

## O INCRÍVEL MUNDO DA FÍSICA MODERNA

GEORGE GAMOW foi um dos maiores físicos nucleares do mundo. Longe, porém, de restringir sua curiosidade a um tema limitado, dentro da ciência, abordou vários assuntos, desde o átomo às galáxias, desde a origem dos elementos à do próprio universo. Alguns outros físicos também fizeram isso, dirão alguns que apontarão, de fato, alguns exemplos de cientistas que foram gigantes em mais de um terreno.

Nenhum outro, entretanto, fez o que Gamow conseguiu fazer. Transformar os problemas capitais da física atômica numa história em que a precisão científica se mistura com uma dose de ficção, que permite melhor apreender o essencial dos fenômenos e conceitos tratados por ele. Criou Gamow mesmo um personagem que se tornou famoso, Mr. Tompkins, um funcionário de banco que se sentiu atraído pela ciência moderna. Como se não bastasse isso, Gamow ilustra seus próprios livros, com figuras que às vezes farão os desenhistas profissionais franzir a testa, mas que conseguem seu objetivo, que é prender o leitor e utilizar o desenho como forma de comunicação científica com o público.

O INCRÍVEL MUNDO DA FÍSICA MODERNA é, pois, uma história alegremente contada que nos ensina coisas fundamentais, que ninguém deve ignorar no mundo atual, tão fortemente modelado por essa ciência.

Se você ainda se sente como peixe fora d'água quando se fala de relatividade, aproveite agora e ganhe uma idéia bem nítida pelas mãos de Mr. Tompkins. Espaço curvo, universo pulsante, origem e fim do universo, o que é um quantum (a mecânica quântica revolucionou o pensamento humano e você não pode ficar por fora), como é o átomo por dentro... Tudo isso e muito mais está aqui a sua disposição, para leitura fácil.

biblioteca

MODERNA

0 —

Pierre de Latil  
G. S. Carter  
A. W. Keen  
R. A. Lapp  
Scientific American  
Scientific American  
Scientific American

Scientific American

Hans Selye  
Scientific American

Scientific American  
Scientific American  
Ed. Teller  
Scientific American  
Scientific American  
Ernst J. Öpik  
Fernand Gigon  
Werner von Braun  
A. Sutcliffe

George Gamow

GEORGE GAMOW

# O INCRÍVEL MUNDO DA FÍSICA MODERNA

*Tradução*

de E. JACY MONTEIRO

*Segunda Edição*

Título do original inglês:

MR. TOMPKINS IN PAPERBACK

Containing *Mr. Tompkins in Wonderland*  
and *Mr. Tompkins Explores the Atom*

Copyright © 1965 by  
Cambridge University Press

Ilustrado pelo Autor  
e JOHN HOOKHAM

Capa de  
ANGEL MARCO

*Código para obter um livro igual: III-20*

Direitos exclusivos para a língua portuguesa da

IBRASA

INSTITUIÇÃO BRASILEIRA DE DIFUSÃO CULTURAL S. A.

03047 — R. Vinte e Um de Abril, 97 — São Paulo — SP — Tel. 93-9524

*Publicado em 1980*

IMPRESSO NO BRASIL — PRINTED IN BRAZIL

Ao  
Meu Amigo e Editor  
RONALD MANSBRIDGE

## Prefácio

NO INVERNO DE 1938 ESCREVI HISTÓRIA CURTA, CIENTIFICAMENTE fantástica (não de ficção científica) na qual procurei explicar ao leigo as idéias fundamentais da teoria da curvatura do espaço e da expansão do universo. Resolvi fazê-lo exagerando os fenômenos relativistas atualmente existentes a tal ponto que os pudesse observar facilmente o herói da história, C. G. H. Tompkins\*), funcionário bancário interessado na ciência moderna.

Mandei o manuscrito à Harper's Magazine e, como acontece com todos os autores principiantes, recebi-o de volta com um bilhete de rejeição. Assim também fizeram outras revistas, uma meia dúzia, que procurei. Diante disso, pus o manuscrito numa gaveta da secretária e esqueci-o. Durante o verão do mesmo ano, compareci à Conferência Internacional de Física Teórica, organizada pela Liga das Nações em Varsóvia. Estava tagarelando diante de um copo de excelente miúdo polonês com meu velho amigo Sir Charles Darwin, neto de Carlos (da *Origem das Espécies*) Darwin, e a conversa voltou-se para a divulgação da Ciência. Conteí a Darwin a má sorte que experimentara nesse assunto, e ele disse: "Olhe, Gamow, quando voltar aos Estados Unidos, desenterre o manuscrito e mande-o ao dr. C. P. Snow, editor da revista científica popular *Discovery*, publicada pela Cambridge University Press".

---

\* As iniciais do sr. Tompkins originam-se das três constantes fundamentais da Física: a velocidade da luz  $c$ ; a constante gravitacional  $G$ ; e a constante quantum  $h$ , que é preciso multiplicar por fatores imensamente grandes a fim de tornar-lhes o efeito facilmente apreciável pelo vulgo.

Assim o fiz e uma semana depois chegou um telegrama de Snow dizendo: "Publicarei o artigo no próximo número. Favor mandar mais." De tal maneira, certo número de histórias a respeito do snr. Tompkins, que vulgarizaram as teorias da relatividade e do quantum, apareceram em edições subseqüentes de *Discovery*. Logo depois recebi uma carta da "Cambridge University Press", sugerindo a publicação desses artigos com algumas histórias mais para aumentar o número de páginas, sob a forma de livro. O livro, sob o título "O snr. Tompkins no País das Maravilhas", foi publicado em 1940 pela "Cambridge University Press", e desde então reimpresso dezesseis vezes. A ele seguiu-se a continuação, "O snr. Tompkins explora o átomo", publicado em 1940, até agora reeditado nove vezes. Além disso, os dois volumes foram traduzidos em todas as línguas européias (exceto o russo), bem como em chinês e indi.

Recentemente a "Cambridge University Press" resolveu reunir os dois volumes primitivos em edição única em brochura, pedindo-me que pusesse em dia o material antigo e adicionasse mais algumas histórias versando os progressos da física e de campos correlatos que se realizaram depois da publicação desses volumes. De tal maneira vi-me obrigado a juntar as histórias a respeito de fissão e fusão, o firme estado do universo e os problemas excitantes relativos às partículas elementares. Esse material constitui o presente volume.

Devo dizer algumas palavras quanto às ilustrações. Os artigos primitivos em *Discovery* e o primeiro volume receberam ilustrações do snr. John Hookham, que criou as feições do snr. Tompkins. Ao escrever o segundo volume, o snr. Hookham retirara-se do trabalho de ilustrador, e resolvi substituí-lo, obedecendo fielmente ao estilo dele. As novas ilustrações no presente volume são também minhas. Minha esposa Bárbara escreveu os versos e canções que aparecem neste volume.

G. GAMOW

*Universidade do Colorado*  
*Boulder, Colorado, E.U.A.*

## Índice

PREFÁCIO	9
INTRODUÇÃO	13
1 Limite da velocidade da cidade	15
2 Preleção do Professor a respeito de Relatividade que causou o sonho do snr. Tompkins	23
3 O snr. Tompkins entra no gozo de férias	34
4 Preleção do Professor a respeito da Curvatura do Espaço, Gravidade e Universo	46
5 O Universo pulsátil	59
6 Ópera Cósmica	70
7 Bilhares Quânticos	81
8 Janglas Quânticos	101
9 O demônio de Maxwell	111
10 A Tribo alegre dos Eléctrons	128
11 Parte da preleção anterior durante a qual o snr. Tompkins dormiu	144
12 Dentro do Núcleo	152
13 O Entalhador de Madeira	165
14 Furos em Nada	182
15 O snr. Tompkins prova refeição japonesa	193

## Introdução

DESDE A MENINICE FICAMOS ACOSTUMADOS AO MUNDO QUE NOS cerca conforme o percebemos por meio dos cinco sentidos; nesse estágio de desenvolvimento mental formam-se as noções fundamentais de espaço, tempo e movimento. Em pouco tempo o espírito acostuma-se de maneira tal a essas noções que mais tarde nos inclinamos a acreditar que a nossa concepção do mundo exterior, nelas baseada, é a única possível, qualquer idéia de mudá-las afigurando-se-nos paradoxal. Contudo, o desenvolvimento de métodos físicos exatos de observação e a análise mais profunda de relações observadas conduziram a ciência moderna à conclusão definida de que esse fundamento "clássico" falha completamente quando empregado para a descrição minuciosa de fenômenos ordinariamente inacessíveis à observação cotidiana, e, para a descrição correta e consistente da nossa nova experiência apurada, impõe-se certa mudança nos conceitos fundamentais de espaço, tempo e movimento.

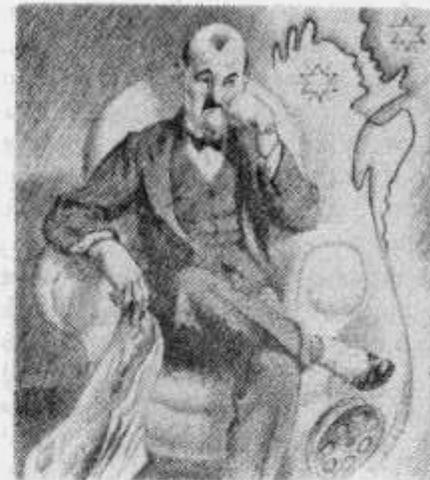
Contudo, os desvios entre as noções comuns e as que a física moderna introduz são inteiramente destituídos de significação no que respeita à experiência da vida ordinária. Se, porém, imaginarmos outros mundos, com as mesmas leis físicas que o nosso, mas com valores numéricos diferentes para as constantes físicas que determinam os limites da aplicabilidade das concepções antigas, os conceitos novos e corretos de espaço, tempo e movimento a que a ciência moderna chega somente depois de investigações mui longas e complexas, tornar-se-iam matéria de conhecimento comum. Podemos dizer que até mesmo em tal mundo algum selvagem primitivo traria conhecimento com os princípios da relatividade e com a teoria do quantum, utilizando-os para as caçadas e necessidades diárias.

O herói destas histórias transfere-se, nos sonhos, a diversos mundos desse tipo, nos quais os fenômenos, inacessíveis aos nossos sentidos ordinários, ficam tão fortemente exagerados que seria possível observá-los facilmente como acontecimentos da vida ordinária. Veio-lhe em auxílio, no sonho fantástico mas cientificamente correto, velho professor de física (cujas filha, Maud, posteriormente desposou) que lhe explicou em linguagem simples os acontecimentos extraordinários por ele observados no mundo da relatividade, cosmologia, quantum, estrutura atômica e nuclear, partículas elementares etc.

É de esperar que as experiências extraordinárias do snr. Tompkins permitirão ao leitor interessado conceber representação mais clara do mundo físico presente em que vivemos.

## *Limite da Velocidade da Cidade*

ERA FERIADO BANCÁRIO, E O SNR. TOMPKINS, PEQUENO AMANUENSE de grande banco da cidade, dormiu até tarde e almoçou descansadamente. Procurando planejar como passar o dia, pensou primeiramente em ir a algum cinema de tarde, e, abrindo o jornal da manhã, buscou as páginas de diversões. Todavia, nenhum filme lhe pareceu interessante. Detestava toda essa bobagem de Hollywood, de romances infinitos entre estrelas populares.



Toda essa história de Hollywood!

Se houvesse tão-só pelo menos um filme com alguma aventura real, com algo de extraordinário e talvez mesmo fantástico! Nada, porém, encontrou. Inesperadamente, o olhar descobriu pequena notícia no canto da página. A universidade local anunciava uma série de preleções a respeito dos problemas da física moderna, e a daquela tarde devia abordar a Teoria da Relatividade de Einstein. Bem, talvez fosse interessante! Ouvira afirmar muitas vezes que havia somente doze pessoas no mundo que entendiam realmente a teoria de Einstein. Talvez pudesse tornar-se a décima terceira! Com certeza iria à preleção; talvez fosse exatamente o de que precisava.

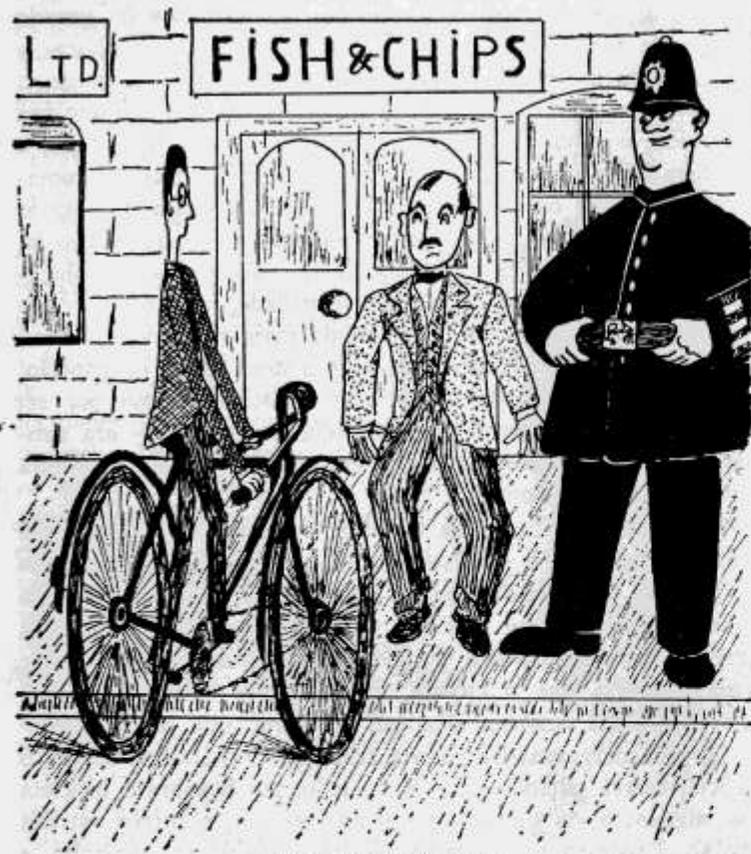
Chegou ao grande auditório da universidade quando a preleção já havia começado. O salão estava cheio de estudantes, na maior parte jovens, escutando atentamente o homem alto, de barbas brancas, perto do quadro negro, procurando explicar ao auditório as idéias fundamentais da Teoria da Relatividade. Mas o snr. Tompkins somente chegou a compreender que a essência da teoria de Einstein consiste em existir velocidade máxima, a da luz, que nenhum corpo material em movimento pode ultrapassar, conduzindo tal fato a conseqüências mui estranhas e extraordinárias. Todavia, o professor afirmou que, como a velocidade da luz é de 300.000 km por segundo, dificilmente seria possível observar os efeitos da relatividade para acontecimentos da vida ordinária. Contudo, a natureza desses efeitos extraordinários era na realidade muito mais difícil de compreender, afigurando-se ao snr. Tompkins que tudo isso estava em contradição com o bom senso. Procurava imaginar a contração de barras de medida e o comportamento esquisito dos relógios, — efeitos a esperar se se moverem com velocidade próxima à da luz — quando a cabeça baixou vagarosamente sobre o ombro.

Quando abriu novamente os olhos, achou-se sentado não em um banco de auditório, mas em um dos que a prefeitura instala para que os passageiros esperem comodamente o ônibus. Estava em bela cidade antiga em que se viam, alinhados pela rua, edifícios universitários medievais. Teve suspeita que devia estar sonhando; mas, com surpresa, nada se passava de extraordinário em torno; até mesmo o policial de pé na esquina oposta

tinha o aspecto comum dos policiais. Os ponteiros do grande relógio da torre no extremo da rua marcavam cinco horas e as ruas estavam quase desertas. Somente um ciclista descia a rua vagarosamente, e, ao aproximar-se, o snr. Tompkins arregalou os olhos de admiração. A bicicleta e o jovem que a montava estavam incrivelmente reduzidos na direção do movimento, como se os visse através de lente cilíndrica. O relógio da torre bateu cinco horas, e o ciclista, evidentemente apressado, calcou com mais força os pedais. O snr. Tompkins não observou ganhasse o ciclista muito em velocidade, mas, como resultado do esforço realizado, ficou ainda mais reduzido e desceu pela rua assemelhando-se exatamente a uma figura de papelão. Depois, o snr. Tompkins sentiu-se muito orgulhoso por ser capaz de compreender o que acontecia ao ciclista — era simplesmente a contração dos corpos em movimento, de que ouvira falar ainda havia pouco.

“Evidentemente o limite da velocidade da natureza é aqui mais baixo” concluiu, “e por isso o soldado na esquina parece tão preguiçoso, pois não precisa estar atento aos que correm demais.” De fato, um táxi que vinha pela rua nesse momento, fazendo o maior barulho possível, não era capaz de mover-se mais depressa que o ciclista, arrastando-se simplesmente. O snr. Tompkins resolveu alcançar o ciclista, que parecia bonachão, para perguntar-lhe tudo a respeito. Certificando-se que o policial estava olhando para outro lado, pulou sobre a bicicleta que alguém havia deixado junto ao meio-fio, e correu estrada abaixo. Esperava ficar imediatamente reduzido em tamanho, e ficou mui satisfeito porquanto ultimamente lhe tinha causado certa ansiedade o próprio aspecto aumentado. Com grande surpresa, contudo, nada lhe aconteceu ou à bicicleta. Por outro lado, mudou inteiramente o aspecto em torno. As ruas ficaram mais curtas, as vitrinas das lojas começaram a parecer fendas estreitas, e o policial da esquina tornou-se o indivíduo mais magro que algum dia havia visto.

“Co’os diabos!” exclamou excitadamente o snr. Tompkins, “agora vejo a trica. É nesse ponto que entra em cena a palavra *relatividade*. Tudo quanto se move em relação a mim parece mais curto, seja quem for que acione os pedais!” Era bom



Incrivelmente encurtado

ciclista e fazia os maiores esforços para alcançar o jovem. Descobriu, porém, não ser fácil conseguir velocidade naquela bicicleta. Embora fizesse força nos pedais o mais que pudesse, era quase de desprezar o aumento da velocidade. As pernas começaram a doer, mas não conseguiu passar pelo poste da lâmpada da esquina mais depressa do que quando começou. Parecia-lhe que todos os esforços que fazia para mover-se mais rapidamente não davam resultado algum. Compreendia agora perfeitamente por que o ciclista e o táxi que havia pouco encontrara não podiam sair-se melhor, e lembrou-se das palavras do



Os quarteirões ficaram ainda mais curtos

professor a respeito da impossibilidade de ultrapassar a velocidade limite da luz. Observou, contudo, que os quarteirões se tornavam ainda mais curtos e o ciclista que ia à frente não parecia tão distante. Na segunda volta alcançou-o, e quando os dois estiveram lado a lado por alguns momentos, surpreendeu-se por ver que o outro era um jovem inteiramente normal, brincalhão. "Oh, talvez seja porque não nos movemos relativamente um ao outro", concluiu, e dirigiu a palavra ao jovem.

"Desculpe-me, senhor!", disse, "não acha inconveniente viver em uma cidade de limite tão baixo de velocidade?"

"Limite de velocidade?" perguntou o outro surpreso. "Não temos aqui limite algum de velocidade. Posso ir a qualquer lugar tão depressa como quiser, ou pelo menos poderia se tivesse uma motocicleta em lugar desta máquina velha que não presta para nada!"

"Mas você estava movendo-se mui vagorosamente quando passou por mim ainda há pouco", disse o sr. Tompkins; "observei-o cuidadosamente".

"Oh, observou-me, ein?" disse o rapaz evidentemente ofendido. "Suponho que não observou termos deixado para trás

quatro quarteirões, desde que me dirigiu a palavra. Não acha suficiente essa velocidade?"

"Mas as ruas ficam tão curtas", arguiu o snr. Tompkins.

"De qualquer maneira que diferença há se nos movemos mais rapidamente ou se a rua se torna mais curta? Tenho de percorrer dez quarteirões para ir ao Correio, e se piso mais fortemente nos pedais os quarteirões ficam mais curtos e chego lá mais depressa. De fato, aqui estamos", disse o jovem saltando da bicicleta.

O snr. Tompkins olhou para o relógio do Correio, que indicava cinco e meia. "Bem", observou triunfalmente, "você gastou meia hora para percorrer estes dez quarteirões, de qualquer modo quando eu o vi pela primeira vez eram exatamente cinco horas!"

"E você observou essa meia hora?" perguntou o companheiro. O snr. Tompkins teve de concordar que na realidade lhe tinham parecido somente alguns minutos. Além disso, olhando para o relógio pulseira, verificou que indicava tão-só cinco minutos depois das cinco. "Oh," exclamou, "estará o relógio do Correio adiantado?" "Naturalmente está, ou o seu está atrasado, exatamente porque você está indo muito depressa. Que é que lhe está acontecendo, seja lá como for? Acaso caiu da Lua?" e o jovem entrou no Correio.

Depois desta conversa, o snr. Tompkins compreendeu como era desagradável não estar presente o velho professor para explicar todos estes acontecimentos estranhos. Evidentemente o jovem era dessa região e se acostumara a essa situação mesmo antes de começar a andar. Assim sendo, o snr. Tompkins viu-se forçado a explorar por si mesmo esse mundo estranho. Acertou o relógio pelo do Correio, e para ter certeza que estava andando bem esperou dez minutos. O relógio não perdeu. Continuando a andar, viu finalmente o relógio da estação da estrada de ferro, e resolveu verificar novamente o próprio. Surpreendentemente, estava de novo um pouquinho atrasado. "Bem, deve ser também algum efeito da relatividade," concluiu o snr. Tompkins; e resolveu indagar a respeito de alguém mais inteligente do que o jovem ciclista.

Breve apresentou-se a oportunidade. Um cavalheiro, evidentemente duns quarenta anos, saiu do trem e começou a dirigir-se para a porta da estação. Veio-lhe ao encontro uma senhora bastante idosa, que, mui surpreendentemente para o snr. Tompkins, a ele se dirigiu como "caro avô". Era demais para o snr. Tompkins. Sob a desculpa de ajudar a carregar as malas, começou a conversar.

"Desculpem-me se estou intrrometendo-me em assuntos de família," disse, "mas o snr. é realmente avô desta gentil senhora? Compreende, sou estranho aqui e nunca..." "Oh, estou vendo," disse o cavalheiro sorrindo com o bigode. "Suponho que está tomando-me pelo judeu errante ou outro semelhante. Mas a questão é bastante simples. A profissão exige que viaje muito e como passo a maior parte da vida nos trens, naturalmente fico velho muito mais devagar do que os parentes que moram na cidade. Fico tão satisfeito de voltar a tempo para ver a minha cara neta ainda viva! Mas desculpe-me, por favor, tenho de arranjar-lhe um táxi", e saiu a correr, deixando o snr. Tompkins sozinho de novo com os seus problemas. Uns sanduíches no restaurante da estação reforçaram-lhe até certo ponto a capacidade mental, chegando mesmo a supor ter encontrado a contradição no famoso princípio da relatividade.

"Sim, sem dúvida," pensou enquanto sorvia o café, "se tudo fosse relativo, o viajante teria de parecer aos parentes bastante velho, e a ele pareceriam muito velhos, embora uns e outros fossem, de fato, muito moços. Mas o que estou dizendo agora é decisivamente contra-senso: Uma pessoa não poderia ter cabelo grisalho relativo!" De sorte que resolveu fazer uma última tentativa para descobrir como tudo é realmente e aproximou-se de um homem solitário, trazendo uniforme da estrada de ferro, que estava sentado no restaurante.

"Terá a bondade, senhor," começou, "poderá ter a gentileza de dizer-me quem é responsável por ficarem os passageiros velhos muito mais lentamente do que os que demoram em qualquer lugar?"

"Cabe-me essa responsabilidade," disse o homem mui simplesmente.

"Oh!" exclamou o snr. Tompkins. "Assim sendo, o snr. resolveu o problema da Pedra Filosofal dos antigos alquimistas. O snr. deve ser muito famoso no mundo da medicina. Ocupa a cátedra de medicina aqui?"

"Não," respondeu o homem, inteiramente desapontado, "sou simplesmente um guarda-freios da estrada de ferro."

"Guarda-freios! Quer dizer guarda-freios..." exclamou o snr. Tompkins, vendo fugir-lhe o chão debaixo do pés. "Quer dizer que — aperta simplesmente os freios quando o trem chega à estação?"

"Isso mesmo, é o que faço: e cada vez que o trem diminui a marcha os passageiros ganham em idade em relação a outras pessoas. Sem dúvida," juntou modestamente, "o maquinista que acelera o trem também toma parte."

"Mas o que tem tudo isso a ver com o ficar jovem?" perguntou o snr. Tompkins grandemente surpreso.

"Bem, não sei exatamente," disse o guarda-freios, "mas assim é. Quando perguntei a um professor universitário que uma vez viajou no meu trem, como era assim, ele começou uma exposição mui longa e incompreensível a respeito e finalmente disse que era semelhante à *mudança rubra de gravitação* — acho que assim a chamava — sobre o sol. Já ouviu dizer algo a respeito de mudanças rubras?"

"Não," disse o snr. Tompkins, um tanto hesitantemente; e o guarda-freios afastou-se, abanando a cabeça.

De repente sentiu mão pesada sacudir-lhe o ombro e achou-se sentado não no restaurante da estação, mas na cadeira do auditório em que havia escutado a preleção do professor. As luzes estavam meio apagadas e o salão vazio. O porteiro que o acordou disse: "Vamos fechar, senhor; se quer dormir, melhor ir para casa." O snr. Tompkins levantou-se e encaminhou-se para a saída.

*Preleção do Professor a Respeito de  
Relatividade, Que Causou o Sonho  
do Snr. Tompkins*

SENHORAS E SENHORES:

Em estágio muito primitivo de desenvolvimento, o espírito humano formou noções definidas de espaço e tempo como estrutura em que os diversos acontecimentos se realizam. Essas noções, sem mudanças essenciais, foram transmitidas de geração em geração, e, desde o desenvolvimento das ciências exatas, passaram a constituir a base da descrição matemática do Universo. O grande Newton talvez tivesse formulado claramente pela primeira vez as noções clássicas de espaço e tempo, escrevendo nos *Principia*:

"O espaço absoluto, na sua natureza própria, sem relação a algo de externo, fica sempre semelhante e imóvel; e o Tempo, absoluto, verdadeiro e matemático decorre, por si e pela própria natureza, igualmente sem relação a algo de externo."

Tão forte era a crença na correção absoluta dessas idéias clássicas a respeito de espaço e tempo que os filósofos as conside-

raram muita vez como dadas *a priori*, e cientista algum pensou jamais na possibilidade de pô-las em dúvida.

Contudo, logo no começo do século atual, tornou-se evidente que certo número de resultados obtidos pelos métodos mais precisos da física experimental conduziam a contradições evidentes se interpretados dentro da estrutura clássica de espaço e tempo. Tal fato inspirou a um dos maiores físicos contemporâneos, Albert Einstein, a idéia revolucionária que não existe qualquer motivo, exceto a tradição, para considerar as noções clássicas relativas ao espaço e ao tempo como absolutamente verdadeiras, impondo-se a necessidade de mudá-las para se ajustarem a novas experiências mais precisas. De fato, desde que as noções clássicas de espaço e tempo foram formuladas em base da experiência humana na vida ordinária, não nos deve surpreender que os métodos apurados de observação atuais, baseados em técnica experimental altamente desenvolvida, indiquem serem essas antigas noções demasiado grosseiras e inexactas, podendo ter-se utilizado na vida ordinária e nos primeiros estágios de desenvolvimento da física somente porque o desvio das noções corretas era suficientemente pequeno. Nem precisamos surpreender-nos que a ampliação do campo de exploração da ciência moderna nos conduzisse a regiões em que tais desvios se tornassem tão grandes que impossibilitassem inteiramente o emprego das noções clássicas.

O resultado experimental mais importante que conduziu à crítica fundamental das noções clássicas foi a descoberta que a velocidade da luz no vácuo representa o limite superior de toda velocidade física possível. Tal conclusão importante e inesperada resultou principalmente das experiências do físico americano Michelson, que procurou, no fim do século passado, observar o efeito do movimento da Terra sobre a velocidade da propagação da luz, e, com grande surpresa e surpresa de todo o mundo científico, verificou não existir tal efeito, realizando-se a velocidade da luz no vácuo sempre exatamente por igual maneira, independentemente do sistema que serviu para medi-la, ou do movimento da fonte que a emite. Não há necessidade de explicar como é extremamente extraordinário semelhante resul-

tado, contradizendo os conceitos mais fundamentais que dizem respeito ao movimento. De fato, se certo objeto se move rapidamente pelo espaço e o observador também se move ao seu encontro, o objeto em movimento o atingirá com velocidade relativa maior, igual à soma das velocidades do objeto e do observador. Por outro lado, se o observador se afasta, o objeto atingi-lo-á por trás com menor velocidade, igual à diferença entre as duas.

Assim também, se uma pessoa se move, digamos em um automóvel, de encontro ao som que se propaga pelo ar, a velocidade do som, medida no carro, será maior conforme a velocidade da pessoa, ou será correspondentemente menor se o som a alcança. Denominamos tal ocorrência de *teorema das velocidades* e sempre se considerou evidente.

Contudo, as experiências mais cuidadosas revelaram que, no caso da luz, tal não se verifica, ficando sempre a mesma a velocidade da luz no vácuo, igual a 300.000 km por segundo (o que se representa em geral por  $c$ ), independentemente da velocidade com que o observador se desloca.

“Não há dúvida”, dir-se-á, “mas não será possível construir velocidade acima da luz adicionando diversas pequenas velocidades que se possam atingir fisicamente?”

Por exemplo, poderíamos considerar um trem que se movesse rapidamente, digamos com três-quartos da velocidade da luz e um vagabundo correndo por cima da cobertura dos carros igualmente com a velocidade de três-quartos da luz.

Conforme o teorema de adição, a velocidade total deveria ser vez e meia a da luz, e o vagabundo em disparada seria capaz de ultrapassar o raio de luz da lâmpada de um sinal. Contudo, a verdade é que, como a constância da velocidade da luz é fato experimental, a velocidade resultante nesse caso deve ser menor do que se espera — não poderá ultrapassar o valor crítico  $c$ ; e desse modo chegamos à conclusão que, também para velocidades menores, o teorema clássico da adição deve estar errado.

O tratamento matemático do problema, no qual não desejo entrar aqui, conduz a nova fórmula muito simples para o cálculo da velocidade resultante de dois movimentos superpostos.

Se  $v_1$  e  $v_2$  são duas velocidades a adicionar, a velocidade resultante será dada por:

$$V = \frac{v_1 \pm v_2}{1 \pm \frac{v_1 v_2}{c^2}} \quad (1)$$

Vê-se por esta fórmula que as duas velocidades primitivas são pequenas, quero dizer pequenas em relação à velocidade da luz, o segundo termo no denominador da fórmula (1) pode desprezar-se em comparação com a unidade, chegando-se ao teorema clássico da adição das velocidades. Se, contudo,  $v_1$  e  $v_2$  não forem pequenas, o resultado será sempre um pouco menor que a soma aritmética. Por exemplo, no caso do vagabundo correndo por cima do trem,  $v_1 = \frac{3}{4}c$  e  $v_2 = \frac{3}{4}c$  e a fórmula dá para a velocidade resultante  $V = \frac{24}{25}c$ , que ainda é menor que a velocidade da luz.

Em um caso particular, quando uma das velocidades originárias é  $c$ , a fórmula (1) fornece  $c$  para a velocidade resultante, independentemente do que for a segunda velocidade. Assim, sobrepondo qualquer número de velocidade, não é possível nunca ultrapassar a velocidade da luz.

Também poderá oferecer interesse saber ter-se provado essa fórmula experimentalmente, e realmente achou-se que a resultante de duas velocidades é sempre um pouco menor que a soma aritmética.

Tendo reconhecido a existência de limite superior para a velocidade podemos começar a crítica das idéias clássicas de espaço e tempo, dirigindo o primeiro golpe à noção de *simultaneidade* nelas baseada.

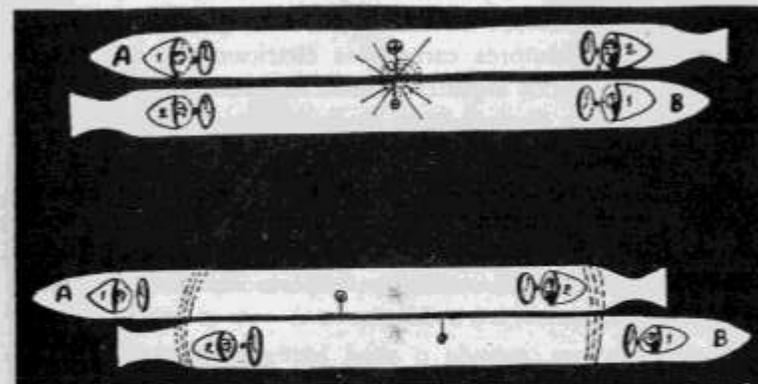
Quando alguém diz: "A explosão nas minas perto da Cidade do Cabo deu-se exatamente no mesmo momento em que lhe serviam ovos estalados em presunto no apartamento de Londres", julga saber o que quer dizer. Vou mostrar, contudo, que não sabe, e, falando rigorosamente, tal afirmação não tem significado exato. De fato, que método se empregaria para verificar

se os dois acontecimentos em lugares diferentes são ou não simultâneos? Poderia dizer-se que os relógios nos dois lugares indicavam a mesma hora; surge, porém, a pergunta quanto à maneira de acertar os relógios distantes de sorte a indicarem simultaneamente a mesma hora, fazendo-nos voltar à pergunta primitiva.

Como a independência da velocidade da luz no vácuo em relação ao movimento da fonte luminosa ou do sistema pelo qual se mede constitui fato experimental estabelecido da maneira mais exata, o método seguinte para medir as distâncias e acertar corretamente os relógios em diversas estações de observação deve reconhecer-se como o mais racional e, conforme o leitor concordará depois de meditar um pouco mais, o único racional.

Envia-se um sinal luminoso da estação  $A$ , e logo o recebem na estação  $B$ , faz-se voltar à estação  $A$ . Metade do tempo, conforme se lê na estação  $A$ , entre o envio e a volta do sinal, multiplicada pela constante da velocidade da luz, define-se com a distância entre  $A$  e  $B$ .

Diz-se que os relógios nas estações  $A$  e  $B$  estão corretamente certos se no momento da chegada do sinal em  $B$  o relógio local indica exatamente a média dos dois tempos registrados em  $A$  no momento de envio e de recebimento do sinal. Empregando esse método entre diversas estações de observação estabelecidas numa estrutura rígida, chegamos finalmente à que



Duas longas plataformas movendo-se em sentido contrário

se deseja para referência, podendo então responder às perguntas que entendem com a simultaneidade ou intervalo de tempo entre dois acontecimentos em lugares diferentes.

Mas observadores em outros sistemas reconhecerão esses resultados? A fim de responder a essa pergunta, vamos supor terem sido estabelecidas essas estruturas de referência em dois corpos rígidos diferentes, digamos em dois longos foguetes espaciais movendo-se com velocidade constante em direções opostas, e vejamos como essas duas estruturas se verificam entre si. Suponhamos estarem localizados quatro observadores nas extremidades frontal e posterior de cada foguete, os quais desejam antes de tudo acertar corretamente os respectivos relógios. Cada par de observadores pode utilizar no foguete respectivo a modificação do método acima mencionado enviando um sinal luminoso do meio do foguete (conforme se medir convenientemente) e pondo o ponto zero nos relógios quando o sinal, proveniente do meio do foguete, chegar a cada extremidade. Desse modo, cada par de observadores estabelece, de conformidade com a definição anterior, o critério de simultaneidade no próprio sistema e acertou "corretamente" os relógios, naturalmente do próprio ponto de vista.

Em seguida resolvem conferir se as leituras da hora nos respectivos foguetes se verificam mutuamente. Por exemplo, os relógios de dois observadores em foguetes diferentes indicam a mesma hora quando passam um por outro? Pode-se verificá-lo da seguinte maneira: instalam-se no meio geométrico de cada foguete dois condutores carregados eletricamente, de tal maneira que, quando os foguetes passam um pelo outro, salte uma centelha entre os condutores, e sinais luminosos partem simultaneamente do centro de cada plataforma em direção às extremidades frontal e posterior. Na ocasião em que os sinais luminosos, viajando com velocidade finita, aproximam-se dos observadores, os foguetes mudaram de posição relativa e os observadores  $2A$  e  $2B$  estarão mais perto da fonte de luz do que os observadores  $1A$  e  $1B$ .

É evidente que, quando o sinal luminoso alcança o observador  $2A$ , o observador  $1B$  estará mais para trás, de sorte que o sinal precisará de mais algum tempo para alcançá-lo. Assim,

se o relógio de  $1B$  acertou-se de tal maneira que indique hora zero à chegada do sinal, o observador  $2A$  insistirá em que está atrasado em relação à hora certa.

De igual maneira, outro observador,  $1A$ , chegará à conclusão que o relógio de  $2B$ , que encontrou o sinal antes dele, está adiantado. Como, de conformidade com a própria definição de simultaneidade, os respectivos relógios estão corretamente certos, os observadores no foguete  $A$  concordarão em que existe uma diferença em relação aos relógios dos observadores do foguete  $B$ . É preciso, porém, não esquecer que os observadores do foguete  $B$ , exatamente pelos mesmos motivos, não-de considerar os próprios relógios como corretamente certos, mas afirmarão existir uma diferença em relação aos relógios do foguete  $A$ .

Como os dois foguetes são completamente equivalentes, pode resolver-se a disputa entre os dois grupos de observadores somente dizendo que os dois estão corretos do respectivo ponto de vista, mas não tem sentido físico a questão de quem está correto "absolutamente".

Receio ter fatigado o leitor com estas longas considerações, mas quem as acompanhar cuidadosamente verá evidentemente que, logo se adote o nosso método de medida de espaço-tempo, *desvanece-se a noção de simultaneidade absoluta, e dois acontecimentos em lugares diferentes considerados como simultâneos do ponto de vista de certo sistema de referência ficarão separados por intervalo definido de tempo do ponto de vista de outro sistema.*

Esta proposição afigura-se a princípio extremamente estranha, mas assim lhe parecerá se eu disser que, jantando em um trem, se tomam a sopa e a sobremesa no mesmo ponto do carro restaurante, mas em pontos largamente separados da estrada? Contudo, esta afirmação a respeito do jantar no trem pode formular-se dizendo que *dois acontecimentos que ocorrem em tempos diferentes no mesmo ponto de um sistema de referência ficarão separados por intervalo de espaço definido do ponto de vista de outro sistema.*

Se compararmos esta proposição "trivial" à "paradóxica" anterior, veremos que são absolutamente simétricas, podendo

transformar-se uma na outra simplesmente mediante a troca das palavras "tempo" e "espaço".

Aí está a essência do ponto de vista de Einstein: enquanto na física clássica se considerava o tempo como inteiramente independente do espaço e do movimento "fluindo igualmente sem qualquer relação a algo de externo" (Newton), na nova física espaço e tempo estão intimamente ligados e representam exatamente duas seções transversais diferentes de um "continuo espaço-tempo" homogêneo, no qual se realizam todos os acontecimentos observáveis. A separação desse contínuo em quatro dimensões em espaço a três dimensões e tempo de uma dimensão é puramente arbitrária, dependendo do sistema a partir do qual se fazem as observações.

Dois acontecimentos, separados no espaço pela distância  $l$  e no tempo pelo intervalo  $t$ , conforme se observam em um sistema, ficarão separados por outra distância  $l'$  e outro intervalo de tempo  $t'$  quando vistos de outro sistema, de sorte que em certo sentido é possível falar da transformação do espaço em tempo e vice-versa. Também não é difícil ver por que a transformação do tempo em espaço, como no exemplo do jantar no trem, constitui para nós noção comum, enquanto a transformação do espaço em tempo, donde resulta a relatividade da simultaneidade, afigura-se extremamente extraordinária. A questão é que se medimos distâncias, digamos em "centímetros", a unidade correspondente para o tempo não deve ser o "segundo" convencional mas uma "unidade racional de tempo", representada pelo intervalo de tempo necessário para que um sinal luminoso cubra a distância de um centímetro, isto é, 0,000.000.000.03 do segundo.

Portanto, na esfera da nossa experiência ordinária, a transformação dos intervalos de espaço em intervalos de tempo conduz a resultados praticamente inobserváveis, o que parece vir em apoio do ponto de vista clássico que afirma ser o tempo absolutamente independente e imutável.

Contudo, quando se investigam movimentos de velocidades muito elevadas, como, por exemplo, o movimento de elétrons emitidos por corpos radiativos ou o movimento de elétrons dentro do átomo, nos quais as distâncias percorridas em certo

intervalo de tempo são da mesma ordem de grandeza que o tempo expresso em unidades racionais, encontram-se necessariamente os dois efeitos acima discutidos, assumindo grande importância a teoria da relatividade. Mesmo na região de velocidades comparativamente pequenas, como, por exemplo, os movimentos dos planetas em nosso sistema, é possível observar efeitos relativistas em virtude da extrema precisão das medidas astronômicas; tal observação de efeitos relativistas exige, contudo, medidas de alterações do movimento planetário que correspondem a uma fração de um segundo angular por ano.

Conforme procurei explicar, a crítica às noções de espaço e tempo conduz à conclusão da possibilidade da conversão parcial de intervalos de espaço em intervalos de tempo e vice-versa; o que importa em que o valor numérico de certa distância ou período de tempo será diferente conforme se mede de sistemas diferentes de movimento.

Análise matemática relativamente simples desse problema, na qual, contudo, não desejo entrar nestas preleções, conduz a fórmula definida para mudança desses valores. Chega-se à conclusão que qualquer objeto de comprimento  $l$ , movendo-se em relação ao observador com a velocidade  $v$ , encurta-se de uma certa porção que depende da velocidade, cujo comprimento medido será:

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (2)$$

Analogamente, qualquer processo que ocupe o tempo  $t$  será observado do sistema que se move relativamente como gastando mais tempo  $t'$  dado pela fórmula:

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3)$$

Tal o famoso "encurtamento do espaço" e "expansão do tempo" da teoria da relatividade.

Ordinariamente, quando  $v$  é muito menor que  $c$  os efeitos são muito pequenos, mas para velocidades suficientemente

grandes, os comprimentos conforme se observam de um sistema em movimento podem tornar-se arbitrariamente pequenos e os intervalos de tempo arbitrariamente longos.

Desejo não esqueça o leitor serem ambos esses efeitos sistemas absolutamente simétricos, e, enquanto os passageiros de um trem que se move rapidamente ficarão admirados por verem as pessoas no trem parado tão delgadas movendo-se tão vagorosamente, estes pensarão o mesmo a respeito dos passageiros daquele.

Outra conseqüência importante da existência da velocidade máxima possível diz respeito à *massa* dos corpos em movimento. Conforme os fundamentos gerais da mecânica, a massa de um corpo determina a dificuldade de pô-lo em movimento ou de acelerar o movimento já existente; quanto maior a massa, mais difícil será aumentar a velocidade em certa dose.

Não podendo qualquer corpo, sob quaisquer circunstâncias, exceder a velocidade da luz, chegamos diretamente à conclusão que a resistência a maior aceleração ou, por outras palavras, a massa, deve aumentar ilimitadamente quando a velocidade do corpo se aproxima da velocidade da luz. A análise matemática conduz a uma fórmula para essa dependência, análoga às fórmulas (2) e (3); Se  $m_0$  é a massa para velocidades muito pequenas, a massa  $m$  na velocidade  $v$  é dada por:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

e a resistência a maior aceleração torna-se infinita quando  $v$  se aproxima de  $c$ .

Esse efeito da mudança relativista da massa pode observar-se facilmente pela experiência com relação a partículas que se movem com grande rapidez. Por exemplo, a massa dos elétrons emitidos pelos corpos radiativos (com a velocidade 99% da luz) é várias vezes maior que no estado de repouso e a massa

dos elétrons que formam os chamados raios cósmicos, que se movem freqüentemente a 99,98% da velocidade da luz, é mil vezes maior.

Para velocidades dessa ordem a mecânica clássica torna-se absolutamente inaplicável e passamos ao domínio da relatividade pura.