-63, 1978.
- 21 CAPEK, M. Relativity and the status of becoming. *Foundations of Physics*. 5: 607-17, 1975.
- 22 CARNEIRO, A. *Introdução ao estudo da "science-fiction"*. São Paulo, Conselho Estadual de Cultura, 1967, p. 88.
- 23 CARTER, B. The complete analytic extension of the Reissner-Nordström metric in the special case $e^2 = m^2$. *Physics Letters*. 21: 423-4, 1966 (a).
- 24 — . Complete analytic extension of the symmetry axis of Kerr's solution of Einstein's equations. *Physical Review*. 141: 1.242-7, 1966 (b).
- 25 — . Global structure of the Kerr family of gravitational fields. *Physical Review*. 174: 1.559-71, 1968.
- 26 CHANDRASEKHAR, S. and Wright, J. P. The geodesics in Gödel's universe. *Proceedings of the national Academy of Science (USA)*. 47: 341-7, 1961.
- 27 CHISHOLM, R. M. and Taylor, R. Making things to have happened. *Analysis*. 20: 73-8, 1960.
- 28 CSONKA, P. L. Causality and faster-than-light particles. *Nuclear Physics. B*. 21: 436-43, 1970.
- 29 DIBAI, E. A. and Tsvetanov, Z. I. T. Comparative parameters of Seyfert 1 and Seyfert 2 galaxies. *Soviet Astronomy*. 24: 259-64, 1980.
- 30 DRAY, W. Taylor and Chisholm on making things to have happened. *Analysis*. 20: 79-82, 1960.

- 31 DUMMETT, M. A. E. Bringing about the past. *Philosophical Review*. 73: 338-59, 1964.
- 32 DUNNE, J. W. *An experiment with time*. London, Faber, 1934.
- 33 EARMAN, J. On going backwards in time. *Philosophy of Science*. 34: 211-22, 1967.
- 34 —. Implications of causal propagation outside the null cone. *Australasian Journal of Philosophy*. 50: 222-37, 1972.
- 35 ECO, Umberto. Les options d'un projet: voyage dans le temps. *Synthèses*. 22: 30-9, 1967.
- 36 EINSTEIN, A. Zur Elektrodynamik bewegter körper. *Annalen der Physik*. [4] 17: 891-921, 1905.
- 37 —. Über die Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie. *Annalen der Physik*. [4] 23: 371-84, 1907.
- 38 —. Remarks concerning the essays brought together in this cooperative volume. In: SCHILPP 1949, pp. 665-88.
- 39 ELIOT, T. S. *Collected Poems — 1909-1935*. London, Faber and Faber, 1936, pp. 183-91.
- 40 EVERETT III, H. 'Relative state' formulation of quantum mechanics. *Reviews of modern Physics*. 29: 454-62, 1957.
- 41 FEINBERG, G. Possibility of faster-than-light particles. *Physical Review*. 159: 1.089-105, 1967.
- 42 FLEW, A. Causal disorder again. *Analysis*. 17: 81-6, 1957.
- 43 —. Precognition. In: EDWARDS, P. (ed.). *The Encyclopaedia of Philosophy*. New York, Macmillan, 1967, v. 6, pp. 436-41.
- 44 Van FRAASSEN, B. C. *An introduction to the philosophy of time and space*. New York, Random House, 1970.
- 45 GEACH, P. T. Some problems about time. *Proceedings of the British Academy*. 51: 321-36, 1965.
- 46 GIBBONS, G. W. and Russel-Clark, R. A. Note on the Sato-Tomimatsu solution of Einstein's equation. *Physical Review Letters*. 30: 398-9, 1973.
- 47 GÖDEL, K. A remark about the relationship between relativity theory and idealistic philosophy. In: SCHILPP 1949, pp. 557-62 (a).
- 48 —. An example of a new type of cosmological solution of Einstein's field equations of gravitation. *Reviews of modern Physics*. 21: 447-50, 1949 (b).
- 49 —. Rotating universes in general relativity theory. *Proceedings of the international Congress of Mathematicians*. Cambridge, 1950, v. 1, pp. 175-81.
- 50 GRAVES, J. C. and Roper, J. E. Measuring measuring rods. *Philosophy of Science*. 32: 39-56, 1965.

- 51 GRÜNBAUM, A. *Philosophical problems of space and time*. Dordrecht, Reidel, 1973.
- 52 GUTTING, G. Einstein's discovery of special relativity. *Philosophy of Science*. 39: 51-68, 1972.
- 53 HAWKING, S. W. The existence of cosmic time functions. *Proceedings of the royal Society of London. A*. 308: 433-5, 1968.
- 54 —. The occurrence of singularities in cosmology. III — Causality and singularities. *Proceedings of the royal Society of London. A*. 300: 187-201, 1970.
- 55 HELLER, M. and Reinhardt, M. Meaningless questions in cosmology and relativistic astrophysics. *Zeitschrift für Naturforschung. A*. 31: 1.271-6, 1975.
- 56 HORWICH, P. On some alleged paradoxes of time travel. *Journal of Philosophy*. 72: 432-44, 1975.
- 57 Von IGNATOWSKY, W. Einige allgemeine Bemerkungen zum Relativitätsprinzip. *Physikalische Zeitschrift*. 11: 972-6, 1910.
- 58 —. Über Überlichtgeschwindigkeiten in der Relativtheorie. *Physikalische Zeitschrift*. 12: 776-8, 1911.
- 59 KEMP SMITH, N. *Immanuel Kant's Critique of Pure Reason*. London, Macmillan, 1934.
- 60 Von LAUE, M. Die Fortpflanzung der Strahlung in dispergierenden und absorbierenden Medien. *Annalen der Physik*. [4] 18: 523-66, 1905.
- 61 LEIBNIZ, G. W. *Philosophical papers and letters*. Dordrecht, Reidel, 1969.
- 62 LEWIS, D. The paradoxes of time travel. *American philosophical Quarterly*. 13: 145-52, 1976.
- 63 MACARRONE, G. D. and RECAMI, E. Comments on "Farewell to tachyons?". *Foundations of Physics*. 10: 949-64, 1980.
- 64 MACKIE, J. L. The direction of causation. *Philosophical Review*. 75: 441-66, 1966.
- 65 MARTINS, R. de A. Causal paradoxes implied by the hypothetical coexistence of positive — and negative — mass matter. *Letere al nouvo Cimento*. 28: 265-8, 1980.
- 66 —. Causal anomalies and the case for a preferred referencial frame. Em: BELLANDI FILHO, J. e Ammiraju, P. *Topics in cosmic rays*. Campinas, UNICAMP, 1984, v. 1, pp. 208-32.
- 67 MAUND, J. B. Tachyons and causal paradoxes. *Foundations of Physics*. 9: 557-74, 1979.
- 68 MEHLBERG, H. Essai sur la théorie causale du temps. *Studia philosophica*. 1: 119-260, 1935.

- 69 MILGRON, M. Review of the theories on SS 433. *Vistas in Astronomy*. 25: 141-51, 1981.
- 70 MISNER, G. W., Thorne, K. S. and Wheeler, J. A. *Gravitation*. San Francisco, Freeman, 1973.
- 71 MØLLER, C. *The theory of relativity*. London, Oxford University, 1952.
- 72 —. On the crisis in the theory of gravitation and a possible solution. *Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, Matematisk-tysiske meddelelser*. 39: 1-31, 1978.
- 73 NERLICH, G. Special relativity is not based on causality. *British Journal for the Philosophy of Science*. 33: 361-88, 1982.
- 74 NEWTON, R. G. Causality effects of particles that travel faster than light. *Physical Review*. 162: 1.274, 1967.
- 75 —. Particles that travel faster than light? *Science*. 167: 1.569-74, 1970.
- 76 NOVELLO, M. and Rebouças, M. J. Rotating universe with successive causal and noncausal regions. *Physical Review*. 19: 2.850-2, 1979.
- 77 ODA, M. Cygnus X-1: A candidate of the black hole. *Space Science Review*. 20: 757-813, 1977.
- 78 OUSPENSKY, P. D. *Fragments d'un enseignement inconnu*. Paris, Gallimard, 1949.
- 79 —. *Tertium Organum*. New York, Random House, 1970.
- 80 OZSVÁTH, L. and Schücking, E. Finite rotating universe. *Nature*. 193: 1.168-9, 1962.
- 81 OZSVÁTH, I. Homogeneous Lichnerowicz universes. *Journal of mathematical Physics*. 8: 326-44, 1967.
- 82 PAVSIC, M. and Recami, E. How to recover causality for tachyons even in macrophysics. *Nuovo Cimento A*. 36: 171-86, 1976.
- 83 PEARS, D. F. The priority of causes. *Analysis*. 17: 54-63, 1957.
- 84 REBOUÇAS, M. J. A rotating universe with violation of causality. *Physics Letters A*. 70: 161-3, 1979.
- 85 RECAMI, E. How to recover causality in special relativity for tachyons. *Foundations of Physics*. 8: 329-40, 1978.
- 86 RECAMI, E. and Mignani, R. Classical theory of tachyons. *Rivista del nuovo Cimento*. [2] 4: 209-90, 1974.
- 87 RECAMI, E. and Pavsic, M. Answer to "Information flow, causality, and the classical theory of tachyons". *International Journal of theoretical Physics*. 17: 77-9, 1978.
- 88 REICHENBACH, H. *The philosophy of space and time*. New York, Dover, 1957.
- 89 —. *The direction of time*. Berkeley, University of California, 1971.

- 90 ROLNICK, W. B. Implications of causality for faster-than-light matter. *Physical Review*. 183: 1.105-8, 1969.
- 91 ———. Tachyons and the arrow of causality. *Physical Review D*. 6: 2.300-1, 1972.
- 92 RUFFINI, R. and Wheeler, J. A. Introducing the black hole. *Physics Today*. 24(1): 30-41, 1971.
- 93 SCHILPP, P. A. (ed.) *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*. Evanston, Ill., Library of Living Philosophers, 1949.
- 94 SCHMIDT, H. Can an effect precede its cause? A model for a non-causal world. *Foundations of Physics*. 8: 453-80, 1978.
- 95 SCRIVEN, M. Randomness and the causal order. *Analysis*. 17: 5-9, 1956.
- 96 SODRÉ, M. *A ficção do tempo*. Petrópolis, Vozes, p. 104, 1973.
- 97 SOM, M. M. and Raychaudhuri, A. K. Cylindrically symmetric charged dust distributions in rigid rotation in general relativity. *Proceedings of the royal Society of London. A*. 304: 81-6, 1968.
- 98 SOMMERFELD, A. Ein Einwand gegen die Relativtheorie der Elektrodynamik und seine Beseitigung. *Physikalische Zeitschrift*. 8: 841-2, 1907.
- 99 ———. Über die Fortpflanzung des Lichtes in dispergierenden Medien. *Annalen der Physik*. [4] 44: 177-202, 1914.
- 100 STEIN, H. On the paradoxical time-structures of Gödel. *Philosophy of Science*. 37: 589-601, 1970.
- 101 Von STOCKUM, W. J. Gravitational field of a distribution of particles rotating about an axis of symmetry. *Proceedings of the royal society of Edinburgh*. 57: 135-54, 1937.
- 102 THORNE, K. S. Gravitational collapse. *Scientific American*. 217 (5): 88-98, 1967.
- 103 TIPLER, F. J. Rotating cylinders and the possibility of global causality violation. *Physical Review. D*. 9: 2.203-6, 1974.
- 104 ———. Causality violation in asymptotically flat space-times. *Physical Review Letters*. 37: 879-82, 1976.
- 105 ———. Singularities and causality violations. *Annals of Physics*. 108: 1-36, 1977.
- 106 TOLMAN, R. C. *The theory of the relativity of motion*. Berkeley, University of California, p. 54, 1917.
- 107 TOMINATSU, A. and Sato, H. New exact solution for the gravitational field of a spinning mass. *Physical Review Letters*. 29: 1.344-5, 1972.
- 108 WEINGARD, R. General relativity and the conceivability of time travel. *Philosophy of Science*. 46: 328-32, 1979.

- 109 WELLS, H. G. *The time machine, an invention*. London, Faber and Faber, 1895.
- 110 WEYL, H. *Philosophy of mathematics and natural science*. Princeton, Princeton University, p. 116, 1949.
- 111 WHEELER, J. Assessment of Everett's 'relative state' formulation of quantum theory. *Reviews of modern Physics*. 29: 463-4, 1957.
- 112 WHEELER, J. A. *Geometrodynamics*. New York, Academic Press, 1962.
- 113 WHITROW, G. J. *The natural philosophy of time*. Oxford, Clarendon, 1980.
- 114 DE WITT, B. S. Quantum theory and reality. *Physics Today*. 23(9): 30-5, 1970.
- 115 DE WITT, B. S. and Graham, N. (eds.). *The many-worlds interpretation of quantum mechanics*. Princeton, Princeton University, 1973.