The background of the image is a grayscale photograph of a tree trunk, showing the natural texture and grain of the wood. A white rectangular box is superimposed on the upper portion of the image, containing the title text in a black serif font. The text is centered within the box and reads: "Arrasto de referenciais e o princípio de Mach".

**Arrasto
de referenciais
e o princípio
de Mach**

A

relatividade geral é uma teoria singular da física.

Juntamente com o outro triunfo da física do século XX, a mecânica quântica, forma o pilar central da física moderna. Porém, ao contrário da mecânica quântica, a relatividade geral não surgiu dos esforços descoordenados de vários cientistas em busca de explicações para intrigantes realidades experimentais. É uma obra solitária, platônica, vertical, construída linearmente a partir de elegantes indagações puramente formais, inicialmente sem nenhuma motivação experimental. É frequentemente considerada como uma das mais brilhantes criações da mente humana, e seu criador, Albert Einstein, como um dos maiores expoentes da ciência. A relatividade geral altera profundamente nosso entendimento do espaço e do tempo. Para poder apreciar a revolução de conceitos que ela promove, faz-se necessária uma pequena revisão das bases de suas predecessoras: a mecânica e a gravitação universal de Newton.

As leis da mecânica newtoniana envolvem o conceito-chave de *inércia*, a propriedade dos corpos resistirem à aceleração, a tendência, na ausência de forças externas, dos corpos em repouso assim continuarem e dos em movimento seguirem uma trajetória retilínea e uniforme. A segunda lei da mecânica estabelece que a força F necessária para romper a inércia de um corpo, imprimindo-lhe uma aceleração a , é proporcional à quantidade de matéria

ALBERTO SAA
é professor da Unicamp.

do corpo (sua massa m): $F = ma$. As perguntas naturais que surgem daqui são: repouso em relação a quê? Trajetória retilínea vista por quem? Aceleração referente a quê? Segundo Newton, os estados de movimentos estariam todos definidos em relação a um *referencial inercial absoluto*, eterno e imóvel. O referencial absoluto coincidiria, numa aproximação muito boa, com o referencial no qual as estrelas distantes estão em repouso. Newton propôs vários experimentos para determinar movimentos em relação ao referencial absoluto. O mais famoso fala sobre a detecção de movimentos de rotação. Numa versão informal devida a Weinberg (1), esse experimento é descrito da seguinte maneira: saia ao ar livre numa noite clara. Deixe seus braços livres e descansados e olhe para o céu. Gire em piruetas. De maneira inequívoca, você verá as estrelas girarem na direção contrária à sua rotação e sentirá seus braços se abrirem. A aparição da força centrífuga responsável pela abertura dos seus braços seria a evidência direta do seu estado de movimento em relação ao referencial das estrelas distantes. A concepção newtoniana do referencial absoluto foi duramente contestada por um dos seus grandes oponentes, Gottfried Wilhelm von Leibniz, para quem a hipótese do referencial absoluto deveria ser desnecessária, e somente haveria sentido em falar sobre movimentos *relativos* entre corpos materiais, e não sobre movimentos absolutos. Um longo e celebrado debate filosófico prosseguiu no século XVIII a partir dessas discussões.

O físico austríaco Ernst Mach, em seu livro *The Science of Mechanics*, de 1883, reacendeu essas discussões. Segundo Mach, experimentos como o das piruetas numa noite clara poderiam tão-somente detectar a aparição de forças numa situação de movimento relativo entre quem gira e o seu entorno, incluindo as estrelas distantes aparentemente em repouso. Supondo que apenas os movimentos relativos fazem sentido, Mach sugere algo de difícil, se não impossível, detecção experimental: forças idênticas tenderiam a abrir os seus braços se você ficasse parado, mas se tudo ao seu

redor, incluindo as estrelas distantes, começasse a girar. Essa hipótese, um tanto vaga, de que “tudo ao seu redor, incluindo as estrelas distantes”, pode alterar propriedades inerciais, é conhecida como princípio de Mach.

Einstein também se sentia desconfortável com a hipótese dos referenciais absolutos de Newton. A relatividade geral prescinde deles. Nela, espaço e tempo são indissociáveis (o espaço-tempo) e suas propriedades dependem da presença da matéria gravitante. Numa situação aproximada (2) de ausência de matéria gravitante (a distâncias consideráveis de grandes astros, por exemplo) o espaço-tempo é tal que as propriedades inerciais newtonianas são verificadas: na ausência de forças externas, corpos em repouso tendem a ficar em repouso e corpos em movimento seguem trajetórias retilíneas e uniformes. Porém, na proximidade de grandes astros, como o caso da Terra em relação ao Sol, o espaço-tempo sofre deformações que influenciam suas propriedades inerciais. Um corpo livre de forças externas já não segue um movimento retilíneo e uniforme. A Terra, por exemplo, é praticamente livre de forças externas. Seu movimento em torno do Sol é devido às deformações do espaço-tempo e suas conseqüentes alterações das propriedades inerciais. Na relatividade geral, a gravitação é uma interação mediada pelo próprio espaço-tempo, e não por forças que atuam a distância, como na gravitação universal de Newton.

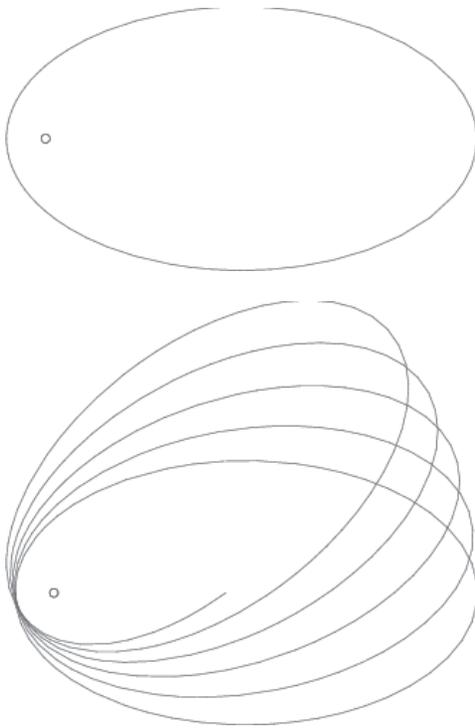
A relatividade geral parece compatível com o princípio de Mach, já que nela as propriedades do espaço-tempo, incluindo, em particular, as dos referenciais inerciais, são determinadas pela distribuição da matéria gravitante. Uma análise mais cuidadosa, porém, revela algumas inconsistências. Pelo princípio de Mach, as propriedades inerciais dos corpos materiais dependem de toda matéria ao seu redor. Se a distribuição de matéria for isotrópica, isto é, idêntica em todas as direções, como no caso das estrelas distantes, as propriedades inerciais também o serão. A presença de distribuições anisotrópicas implicaria pe-

1. S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology: a Principles and Applications of the General Theory of Relativity*.

2. Uma situação de ausência total de matéria é mais sutil. Não são claras quais seriam as propriedades inerciais num universo completamente vazio.

quenas anisotropias na inércia. Nesse caso, forças diferentes seriam necessárias para imprimir a um corpo a mesma aceleração em direções diferentes, isto é, a massa dependeria da direção. A relatividade geral não prevê essas anisotropias de inércia. Para um laboratório em órbita do Sol, o próprio Sol é fonte de anisotropias. Além disso, nossa galáxia é uma gigantesca distribuição anisotrópica de matéria. Todos os experimentos realizados até hoje são compatíveis com a relatividade geral, descartando a existência de anisotropia na inércia e pondo sérias dúvidas na aplicabilidade do princípio de Mach em sua versão original.

Figura 1



Contudo, insistiremos aqui na imagem pictórica do princípio de Mach e do experimento das piruetas na noite clara.

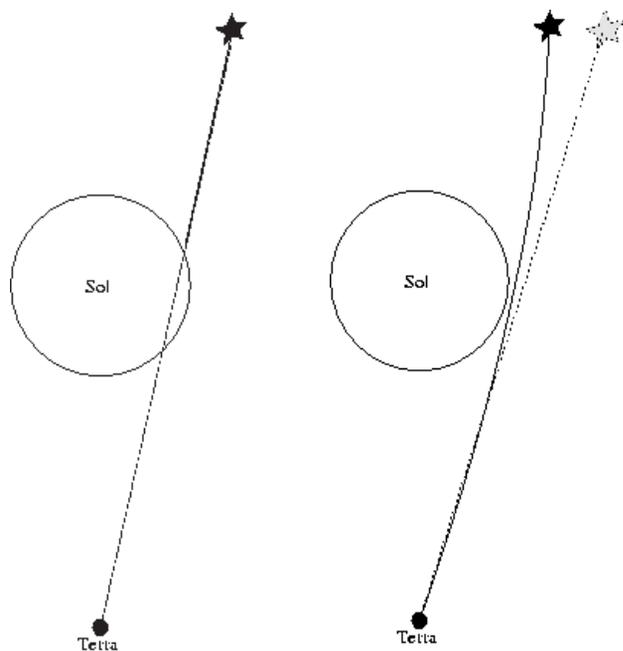
A relatividade geral é uma teoria física. Seu sucesso não vem da sua elegância interna nem dos profundos questionamentos conceituais que a motivaram, mas sim de sua capacidade de fazer previsões e de suas espetaculares comprovações experimentais. Uma única falha, uma única previsão não verificada, é suficiente para descartar completamente uma teoria física.

São três as previsões “clássicas” da relatividade geral, propostas pelo próprio Einstein, as três verificadas experimentalmente no fim da década de 10 do século XX. A primeira é o avanço do periélio de Mercúrio. A gravitação universal de Newton prevê que as órbitas dos planetas são elipses, com o Sol num dos focos. Chama-se periélio o ponto da órbita mais próximo ao Sol, ponto esse que pode ser determinado a partir de observações astronômicas do movimento do planeta. Se a única força atuante sobre Mercúrio fosse o Sol, não se esperaria nenhum movimento do eixo da elipse correspondente a sua órbita e , em particular, nenhum movimento do seu periélio. Porém, outras forças contribuem efetivamente para o movimento de Mercúrio, notadamente a atração gravitacional de Júpiter e dos outros planetas internos (Vênus e Terra). Levando-se em conta essas forças extras, ainda no contexto newtoniano, conclui-se que o eixo da elipse da órbita de Mercúrio deve girar lentamente em torno do Sol, implicando diminutos avanços no periélio de Mercúrio a cada um de seus anos (Figura 1). Porém, os dados

Em cima, tem-se uma órbita elíptica, com o Sol num de seus focos. Periélio é o ponto da órbita mais próximo ao Sol, afélio é o mais distante. Considerando-se outros pequenos efeitos gravitacionais, como os devidos a Júpiter, por exemplo, tem-se uma órbita como a de baixo, na qual o semi-eixo maior da elipse gira em torno do Sol, implicando pequenos avanços do periélio, assim como do afélio.

astronômicos dos anos 10 indicavam ainda pequenas diferenças entre o avanço previsto teoricamente pela teoria newtoniana e o observado, o qual era maior. Várias hipóteses foram levantadas para explicar essa discrepância, incluindo a existência de um novo planeta (3), nunca observado, ainda mais próximo ao Sol. A relatividade geral foi a única teoria capaz de explicar o excesso no avanço do periélio de Mercúrio, e o fez com uma precisão notável. Este foi seu primeiro triunfo.

Figura 2



À esquerda, vê-se que, segundo a teoria newtoniana, a estrela que está, em linha reta, atrás do Sol não poderia ser vista da Terra. Do lado direito está a situação revelada pelo eclipse de 1919. Apesar de estar atrás do Sol, a estrela é ainda vista, ligeiramente deslocada, já que os raios de luz provenientes dela não viajam em linha reta, mas numa curva devido às deformações do espaço-tempo causadas pelo Sol.

As duas outras previsões são menos precisas, mas também destacaram a relatividade geral da gravitação de Newton. São situações em que há diferenças qualitativas entre as previsões newtonianas e as relativísticas. A deflexão de raios luminosos por corpos gravitantes é uma delas. A gravitação de Newton não prevê *nenhuma* interação entre a luz e os campos gravitacionais. Como na relatividade geral a gravitação é descrita a partir de deformações do espaço-tempo, qualquer trajetória, seja de raios de luz ou de corpos materiais, sofrerá algum tipo de deflexão ao passar nas proximidades de grandes corpos gravitantes. Essa previsão foi verificada numa famosa expedição, de 1919, ao hemisfério sul para a observação de um eclipse total do Sol. Sir Frank Dyson, o astrônomo real britânico, havia sugerido, dois anos antes, que o eclipse de 1919 poderia ser explorado para verificar a previsão da deflexão da luz. Uma pequena estrela estaria, em linha reta, atrás do Sol no momento do eclipse e, portanto, não deveria ser vista, segundo o paradigma newtoniano (Figura 2). Segundo a relatividade geral, porém, a trajetória da luz emitida pela estrela não seria uma linha reta, mas sofreria um pequeno desvio ao passar próximo ao Sol, possibilitando sua observação durante o eclipse. Dá-se a esse fenômeno o nome de lente gravitacional (4). Na verdade, foram duas expedições, ambas chefiadas por Sir Arthur Eddington, um ilustre astrônomo britânico. Eddington foi à Ilha do Príncipe, em São Tomé e Príncipe, então uma colônia portuguesa na costa ocidental da África. Seus assistentes vieram a Sobral, no Ceará. Quis o destino que o dia 29 de maio de 1919, na Ilha do Príncipe, amanhecesse completamente nublado, impossibilitando qualquer observação astronômica do eclipse. Em compensação, o dia em Sobral, cidade sempre assolada por secas, foi completamente livre de nuvens, e vários dados do evento foram colhidos em placas fotográficas. Todos confirmaram as previsões relativísticas. Essas observações, apesar de menos precisas e de serem posteriores à previsão do avanço correto do periélio de

Mercúrio, trouxeram fama mundial a Einstein. O experimento foi divulgado em todo o mundo, sempre apresentado e ressaltado como uma prova de que a Primeira Guerra Mundial que acabara de terminar estava superada, já que a previsão de um cientista alemão estava sendo comprovada por uma expedição britânica.

A outra previsão em que a relatividade geral mostra-se qualitativamente distinta da gravitação de Newton é o desvio para o vermelho da luz emitida nas proximidades de grandes massas. Uma vez mais, a gravitação newtoniana não prevê nenhum tipo de interação entre o campo gravitacional e os mecanismos de emissão de luz. A relatividade geral, por outro lado, prevê uma interação. O espaço-tempo é deformado na vizinhança de grandes corpos de maneira que os padrões de comprimento e de intervalo de tempo também mudam. A luz é caracterizada pelo seu comprimento de onda; sua cor, em particular, depende de seu comprimento de onda. Seguindo o espectro do arco-íris, as cores avermelhadas têm um comprimento de onda maior e as azuladas, menor. Suponha que uma luz do meio do espectro do arco-íris seja emitida nas proximidades de um grande astro. Sua cor de origem é definida segundo os padrões de comprimento (e de intervalo de tempo) da vizinhança do astro em questão. Ela então viaja e chega a um observador distante, que quase não sofre mais influência gravitacional do astro. Esse observador tem seus próprios padrões de comprimento e de tempo, os quais não são distorcidos pelo astro devido à grande distância. Aquela luz, para ele, terá uma cor diferente, ligeiramente deslocada em direção ao vermelho no espectro do arco-íris. As primeiras observações do desvio para o vermelho foram feitas comparando-se a luz emitida por várias estrelas diferentes (5).

Num artigo publicado em 1918, menos de dois anos após Einstein ter proposto sua teoria da relatividade geral, Hans Thirring e Joseph Lense, dois físicos austríacos, mostraram que a relatividade geral prevê um outro fenômeno que deixaria encantado seu compatriota Mach. Thirring e Lense estu-

daram uma situação em que uma grande casca esférica de massa muito grande gira em torno de seu eixo. Mostraram que a relatividade geral, ao contrário da gravitação newtoniana, prevê a existência de “forças” na região interior da casca. Da mesma forma que a presença de uma grande massa “deforma” o espaço-tempo em sua volta, sua rotação causa também um “arrasto” do espaço-tempo (veja as Figuras 3 e 4). Dá-se a esse arrasto o nome de efeito Lense-Thirring. Suponha que você esteja parado dentro da casca esférica, olhe para cima, e suponha, ainda, que você possa ver também as estrelas distantes. Essa é uma situação semelhante à proposta no princípio de Mach. As estrelas distantes não giram, mas a grande casca esférica sim. Definindo o referencial inercial newtoniano de acordo com as estrelas distantes, seus braços não sentirão nenhuma força enquanto você permanecer parado. Porém, por que devemos definir o referencial a partir das estrelas distantes? Poderíamos defini-lo a partir da casca! Qual será o referencial correto? A casca, apesar de ter uma massa muito grande, é certamente muito mais leve que o resto das estrelas. Algo sugere, então, que pode haver uma situação intermediária na qual o referencial poderia, por exemplo, ser ligeiramente perturbado pela casca esférica em rotação, de maneira que seus braços sentiriam uma pequena fração da força centrífuga, equivalente a uma pequena rotação na mesma direção da rotação da casca. Essencialmente, é essa a previsão de Lense e Thirring. Em 1918, havia pouquíssimas esperanças, se não nenhuma, de verificar experimentalmente o arrasto de referenciais.

A segunda metade do século XX foi marcada pelos experimentos de incrível precisão que estabeleceram a mecânica quântica como a teoria científica mais bem-sucedida da história. Uma de suas previsões, o valor da razão giromagnética do elétron (6), pode ser verificada com uma precisão de 12 casas decimais. A relatividade geral também entrou, no último quarto do século, nessa fase de experimentos de alta precisão. Experimentos realizados no

3. Batizado como Vulcano, chegou a ser tema de várias histórias de ficção científica. Curiosamente, cerca de meio século antes, uma situação semelhante levaria à descoberta de Netuno. Foi, então, a consagração da gravitação newtoniana. John Couch Adams, astrônomo inglês, estudando perturbações inesperadas na órbita de Urano, previu, em 1845, a existência de um novo planeta. Informou sua posição a James Challis, do Observatório de Cambridge. Challis, porém, demorou muito para observar o novo planeta. Enquanto isso, de maneira independente, o francês Urbain Jean Joseph Leverrier fazia uma análise semelhante, em 1846, informou Johann Gottfried Galle, do Observatório de Berlim, que identificou Netuno em poucas horas. Desde então, atribui-se a Leverrier a descoberta teórica da existência de Netuno. Ironicamente, Netuno já havia sido observado desde Galileu! Porém, fora identificado até então como uma fraca estrela. Plutão foi descoberto de maneira semelhante, a partir de discrepâncias observadas na órbita de Netuno, no início do século XX.

4. Situações como essa são usadas atualmente pelo telescópio espacial Hubble para conseguir imagens ampliadas de galáxias distantes. Veja o artigo de Laerte Sodré Jr. neste dossiê.

5. Um experimento da Nasa de 1976, que ficou conhecido como GP-A (Gravity Probe A), mediu o desvio para o vermelho com grande precisão num rápido voo espacial, obtendo, uma vez mais, resultados compatíveis com a relatividade geral.

6. Na verdade, uma previsão de eletrodinâmica quântica.

Figura 3

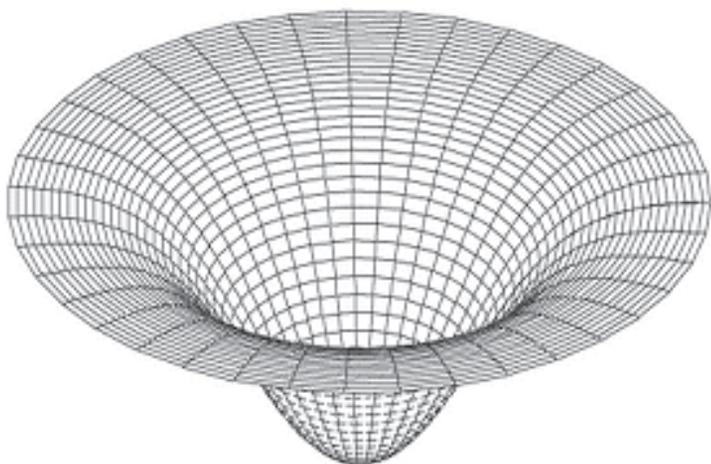


Ilustração bidimensional das deformações do espaço-tempo causadas por um corpo gravitante. Nessa situação, um corpo livre de forças externas não viajaria em linha reta, mas sim sobre essa superfície.

Figura 4

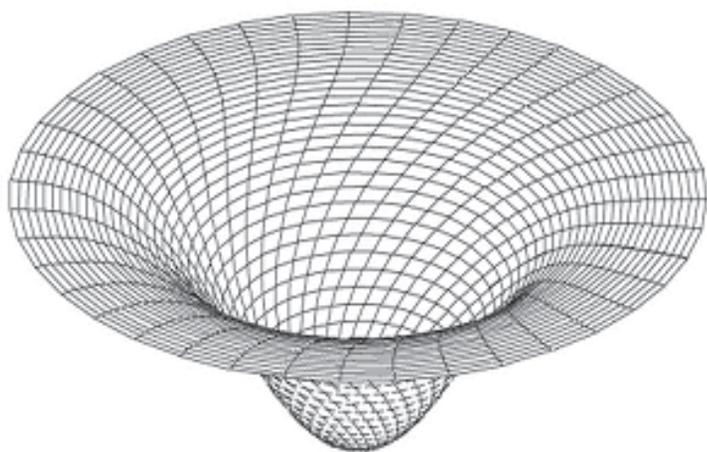


Ilustração bidimensional das deformações do espaço-tempo causadas por um corpo gravitante em rotação no sentido anti-horário. Além dos efeitos descritos na Figura 1, há também um efeito de arrasto na superfície, na direção da rotação do corpo gravitante.

sistema solar usando-se eco de radar melhoraram muito as precisões dos três testes clássicos descritos acima. Várias teorias alternativas à relatividade geral foram descartadas por esses novos experimentos. Até o final dos anos 50, porém, não havia nenhuma proposta para detecção de qualquer efeito associado ao arrasto de referenciais. G. E. Pugh e L. I. Schiff, dois físicos norte-americanos, propuseram ao Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, em 1959, um experimento gravitacional de alta precisão envolvendo giroscópios em órbita da Terra, capaz, em princípio, de verificar diretamente o arrasto de referenciais. Porém, o Sputnik entrara em órbita somente dois anos antes, o primeiro satélite artificial americano, o Explorer I, um ano antes; a corrida espacial tinha então menos de um ano de vida, a proposta de Pugh e Schiff era vista com muito ceticismo. Nascia, contudo, o Gravity Probe B.

É comum atribuir-se a Jean Bernard Leon Foucault, físico francês do século XIX, a invenção do giroscópio. Talvez seja mais correto afirmar que Foucault cunhou o termo giroscópio para o aparelho que consiste num disco metálico que pode girar livremente em torno de um eixo, o qual, por sua vez, pode ser alinhado em qualquer direção (Figura 5). Foucault utilizou um giroscópio num de seus experimentos para determinar o movimento de rotação da Terra. Porém, melhores resultados foram obtidos em seu outro experimento, o do seu célebre pêndulo. Uma vez posto em rotação numa dada direção e estando livre de forças externas, o giroscópio, por conservação do momento angular, *mantém* sempre a mesma direção de rotação. Essa propriedade lhe garante uma vasta área de aplicação, principalmente em sistemas de navegação. O mecanismo de “horizonte artificial” dos aviões envolve um giroscópio. Ganharam fama os giroscópios dos torpedos da Real Marinha Britânica na Segunda Guerra Mundial. A idéia é simples: põe-se o giroscópio a girar na direção que se deseja manter (com as asas na horizontal, para os aviões, na direção do alvo, por exemplo, para os torpedos). Se o avião

se mantiver sempre com as asas na horizontal e o torpedo sempre na direção do alvo, seus respectivos giroscópios não experimentarão nada de anormal. Contudo, se por algum motivo o avião se inclinar ou o torpedo mudar de direção, seu giroscópio “resistirá” à modificação de seu eixo de rotação, o que poderá ser detectado e, eventualmente, ativar algum mecanismo de correção de inclinação ou de rota. Como o giroscópio resiste à modificação de seu eixo de rotação? Essa questão pode ser respondida olhando-se o mais simples dos giroscópios: o pião. Um pião, se posto a girar exatamente na vertical, continuará assim até que toda sua energia seja dissipada nas fricções com o ar e de sua ponta com o solo. Sabe-se, contudo, que é muito difícil, se não impossível, colocá-lo para girar exatamente na vertical. Tipicamente, seu eixo de rotação fará um pequeno ângulo com a vertical. Um bom pião é um objeto simétrico e tem, portanto, seu centro de gravidade ao longo do eixo de rotação. Girando com o eixo de rotação ligeiramente desviado da vertical, a força da gravidade irá induzir um torque em torno do ponto de contato, o qual tentará modificar o eixo de rotação, aumentando o ângulo com a vertical, tentando derrubar o pião. Como o pião reage a isso? Ele *precessa*, isto é, seu eixo de rotação passa a girar em torno da vertical, com uma velocidade angular bem menor que a sua de rotação. A partir da detecção da precessão de um giroscópio pode-se, em princípio, identificar as forças que tentam modificar sua direção de rotação.

A relatividade geral também prevê precessões para um giroscópio. Porém, elas são de natureza distinta da precessão descrita acima no contexto newtoniano. Na relatividade geral, um giroscópio posto a girar numa dada direção também manterá a mesma direção se estiver livre de forças externas. Porém, a pergunta relevante agora é: o que é a mesma direção no contexto da relatividade geral? Como a presença de matéria deforma o espaço-tempo, é natural esperar modificações em “direções previamente fixas”. A proposta de Pugh e Schiff

consistia em colocar um giroscópio numa órbita circular em torno da Terra, passando pelos pólos (veja Figura 6). Esse giroscópio, livre de qualquer força externa, seria alinhado numa direção fixa e então seria posto a girar. A relatividade geral prevê duas contribuições completamente diferentes para a precessão do giroscópio. A primeira é chamada de precessão (ou desvio) geodésica(o) e se deve à deformação do espaço-tempo devido à presença da Terra (veja Figura 3). Esta é independente da rotação da Terra, seria idêntica mesmo se a Terra não girasse. A segunda, muito mais tênue, é a chamada precessão de arrasto (Figura 4). Corresponde a um desvio do eixo de rotação do giroscópio na direção de rotação da Terra, como se esse tentasse acompanhá-la. Como a Terra é muito mais leve que “as estrelas distantes”, a precessão de arrasto tem uma velocidade angular muito pequena. A analogia com o efeito Lense-Thirring e com o princípio de Mach é bastante pertinente. Pode-se calcular com boa precisão essas precessões como fun-

Figura 5



Um giroscópio simples: um disco metálico que pode girar em torno de seu eixo, preso a dois anéis móveis de tal maneira que o eixo de rotação do disco pode ser alinhado em qualquer direção.

ção da órbita circular do giroscópio e dos parâmetros da Terra. Essa é a base teórica do fantástico experimento Gravity Probe B (GP-B) (7). Desde sua concepção teórica até o efetivo lançamento do satélite algumas semanas atrás, 45 anos se passaram e 700 milhões de dólares foram investidos. Pugh e Schiff não puderam presenciar o funcionamento de seu experimento, classificado pela própria Agência Espacial Norte-Americana (Nasa) como o maior desafio científico e tecnológico em que ela esteve envolvida.

Há vários pontos críticos nesse experimento. Os mais de quarenta anos do projeto foram dedicados basicamente a superá-los. Destacam-se:

1) *A construção de giroscópios de precisão.* A medição de efeitos tão pequenos como os propostos requer giroscópios in-

trinsecamente estáveis, que garantam que seus eixos de rotação possam ser mantidos numa mesma direção com uma precisão de 10^{-8} "/hora (8).

2) *Método de leitura da precessão.* É necessário um método para determinar as precessões do giroscópio sem induzir perturbações sensíveis.

3) *Estrutura estável.* Os giroscópios devem estar montados numa estrutura mecanicamente muito estável, livre de vibrações e de perturbações eletromagnéticas, a qual deve ser direcionada com grande precisão.

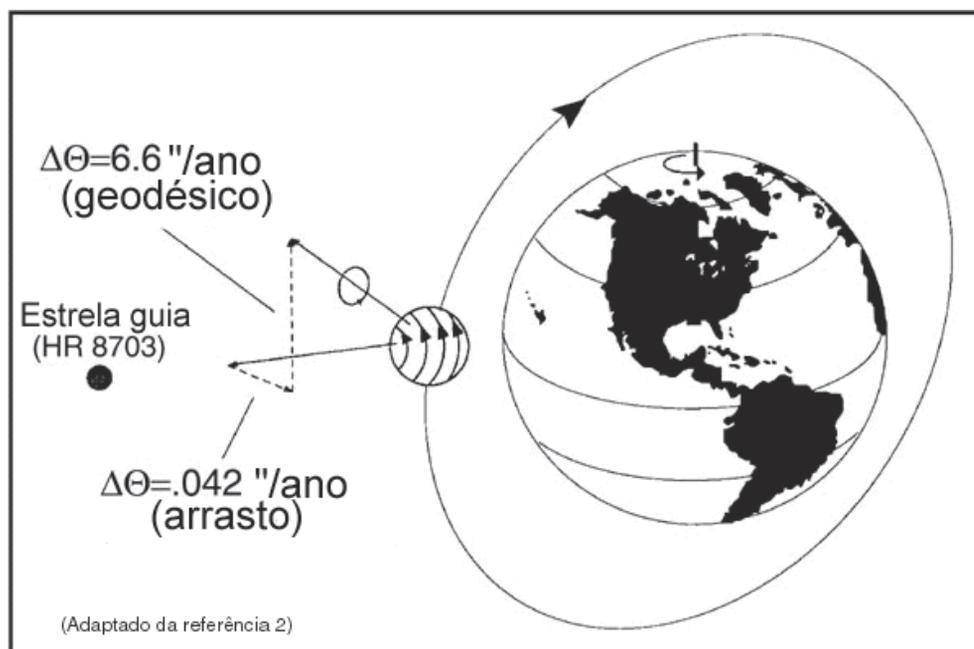
4) *Estrela guia adequada.* Os giroscópios devem ser apontados para uma estrela brilhante e com movimento conhecido.

O GP-B possui 4 giroscópios. São esferas de quartzo, do tamanho de bolas de pingue-pongue, recobertas por uma finíssima,

7. <http://einstein.stanford.edu/>

8. $1'' = 1$ segundo de arco. $1^\circ = 3.600$ segundos de arco.

Figura 6



O giroscópio viaja numa órbita circular que passa pelos pólos da Terra e é coplanar à estrela guia HR 8703 (Pégasus), a qual marca a direção de rotação do giroscópio. A precessão tem duas componentes: a geodésica, tangencial à órbita, e a de arrasto, muito mais tênue, na direção da rotação da Terra.

uniforme e pura camada de nióbio. Os desvios de esfericidade desses giroscópios são inferiores a 40 camadas atômicas. Se a Terra tivesse o mesmo grau de esfericidade, a maior montanha teria meio metro de altura. Esses são os objetos mais esféricos já construídos e provavelmente os mais esféricos existentes na nossa vizinhança astronômica. Somente estrelas de nêutrons são mais esféricas. A fabricação dos giroscópios só foi possível devido à invenção de várias técnicas novas de lapidação, polimento e recobrimento metálico, além de novos instrumentos para a medição do diâmetro das esferas. O giroscópio é mantido em suspensão dentro de seu receptáculo aplicando-se campos elétricos adequados. Evitando, pode manter sua velocidade de 10.000 rotações por minuto, obtida a partir de um fluxo de gás hélio de alta velocidade, por muito tempo; as perdas no sistema isolado são praticamente desprezíveis. Os giroscópios são mantidos a uma temperatura muito baixa, pouco acima do zero absoluto. Nessas condições, o nióbio que os recobre torna-se supercondutor. Um supercondutor, ao girar, dá origem a um campo magnético específico, o chamado momento de London, sempre alinhado com a direção de rotação. Tem-se aqui o mecanismo de detecção das precessões sem perturbar os giroscópios: o monitoramento do momento de London (9). Os quatro giroscópios giram na mesma direção, dois deles em sentido contrário. Essa configuração é a mais apropriada para eliminar erros sistemáticos.

Os giroscópios estão montados num corpo também de quartzo, o qual contém, ou é, o próprio telescópio. O corpo é composto por várias peças, montadas sem nenhum tipo de cimento ou cola. Todas as peças que devem ser unidas têm suas superfícies de contato polidas com grande precisão, de maneira que, ao aproximá-las, mantenham-se fortemente unidas devido às forças de atração moleculares. É o chamado contato óptico. O telescópio é usado para se fixar a direção do corpo e, em consequência, dos quatro giroscópios. A direção escolhida foi a da distante estrela HR 8703

(Pégasus), a qual possui um movimento bem conhecido. Tal estrela é, na verdade, um sistema binário bastante brilhante. Sua localização com relação a um referencial extragaláctico definido a partir de quasares (10) distantes é conhecida com um erro inferior a 0.0001 "/ano.

O GP-B é mais do que um triunfo tecnológico. Seus críticos lembram constantemente o seu altíssimo custo e a pouca importância da detecção do arrasto de referenciais atualmente. A precisão do GP-B para a precessão de arrasto será da ordem de 1%. Já existem evidências astronômicas indiretas do fenômeno, com precisão semelhante. Contudo, uma observação direta nunca foi feita. A precessão geodésica, por sua vez, poderá ser verificada no GP-B com uma precisão de 0,01%, algo nunca obtido antes. Será a medição mais precisa à qual a relatividade geral foi submetida. As tecnologias desenvolvidas durante o projeto e construção do GP-B já tiveram diversas e inesperadas aplicações. Não será uma surpresa se, a médio prazo, o retorno financeiro desses investimentos superar facilmente os 700 milhões de dólares. Por exemplo, as técnicas de construção de esferas altamente precisas estão sendo agora aplicadas à nova definição do quilograma padrão. Quase todos os satélites de comunicação atuais usam uma técnica desenvolvida pela equipe do GP-B para determinação e correção de órbitas. Essas novas técnicas estão possibilitando uma revolução no estudo topográfico do planeta, principalmente no estudo dos mares. O sistema de isolamento térmico do telescópio e alguns dispositivos optoeletrônicos desenvolvidos para o GP-B já estão sendo usados em produtos comerciais, principalmente em câmeras fotográficas digitais. Contudo o produto mais valioso do projeto foi a capacitação humana. Foram defendidas nos EUA, até agora, 28 teses de doutorado ligadas diretamente ao GP-B, e mais 31 estão na reta final. Em um âmbito mais amplo, foram mais de 70 teses já defendidas. Segundo a Nasa, são estes os principais subprodutos do GP-B, de valor incalculável.

9. Devido ao momento de London, o giroscópio se comporta como um SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), um dispositivo capaz de realizar medições de altíssima precisão.

10. Objetos dos mais distantes do universo, de aparência puntual para efeitos do GP-B.