Este arquivo contém o texto completo do seguinte trabalho:

MARTINS, Roberto de Andrade. Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica. 2 – Física moderna. *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **15** (3): 265-300, 1998.

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-67.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. Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica. 2 – Física moderna. *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **15** (3): 265-300, 1998.

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-67.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.

COMO DISTORCER A FÍSICA: CONSIDERAÇÕES SOBRE UM EXEMPLO DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA . 2 – FÍSICA MODERNA

Roberto de Andrade Martins
Instituto de Física – UNICAMP
Campinas - SP

Resumo

Este artigo discute a dificuldade de apresentar-se conceitos físicos corretos em obras de divulgação científica. Apresenta-se como exemplo uma leitura crítica do livro A dança do universo: dos mitos de criação ao big-bang, analisando-se problemas conceituais da abordagem empregada naquela obra. Mostra-se a existência de grande número de erros, provenientes de uma utilização descuidada de imagens e comparações, erros esses que poderiam ter sido evitados. O presente artigo discute a parte daquela obra referente à física moderna, apenas. A parte referente à física clássica foi discutida em um artigo anterior.

I – Introdução

Um artigo anterior já apresentou uma análise crítica da primeira metade da obra *A dança do universo*, de Marcelo Gleiser, como um exemplo de trabalho de divulgação científica que apresenta grandes limitações, sob o ponto de vista conceitual. Neste artigo, vamos discutir alguns aspectos da segunda metade do livro, dedicada à física moderna. Veremos que também aqui a obra em discussão mostra-se repleta de equívocos, muitas vezes em pontos conceituais centrais da física. Como no artigo anterior, vamos procurar evitar comentários sobre os aspectos de história da ciência ou de epistemologia, concentrando nossa atenção em questões científicas e didáticas.

Como já foi dito no artigo anterior, a escolha desta obra em particular para análise não significa que eu a considere a pior já escrita, nem que tenha algum problema pessoal com o autor (que não conheço). Creio que o tipo de análise crítica aqui apresentada pode ser útil aos estudantes e educadores, e servir também de alerta a autores e editoras, para que procurem ser mais cuidadosos em trabalhos desse tipo.

Alguns pontos serão indicados de modo muito resumido, para poupar espaço. Teria sido possível explicar melhor cada um deles, mas espero que os leitores possam completar por si próprios a análise apresentada.

II – Teoria da relatividade especial

Ao descrever a origem da teoria da relatividade, o livro A dança do universo apresenta uma descrição histórica pouco fiel, que não será discutida aqui, a não ser em alguns pontos fundamentais, que afetam a compreensão da própria natureza científica da teoria da relatividade. Em primeiro lugar, quanto aos experimentos de Michelson:

> *Albert Michelson, cujo brilhante experimento, executado com Edward Morley em 1887, foi fundamental para que se estabelecesse a não-existência do éter, jamais aceitou seus próprios resultados. O que supostamente deveria ter sido um mero teste para confirmar a existência do éter transformou-se num pesadelo. (GLEISER, A dança do universo, p. 254)*

Michelson, como a quase totalidade dos físicos da época, não colocava em dúvida a existência do éter, e por isso nunca pensaria em testar a sua existência. O que ele estava tentando fazer, em seus famosos experimentos, era medir a velocidade da Terra através do éter, admitindo o modelo de Fresnel de um éter estacionário (ou seja, que não era arrastado pela própria Terra). O resultado obtido, contrário à expectativa, podia ser interpretado de muitos modos diferentes. Michelson não rejeitou os resultados do experimento, evidentemente, mas adotou uma interpretação que é diferente da interpretação relativística, posterior.

Por outro lado, nem o experimento de Michelson e Morley nem qualquer outro experimento permitem *estabelecer* a não existência do éter. Ao contrário do que popularmente se divulga, não existe nenhuma prova de que o éter não existe: simplesmente a teoria da relatividade (no sentido de Einstein) adotou o princípio *epistemológico* de que não se deve utilizar na física entes que não sejam observáveis, e assim rejeitou o éter, porque ele não havia sido detectado em certos experimentos[1]. Outras pessoas aceitaram exatamente os mesmos experimentos, mas adotaram uma interpretação diferente (aceitando o éter), por utilizarem princípios *epistemológicos* diferentes (por exemplo, Poincaré).

O éter não era uma suposição tola: na verdade, tolice é falar-se sobre um espaço totalmente vazio (MARTINS 1993). No final do século XIX e início do século XX, o éter preenchia o papel de proporcionar uma *explicação causal* para alguns fenômenos físicos (por exemplo, propagação da luz e dos campos eletromagnéticos), e na versão de Lorentz e Poincaré permitia uma explicação causal de fenômenos como a contração dos corpos em movimento (essa contração seria

---

[1] Na verdade, havia experimentos realizados no século XIX, por Fizeau e por Ångström, que aparentemente haviam medido a velocidade da Terra em relação ao éter. Ver MARTINS 1986a.

causada por uma variação das forças eletromagnéticas entre as partículas do corpo, que, por sua vez, seria causada pelo movimento através do éter). O aumento de massa de um elétron era explicado a partir do momento acumulado ao redor do mesmo, no éter, pelos campos eletromagnéticos. Na versão de Einstein, a teoria da relatividade *prevê* os efeitos, mas não se preocupa em apresentar uma explicação causal dos fenômenos (MARTINS 1981).

Não se pode, portanto, afirmar que "Michelson continuou a acreditar na existência do éter até o fim de sua vida, mesmo após a teoria da relatividade de Einstein ter elegantemente *demonstrado que esse meio era completamente desnecessário*" (GLEISER, *A dança do universo*, p. 254). A teoria de Einstein permitia fazer deduções sem fazer referência ao éter, mas isso não indica que o éter era completamente desnecessário. É bem sabido, aliás, que na década de 1920 Einstein voltou a aceitar a existência do éter.

Mais adiante, o livro afirma de modo ainda mais forte:

> *A existência do éter é inconsistente com os dois postulados de Einstein. (GLEISER, A dança do universo, p. 276)*

Errado. A existência do éter é inconsistente com a visão epistemológica empirista adotada por Einstein quando formulou a teoria da relatividade especial. Mas os dois postulados (o princípio da relatividade e o da constância da velocidade da luz) são perfeitamente compatíveis com a existência do éter, como se pode ver nas teorias de Poincaré e Lorentz.

O livro apresenta a proposta da contração por Lorentz e Fitzgerald de um modo ridículo:

> *Eles queriam salvar o éter a qualquer preço, mesmo que isso os forçasse a inventar essa bizarra contração de objetos na direção de seu movimento. Sua proposta não possuía uma fundação conceitual sólida o suficiente. (GLEISER, A dança do universo, p. 275)*

É verdade que a *primeira* proposta da contração foi uma hipótese *ad hoc*. Mas logo depois a contração foi integrada a uma teoria sólida, por Lorentz (e, depois, Poincaré) e explicada a partir da alteração das forças eletromagnéticas entre as partículas da matéria que se move através do éter. Além disso, por que chamar de "bizarra" a contração dos objetos, que foi também adotada na teoria de Einstein e que aceitamos até hoje?

Voltando à seqüência do livro:

E, como já sabemos, sempre que surgem novas idéias em física, também surgem novas idéias em cosmologia (...) (GLEISER, A dança do universo, p. 255)

Ou essa afirmação é entendida em um modo tão amplo que se torna tautológica, ou então está errada. O desenvolvimento do eletromagnetismo, no século XIX, não trouxe contribuições à cosmologia. O desenvolvimento da física do estado sólido – uma das mais importantes áreas da física atual – também não trouxe contribuições à cosmologia.

O livro procura justificar a constância da velocidade da luz a partir da teoria eletromagnética:

Mas, segundo a teoria de Maxwell, isso seria impossível; uma onda eletromagnética em repouso simplesmente não existe; a luz está sempre em movimento. (GLEISER, A dança do universo, p. 263)

Isso não é verdade. A teoria de Maxwell (isto é, aquilo que Maxwell fez, e não o que Lorentz fez depois dele) só era aplicável a referenciais em repouso em relação ao éter. Não examinava o que aconteceria em outros referenciais. Suponho que Maxwell aceitaria que, em princípio, um observador poderia se mover pelo éter com uma velocidade igual à da luz, e acompanhar uma onda eletromagnética pelo espaço. Podemos mencionar, por exemplo, que antes do desenvolvimento da teoria da relatividade, Heaviside utilizou a teoria de Maxwell e argumentou que uma partícula carregada poderia ter velocidades superiores à da luz no vácuo.

O livro apresenta de um modo confuso o princípio da relatividade:

Esse resultado é resumido no princípio da relatividade, que diz que as leis da física são idênticas para passageiros se movendo com velocidades relativas constantes. (GLEISER, A dança do universo, p. 265)

O princípio da relatividade diz que as leis da física são idênticas para todos os referenciais inerciais (...) (GLEISER, A dança do universo, p. 265)

(...) a partir de dois postulados: 1) as leis da física são as mesmas para observadores movendo-se com velocidade relativa constante; (...) (GLEISER, A dança do universo, pp. 266-7)

> *O primeiro postulado é o conhecido princípio da relatividade. As leis da física são idênticas para todos os referenciais inerciais. (GLEISER, A dança do universo, p. 267)*

É claro que referenciais com velocidade relativa uniforme não significa a mesma coisa que referenciais inerciais. O texto oscila entre duas formulações do princípio da relatividade (da teoria restrita), sem deixar claro o conceito envolvido. Não se encontra uma discussão do conceito de referencial inercial, nessa parte do livro, e a conceituação apresentada no capítulo em que se fala sobre Galileo (GLEISER, A dança do universo, p. 151: "Esse movimento com velocidade constante é chamado de movimento inercial", etc.) é inadequada. Dessa forma, o livro deixa o primeiro postulado da relatividade envolto em uma profunda confusão conceitual.

> *Como solução, Einstein sugeriu que a velocidade da luz no vácuo (espaço vazio) não é como qualquer outra velocidade, mas é especial; a velocidade da luz é a velocidade limite de processos causais na Natureza, a velocidade mais alta com que a informação pode viajar. Mais do que isso, a velocidade da luz é independente da velocidade da fonte. (GLEISER, A dança do universo, p. 266)*

O que Einstein utilizou como suposição básica (postulado 2) na teoria da relatividade especial foi que a velocidade da luz *independe da velocidade da fonte* – uma suposição que já era aceita antes, a partir da teoria do éter. De fato, se a luz é uma onda do éter, seu movimento é independente do movimento da fonte, exatamente como a velocidade do som ou de uma onda na água não depende da velocidade da fonte do som ou das oscilações da água.

O conceito de velocidade limite de processos causais não é uma das suposições básicas da teoria – é uma conseqüência da teoria, obtida quando se adiciona o princípio de antecedência das causas – ou seja, que uma causa nunca ocorre depois do seu efeito (MARTINS 1986b).

III – Dedução dos fenômenos relativísticos

Muitos autores já se esforçaram, ao longo das décadas, para apresentar deduções extremamente simples das transformações de espaço e tempo da relatividade especial. O tipo de dedução que me parece mais simples e conceitualmente correto é o que aparece (entre outros lugares) nas conferências de Feynman, e que se baseia em relógios de luz (FEYNMAN *et al.*, *The Feynman*

lectures on physics, vol. 1, cap. 15). O livro *A dança do universo* procurou inovar essas deduções, mas cometeu equívocos graves.

Quando o livro procura justificar a dilatação temporal e a contração dos comprimentos (GLEISER, *A dança do universo*, p. 269 e seguintes), há um problema físico não muito óbvio, mas importante. As transformações usuais entre períodos de relógios, do tipo $T = T_0.(1-v^2/c^2)^{-1/2}$ são válidas se e somente se o período T_0 é um período *próprio* para um dos referenciais. Ou seja, ele deve ser o intervalo de tempo entre dois eventos que ocorrem *na mesma posição* para um dos dois referenciais. Isso pode ser confirmado notando-se que a fórmula pode ser deduzida da quarta transformação de Lorentz se e somente se Δx for nulo:

$$t' = (t-v.x/c^2).(1-v^2/c^2)^{-1/2} \therefore$$

$$\therefore \Delta t' = (\Delta t-v.\Delta x/c^2).(1-v^2/c^2)^{-1/2}$$

Se Δx for diferente de zero, não se pode concluir $\Delta t' = \Delta t.(1-v^2/c^2)^{-1/2}$. Por isso, os eventos que marcam o início e o fim do período T_0 devem ocorrer exatamente na mesma posição. Assim, nas deduções que se encontra normalmente em livros sobre teoria da relatividade especial, utiliza-se um relógio de luz *em que a luz parte de um ponto, é refletida por um espelho e volta ao ponto de partida*. Esse é um relógio relativístico válido, exatamente porque o intervalo de tempo é próprio. Com esse tipo de relógio, pode-se deduzir as equações aceitas da teoria da relatividade especial. No entanto, em *A dança do universo*, o relógio de luz é diferente: o período do relógio é o tempo entre a reflexão do pulso de luz no espelho inferior ("tique") e a reflexão do mesmo pulso no espelho superior ("taque"):

> *Quando o pulso de luz bate no espelho inferior, ouvimos um "tique", e, quando o pulso bate no espelho superior, ouvimos um "taque". Antes de o relógio de luz ter sido posto no trem, o observador A mediu o intervalo de tempo entre um "tique" e um "taque", chamando-o de T_0. (GLEISER, A dança do universo, p. 269)*

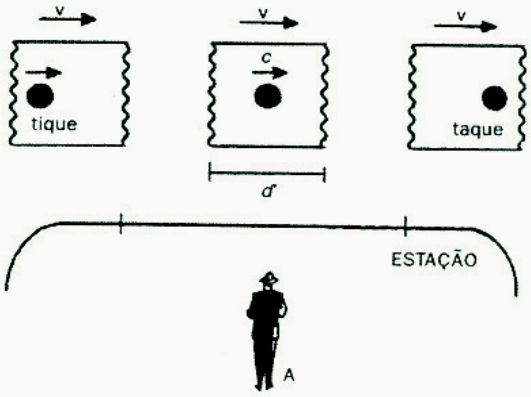
Esse intervalo de tempo impróprio *não se transforma* como o período dos relógios relativísticos usuais.

Outro ponto é que o livro introduz um *som*, na análise: o observador *ouve* os "tiques" e "taques". Mas o som demora um certo tempo (muito maior do que o período) para se propagar até o observador, e isso teria que ser levado em conta, o que complicaria extremamente a análise quantitativa, se ela fosse feita. Qualitativamente, isso complica muito a compreensão do fenômeno estudado. É muito mais fácil tratar de dois eventos que ocorram *no mesmo ponto* (duas reflexões

sucessivas da luz no espelho superior *ou* no inferior), o que elimina qualquer necessidade de introduzir o som ou outro sinal difícil de ser analisado.

No primeiro uso que o livro *A dança do universo* faz do relógio de luz (dilatação dos períodos dos relógios), o erro conceitual não introduziria nenhum problema em uma dedução quantitativa: pode-se chegar à fórmula correta (basicamente porque, embora o "tique" e o "taque" ocorram em dois pontos diferentes, o Δx é igual a zero). Mas na segunda análise, em que o relógio é colocado "deitado" (na direção do movimento), o "tique" e o "taque" ocorrem em posições diferentes ao longo do eixo do movimento, e existe um Δx diferente de zero que introduz um grande problema. O raciocínio apresentado para justificar a contração dos comprimentos está errado:

> *Entretanto, na presente situação, o pulso de luz tem de viajar uma distância bem mais longa, já que ele não só deve cobrir a distância entre os dois espelhos, mas também deve "alcançar" o espelho, que está se movendo para o leste (→). Como a luz viaja sempre com a mesma velocidade, a única explicação para o intervalo de tempo ser o mesmo que antes é que a distância entre os dois espelhos encolheu, ou seja, d' é menor do que d (ver figura 7.5). Os objetos se contraem na direção de seu movimento! (GLEISER, A dança do universo, pp. 271-2)*



Esse raciocínio está errado. Se ele for utilizado para deduzir quantitativamente a contração dos comprimentos, a conclusão será que o comprimento do relógio se contrairia de acordo com a relação $L = L_0.(1-v^2/c^2)$ e não de acordo com a fórmula correta, $L = L_0.(1-v^2/c^2)^{1/2}$ (deixo a dedução para o leitor). Além disso (e muito pior do que isso!), se o relógio do livro for *invertido*, de tal modo que a luz caminhe para a esquerda (←) entre o "tique" e o "taque", a

conclusão teria que ser oposta, ou seja, adaptando-se o texto anteriormente citado do livro:

> *Entretanto, na presente situação, o pulso de luz tem de viajar uma distância bem mais curta, já que ele ~~não só~~ deve cobrir a distância entre os dois espelhos, mas também deve "ser alcançado" pelo espelho, que está se movendo para o oeste (←). Como a luz viaja sempre com a mesma velocidade, a única explicação para o intervalo de tempo ser o mesmo que antes é que a distância entre os dois espelhos aumentou, ou seja, d' é maior do que d (ver figura 7.5). Os objetos se dilatam na direção de seu movimento!*

Na verdade, nada pode ser concluído desse modo. É necessário considerar *o tempo de ida e volta*, e fazer os cálculos, para poder concluir que há contração do comprimento.

Na dedução correta, utiliza-se luz que caminha nos dois sentidos, indo e voltando. O tempo de ida é $L/(c-v)$ e o tempo de volta é $L/(c+v)$; o tempo total é $T=2Lc/(c^2-v^2) = (2L/c)/(1-v^2/c^2)$. Como o período próprio é $T_0=2L_0/c$, e como a transformação do período é $T=T_0.(1-v^2/c^2)^{-1/2}$, deduz-se daí a relação correta para a contração do comprimento.

IV – Outros aspectos da relatividade

Ao tentar exemplificar os efeitos relativísticos, o livro menciona os raios cósmicos, que são assim descritos:

> *Raios cósmicos são "chuveiros" de pequenas partículas de matéria que atravessam nossa atmosfera, provenientes do espaço. (GLEISER, A dança do universo, p. 273)*

> *RAIOS CÓSMICOS: "Chuveiros" de partículas que penetram em nossa atmosfera, provenientes do espaço. (GLEISER, A dança do universo, p. 406)*

Errado. Os raios cósmicos podem produzir "chuveiros" de partículas, mas não são chuveiros. Não é apenas na Terra que existem raios cósmicos, eles também existem na Lua, em Marte, no espaço interestelar, etc. Para não ficar uma coisa confusa, teria sido conveniente diferenciar claramente entre raios cósmicos primários e secundários.

Quando os raios cósmicos (na maioria prótons) atingem os átomos nas camadas superiores de nossa atmosfera, eles produzem, entre outros fragmentos, uma partícula chamada múon, um primo pesado do elétron. (GLEISER, A dança do universo, p. 273)

Está errado. Os raios cósmicos *primários* são, em sua maioria, prótons, os *secundários* não são. Os prótons colidem com átomos da atmosfera, e nessas colisões são produzidas geralmente muitas partículas, que dependem da energia dos prótons. *Nunca* são produzidos múons diretamente nessas colisões, e os múons de modo nenhum podem ser chamados de "fragmentos" dos prótons. Os múons que observamos na radiação cósmica são o resultado da desintegração de mésons pi (ou píons), que por sua vez podem ser produzidos na interação dos prótons primários com átomos da atmosfera, como foi descoberto por um físico brasileiro, César Lattes, 50 anos atrás, e como todos os brasileiros deveriam saber.

O livro contém muitas frases de efeito, como a seguinte:

Efeitos aparentemente estranhos, como a contração espacial ou a dilatação temporal, surgem ao olharmos para a realidade física com as lentes distorcidas do espaço e tempo sensoriais da física newtoniana. (GLEISER, A dança do universo, p. 276)

Esses efeitos não têm relação com o espaço e o tempo sensoriais. São efeitos associados aos processos de *medida* do espaço e do tempo, fundamentados na teoria da relatividade especial, e não na física newtoniana. O espaço e tempo sensoriais, como o próprio nome diz, dependem de nossa estrutura fisiológica, e não de Newton (já existiam antes que Newton tivesse nascido, suponho).

A verdadeira arena em que os fenômenos físicos ocorrem é o espaço-tempo quadridimensional da relatividade especial, onde as distâncias são as mesmas para todos os observadores inerciais. (GLEISER, A dança do universo, p. 276-7)

O leitor pode ser levado a pensar que não existe contração dos comprimentos, quando se considera o espaço-tempo. Mas a contração dos comprimentos continua a existir. É um *novo conceito*, o de intervalo relativístico Δs (uma combinação entre intervalo de tempo e distância, $\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2.\Delta t^2$), que é invariante. O texto não deixa isso claro.

3) massa e energia podem ser convertidas entre si (GLEISER, A dança do universo, pp. 251)

A "conversão" de massa em energia (ou vice-versa) é um conceito problemático, embora infelizmente apareça em enorme número de obras. Pode-se *converter* energia cinética em energia potencial, no sentido de que uma delas vai diminuindo, e vai surgindo uma quantidade equivalente da outra. Converter massa em energia significaria, de modo equivalente, que haveria fenômenos em que a massa iria desaparecendo e iria surgindo uma quantidade equivalente de energia, ou vice-versa. Isso não ocorre. Afirmar a conversão de massa em energia é o mesmo que partir da equação E=hν e afirmar que a energia pode ser convertida em freqüência, ou vice-versa.

Há uma *relação* entre massa e energia, de tal modo que *quase sempre* elas são proporcionais. As exceções são os casos em que um sistema extenso está submetido a pressões e tensões externas, e o caso da energia potencial eletromagnética, à qual não se pode associar uma massa (ver MARTINS 1989). Por exemplo: um elétron dentro de um Van de Graaf pode ter uma energia potencial positiva ou negativa muitas vezes superior à sua energia de repouso, mas isso não afeta seu comportamento dinâmico, ou seja, não afeta sua massa.

> *A massa é uma forma de energia, a famosa equação $E = mc^2$. (...) De modo a acomodar esse fato óbvio, Einstein propôs que a massa de um objeto aumenta com a sua velocidade, tendendo a um valor infinito à medida que ele se aproxima da velocidade da luz (...) (GLEISER, A dança do universo, p. 277)*

"A massa é uma forma de energia" é outra afirmação incorreta. A energia cinética, a energia potencial gravitacional, a energia química, a energia térmica, etc., são formas de energia, a massa não é.

A relação entre massa e velocidade não foi deduzida da relação $E = mc^2$ – ela é mais antiga, e vem do estudo do momento do campo eletromagnético em torno de uma carga em movimento. Antes de 1905, a relação entre massa e velocidade já havia sido deduzida e testada experimentalmente (ver MARTINS 1989).

> *Em outras palavras, nenhum objeto com extensão espacial e com massa pode atingir a velocidade da luz. Ela é, mesmo que as histórias de ficção científica insistam em afirmar o contrário, a velocidade mais alta da Natureza. (GLEISER, A dança do universo, p. 277)*

Seria conveniente ser um pouco mais cauteloso. Os táquions, por exemplo, não são inconsistentes com a teoria da relatividade (MARTINS 1986b). Na página seguinte do livro, encontra-se uma advertência de Whitehead que o próprio

autor deveria levar em consideração: "Qual será o absurdo de hoje que será a verdade de amanhã?"

V – Teoria quântica

O capítulo seguinte do livro introduz a problemática da teoria quântica com uma discussão sobre a cor da luz emitida por um corpo aquecido:

> *No entanto, até o início do século XX (...) Para piorar ainda mais as coisas, ninguém sabia por que certos objetos, como, por exemplo, uma barra de metal ou filamentos usados em lâmpadas, emitem luz de cores diferentes quando aquecidos a temperaturas diferentes. (GLEISER, A dança do universo, p. 278)*

> *Num forno realmente potente, a barra metálica se tornaria cada vez mais amarelada, até que, a temperaturas extremamente altas, ela emitiria uma luz azulada. (...) A física clássica podia explicar esse fenômeno combinando argumentos da termodinâmica e do eletromagnetismo de Maxwell. Se a barra metálica é feita de cargas elétricas que podem vibrar (ainda não existia um modelo do átomo!), quanto mais quente a barra, mais rapidamente as cargas vibram, emitindo radiação de freqüência cada vez mais alta. (GLEISER, A dança do universo, p. 279)*

É claro que essas duas citações se contradizem, pois a primeira afirma que não se conseguia explicar a variação de cores, e a segunda diz que era possível explicá-la. Na verdade, já existia uma explicação (dada por Wien), diferente da apresentada no livro.

A segunda citação diz que "a barra metálica se tornaria cada vez mais amarelada, até que, a temperaturas extremamente altas, ela emitiria uma luz azulada", o que não está correto. A barra se tornaria mais amarelada, *depois branca*, e depois (se não derretesse) ficaria azulada. Na verdade, nenhum sólido conhecido pode atingir temperaturas tão altas (e nenhum forno, também).

A física clássica explicava o deslocamento das freqüências luminosas em função da temperatura, mostrando que a freqüência do máximo de intensidade devia ser proporcional à temperatura absoluta. A explicação não dependia do eletromagnetismo – era puramente termodinâmica.

A explicação dada no livro ("quanto mais quente a barra, mais rapidamente as cargas vibram") está incorreta, sob o ponto de vista da física clássica. Admitindo-se cargas elétricas que oscilam (como foi feito primeiramente por Lorentz

e, depois, por Planck), a freqüência de oscilação seria uma característica fixa de cada oscilador (demonstra-se em qualquer livro de mecânica que a freqüência de um oscilador harmônico independe de sua energia), e não poderia aumentar com a temperatura. O que mudaria com a temperatura seria a *amplitude* das vibrações, e a distribuição de energia pelos osciladores.

> *CORPO NEGRO: Um objeto capaz de absorver radiação perfeitamente. Kirchhoff mostrou que o interior de uma cavidade oca pode imitar um corpo negro. (GLEISER, A dança do universo, p. 400)*

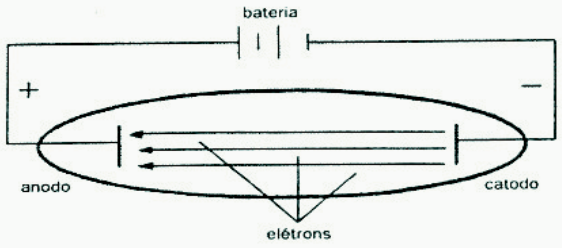
> *Já que uma superfície perfeitamente absorvente é negra, enquanto uma superfície perfeitamente refletora é branca, a cavidade de Kirchhoff, que absorvia todo o calor que recebia* ***mas não emitia nenhum****, foi chamada de corpo negro. (GLEISER, A dança do universo, p. 281)*

Errado. Um absorvedor ideal é também um emissor ideal, conforme provado por Kirchhoff através de argumentos termodinâmicos. Um pequeno orifício conectado a uma cavidade aquecida emite mais radiação do que qualquer tipo de superfície, à mesma temperatura.

> *De modo a estudar as propriedades da radiação no interior da cavidade, Kirchhoff fez um pequeno orifício numa de suas paredes, permitindo que um pouco de radiação "vazasse" para o exterior. (GLEISER, A dança do universo, p. 281)*

Errado. Kirchhoff não fez orifício nenhum, ele simplesmente *analisou* quais seriam as propriedades de um corpo negro dotado de um orifício. Tratava-se de um trabalho teórico, conceitual, e não de um experimento de furar um corpo oco.

Ao descrever a descoberta dos raios X, o livro apresenta uma figura errônea, sob os pontos de vista histórico e físico (GLEISER, *A dança do universo*, p. 289, fig. 8.3).



Nos tubos de raios catódicos utilizados inicialmente por Röntgen e outros pesquisadores para produzir raios X, o ânodo não ficava na frente do cátodo, e sim ao lado. O feixe de raios catódicos que saía do cátodo caminhava em linha reta e atingia o vidro do tubo. O desenho apresenta um esquema de uma *bateria* ligada ao tubo de descarga, produzindo os raios X. Isso é impossível, pois somente com altas voltagens (milhares de volts) é possível produzir-se raios X. Por isso, Röntgen e os pesquisadores da época utilizavam bobinas de indução, capazes de produzir uma diferença de potencial de dezenas (às vezes centenas) de milhares de volts.

A descrição da descoberta da radioatividade apresenta também inúmeros problemas.

> *Um ano após a descoberta de Röntgen, o físico francês Henri Becquerel resolveu investigar se a luz do Sol podia fazer com que certos materiais se tornassem fosforescentes. (GLEISER, A dança do universo, p. 291)*

Além de ser uma informação histórica incorreta (MARTINS 1990), isso não faz sentido sob o ponto de vista científico. Os corpos fosforescentes são exatamente os que permanecem luminosos durante algum tempo, no escuro, após serem submetidos à luz do Sol ou a outra luz forte. Isso era conhecido por todos, e Becquerel e seu pai eram especialistas em luminescência. O que Becquerel estava procurando, um mês após a descoberta de Röntgen, era se os materiais fosforescentes podiam emitir raios X (ver MARTINS 1997).

Passando à teoria quântica, aparecem conceitos não muito corretos, como por exemplo:

> *A órbita mais próxima do núcleo, a mais interna, é chamada de estado fundamental do átomo de hidrogênio. (GLEISER, A dança do universo, p. 295)*

Não é a *órbita* que se chama de estado fundamental. O estado fundamental do átomo de hidrogênio é o seu estado mais estável, em que ele possui a menor energia possível, e não pode emitir radiação Isso ocorre (na antiga teoria de Bohr) quando o seu elétron se encontra na órbita mais interna. No entanto, mesmo quando a idéia das órbitas eletrônicas caiu, continuou sendo possível utilizar o conceito de estado fundamental, justamente porque ele não é definido em função de uma órbita e sim de um estado de energia mínima.

> *[Bohr] ... sabia que, quanto mais perto o elétron estava do núcleo, mais forte seria a atração elétrica entre os dois.*

> ***Portanto**, o elétron no estado fundamental precisa de energia extra para mover-se até uma órbita mais elevada (um "estado excitado"), mais distante do núcleo. (GLEISER, A dança do universo, p. 295)*

Novamente, *órbita* não é *estado*. Mas há um problema físico mais grave aqui. O "portanto" está relacionando duas coisas que não estão associadas de forma correta. O elétron precisa de energia extra para se afastar do núcleo *se e somente se* a força entre o elétron e o núcleo for atrativa. Mesmo se a força não aumentasse com a proximidade (se ela fosse constante, ou se diminuísse para pequenas distâncias), desde que ela fosse *atrativa*, seria necessário fornecer energia para afastar o elétron do núcleo. Há muitos outros pontos no livro em que também são afirmadas relações lógicas inexistentes.

Referindo-se à teoria do átomo de Bohr, o livro comenta:

> *Finalmente, o mistério por trás dos espectros dos elementos fora desvendado! (GLEISER, A dança do universo, p. 296)*

Essa frase dá a impressão de que Bohr chegou à explicação que é aceita até hoje (o que não é verdade).

> *A noção de que uma realidade objetiva existe independentemente da presença de um observador, parte fundamental da descrição clássica da Natureza, tem de ser abandonada. (GLEISER, A dança do universo, p. 299)*

Se isso fosse verdade, não seria possível aplicar a Física ao estudo de fases do universo nas quais não havia observadores e a própria cosmologia seria impossível. A interpretação acima colocada da teoria quântica não se coaduna com a prática científica, que é realista.

> *A energia da órbita eletrônica tem uma **correspondência unívoca** com o número de nós da onda estacionária: quanto maior o número de nós, maior a distância entre a órbita e o núcleo. (GLEISER, A dança do universo, p. 302, legenda da fig. 8.5)*

O texto dá ao leitor a impressão de que a teoria de De Broglie é geométrica e fácil de ser entendida: precisa-se de mais espaço para colocar mais nós, por isso as órbitas maiores são as que possuem mais nós. Não é essa a idéia de De Broglie. Na teoria que ele formulou, o que existe é uma relação direta entre o

comprimento de onda associado ao elétron e o seu momento ($p=h/\lambda$). Se considerarmos dois átomos hidrogenóides diferentes, não haverá uma correspondência unívoca entre o número de nós e a energia da órbita correspondente, nem entre o número de nós e a distância ao núcleo.

Em relação à interpretação da teoria quântica, o livro afirma:

> *4) não podemos determinar se os constituintes fundamentais da matéria são ondas ou partículas, a famosa "dualidade onda-partícula"; 5) ao observarmos um sistema físico influenciamos seu comportamento; não existe mais uma separação clara entre observador e observado; [...] 7) não podemos determinar a localização de um objeto – apenas afirmar a probabilidade de ele estar aqui ou ali. Ou seja, devemos abandonar uma descrição estritamente determinista dos fenômenos naturais, pelo menos na escala atômica. (GLEISER, A dança do universo, pp. 251-2)*

Com relação aos pontos relativos à mecânica quântica, é sempre conveniente diferenciar entre a *interpretação* tradicional (Copenhagen) da teoria, e aquilo que a própria teoria permite dizer. Por outro lado, mesmo dentro da interpretação tradicional, é necessário tomar certos cuidados. Tanto na física clássica quanto na física quântica, ao observarmos um sistema físico estamos influenciando seu comportamento. A diferença principal é que, na física clássica, supõe-se a possibilidade de reduzir-se indefinidamente ou calcular e compensar exatamente as perturbações introduzidas – e isso é impossível na física quântica, onde as perturbações possuem um mínimo correspondente ao quantum de ação, e não podem ser reduzidas indefinidamente nem compensadas. Em um outro sentido, é o arranjo experimental que determina a natureza daquilo que vai ser observado (por exemplo: se vamos tentar localizar um elétron, ou medir seu momento), e na teoria quântica há limitações para a medida simultânea de duas grandezas canonicamente associadas. Já a idéia da impossibilidade de separar o observador daquilo que está sendo observado é uma forma um pouco forte demais de representar o conteúdo da teoria quântica.

Dentro da teoria quântica, ao contrário do que afirma o livro, podemos determinar a posição de um elétron, por exemplo, com a precisão que quisermos. O que não é possível é determinar *ao mesmo tempo* uma coordenada e o momento conjugado.

VI – Relatividade geral e princípio de equivalência

A apresentação que o livro faz da relatividade geral também introduz noções problemáticas.

6) a presença de matéria deforma a geometria do espaço e altera o fluxo do tempo (GLEISER, A dança do universo, pp. 251-2)

A presença da matéria, na relatividade geral, altera as propriedades do espaço-tempo, mas é importante complementar afirmando que mesmo no vácuo o espaço-tempo pode estar também deformado – ou seja, as alterações produzidas pela matéria não estão restritas ao local onde a própria matéria está.

(...) os efeitos da matéria sobre a geometria do espaço ou sobre o fluxo do tempo são desprezíveis para objetos mais leves do que estrelas. (GLEISER, A dança do universo, p. 252)

Errado. O campo gravitacional da Terra é perfeitamente observável por todos nós, que temos peso e observamos objetos caindo, e esse campo, na teoria da relatividade geral, é interpretado como uma deformação do espaço-tempo produzida pela matéria terrestre. Se o espaço-tempo nas proximidades da Terra não fosse significativamente alterado, os corpos se moveriam em linha reta, e não em trajetórias curvas.

Há efeitos gravitacionais, previstos pela relatividade geral, que são muito pequenos e difíceis de se detectar sem se utilizar campos mais fortes, como os das estrelas (por exemplo, deflexão da luz). No entanto, mesmo no campo terrestre, é possível detectar-se, por exemplo, o efeito do desvio para o vermelho (em experimentos de laboratório, sem observar estrelas), e portanto, ao contrário do que afirma o livro, os efeitos sobre o fluxo do tempo não são desprezíveis.

Ao tentar introduzir a necessidade de uma generalização da teoria da relatividade especial no tratamento da gravidade, o livro afirma:

Já que a força gravitacional produz movimento uniformemente acelerado, uma extensão do princípio da relatividade deveria incorporar de algum modo a gravidade. (GLEISER, A dança do universo, p. 320)

Non sequitur. Dentro de um capacitor de placas paralelas, o campo elétrico produz um movimento uniformemente acelerado em uma carga elétrica. Será que daí se segue que "uma extensão do princípio da relatividade deveria incorporar de algum modo a eletricidade"?

O princípio de equivalência da relatividade geral é usualmente introduzido por meio de exemplos de um elevador acelerado ou em queda livre, mas o livro em discussão apresenta várias idéias incorretas, ao falar sobre isso:

Quanto mais rapidamente o elevador descer, mais leve você se sentirá. (GLEISER, A dança do universo, p. 321)

Errado. Em qualquer curso de física geral, aprende-se que o peso aparente de uma pessoa dentro de um elevador não depende da *velocidade* do elevador, e sim de sua *aceleração* (ver, por exemplo, HALIDAY *et al. Fundamentos da física* vol. 1, pp. 86-7). Esteja o elevador subindo ou descendo, depressa ou devagar, se a velocidade for constante, o peso será o mesmo.

O mesmo erro aparece depois:

Imagine um elevador subindo; a aceleração extra do elevador faz com que você se sinta mais "pesado", ou seja, ela aumenta a força gravitacional que você sente. (GLEISER, A dança do universo, p. 323)

Aceleração não é sinônimo de velocidade. O elevador pode estar subindo e mesmo assim a pessoa pode se sentir mais leve (se a velocidade estiver diminuindo).

Por exemplo, no interior do elevador em queda livre não existe gravidade, e, portanto, não existe aceleração; objetos que se movem com velocidade constante no elevador continuarão a mover-se com velocidade constante se o elevador estiver em queda livre. Se eles estavam inicialmente em repouso entre si, irão permanecer em repouso. Em outras palavras: dentro do elevador em queda livre, os princípios da relatividade especial são perfeitamente válidos. (GLEISER, A dança do universo, p. 321)

É preciso deixar claro que existe uma diferença entre uma região estudada e o referencial utilizado. No interior do elevador existe ou não gravidade, dependendo do referencial. Para um referencial parado em relação ao solo, tudo o que está dentro do elevador está caindo, de modo acelerado, por causa da ação da gravidade. Esse mesmo fenômeno, em relação a um referencial parado em relação ao próprio elevador, é descrito de um modo diferente: nenhum dos objetos dentro do elevador está acelerado em relação ao elevador.

A frase "*objetos que se movem com velocidade constante no elevador continuarão a mover-se com velocidade constante se o elevador estiver em queda livre*" parece não ter sentido. Os objetos já estavam se movendo com velocidade constante antes que o elevador estivesse em queda livre? Eles não sofriam a aceleração da gravidade?

"***Em outras palavras:*** *dentro do elevador em queda livre, os princípios da relatividade especial são perfeitamente válidos*" – isso não é correto. Trata-se de outro exemplo em que o livro afirma uma conexão lógica inexistente. Aquilo que precede essa frase não permite concluir que o princípio da relatividade e o princípio da constância da velocidade da luz são válidos em relação ao referencial do elevador (e que não são válidos em relação a outro referencial). A única coisa que foi mostrada foi que os corpos, em relação ao referencial do elevador em queda livre, parecem não estar sujeitos a forças externas, e que se movem de modo aparentemente inercial. Como o livro não esclareceu o conceito de referencial inercial, não dá para conectar isso com a relatividade especial.

> *(...) para um observador no interior de uma cabine (como um elevador, por exemplo), sem contato com o mundo exterior, seria impossível distinguir entre a aceleração causada pela gravidade e a aceleração causada por qualquer outra força. (GLEISER, A dança do universo, pp. 321-2)*

Esta frase está incorreta. É claro que é possível distinguir, por exemplo, a aceleração causada pela gravidade e a aceleração causada por um campo elétrico: a primeira é igual para todos os corpos, a segunda é diferente para corpos com diferentes razões entre carga elétrica e massa. O que o autor deveria dizer é que seria impossível distinguir entre um campo gravitacional e os efeitos produzidos pela aceleração uniforme da própria cabine, em uma região desprovida de campo gravitacional.

> *Qualquer campo gravitacional pode ser simulado por um referencial acelerado. (GLEISER, A dança do universo, p. 323)*

Isso só vale para campos gravitacionais uniformes, ou para campos em uma região infinitesimal do espaço: é impossível simular um campo que varia de ponto para ponto, como o da Terra, por um referencial acelerado. Na prática, pode-se distinguir os campos gravitacionais reais de um campo fictício gerado por aceleração do referencial, medindo-se as forças de maré, ou seja, a variação da aceleração com a posição no espaço. Isso pode ser feito com uma balança de Eötvös, por exemplo.

> *Enquanto você executava os experimentos, seus amigos iriam observá-lo do ponto de vista de um referencial inercial (velocidade constante). (GLEISER, A dança do universo, p. 325)*

Referencial inercial significa o mesmo que velocidade constante? Velocidade constante em relação a quê? Isso não é o conceito correto de referencial inercial.

> *Assim que você joga a bola, sua espaçonave começa a acelerar para cima. Portanto, mesmo que você e a cabine sofram uma aceleração para cima, a bola, que não estava mais em contato com você ou com a cabine, não sofre nenhuma aceleração. (GLEISER, A dança do universo, p. 325)*

O texto transmite a impressão errônea de que, se a bola fosse jogada *depois* que a aceleração começasse, o resultado seria diferente. Não é por ter sido jogada *antes* que a bola não sofre nenhuma aceleração. Mesmo se a espaçonave já estivesse acelerada, quando a bola fosse jogada, ela não teria aceleração, em relação a um referencial inercial.

> *DESVIO GRAVITACIONAL PARA O VERMELHO: A amplificação do comprimento de onda da radiação emitida na presença de um campo gravitacional não uniforme. (GLEISER, A dança do universo, p. 400)*

O termo "amplificação" (também usado na pág. 328) não é adequado (é utilizado em física no sentido de aumento de intensidade, e não de mudança de comprimento de onda). Por que não usar simplesmente "aumento"? Por outro lado, o desvio gravitacional para o vermelho não pode ser descrito como um aumento de comprimento de onda da radiação *emitida na presença de um campo gravitacional.* Trata-se de um aumento de comprimento de onda que ocorre quando a radiação passa de uma região do espaço para outra que esteja a um *potencial gravitacional* mais alto do que a primeira. É um efeito relacional, e não local. Nenhuma das duas regiões precisa ter um campo gravitacional presente. Nem sempre que há campo gravitacional há desvio para o vermelho: pode haver desvio para o azul – quando a luz passa para um ponto de menor potencial gravitacional – ou não haver desvio – quando a radiação se desloca perpendicularmente ao campo gravitacional. No corpo do livro, também está errado:

> *Ele propôs que, sob a ação de campos gravitacionais intensos, as fontes de radiação eletromagnética, isto é, cargas elétricas vibrando em algum material, teriam seus comprimentos de onda afetados; quanto mais forte o campo, maior o comprimento de onda, como se o campo estivesse esticando as ondas*

eletromagnéticas produzidas. (GLEISER, A dança do universo, pp. 327-8)

Fontes de radiação não possuem comprimentos de onda. Mas o ponto principal é que, como já foi indicado acima, não é a existência de um campo, nem a circunstância de que ele seja forte, que altera o comprimento de onda. O comprimento de onda muda quando a onda passa de uma região para outra. Em qualquer ponto do campo, por mais forte que este seja, uma medida local da radiação emitida naquele mesmo ponto indicará sempre o mesmo comprimento de onda.

Há um outro ponto problemático. Neste ponto do livro, após falar sobre a teoria quântica, o autor já não deveria mais associar emissão de radiação eletromagnética com vibração de cargas elétricas. No entanto, o livro continua a utilizar esse modelo clássico:

> *(...) na presença de campos gravitacionais intensos, os átomos vibram mais lentamente (menor freqüência), conseqüentemente produzindo ondas de maior comprimento. Como as freqüências vibracionais atômicas são extremamente regulares, podemos considerar os átomos como sendo pequenos relógios, batendo de modo furiosamente rápido. (GLEISER, A dança do universo, p. 328)*

Na visão quântica, a freqüência da luz não tem nada a ver com uma freqüência de vibração dos átomos. Ela está associada apenas à variação de energia do átomo, pela relação $\nu = \Delta E/h$. No Glossário, onde deveriam aparecer os conceitos científicos atualizados, encontramos:

> *RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA: Radiação emitida por cargas elétricas quando em movimento acelerado. (GLEISER, A dança do universo, p. 406)*

Errado. A radiação gama, por exemplo, não é emitida em um processo de aceleração de cargas, de acordo com aquilo que se conhece. A luz emitida por um átomo não é mais interpretada como o resultado de aceleração de cargas elétricas. A freqüência da luz não é um efeito de elétrons vibrando dentro do átomo.

> *O desvio para o vermelho é, portanto, equivalente a uma diminuição no ritmo dos relógios: os campos gravitacionais afetam o fluxo do tempo, ou seja,* ***quanto mais forte o campo****, mais lento o fluxo! (GLEISER, A dança do universo, p. 328)*

Novamente: o ritmo dos relógios não é uma função do campo gravitacional e sim do potencial gravitacional. Suponhamos uma esfera material oca, de grande massa. No interior dessa esfera oca, o campo gravitacional da esfera é nulo. No entanto, comparado com um relógio distante, um relógio no interior dessa esfera oca terá um ritmo mais lento. Também no caso de um campo gravitacional razoavelmente uniforme, para dois pontos localizados a diferentes alturas os ritmos dos relógios serão diferentes, mesmo se os campos forem iguais nesses dois pontos.

VI – Espaços não euclidianos

O conceito de espaço-tempo curvo é fundamental na teoria da relatividade geral, mas desde sua introdução o livro se enreda em dificuldades:

> *(...) em vez de afirmarmos que o campo gravitacional defletiu a trajetória do raio luminoso, podemos igualmente afirmar que o raio luminoso seguiu uma trajetória curva porque o próprio* ***espaço*** *era curvo! A trajetória curva é o caminho mais curto possível nessa geometria deformada. (GLEISER, A dança do universo, p. 330)*

Há problemas nesse tipo de interpretação simplificada. Pode-se dizer que o raio luminoso seguiu uma trajetória curva porque o **espaço-tempo** era curvo. A luz *não* percorre o caminho mais curto possível no espaço (tridimensional) e sim o menor intervalo relativístico no espaço-tempo. Se dissermos que o próprio espaço é curvo e que a luz segue uma trajetória curva por causa disso, não poderemos entender pór qual motivo a trajetória de cada tipo de coisa vai ser diferente (uma pedra, uma bala de revólver e a luz terão trajetórias diferentes, quando lançados do mesmo ponto, na mesma direção). Todos teriam que ser canalizados na mesma trajetória, pelo espaço curvo, se a explicação do livro fosse a correta.

A mesma afirmação incorreta de que tudo se reduz a utilizar *espaços* curvos reaparece em vários pontos (ver, por exemplo, pág. 332).

> *Sabemos que a superfície da mesa é plana porque podemos vê-la "de fora", ou seja, de um ponto de vista tridimensional. Para vermos um espaço plano de três dimensões, precisaríamos existir num espaço de quatro dimensões. (GLEISER, A dança do universo, p. 331)*

Qualquer superfície bidimensional pode ser considerada como embebida em um espaço euclidiano de três dimensões. Qualquer espaço (Riemanniano) de três dimensões pode ser considerado embebido em um espaço euclidiano de **seis**

dimensões (e não quatro). Na verdade, teríamos que "existir" em um espaço de seis dimensões para poder "ver" diferentes espaços de três dimensões e perceber se eles são "planos" (chatos) ou não.

> *Imagine uma superfície elástica bem grande, como as usadas em camas elásticas, que foi cuidadosamente esticada na forma de um quadrado perfeitamente plano. Coloque uma bola metálica pesada no centro da superfície. A deformação causada pela bola na forma da superfície é semelhante à deformação causada na geometria do espaço devido à presença de uma massa (...). (GLEISER, A dança do universo, p. 331)*

Esse tipo de analogia, muito usado em livros de divulgação, passa uma idéia bastante incorreta. A bola metálica produz uma deformação na superfície elástica por causa de uma *força* (seu peso) que ela exerce sobre a superfície. Imagine a cama elástica em uma estação espacial, onde parece não existir gravidade. Coloque sobre a superfície elástica uma grande bola metálica. O que vai acontecer? Nada. A presença de matéria não deforma a superfície elástica. A analogia falhou.

Muito bem, precisamos pressionar a superfície elástica para produzir uma deformação. Vamos empurrar a bola, e deformar a cama elástica. Teremos agora uma boa analogia? Não. Na teoria da relatividade geral, uma fonte de campo deforma o espaço-tempo, mas isso não é devido a uma *força* exercida pela fonte do campo (na verdade, queremos *explicar* a força gravitacional, e por isso utilizamos uma coisa que não é uma força).

> *Se jogarmos algumas bolinhas de gude sobre o elástico deformado, elas se moverão em trajetórias curvas. Perto da massa, as bolas de gude seguirão órbitas circulares ou elípticas, antes que a fricção as faça espiralar em direção ao "buraco" do centro. (GLEISER, A dança do universo, pp. 331-2)*

Aqui, a analogia começa a ficar pior ainda. Se colocarmos uma bolinha de gude sobre uma superfície curva *em um local onde não exista a gravidade*, a bolinha ficará parada. Ela não se aproximará nem afastará da bola metálica. Uma deformação geométrica não produz nada parecido com uma atração. A bolinha sobre a superfície curva descrita no livro só se move porque existe a gravidade terrestre. Ela também começaria a se mover se estivesse sobre uma superfície *plana* inclinada, ou se não houvesse superfície nenhuma. Não é a curvatura que produz o movimento. O problema grave dessa analogia é que se está utilizando um modelo cujo funcionamento depende da gravidade terrestre para explicar o fenômeno

gravitacional. Minha experiência didática mostra que os estudantes (infelizmente) ouvem falar sobre essa analogia e que fazem enormes confusões por causa disso.

A analogia da cama elástica só parece funcionar porque nela interferem, *duas vezes*, a própria força gravitacional (para deformar a superfície e para mover as bolinhas de gude). No entanto, já que se quer explicar exatamente a força gravitacional, é inválido utilizar como modelo um fenômeno que só ocorre por causa da própria gravidade.

Na relatividade geral, o movimento de uma partícula no campo gravitacional é descrito sem se falar em forças, introduzindo um espaço-tempo com métrica curva, e calculando-se as geodésicas nesse espaço-tempo. Em um sentido matemático bem preciso, as partículas descrevem "retas" (geodésicas) do espaço-tempo, mas não "retas" (geodésicas) do espaço. A analogia da cama elástica não capta nenhum desses aspectos – desvia apenas a atenção do leitor, que pensa ter entendido alguma coisa, mas que não pode captar pela analogia nada de correto sobre a relatividade geral.

Também está errado dizer que "Perto da massa, as bolas de gude seguirão órbitas circulares ou elípticas". A única possibilidade de surgirem órbitas elípticas (desprezando-se o atrito) será se a superfície tiver exatamente uma forma adequada para simular uma força inversamente proporcional ao quadrado da distância. Suponhamos que a superfície seja descrita em função de r, ϕ e z (coordenadas cilíndricas). A projeção horizontal do movimento das bolas de gude poderá ser elíptica apenas se valer a relação

$$\sin 2\alpha = k/r^2$$

onde α = arctan (dz/dr). Isso exige, portanto, condições extremamente especiais da forma da superfície elástica. Aliás, se a cama elástica for quadrada (como no caso do livro), isso nunca será possível.

Na página 332, encontramos uma referência à nota (9), que diz:

> *Suficientemente perto da massa central, as trajetórias são linhas verticais na direção do centro de atração. (GLEISER, A dança do universo, p. 422)*

Não é correto. Perto ou longe da massa central, as trajetórias podem ser curvas ou retas radiais. Isso depende da direção da velocidade inicial do corpo, ou seja, de seu momento angular. Se o momento angular for nulo, as trajetórias serão retas radiais.

Ao descrever o desenvolvimento das geometrias não-euclidianas, o livro comenta:

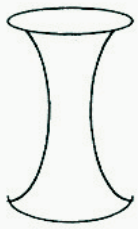
> *Mais ainda, demonstraram que as geometrias não euclidianas mais simples são de dois tipos: espaços podem ter curvatura positiva, como a superfície (bidimensional) de uma bola, ou podem ter curvatura negativa, como a superfície (bidimensional) de uma sela de cavalo. Geometrias mais complicadas podem ser reconstruídas a partir de combinações desses dois tipos básicos (GLEISER, A dança do universo, p. 332)*

Não é bem isso. As geometrias não euclidianas mais simples são aquelas que possuem curvatura constante e igual em todos os pontos, isto é, que são homogêneas. Tanto uma bola esférica quanto uma de futebol americano possuem curvatura positiva, mas uma (a esférica) apresenta uma geometria mais simples. É preciso separar dois conceitos independentes: o tipo de curvatura (positiva, negativa, nula) e a simplicidade do espaço (curvatura constante, variável). A última frase também é problemática: não se pode compor qualquer tipo de superfície com partes de esferas e de superfícies em sela (pense, por exemplo, em um cone).

O conceito de *curvatura gaussiana* está associado à existência de um excesso (ou defeito) angular. Em um triângulo, o excesso angular é a diferença entre a soma dos ângulos internos do triângulo e 180°. Em um quadrado, o excesso angular é a diferença entre a soma dos seus ângulos internos e 360°. A curvatura gaussiana média de uma região (por exemplo, triangular ou quadrada) é dada pela razão entre a diferença angular e a área da região. Esse conceito pouco óbvio não foi passado no livro, e no entanto fica-se o tempo todo falando em "curvatura", como se fosse um conceito intuitivo.

> *Espaços planos ou com curvatura negativa são chamados de espaços abertos; na maioria deles, se você caminhar na mesma direção, nunca voltará ao seu ponto de partida. (GLEISER, A dança do universo, p. 333)*

Novamente estão sendo confundidos dois conceitos independentes. Uma superfície cilíndrica (ou cônica) é um espaço plano (com curvatura gaussiana nula), mas pode-se voltar ao ponto de partida caminhando sempre na mesma direção (dependendo da direção). O mesmo pode ocorrer em superfícies de curvatura negativa. Imagine um vaso de flores que seja curvo, "quase" cilíndrico, mas com a base e a boca mais largos do que a parte central.



A curvatura na região central será negativa, mas é possível caminhar na mesma direção e voltar ao ponto de partida (dependendo da direção).

> *Espaços de curvatura positiva são chamados de espaços fechados; se você caminhar na mesma direção, acabará voltando ao seu ponto de partida, como podemos facilmente visualizar investigando a superfície de um globo. (GLEISER, A dança do universo, p. 334)*

Também não está correto. Está, novamente, confundindo dois conceitos. Uma superfície esférica é uma superfície que é, ao mesmo tempo, fechada e com curvatura positiva, mas isso é apenas um caso especial. Uma superfície de um parabolóide ou hiperbolóide de revolução, por exemplo, tem curvatura positiva em todos os pontos, mas, partindo-se de um ponto e caminhando-se sempre na mesma direção, não se retorna ao ponto de partida, exceto em direções especiais (como no caso do cilindro e do cone). Existem, aliás, pontos dos quais *nunca* se retorna ao ponto de partida, nessas superfícies. Pense-se, também, em um elipsóide de revolução: a partir de um ponto arbitrário, também só é possível voltar ao ponto de partida se a direção do movimento for muito especial.

> ***Portanto**, geometrias fechadas são finitas; elas têm volume finito. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 334)*

Como o conceito de geometria fechada tinha sido introduzido a partir da existência de geodésicas fechadas, uma coisa não pode ser concluída a partir da outra. Uma superfície cilíndrica possui geodésicas fechadas, mas área infinita.

Resumindo: há grandes problemas na conceituação geométrica apresentada, porque o livro fica passando de um conceito para outro, como se fossem equivalentes, quando na verdade são conceitos diferentes e – em grande parte – independentes.

> *Após dominar as sutilezas da geometria não euclidiana, Einstein ainda tinha pela frente um grande desafio: incorporar a geometria à física de tal modo que a teoria final fosse consistente tanto com o princípio de equivalência (...) como com a lei mais sagrada da física, a lei da conservação da energia e quantidade de movimento. Após muitas tentativas fracassadas, no outono de 1915, Einstein obteve as equações da relatividade geral em sua forma final. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 334)*

Compreende-se a partir daí que a teoria da relatividade geral incorpora a lei da conservação da energia. Não é verdade. As equações de campo da relatividade geral utilizam, como fonte do campo, o tensor de momento-energia da relatividade especial, e utilizam a condição matemática de que o divergente desse tensor seja nulo. Isso significa que a relatividade geral incorpora a conservação do momento-energia da relatividade especial. *Ocorre, no entanto, que esse tensor de momento-energia inclui momento e energia de todos os tipos* exceto *gravitacional.* Para incluir a energia do campo gravitacional nas transformações de energia, foi proposto inicialmente um pseudo-tensor de energia do campo gravitacional (WEINBERG, *Gravitation and cosmology*, pp. 165-71), mas, como o próprio nome mostra, isso não conseguia resolver os problemas, pois era possível escolher-se um referencial no qual as componentes do pseudo-tensor se anulavam, e nesse referencial não havia conservação da energia total. Houve várias tentativas posteriores (e recentes) de incorporar a conservação da energia à relatividade geral, mas todas essas tentativas *alteram* a teoria de Einstein. Não existe, até hoje, uma solução consensual para o problema. Com certeza, pode-se apenas afirmar que a teoria de Einstein *não incorporava* "a lei mais sagrada da física, a lei da conservação da energia e quantidade de movimento".

> *Das duas outras previsões de sua teoria, o desvio gravitacional para o vermelho e a deflexão de raios luminosos, apenas a última podia – na época – ser observada. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 334)*

Não está certo. O desvio gravitacional para o vermelho também podia ser observado, e foi procurado (no espectro do Sol) *antes* da deflexão de raios luminosos. Os resultados iniciais foram *contrários* às previsões da teoria da relatividade (MARTINS 1986a).

VII – Cosmologia relativística

Como o livro tem por objetivo central discutir modelos cosmológicos, esperaríamos que, pelo menos nessa parte, o texto fosse rigoroso e correto. Mas isso não ocorre em muitos pontos.

> *Embora vazio, o Universo de De Sitter tem movimento! Sem a presença de matéria, a repulsão cósmica alimentada pela constante cosmológica provoca a expansão da geometria. Enquanto o Universo de Einstein tem matéria sem movimento, o de De Sitter tem movimento sem matéria; de certo modo, os dois modelos são complementares (GLEISER,* A dança do universo, *p. 340)*

Não é verdade. O universo de De Sitter é estático: tem uma métrica que não é função do tempo (ou seja, a geometria não se expande). Esse modelo cosmológico, em si, não tem movimento. No entanto, *colocando-se corpos de prova nesse universo*, e supondo que a presença desses corpos de prova não altera a métrica, mostra-se que eles irão se afastar um do outro, com velocidade crescente (ver NORTH, *The measure of the universe*, pp. 87-9).

> *Sem considerar detalhes que não são importantes para nós, Friedmann distinguiu duas classes principais de soluções: as que descreviam um Universo em expansão e as que descreviam um Universo oscilatório. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 345)*

> *Vimos que os modelos de Friedmann, com sua geometria fechada, levam a um Universo que, em princípio, alternará períodos de expansão de contração. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 387)*

Havia também os modelos em que havia apenas contração, e aqueles em que havia contração até uma densidade inferior ao limite de Einstein, e posteriormente expansão indefinida. A tabela da página 347 também está incompleta (ver NORTH, *The measure of the universe*, pp. 111-7).

> *RAIO DE CURVATURA: O parâmetro dependente do tempo que determina a distância relativa entre dois observadores em*

> *modelos cosmológicos homogêneos e isotrópicos. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 406)*

Errado. O raio de curvatura de um modelo cosmológico nem sempre depende do tempo e a definição de raio de curvatura não tem nada a ver com observadores. O "raio de curvatura" é um conceito matemático, que pode ser aplicado não só a modelos cosmológicos mas a qualquer objeto geométrico (por exemplo, a superfície de uma esfera).

Ao descrever o modo de estimar as distâncias de estrelas e galáxias, o livro afirma:

> *O procedimento tradicional é medir a intensidade da fonte luminosa (a lanterna) a uma distância fixa (essa intensidade é chamada de* luminosidade intrínseca*), e usar a* lei do quadrado inverso *para estimar a distância. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 351)*

O exemplo da lanterna não é bom, didaticamente, porque a luz da lanterna é direcionada, não se espalhando isotropicamente para todos os lados. A pequenas distâncias de uma lanterna, a intensidade luminosa não obedece à lei do inverso do quadrado da distância. Seria melhor utilizar a velha analogia da vela. Aliás, em português não se diz "lei do quadrado inverso" [*inverse square law*], e sim "lei do inverso do quadrado da distância".

Por outro lado, "luminosidade intrínseca" não é a intensidade a uma distância fixa, e sim a potência luminosa total emitida pela fonte. Se chamarmos de $\underline{S}$ o fluxo luminoso (medido em $J.m^{-2}.s^{-1}$) recebido a uma distância $\underline{d}$ de uma fonte isotrópica, a luminosidade $\underline{L}$ da fonte é $L=4\pi d^2 S$ (medido em $J.s^{-1}$)

No texto, a apresentação da lei de Hubble está boa, mas no Glossário aparece:

> *LEI DE HUBBLE: Relação obtida empiricamente por Hubble em 1929, em que a distância e a velocidade de recessão de galáxias distantes são diretamente proporcionais.* A relação é conseqüência da expansão do Universo. *(GLEISER,* A dança do universo, *p. 404)*

A última frase está errada. Em diferentes modelos do universo em expansão há diferentes fórmulas que relacionam a distância e a velocidade de afastamento das galáxias distantes. A expansão do universo não tem por

conseqüência a existência de uma proporcionalidade entre distância e a velocidade de afastamento das galáxias.

> *De fato, se pudéssemos visualizar a evolução do Universo como um filme que podemos passar de trás para a frente ou vice-versa (...) passando o filme para trás, obrigatoriamente encontraríamos um instante no passado no qual as galáxias estariam agrupadas em uma região muito pequena do espaço. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 362)*

É claro que isso depende do modelo cosmológico, e não é portanto "obrigatório". É possível desenvolver modelos em que o universo tenha passado por uma fase mais densa, porém não muito diferente da atual (densidade máxima), e antes disso tivesse uma densidade menor. Isso ocorre em modelos com constante cosmológica.

Além disso, o final da frase está errado: as galáxias não iriam se aproximando indefinidamente, porque elas e as estrelas iriam se desfazendo. O que se poderia afirmar é que, se a expansão não partiu de uma certa densidade máxima, e se a matéria se conserva, a matéria estaria agrupada em uma região muito pequena do espaço.

> *À parte o abrupto aparecimento acausal do Universo em um determinado momento do passado, modelos cosmológicos evolucionários sofriam de um problema mais imediato: Hubble havia medido que o Universo é mais jovem do que a Terra. (GLEISER,* A dança do universo, *pp. 368-9)*

Nem todos os modelos cosmológicos evolucionários têm esses problemas. O primeiro modelo que Lemaître havia proposto, e que foi adotado por Eddington, supunha que a situação inicial do universo era um universo de Einstein, cheio de um gás homogêneo. Flutuações nesse gás iniciariam a formação de nuvens mais densas, nas quais iriam depois se formar as estrelas. Esse processo romperia também com o equilíbrio do universo de Einstein, e começaria lentamente uma expansão, que iria se acelerando com o passar do tempo. Nesse modelo, não havia início brusco, e a idade do universo podia ser muito maior do que o inverso da constante de Hubble.

> *A criação espontânea de matéria viola nossa lei mais querida, a lei da conservação da energia. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 370)*

A lei da conservação da energia, como já indiquei, não é mantida na relatividade geral. Por outro lado, utilizando raciocínios aproximados (quase newtonianos), pelo menos uma das versões do modelo do estado estacionário introduzia criação de matéria sem violação da conservação da energia: bastava considerar que a energia total da partícula criada (energia de repouso mais energia potencial gravitacional) era nula, e isso é bastante coerente com dados cosmológicos.

VIII – Física nuclear e partículas

Para explicar a energia liberada pelas estrelas, o livro introduz noções de física nuclear:

> *Já as reações nucleares que geram a energia das estrelas são "reações construtivas": a energia é liberada à medida que núcleos maiores são fundidos a partir de núcleos menores. (...) Esse conceito de fusão progressiva de núcleos maiores a partir de núcleos menores (...) (GLEISER,* A dança do universo, *p. 373)*

Não são os núcleos maiores que são fundidos. O verbo "fundir" significa derreter ou unir várias coisas entre si (quando se derretem juntas várias coisas, elas se unem). Assim, faz sentido falar na fusão de duas empresas pequenas para formar uma maior, mas não faz sentido falar na fusão da empresa maior em duas menores. As frases ficariam corretas se fossem: "à medida que núcleos menores são fundidos para formar núcleos maiores", e "fusão progressiva de núcleos menores para formar núcleos maiores". Há vários outros pontos do livro em que "fundir" e derivados estão usados de modo errado.

Ao representar por figuras a estrutura atômica (GLEISER, *A dança do universo*, p. 375, fig. 10.1) o livro apresenta uma visão há muito ultrapassada, como se os elétrons e núcleons fossem bolinhas, e os elétrons tivessem órbitas bem definidas em torno do núcleo (mais adiante, a fig. 10.2, pág. 383, continua representando prótons e até mesmo quarks como "bolinhas"). Por outro lado, a união de um próton e um nêutron não deveria ser chamada de "deutério" e sim de "dêuteron", e assim por diante. "Deutério" se aplica a um tipo de átomo, e não ao núcleo desse átomo.

Ao explicar a fusão nuclear, o livro descreve o processo de formação do hélio da seguinte forma:

> *E o hélio? Fundindo dois prótons e dois nêutrons, algo que pode ser feito de vários modos. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 376)*

e aqui o texto remete à nota (15):

> *(15) Por exemplo, fundindo dois deutérios, quatro átomos de hidrogênio, ou um trítio e um próton. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 424)*

Não ocorre um "vale tudo" na física nuclear. A fusão simultânea de quatro átomos de hidrogênio tem uma probabilidade minúscula, e nem é considerada nos cálculos que se costuma realizar. A probabilidade de fusão de dois dêuterons entre si, ou de um trítium e um próton, são diferentes e é necessário estudar as seções de choque para diferentes reações nucleares, para determinar qual é a mais viável, nas condições de temperatura consideradas. Nas condições em que se tenta produzir fusão controlada em laboratório, a reação utilizada não é nenhuma das que o livro indica, e sim:

$$H^2 \text{ (dêuteron)} + H^3 \text{ (trítion)} \rightarrow He^4 \text{ (núcleo de hélio)} + n + 17.6 \text{ MeV}$$

No interior das estrelas, a reação que ocorre também não é nenhuma das indicadas no livro, e sim a seguinte:

$$He^3 \text{ (núcleo de hélio)} + Hc^3 \text{ (núcleo de hélio)} \rightarrow He^4 \text{ (núcleo de hélio)} + p + p$$

Quando se produz uma fusão de dois dêuterons, a probabilidade de obter-se um núcleo de hélio H^4 é quase nula. Obtém-se H^3 e emissão de um próton ou nêutron.

> *Sempre que um processo de fusão ocorre, até o elemento ferro, com 26 prótons, energia é liberada. Essa energia é chamada de* energia de ligação. *(GLEISER,* A dança do universo, *p. 376)*

Errado. A energia que é liberada na fusão de dois núcleos é igual à *diferença* entre a energia de ligação do núcleo resultante e a soma das energias de ligação dos núcleos que estão se unindo (supondo que a energia cinética desses núcleos seja desprezível).

Mesmo para elementos abaixo do ferro, dependendo dos isótopos considerados, a fusão só é possível com fornecimento de energia.

(...) neutrinos, partículas que, como os fótons, não têm massa (...) (GLEISER, A dança do universo, p. 381)

Os fótons não possuem massa *de repouso*, mas pode-se associar massa aos fótons, pois eles possuem momento. Acreditava-se que os neutrinos também não possuiriam massa de repouso, mas atualmente acredita-se que possivelmente eles possuem uma pequena massa de repouso.

Liberados do complicado triângulo amoroso, os fótons iniciaram uma dança solitária através do Universo, desprezando daí por diante todas essas ligações e interações que parecem ser tão importantes para os constituintes da matéria. (GLEISER, A dança do universo, *p. 382)*

DESACOPLAMENTO: De acordo com o modelo do big-bang, desacoplamento é o evento que marca o período de formação dos átomos, quando fótons, ***livres das interações com prótons e elétrons, passam a propagar-se através do Universo.*** *(GLEISER,* A dança do universo, *p. 400)*

Errado. O desacoplamento é a transição na qual a energia *média* dos fótons cai a valores abaixo da energia de ionização dos átomos de hidrogênio, permitindo que se formem átomos estáveis. Os fótons não deixam de interagir com prótons e elétrons (continuam a interagir com a matéria até hoje).

Portanto, de acordo com o modelo do big-bang, o próprio Universo é um corpo negro (...) (GLEISER, A dança do universo, *p. 382)*

Um corpo negro é aquele que absorve praticamente toda radiação que incide sobre ele. Com pode incidir alguma radiação sobre o universo, se não existe nada fora dele? O conceito, nesse caso, não se aplica. O que o livro poderia explicar é que a característica básica do espectro de radiação de um corpo negro provém da existência de um equilíbrio termodinâmico na cavidade, e que a radiação residual do modelo do *big bang* teria propriedades semelhantes.

(...) e centenas de outras partículas que foram sistematicamente descobertas em aceleradores de partículas (...) (GLEISER, A dança do universo, *p. 388)*

Até a década de 1950, as grandes descobertas de partículas foram feitas na radiação cósmica, e não com aceleradores de partículas.

> *No entanto, se existe uma incerteza na medida de energia de um sistema, então é possível que a própria energia do seu estado fundamental flutue. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 391)*

São duas coisas distintas. Poderia haver uma incerteza nas medidas sem haver uma indeterminação na própria natureza (interpretações de variáveis ocultas).

> *Se chamarmos esse estado fundamental de um sistema de* vácuo quântico, *concluímos que, devido a essas flutuações em sua energia, o vácuo quântico tem sempre alguma estrutura interna ... (GLEISER,* A dança do universo, *p. 391)*

> *VÁCUO QUÂNTICO: O estado fundamental, ou seja, de menor energia, de um sistema quântico. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 407)*

Errado. Um átomo em seu estado fundamental não é chamado de "vácuo quântico". O vácuo quântico é uma região do espaço em que a densidade média de energia é nula.

> *Por exemplo, sabemos pela relatividade especial que energia e matéria podem ser convertidas uma na outra, conforme expressa a equação* $E = mc^2$. *(GLEISER,* A dança do universo, *p. 391-2)*

A relação $E = mc^2$, no seu domínio de validade, indica que há uma energia E associada a qualquer massa m, e vice-versa. Não se trata de uma *conversão*. Um elétron de massa m *tem* uma energia total $E = mc^2$; a equação não diz que o elétron pode ser criado a partir de energia pura, como por exemplo radiação eletromagnética (não pode) nem que ele pode se transformar em energia pura (não pode). Há outras leis que impedem isso (conservação do número leptônico, da carga, etc.).

> *Portanto, flutuações quânticas na energia do vácuo podem ser convertidas em partículas de matéria! Parece absurdo?* ***Talvez, mas esse fenômeno é rotineiramente observado em experimentos envolvendo colisões de partículas.*** *Essas*

> *partículas que surgem como flutuações do vácuo são conhecidas como* partículas virtuais, *vivendo por um tempo microscopicamente pequeno ... (GLEISER,* A dança do universo, *p. 392)*

A frase em negrito está errada. Essas flutuações *não são observadas*, justamente porque as partículas virtuais têm uma vida muito curta. As partículas virtuais são, é claro, teóricas. O que se observa em colisões de partículas é o surgimento de novas partículas em processos em que há conservação de energia, e essas partículas não são virtuais.

> *Como vimos, a cosmologia é a única disciplina da física que lida com questões que podem também ser legitimamente formuladas fora do discurso científico. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 396)*

Não vejo como se possa sustentar isso. Há um número ilimitado de contra-exemplos:

a) Questões sobre origens: De onde surgiram as montanhas? De onde surgiu a água? De onde surgiram as rochas? De onde surgiu o sabor salgado do mar?

b) Questões sobre causas: Por que o céu é azul? Por que as nuvens não caem? Por que a duração dos dias e das noites varia ao longo do ano? Por que a água fica dura quando esfria?

c) Questões sobre a natureza das coisas: O que são os raios? O que são as estrelas? O que é o ar?

d) Questões sobre constituintes: Como é o interior da Terra? Como é o interior dos vulcões? Como é o interior das pedras? Qual a diferença entre a água e o ar?

> *... a luz que recebemos agora de Andrômeda foi gerada 2 milhões de anos atrás! Ao mergulharmos nas profundezas do espaço estamos efetivamente viajando para o passado. (GLEISER,* A dança do universo, *p. 416)*

Errado. Quando olhamos para Andrômeda ou quando ouvimos um disco gravado por Carmen Miranda não estamos viajando efetivamente para o passado – estamos recebendo uma informação produzida no passado. Se pudéssemos viajar efetivamente para o passado, poderíamos interagir com esse passado (conversar com Carmen Miranda, por exemplo). A própria expressão "mergulhar nas profundezas do

espaço" é uma expressão literária atraente, mas vazia (quem olha para uma galáxia distante não está mergulhando nas profundezas do espaço).

IX – Comentários finais

A física moderna, por estar mais distante de nossas concepções intuitivas sobre o universo, é mais difícil de ser compreendida e explicada. Não é impossível, no entanto, descrever os resultados conceituais mais importantes da física moderna em linguagem qualitativa. A revista *Scientific American*, para citar apenas uma fonte, é um excelente exemplo de divulgação científica da física moderna, com artigos bem escritos, interessantes e ao mesmo tempo corretos.

Muitas vezes, as pessoas que se dedicam à divulgação científica transmitem informações errôneas, por vários motivos. Um primeiro motivo é que algumas vezes escrevem sobre algo que escapa ao seu domínio científico – por exemplo, uma pessoa com formação jornalística escrevendo sobre um tema altamente técnico, ou um cientista com treino em uma área específica escrevendo sobre outra área. Um segundo motivo que leva a conteúdos incorretos é a tentativa bem intencionada de tornar as informações compreensíveis, através de comparações e analogias, que infelizmente podem levar a deformações infelizes do conteúdo científico.

Há algumas condições básicas para se escrever um livro de divulgação sobre física moderna: ter uma excelente compreensão conceitual do assunto, percebendo as condições de validade e os limites de cada idéia, suas semelhanças e diferenças com idéias da física clássica; dispor de um bom estoque de comparações, analogias e ilustrações, utilizando-as cautelosamente e alertando o leitor para os pontos em que as semelhanças deixam de existir; e ser capaz de escrever com um estilo que capte a atenção do leitor. É preciso saber simplificar as idéias mais complicadas, mas sem falseá-las, pois um erro, depois de assimilado, dificilmente é erradicado.

X - Referências bibliográficas

FEYNMAN, Richard P., LEIGHTON, Robert B. & SANDS, Matthew. *The Feynman lectures on physics*. 3 vols. Reading: Addison-Wesley, 1965.

GLEISER, Marcelo. *A dança do universo. Dos mitos de criação ao big-bang*. 2. ed. São Paulo: Companhia das Letras (Editora Schwarcz), 1997.

HALIDAY, David, RESNICK, Robert & MERRILL, John. *Fundamentos da física.1 Mecânica*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1993.

MARTINS, Roberto de Andrade. Use and violation of operationalism in relativity. *Manuscrito* **5** (2): 103-15, 1981.

MARTINS, Roberto de Andrade. A Popperian evaluation of Einstein's theory-plus-method. *Manuscrito* **9** (2): 85-113, 1986 (a).

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

MARTINS, Roberto de Andrade. A relação massa-energia e energia potencial. *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **6**: 52-84, 1989.

MARTINS, Roberto de Andrade. Como Becquerel não descobriu a radioatividade. *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **7**: 27-45, 1990.

MARTINS, Roberto de Andrade. Em busca do nada: considerações sobre os argumentos a favor e contra o vácuo. *Trans/Form/Ação* **16**: 7-27, 1993.

MARTINS, Roberto de Andrade. Becquerel and the choice of uranium compounds. *Archive for History of Exact Sciences* **51** (1): 67-81, 1997.

NORTH, John David. *The measure of the universe*. New York: Dover, 1990.

WEINBERG, Steven. *Gravitation and cosmology: principles and applications of the general theory of gravitation*. New York: John Wiley & Sons, 1972.

WHITTAKER, Edmund. *A history of the theories of aether and electricity*. 2 vols. New York: American Institute of Physics, 1987.