

A INTERAÇÃO GRAVITACIONAL

Mario Novello

1. A força gravitacional

Talvez a característica da teoria da gravitação de Einstein que seja menos compreensível para os não-iniciados é sua identificação com a estruturação da geometria do mundo. Estamos acostumados, em nosso cotidiano a conviver com uma geometria única, imutável, que serve como pano-de-fundo de todos os processos do mundo. Isso nós herdamos da física newtoniana. Até o final do século XIX essa estrutura se identificava com a geometria euclideana tri-dimensional. No começo do século XX essa estrutura absoluta se transformou em uma outra estrutura absoluta: a geometria minkowskiana a quatro dimensões que unificou o espaço e o tempo em um só conceito. Finalmente, na segunda década do século XX essa estrutura absoluta sofreu uma profunda crítica e ganhou outra formulação, passando a constituir uma configuração variável, dependente da presença de matéria e energia. Como foi isso possível?

2. De 1905 a 1915

Em 1915 o físico alemão Albert Einstein fez uma revolução conceitual sobre a estrutura da geometria do espaço e do tempo, alterando profundamente a teoria da gravitação proposta três séculos antes por Isaac Newton e, desse modo, retirando da Inglaterra a honra de ter sido o berço do cientista que havia desvendado o profundo segredo envolvendo as forças que controlam os astros e os planetas em suas andanças cósmica. A história até chegar-se a este ponto é longa e aqui eu me limitarei a tratar somente de uma introdução deixando seus detalhes para outro lugar.

Ao final da idade média, graças a um longo trabalho desenvolvido por um grande número de astrônomos – como Tycho Brahe e Johannes Kepler – havia-se conseguido acumular um número suficiente de informações sobre o mundo supra-lunar capaz de permitir uma fantástica especulação sobre a existência de uma força universal capaz de atuar sobre qualquer forma de matéria. Com o ponto de apoio tomado sobre observações locais, em nossa vizinhança terrestre, acreditando na hipótese reducionista da unidade do mundo e apossando-se da simplificação formal como um instrumento poderoso na elaboração da realidade, os astrônomos ao final do século XVI estavam preparados para lançar a hipótese da existência da lei de gravitação universal. Foi o que Isaac Newton fez ao caracterizar a atração gravitacional como uma força que se espalha instantaneamente

por todo o espaço e cuja intensidade depende da proximidade do corpo material que lhe deu origem. A lei universal da gravitação proposta no século XVI permitiu unificar todos os processos de atração entre os corpos. Assim, qualquer forma de matéria, seja sobre a Terra (como no famoso exemplo da maçã), seja em corpos celestes (como planetas e estrelas) obedecem a um único tipo de força, a gravitação universal. O efeito desta força – por exemplo, a atração de uma estrela como o Sol – seria sentida em todo o espaço, sendo que sua intensidade diminuiria com o inverso do quadrado da distância. Essa primeira formalização dessa lei da gravitação foi certamente um imenso passo na descrição dos fenômenos astronômicos permitindo melhor classificar e compreender os movimentos de corpos materiais em nossa vizinhança, obtendo enorme sucesso ao exhibir as causas de diversas regularidades nos céus, e em particular o movimento dos planetas girando ao redor do Sol.

Durante quase trezentos anos, os fenômenos que os astrônomos observavam nos céus foram bem descritos por essa lei. Não havia necessidade observacional capaz de diminuir a certeza de sua validade pelos astrônomos. Entretanto, razões de natureza teórica, devido a alterações ocorridas na física nos últimos anos do século XIX e no começo do XX produziram um modo novo de descrever a realidade que resultou ser incompatível com a formulação da gravitação de Newton. A descrição newtoniana poderia ser ainda usada como uma expressão aproximada dos fenômenos gravitacionais, para explicar de modo simples por que, por exemplo, se eu soltar de minha mão essa caneta com que estou escrevendo esse texto, ela cairá. Entendemos que isso ocorre graças à força que a Terra exerce sobre a caneta. Entretanto, uma tal explicação deve ser abandonada quando se trata de descrever processos na presença de campos muito fortes.

Antes de entrarmos nessa análise uma característica desta teoria newtoniana deve ser explicitada, pois embora ela não provocasse nenhuma dificuldade formal para sua aceitação, ela estava na origem da crítica maior que se seguiu quando, na segunda década do século XX, Einstein produziu uma nova teoria da gravitação. Qual era esta propriedade que passou invisível aos olhos dos antigos?

A descoberta da existência da atração universal, capaz de permitir a compreensão de propriedades regulares observadas no movimento de planetas vizinhos, trazia embutida a ausência do tempo. A lei newtoniana tratava do movimento e, conseqüentemente, da passagem do tempo, e no entanto, ela não apresenta nenhuma referência ao tempo. Isto é, a ação de um corpo sobre outro, essa interação universal que permitia compreender as leis locais de movimento dos planetas, ela mesma, era instantânea: não requeria um “passar do tempo” para exercer sua ação; não precisava de tempo para sua influência se fazer sentir; ela se propagava como se

possuísse uma velocidade infinita; ou, para ser mais exato, não se propagava.

Uma tal propriedade aparece hoje, aos olhos modernos dos cientistas como totalmente inadmissível, pois mesmo os fótons – os grãos de luz que se movimentam com a maior velocidade possível – requerem tempo para ir de um lugar a outro. Um raio de luz leva alguns minutos para sair do Sol e chegar à Terra. E, quanto mais longe, maior seu tempo de percurso. Sabemos até mesmo que, como as estrelas possuem um processo evolutivo, podendo ter um tempo de existência finito, podemos estar vendo nos céus uma estrela que já não mais existe. Sua distância pode ser tão grande que a luz que ela emitiu quando ainda existia, demorou tanto tempo para atravessar os espaços siderais que aquela estrela pode não mais existir, tendo explodido e dado origem a poeira estelar, o que só poderá ser observado na Terra em futuro longínquo.

No entanto, nos séculos que seguiram esta descoberta newtoniana até o início do século XX, a condição da ação gravitacional ser instantânea, era entendida como uma propriedade “natural” igual às suas outras características. O fato de não ser observável não produzia nenhum desconforto de princípio para os cientistas. Em verdade, nem sequer era possível formular uma tal questão: o tempo não aparecia como um ingrediente importante no modo newtoniano de descrever a ação gravitacional. Somente sua ação sobre um corpo estava associada a uma variação temporal. O tempo aparecia como uma variável importante ao se acompanhar o movimento de um corpo sob a força gravitacional, mas não era listado entre as características desta força. Foi somente ao final do século XIX e início do século XX que a instantaneidade da força gravitacional começou a ser entendida como um verdadeiro problema, uma dificuldade associada ao modo newtoniano de descrever este campo de força. Para entendermos essa mudança de atitude devemos nos referir à revolução feita na física ao começo do século XX, por vários cientistas dentre os quais podemos citar H. Poincaré, H. A. Lorentz e A. Einstein, entre outros. Esta mudança foi sintetizada por Einstein no que chamou de teoria da relatividade especial.

3. Teoria da Relatividade Especial

De um modo geral, exceto em uns poucos momentos singulares excepcionais, a atividade científica é um trabalho coletivo. Não somente nos caminhos através dos quais, a partir de observações de fenômenos na natureza, uma mudança no modo de descrever a realidade se estrutura, mas no próprio início da análise crítica de uma dada descrição formal, capaz de gerar uma mudança de paradigma. O caso da relatividade especial não fugiu a esta regra.

Ao final do século XIX os físicos haviam conseguido organizar uma descrição da realidade sustentada em dois grandes esquemas conceituais, dois pilares sobre os quais praticamente toda a física se erguia: a mecânica e o eletromagnetismo. A mecânica permitia descrever movimentos dos corpos materiais gerados por quaisquer forças. Além das forças de contato entre os corpos, o eletromagnetismo constituía, juntamente com a gravitação, as duas únicas forças de longo alcance conhecidas.

Entretanto, havia uma grande diferença na explicação envolvendo o modo pelo qual estas forças exercem suas ações sobre os diferentes corpos. A gravitação era pensada, desde Newton, como uma força instantânea, isto é, exibindo sua presença nas regiões mais longínquas, nos domínios intermináveis do universo, como se possuísse uma velocidade “infinita” para sua ação. A força eletromagnética parecia totalmente distinta. Faraday e seus contemporâneos elaboraram a fantástica noção de campo-de-força que iria se constituir no paradigma moderno de toda forma de interação entre dois corpos quaisquer. Este modo novo, dito “de campo”, proposto na descrição das forças eletromagnéticas supõe a existência de uma ação contígua no espaço e no tempo de tal modo que um movimento contínuo exercido por um agente do campo se propaga a partir de uma fonte geradora de uma força eletromagnética. Contrariamente à força gravitacional, a força eletromagnética não é exercida sobre e por qualquer corpo. Para interagir desta forma, um corpo material deve possuir uma qualidade especial, particular, intrínseca, que se chamou “carga elétrica”. Esta carga desempenharia um papel análogo na força eletromagnética, àquele que é desempenhado pela massa na força newtoniana gravitacional.

Por que alguns corpos possuem carga elétrica e outros não, os físicos não sabem. Trata-se de uma constatação, da observação continuada e nunca violada de que para exercer uma força eletromagnética, um corpo deve possuir esta qualidade especial: a carga elétrica. O valor desta carga vai determinar a intensidade do campo por ela gerada. Quanto maior a carga, maior a intensidade de campo, mais forte a ação eletromagnética. Tudo se passa, como se cada corpo carregado produzisse em sua volta um campo de forças – apto a exercer sua influência sobre outros corpos carregados – que seria tão maior quanto mais próximo da carga. Curiosamente, de modo semelhante à interação gravitacional, a intensidade do campo eletromagnético também varia inversamente com a distância.

No final do século XIX ficou claro que um corpo carregado cria em sua volta um estado de tensão que se propaga com velocidade finita. Essa velocidade associada ao processo de interação constituía a principal diferença entre o eletromagnetismo e a gravitação. Essas duas visões do mecanismo pelo qual ocorre uma interação são irreconciliáveis e a necessidade de escolher entre um modo ou outro passou a ser o grande

problema a ser resolvido. A observação permitiu decidir entre estas duas descrições formais quando se descobriu que se deveria aceitar a velocidade da luz (no vácuo) como absoluta e máxima para qualquer forma de propagação. A partir deste momento não era mais possível considerar a formulação newtoniana como representando a força gravitacional e sua velocidade de propagação infinita.

Alguns anos antes de construir uma nova teoria da gravitação, Einstein realizou um trabalho formidável de síntese no que chamou de teoria da relatividade especial, envolvendo algumas questões que ao final do século XIX haviam colocado em contradição a mecânica e o eletromagnetismo. Nesta teoria, deu publicidade a uma fórmula que lhe angariou enorme fama, ao afirmar que embora energia e matéria pudessem ter configurações distintas e múltiplas, elas poderiam ser entendidas de modo unificado. Com efeito, a fórmula

$$E = Mc^2$$

permite quantificar a energia máxima que é possível ser obtida a partir de um corpo material de massa M . Esta identificação entre matéria e energia – produzida na teoria da relatividade especial – permitiu estender a lei de Newton não somente a corpos materiais (uma maçã, um planeta) como também a energias (como, por exemplo, a radiação eletromagnética constituída por fótons, os grãos elementares da luz). A observação do eclipse solar em Sobral (Ceará) em 29 de maio de 1919, permitiu comprovar que a luz sofre também a atração gravitacional. Quando a luz passa na vizinhança de um corpo massivo, como o Sol, por exemplo, ela é desviada de sua trajetória. Este passo, que permitiu a máxima generalização da universalização da interação gravitacional, levou Einstein pensar a força gravitacional como sendo nada mais do que modificações produzidas na geometria do espaço-tempo com o qual descrevemos a localização e os movimentos dos corpos.

4. Teoria da Relatividade Geral (a gravitação)

Este caráter universal da força gravitacional conduziu, no século XX, à primeira grande modificação da teoria de Newton. Com efeito, podemos constatar que todo corpo é atraído por outro corpo qualquer, independentemente de suas constituições químicas. Não há nenhuma forma de matéria e/ou energia que seja imune à ação desta força. Em verdade, tudo que existe sente a interação gravitacional. Talvez o modo mais contundente de referirmo-nos a este caráter universal da gravitação esteja contida na afirmação[1]

CAIO, LOGO EXISTO!

Isso significa que não existe nenhum corpo material ou forma de energia que esteja isenta de interação gravitacional. Toda matéria, todo corpo, toda partícula, elementar ou não, toda forma de energia possui interação gravitacional. Essa propriedade é única, pois a outra força clássica de longo alcance conhecida - a força eletromagnética - não possui esta propriedade. Com efeito, existem corpos materiais compostos ou elementares - como a partícula chamada neutrino - que podem passar incólume por uma região onde exista um campo eletromagnético sem que ela seja influenciada de forma alguma por este campo: diz-se que o neutrino não possui interação eletromagnética!

Foi precisamente este caráter universal da força gravitacional que permitiu pensá-la como uma força completamente distinta de todas as outras que os físicos conhecem. Com efeito, posto que tudo-que-existe sente a ação de um campo de força gravitacional, não seria possível - perguntou-se Einstein - substituir sua descrição por algum tipo de fenômeno associado à natureza do substrato único que permeia toda a matéria e energia, que está em contato íntimo com toda a matéria e energia que existe, ou seja, o contínuo espaço-tempo?

Neste ponto Einstein introduz um novo conceito argumentando que a força gravitacional pode ser identificada com a estrutura da geometria do espaço-tempo. Ato seguinte, é levado a modificar a teoria então vigente argumentando que a dinâmica newtoniana é somente uma teoria aproximada, capaz de descrever campos gravitacionais fracos. A nova dinâmica requer uma relação entre a geometria e o conteúdo material/energético existente na região onde se passa a interação gravitacional. A teoria da relatividade especial de 1905 havia dado um enorme passo ao fundir o espaço tri-dimensional ao tempo formando uma nova unidade, a estrutura espaço-tempo, e constituiu um momento culminante de uma longa aventura do pensamento unificando a descrição da física. A geometria do espaço-tempo introduzida na teoria da relatividade especial se baseava em uma configuração rígida, imóvel, capaz de servir de arena ou pano-de-fundo de todos os processos físicos.

Na teoria da relatividade geral, em 1915, Einstein dá um enorme passo ao sugerir que a força gravitacional (produzida por campos materiais e energia sob qualquer forma) poderia ser descrita como uma modificação efetiva da geometria do espaço-tempo. A identificação entre matéria e energia - produzida na teoria da relatividade especial - permitiu estender a lei de Newton não somente a corpos materiais (uma maçã, um planeta), como também a energias (como por exemplo a radiação eletromagnética constituída por fótons, os grãos elementares da luz).

Este passo, ao retirar todas as conseqüências da universalização da interação gravitacional, permitiu a Einstein pensar a identificação da força gravitacional com modificações na própria geometria do espaço-tempo com o qual limitávamos a descrever a localização e os movimentos dos

corpos. A geometria do mundo passa a ser identificada com a força gravitacional. As conseqüências dessa proposta são fantásticas e dentre essas podemos singularizar a possibilidade de gerar um modelo cosmológico para o universo [2].

5. Catástrofes cósmicas

Embora a gravitação seja uma força muito fraca, em escalas astronômicas ela pode produzir efeitos muito intensos. Dentre esses, o mais conhecido graças à sua popularização pela mídia, é o buraco negro, entendido como o resultado final de um colapso gravitacional de estrelas massivas. Na cosmologia, a hipótese da criação do universo a partir de uma “explosão inicial” também adquiriu grande popularidade. Há no entanto uma grande diferença entre esses dois processos quanto ao seu impacto sobre o conhecimento. Enquanto o buraco negro pode ser entendido como uma visão limitada do processo do colapso e uma análise ulterior sobre sua evolução pode retirar o caráter definitivo do colapso, eventualmente por emissão de radiação; no caso do Big Bang a estrutura resultante inibe completamente uma análise racional sobre os mecanismos que fizeram o universo se projetar no real. Isso porque a versão tradicional do Big Bang impede qualquer investigação sobre sua origem inibindo o pensamento científico de ir além. Felizmente – opondo-se a esse enorme movimento de difusão dessa imagem “criacionista” do universo que foi imposto à sociedade – nos últimos tempos a versão de um universo mais complexo, envolvendo uma fase de colapso gravitacional anterior à atual fase de expansão, tem adquirido aceitação não somente na comunidade científica como também na mídia. Nessa versão, o universo teria iniciado um colapso onde todo o volume do tri-espaco diminuiu com o tempo, atingiu um volume mínimo e depois então iniciou seu processo de aumento do volume – fase na qual nos encontramos. De imediato, podemos entender o ponto de condensação máxima desse cenário como a versão atual do antigo Big Bang, embora sem as dificuldades formais e a singularidade associadas àquele antigo modelo. Por outro lado, novas questões aparecem, como por exemplo: o que teria dado origem àquele colapso primordial do universo e o que seria isso que teria colapsado? Os cosmólogos têm respondido a essas questões e produzido uma enorme riqueza conceitual, permitindo continuar a caminhada iniciada pelos astrônomos como Tycho Brahe, Johannes Kepler e outros, como descrevi em outro lugar [3].

6. Comentários

Malgrado o sucesso que a descrição de fenômenos relacionados à força gravitacional pela teoria da relatividade geral obteve ao longo do século XX, diversas propostas de modificação dessa teoria tem aparecido nos últimos anos. A principal fonte das dificuldades dessa teoria tem sua origem em questões astronômicas. Isso é compreensível, pois a gravitação é uma interação extremamente fraca e só é dominante em processos

envolvendo grandes quantidades de matéria ou em grandes dimensões de espaço e tempo. Assim, como uma estratégia para salvar a relatividade geral, os físicos têm examinado a possível existência de fontes esdrúxulas para a gravitação que tem recebido nomes de fantasia inconvenientes como matéria escura e energia escura. Esses nomes representariam novas formas de energia e/ou configurações especiais, não usuais, de matéria de diferentes tipos. Assim, os processos observados incapazes de serem compreendidos à luz da Relatividade Geral estariam associados não à necessidade de alterar aquela teoria mas sim à presença—até então passada despercebida – de novas formas de matéria e/ou novas propriedades de configurações especiais. Ainda assim, pequenas alterações da Relatividade Geral estão sendo orquestradas por diversos grupos de pesquisa tentando dar sentido àquelas configurações. A quase totalidade dessas modificações se limitam a sofisticadas reformas da Relatividade Geral sem ousar mexer em seus alicerces fundamentais. Trata-se de um procedimento que visa limitar as modificações no comportamento da dinâmica da gravitação para torná-la compatível com dados observacionais astronômicos e, em particular, em seus aspectos cosmológicos envolvendo questões globais do universo, minimizando seus ajustes formais.

Em alguns momentos essa insatisfação tem produzido afastamentos maiores daquela teoria que tem aparecido na comunidade científica mas que, devido ao status que a Relatividade Geral adquiriu como versão paradigmática dos processos gravitacionais, ainda são tratados pela maioria dos físicos como propostas colaterais que não adquiriram junto à essa comunidade um status capaz de substituir a Relatividade Geral.

O cientista e filósofo Ernst Mach argumentava, ainda no século XIX, que para empreender uma crítica profunda de uma teoria científica deve-se proceder em um primeiro momento como um historiador, examinando suas origens, procurando conhecer os caminhos seguidos para construí-la e, especialmente, as alternativas que seu fundador conhecia (ou não) e entender os motivos pelos quais ele não as seguiu. Assim fazendo, estaríamos reproduzindo os passos principais que lhe permitiram estabelecer aquela teoria. Em um segundo momento, deveríamos entender as razões de seu sucesso. E, por fim, entender como seus pares foram convencidos pelos seus argumentos até o momento em que essa teoria se estabeleceu hegemonicamente como tal. É esse movimento que os cientistas estão empreendendo para podermos erigir em bases sólidas uma refundação da gravitação.

Se comento essas questões é somente para deixar claro que, embora nesse texto eu tenha limitado meus comentários à teoria da relatividade geral, isso não deve ser entendido como a aceitação de que essa teoria consiga esclarecer todos os aspectos conhecidos dos processos envolvendo a interação gravitacional. Em outro lugar tratei da análise da

mudança que deve ocorrer na teoria da gravitação para que seja capaz de descrever os novos fenômenos no universo, em particular torná-la compatível com a descrição do mundo microscópico e capaz de produzir uma unificação entre o macro e o micro. Seu caráter extremamente técnico me impede de apresentá-la aqui.

[1] M. Novello, Os Jogos da Natureza. Editora Campus Elsevier (2004).

[2] M. Novello, O que é cosmologia? Editora Jorge Zahar (2006)

[3] M. Novello, Do big bang ao universo eterno; Editora Jorge Zahar (2010).

Glossário

Apresento aqui algumas propriedades associadas a termos técnicos. Eles não devem ser entendidos como definições mas sim como formas simplificadas do modo como são usados comumente.

Astronomia: estudo dos planetas, estrelas e demais objetos celestes.

Astrofísica: estudo da natureza física dos objetos celestes, sua composição, configurações e evolução dinâmica.

Astrofísica Relativista: aplicação das teorias relativistas (especial e geral) à Astrofísica.

Cosmologia: estudo do Universo, identificado com tudo-que-existe, isto é, matéria, energia, espaço e tempo.

Relatividade Geral: teoria elaborada em 1915 pelo físico alemão Albert Einstein para descrever a força gravitacional em substituição à teoria de Newton (século XVII).

Singularidade: região do espaço-tempo onde, na teoria da relatividade geral, quantidades físicas associadas ao campo gravitacional assumem valor infinito. Em particular, o próprio campo gravitacional deixa de ser observável.

Modelo cosmológico: A força gravitacional é a principal responsável pelas propriedades globais do universo. Dentro da descrição da relatividade geral, um modelo cosmológico é uma solução da dinâmica dessa teoria que não possui características localizadas e que deve ser considerada válida em todo o espaço-tempo: sua ação se espraia globalmente.

Cenário cosmológico: consiste em uma descrição concertada de várias

áreas da física, envolvendo não somente a força gravitacional, bem como os diferentes mecanismos da interação da matéria entre si e com o campo de gravitação.

Curvatura do espaço-tempo: Na relatividade geral, matéria e energia sob qualquer forma, influenciam as propriedades geométricas do espaço e do tempo. Tudo se passa como se este espaço-tempo fosse uma substância com propriedades elásticas afetadas pelos corpos materiais, produzindo buracos nesta estrutura e assim modificando o movimento dos corpos em interação. Estes sulcos no tecido espaço-tempo são maiores ou menores conforme a intensidade do processo gravitacional. A curvatura do espaço-tempo deve ser considerada uma medida da intensidade da força gravitacional.

MARIO NOVELLO é professor e pesquisador do CBPF. Possui doutorado em Física – Université de Génève (1972) sob a orientação do Professor J. M. Jauch. Possui mestrado em Física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (1968) sob orientação do Professor José Leite Lopes. Criou em 1976 o grupo de Cosmologia e Gravitação no CBPF, inaugurando em nosso país o estudo sistemático da Cosmologia. Elaborou em 1979 o primeiro modelo cosmológico com solução analítica que possui *bouncing* (ricochete), isto é, neste modelo o Universo possui uma fase anterior de colapso, onde o volume total do espaço diminuiu com o tempo, atingido um valor mínimo e, depois, passou a se expandir. Em 2003 criou o Instituto de Cosmologia Relatividade e Astrofísica (ICRA) que foi alocado no CBPF. Recebeu em 2004 o título de Doutor Honoris Causa pela Universidade de Lyon (França) por seus estudos sobre modelos cosmológicos sem singularidade. Foi nomeado em 2008 Cesare Lattes ICRANet Professor pelo Comitê Científico do International Center for Relativistic Astrophysics (ICRANet), presidido pelo Prêmio Nobel da Física (2002) Riccardo Giacconi. Em 2010 foi homenageado pela Comunidade Científica Internacional com o I Symposium Mario Novello on Bouncing Models. Em 2012 foi nomeado Professor Emérito do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas por sua atuação como cientista e formador de cientistas durante os 40 anos de trabalho no CBPF. Escreveu, entre outros livros, *O que é Cosmologia?* pela Editora Jorge Zahar, onde identifica a função da Cosmologia como uma re-fundação da Física.

Artigo publicado na Revista Carbono #5

[Gravidade - verão 2013/2014]

<http://www.revistacarbono.com/edicoes/05/>

Todos os direitos reservados.