

## Gravitação

Orfeu Bertolami\*, Cláudio Gomes

Departamento de Física e Astronomia, FCUP/ CFP/ Universidade do Porto

\*orfeu.bertolami@fc.up.pt

### CITAÇÃO

Bertolami, O, Gomes, C (2017)  
Gravitação,  
*Rev. Ciência Elem.*, V5(03):032.  
[doi.org/10.24927/rce2017.032](https://doi.org/10.24927/rce2017.032)

### EDITOR

José Ferreira Gomes,  
Universidade do Porto

### RECEBIDO EM

17 de julho de 2017

### ACEITE EM

5 de setembro de 2017

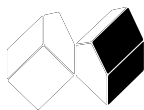
### PUBLICADO EM

30 de setembro de 2017

### COPYRIGHT

© Casa das Ciências 2017.  
Este artigo é de acesso livre,  
distribuído sob licença Creative  
Commons com a designação  
[CC-BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), que permite  
a utilização e a partilha para fins  
não comerciais, desde que citado  
o autor e a fonte original do artigo.

[rce.casadasciencias.org](http://rce.casadasciencias.org)



A força da gravitação de Newton é a força atrativa entre quaisquer dois corpos no Universo de massas,  $m_1$  e  $m_2$ , que é proporcional ao produto dessas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os centros de massa destes corpos,  $r$ , e é dada em módulo por:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

onde  $G = 6.674287 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$  é a constante da gravitação universal de Newton. A gravitação foi a primeira interação fundamental da Natureza a ser descrita matematicamente de forma detalhada.

Desde a publicação dos *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* em 1687<sup>1</sup>, é conhecida a formulação da gravitação universal de Newton enunciada acima e que descreve quase exatamente o movimento planetário, o fenómeno das marés, e um vasto conjunto de factos de Mecânica Celeste, assim como a propriedade de todos os corpos caírem com a mesma aceleração quando em queda livre à superfície da Terra.

Para percebermos o poder preditivo da teoria da gravitação de Newton, recordemos que, em 1845, o astrónomo francês Le Verrier previu a existência do planeta Neptuno com base nas irregularidades por ele causadas na órbita do planeta Urano. Em 1846, o planeta Neptuno foi descoberto pelo astrónomo Johann Galle no Observatório de Berlim, exatamente como previsto pela gravitação de Newton.

Efetivamente, a descrição de Newton só foi demonstrada ser inexata em 1919, aquando do primeiro teste direto da [Teoria da Relatividade Geral](#) (TRG) formulada por Einstein em novembro de 1915. Nesta teoria, a força gravitacional é substituída pela noção de curvatura do espaço-tempo e por uma complexa equação tensorial para o [tensor métrico](#): a equação de campo de Einstein. A incógnita desta equação é o tensor métrico, o objeto matemático que permite calcular a curvatura do espaço-tempo. A equação de campo de Einstein corresponde a dez equações diferenciais a derivadas parciais, acopladas e não-lineares.

Em 1916, Einstein previu a existência de ondas gravitacionais, isto é, de perturbações no espaço-tempo, que se propagam neste à velocidade da luz, e que só foram detetadas em 2015.

Em 1917, Einstein fez outra descoberta espantosa, nomeadamente que a história e a evolução do Universo eram uma solução das equações da sua teoria. Por conta das limitações do conhecimento de então sobre a extensão do Cosmos e sobre o papel das galáxias na descrição cosmológica, inicialmente Einstein rejeitou esta evolução e modificou as suas equações. Não obstante, o trabalho seminal de 1917 fundou a ciência cosmológica.

Ao nível do Sistema Solar, a TRG descreve os fenómenos gravitacionais com uma impressionante precisão, na verdade, teoria e observações são consistentes entre si em 5 casas decimais!

Contudo, às escalas galácticas e à escala do Universo como um todo, a TRG descreve adequadamente a formação de galáxias, a coesão dos enxames de galáxias e as observações mais recentes sobre a expansão do Universo, se e somente se mais matéria não relativista (com velocidades muito menores que a velocidade da luz) e mais energia do que a observada através do brilho das estrelas e da radiação em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético (infravermelho, visível, ultravioleta, raio-X, etc) for introduzida nas equações de Einstein. De facto, a compatibilidade entre a TRG e as observações astrofísicas e cosmológicas é totalmente assegurada por meio da hipótese de existência de uma significativa quantidade de matéria escura não relativista e energia escura.

Na verdade, por meio de estudos da radiação fóssil de micro-ondas, designada por [radiação cósmica de fundo](#)<sup>2,3,4</sup>, é possível determinar, com grande precisão, o conteúdo energético do Universo. Esta radiação, observada na região de micro-ondas do espectro eletromagnético, é um remanescente do Universo 375 mil anos após o Big Bang e a sua estrutura revela com grande riqueza de detalhes a história do Cosmos. Através desta radiação sabemos que a geometria do Universo correspondente à parte espacial é plana. De facto, o Universo é quadri-dimensional, isto é, tem 3 dimensões espaciais e 1 temporal. Através da radiação de fundo e de outras observações é possível estimar que cerca de 68% da energia do Universo está distribuída de forma ténue e uniforme por toda a parte e que, por não se manifestar luminosamente, é designada por energia escura. Esta energia é responsável pela atual expansão acelerada do Universo. Também se consegue inferir que existe mais matéria não relativista que a que nós conhecemos: a matéria escura.

A gravitação é estudada com base na TRG. Contudo, esta não é a forma única de acoplar matéria com curvatura do espaço-tempo, pelo que para descrever a dinâmica do Universo, existe uma outra possibilidade além de incluir matéria escura e energia escura nas equações de Einstein, nomeadamente considerar teorias alternativas da gravitação. É possível que a Teoria da Relatividade Geral não seja completamente adequada e que descreva só aproximadamente a evolução do Cosmos. Até ao presente, todavia nenhum modelo alternativo à TGR foi capaz de rivalizar com o poder explicativo e preditivo desta teoria, mas os cientistas têm trabalhado ativamente também nesta frente de investigação. Naturalmente, distinguir entre estas duas possibilidades, TRG com matéria e energia escura, por um lado, e a uma teoria alternativa da gravitação com matéria ordinária, é uma das questões mais fundamentais da Física contemporânea.

Na verdade, há outras razões para se estudar alternativas à TRG. De facto, a descrição da gravitação segundo a TRG não encaixa com a descrição das outras interações fundamentais da Natureza, as interações nuclear, forte e fraca, e a interação eletromagnética, que são descritas pela outra grande teoria do século XX, a Teoria Quântica dos Campos, a versão relativista da Mecânica Quântica.

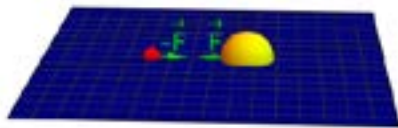


FIGURA 1. Teoria da gravitação de Newton: forças gravitacionais.

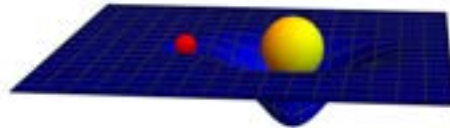


FIGURA 2. Relatividade Geral: o espaço-tempo é curvado por objetos com massa.

A harmonização dessas duas grandes teorias do século XX, Relatividade Geral e Teoria Quântica dos Campos pode estar na raiz da resolução de problemas fundamentais como, por exemplo<sup>5</sup>:

- O problema da curvatura do espaço-tempo derivado do entendimento de que o vácuo segundo a Teoria Quântica dos Campos não é vazio e tem uma elevadíssima concentração de energia, o chamado problema da constante cosmológica;
- Os buracos negros, assim como os modelos cosmológicos, apresentam singularidades, isto é, pontos onde as leis da Relatividade Geral não são válidas. Existe alguma extensão quântica da gravitação que regulariza este comportamento aberrante?
- O espaço-tempo é curvo; pode então o tempo curvar-se completamente sobre si mesmo? Se a resposta for positiva, então como podemos evitar paradoxos como o de existir antes de se ter nascido? Ou seja, há que evitar as chamadas máquinas do tempo ou pelo menos evitar que por meio destas máquinas, se elas existirem, se possa alterar a História.

Dada a importância e a generalidade destas questões, a investigação em cosmologia e gravitação é uma das mais ativas da Física contemporânea.

## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> NEWTON, I (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (em latim). Londres: [s.n.] [https://la.wikisource.org/wiki/Philosophiae\\_Naturalis\\_Principia\\_Mathematica](https://la.wikisource.org/wiki/Philosophiae_Naturalis_Principia_Mathematica)
- <sup>2</sup> WEINBERG, S, *Os Três Primeiros Minutos*, (Ed. Gradiva 1987).
- <sup>3</sup> BERTOLAMI, O, *O Livro das Escolhas Cósmicas*, (Ed. Gradiva 2006).
- <sup>4</sup> BERTOLAMI, O, "O Big Bang: a origem do Universo", in *Do Big Bang ao Homem* (U. Porto Edições 2016).
- <sup>5</sup> BERTOLAMI, O, PÁRAMOS, J, *Seis Breves Apontamentos de Cosmologia Contemporânea* (U. Porto Edições 2017).