

Isaac Newton

Isaac Newton nasceu na cidade inglesa de Woolsthorp, Lincolnshire, no dia 25 de dezembro de 1642, exatamente 11 meses após a morte de Galileo. Ele faleceu em Londres no dia 20 de março de 1727.

Em janeiro de 1665, após receber o título de bacharel, Newton teve que retornar à sua cidade natal, onde ficou durante dois anos, devido à peste que assolava Londres. Foi neste período em que ele desenvolveu suas mais importantes idéias científicas.

Nestes dois anos Newton desenvolveu a ciência da mecânica como nós a conhecemos, estabelecendo as leis do movimento dos corpos.

Newton também dedicou-se à óptica nesta época, iniciando suas primeiras experiências com prismas.

Para poder realizar cálculos mecânicos e compreender a Gravitação, Newton inventou uma ferramenta matemática que ele chamou de "fluxions", e que agora é conhecida como "cálculo". O cálculo diferencial também foi descoberto nesta mesma época, independentemente, pelo filósofo e matemático alemão Gottfried-Wilhelm Leibnitz.



Newton é considerado hoje o maior de todos os físicos clássicos.

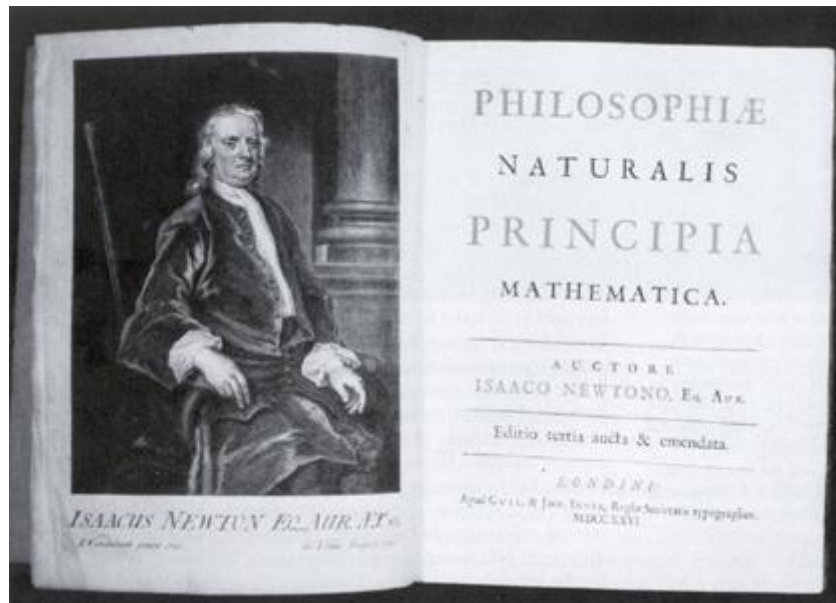
As leis de Newton

Em 1684 o astrônomo Edmund Halley visitou Newton em Cambridge. Ouvindo suas idéias sobre o movimento dos corpos celestes ele estimulou Newton a desenvolvê-las sob a forma de um livro. Halley certamente queria usar estas teorias para analisar órbitas, particularmente aquela do cometa de 1682, que agora tem o seu nome, cometa Halley.

Impelido por Edmund Halley, Newton publicou, em 1687, as suas leis do movimento e a análise da gravidade sob a forma de um livro que, possivelmente, é o mais importante texto de física escrito até hoje.

O livro de Isaac Newton tinha o título

Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica



ou simplesmente *Principia Mathematica* ("Princípios Matemáticos da Filosofia Natural").

Halley estava tão decidido a ver as idéias de Newton sob a forma impressa que, ao notar que a falta de fundos na Royal Society provavelmente retardaria o projeto, decidiu pagar o custo inteiro da primeira impressão deste importante livro.

A página título e o frontispício que aparecem na imagem acima são da terceira edição do *Principia Mathematica* de Isaac Newton, publicada em 1726. A primeira edição apareceu em 1687.

Newton formulou três importantes leis:

- um objeto permanece em repouso ou em movimento uniforme em uma linha reta a menos que atue sobre ele alguma força.
- quando uma força age sobre um corpo ele muda seu movimento em uma quantidade proporcional à força que age sobre ele, e de acordo com a direção da força.

- quando um objeto exerce uma força sobre um segundo objeto, o segundo objeto exerce uma força igual e oposta sobre o primeiro.

Entre as suas várias realizações científicas podemos citar:

- seu trabalho intitulado "Principia" onde ele formulou as leis do movimento que são os fundamentos da mecânica. Com base nestas leis Newton conseguiu explicar porque os planetas obedecem às leis de Kepler. O "Principia" é, provavelmente, o mais importante trabalho científico escrito até hoje.
- Newton expressou a lei universal da gravitação em forma matemática, mostrando que a força da gravidade cai inversamente com o quadrado da distância entre dois corpos.
- Newton mostrou que a gravidade não somente faz uma maçã cair ao chão mas também governa os movimentos dos planetas e seus satélites. A teoria da gravitação de Newton deve se aplicar a quaisquer corpos até mesmo, por exemplo, a estrelas binárias.
- Newton mostrou que a lei da gravitação poderia explicar tanto as marés sobre a Terra como a precessão dos equinócios.

Isaac Newton e a Gravitação Universal

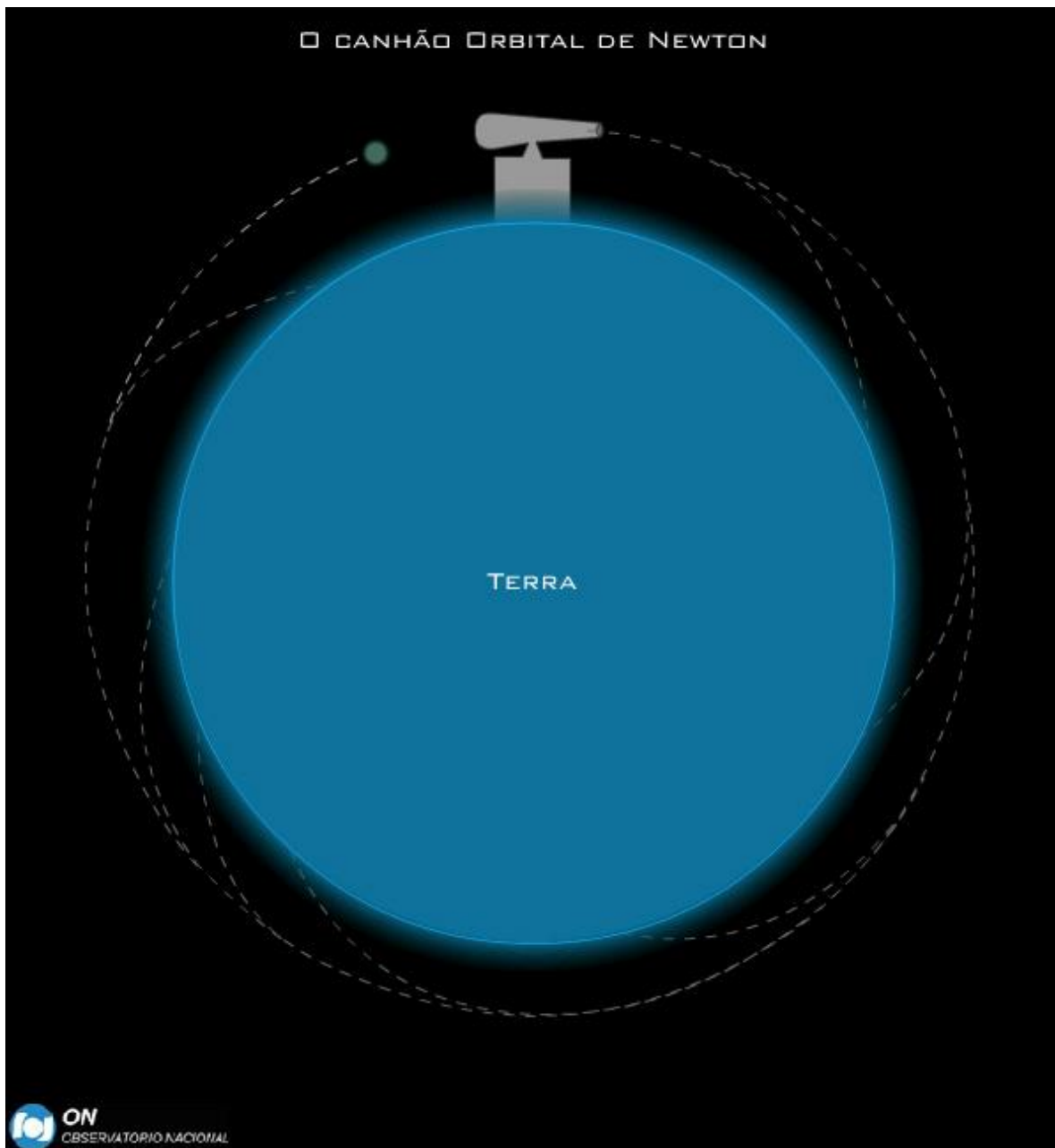
O "Principia", um dos mais influentes livros na história da ciência, teve sua origem nas especulações do jovem Newton sobre a trajetória da Lua durante sua estadia em Woolsthorpe Manor duas décadas antes (a história de que Newton teria notado a existência da lei da gravitação a partir da queda de uma maçã é, quase certamente, apócrifa).

A pergunta que estimulou seus pensamentos era: o que impede a Lua de sair de sua órbita em torno da Terra exatamente como acontece ao cortarmos a corda que prende uma bola que está sendo girada?

A bola em tal situação abandona sua trajetória circular e desloca-se em uma tangente a essa órbita.

Vamos ver isso de uma outra maneira. Suponha que temos um canhão imaginário, muito poderoso, sobre a superfície da Terra. Vamos colocá-lo no topo de uma montanha bastante alta e dispará-lo sempre horizontalmente. Após um pequeno percurso a bala do canhão cairá sobre a superfície da Terra. Suponha agora que aumentamos bastante a capacidade do nosso projétil e o disparamos de novo nas mesmas condições anteriores. Agora, com mais velocidade, ela percorrerá uma trajetória maior mas voltará a cair sobre a superfície. Seguindo esse raciocínio podemos imaginar que à medida que aumentamos a velocidade do nosso projétil, ele se deslocará por distâncias cada vez maiores antes de retornar à superfície da Terra. É fácil concluir que se o canhão projetasse sua bala com exatamente

uma determinada velocidade, ela se deslocaria em volta de todo o nosso planeta, sempre "caindo" mas nunca alcançando a superfície da Terra. Podemos dizer que a superfície da Terra se curva com a mesma taxa que a bala do canhão "cai".



Essa analogia agora pode ser aplicada à Lua em seu movimento em torno da Terra. Newton raciocinou que a Lua pode ser vista como perpetuamente caindo da tangente que ela descreveria em sua contínua órbita em torno da Terra se não fosse atraída pelo nosso planeta.

Newton calculou matematicamente por quanto, em tal analogia, a Lua estaria caindo a cada segundo. Com esses valores ele calculou, com base no mesmo princípio, a velocidade provável de um corpo que cai de modo usual nas nossas próprias vizinhanças. Em suas próprias palavras, a teoria e a realidade estavam "consideravelmente próximas".

Mas, quem faz a Lua "cair" na direção da Terra? Newton nos disse que a Lua "cai" continuamente em sua trajetória em torno da Terra por que existe uma força gravitacional que a atrai na direção do centro do nosso planeta. A Lua sofre uma aceleração gerada pela gravidade do nosso planeta e o conjunto desses fatores produz, no fim das contas, sua órbita.

Seguindo esse raciocínio Newton chegou à conclusão que dois objetos quaisquer no Universo exercem uma mútua atração gravitacional, gerada por uma força que tem uma forma matemática universal.

A palavra **gravidade** já estava em uso nessa época, significando a qualidade de "peso" que faz um objeto cair. Newton demonstrou sua existência agora como uma lei universal:

"Duas partículas quaisquer de matéria atraem uma a outra com uma força diretamente proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas"

Com esta observação Newton introduziu o grande princípio unificador da física clássica, capaz de explicar em uma lei matemática o movimento dos planetas, o movimento das marés e a queda de uma maçã.

Veja que a lei descrita acima nos fala de proporcionalidades. Em matemática quando queremos passar de uma proporcionalidade para uma igualdade introduzimos uma "constante de proporcionalidade". Esta constante de proporcionalidade terá um determinado valor numérico além de unidades físicas.

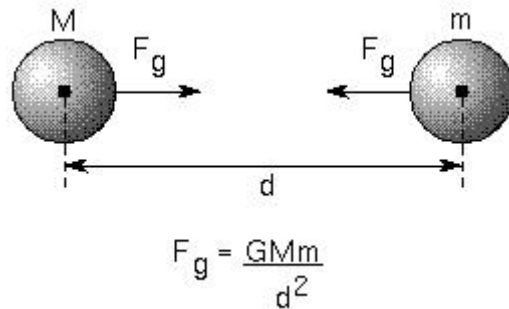
Deste modo, podemos escrever a lei da gravitação universal como uma igualdade se introduzirmos uma constante de proporcionalidade, que chamaremos de **constante universal da gravitação** e que será sempre representada pela letra **G**.

A Lei da Gravitação Universal pode ser escrita matematicamente como:

$$F = G \frac{Mm}{d^2}$$

onde **G** é a "constante universal da gravitação" (ou apenas constante gravitacional), **M** e **m**

são as massas dos corpos que estão interagindo gravitacionalmente, e d é a distância entre estes mesmos corpos.



A constante universal da gravitação tem o valor

$$G = 6,67 \times 10^{-8} \text{ dinas centímetro}^2/\text{grama}^2$$

ou

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ newtons metro}^2/\text{quilograma}$$

Na igualdade acima "dina" e "newton" são unidades de medida de forças. "Dina" corresponde a $\text{gramas} \cdot \text{centímetro}/\text{segundo}^2$ e "newton" equivale a $\text{quilograma} \cdot \text{metro}/\text{segundo}^2$.

Por que chamamos G de constante *universal* da gravitação? Isso se deve ao fato de que a física considera que o seu valor é, e sempre foi, o mesmo em todos os lugares do universo ao longo de toda a sua existência. Isso nos diz que a física considera que a interação gravitacional possui uma característica universal: ela possui a mesma forma matemática em todos os locais do universo.

Na física de hoje é mais comum usar o termo "interação" em vez de "força" quando falamos dos processos fundamentais que ocorrem na natureza. Deste modo, passaremos a usar o termo "interação gravitacional" (em vez de "força gravitacional") ao nos referirmos aos processos de interação que ocorrem entre dois corpos com massa envolvendo a gravidade.

A interação gravitacional possui algumas características importantes que devem ser realçadas:

- a gravidade é a mais fraca entre todas as interações fundamentais (mais tarde veremos que existem outras três interações fundamentais na natureza, a forte, a fraca e a eletromagnética. Veremos também que estas três interações na verdade se reduzem a apenas duas, a eletrofraca e a forte).
- a gravidade é uma interação de longo alcance. Veja, na equação acima, que não há qualquer limite para o valor de d , que é a distância entre os corpos.

- a gravidade é uma interação somente **atractiva**. Não existe repulsão gravitacional na física newtoniana.
- quando consideramos dois corpos celestes, a distância entre eles se refere não às suas superfícies mas sim aos seus centros. Por exemplo, se estivermos aplicando a lei da gravitação universal ao sistema Sol-Júpiter, a distância entre eles é aquela que vai do centro do Sol ao centro de Júpiter.

Por causa destas propriedades a gravidade domina várias áreas de estudo na astronomia. É a interação gravitacional quem determina as órbitas dos planetas, estrelas e galáxias, assim como os ciclos de vida das estrelas e a evolução do próprio Universo.

A Constante Gravitacional da equação de Newton

A gravidade é uma interação tão fraca que não era possível medir o valor da constante **G** que aparece na equação da gravitação de Newton na época em que ela foi proposta.

O primeiro a estimar o valor de **G** foi o astrônomo Nevil Maskelyne. Para fazer isto ele procurou usar duas massas bastante diferentes de tal modo que a interação gravitacional entre elas pudesse ser medida. Nada melhor do que a massa de uma montanha e a de um pedaço de chumbo preso a uma linha. Certamente a atração gravitacional entre estas duas massas provocaria uma deflexão na linha que sustentava o chumbo.

Em 1774, Maskelyne aproximou o seu peso de chumbo das encostas inclinadas do Monte Schiehallion, na Escócia, e mediu a deflexão da linha ou seja, a ação gravitacional entre a montanha e o peso de chumbo. Como o monte Chiehallion tinha uma forma muito regular, Maskelyne foi capaz de estimar sua massa e, como ele conhecia a massa do peso de chumbo, foi possível então determinar o valor da constante gravitacional **G**.

No entanto, o físico inglês Henry Cavendish foi o primeiro a medir **G** no laboratório.

A ação da gravidade nas nossas vidas

E de que modo a ação da gravidade se apresenta na nossa vida? O simples fato de você permanecer de pé na superfície da Terra é resultado da existência da interação gravitacional. É a ação da gravidade da Terra que faz você permanecer sobre ela. É claro que você tem até uma pequena liberdade pois consegue saltar na vertical mas logo é obrigado a retornar à sua superfície tão logo a Terra sinta "saudades" de você e te traga de volta para pertinho dela.

E que outras ações da gravidade nos afetam diretamente? A ação gravitacional entre a Terra e a Lua é uma dessas ações. É ela que produz o conhecido fenômeno das marés. Além disso, como a Lua é um satélite de grande massa, se comparado com os outros satélites do Sistema Solar, a atração gravitacional entre ela e a Terra serve como elemento estabilizador da rotação do nosso planeta em torno do seu eixo. No entanto, a Lua está se afastando da

Terra e a mudança desta ação gravitacional, daqui a milhares de anos, provocará uma alteração no eixo de rotação da Terra. Esta mudança se refletirá sob a forma de fortes alterações climáticas no nosso planeta.

Massa, peso e a interação gravitacional

A expressão da Lei da Gravitação Universal proposta por Newton envolve uma grandeza física fundamental: a massa. Mas, afinal, o que é massa?

Na linguagem popular massa e peso têm sido usados para significar a mesma coisa. Para a física essas duas grandezas estão relacionadas mas são completamente diferentes.

Preste atenção na lei da gravitação universal:

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} \frac{\mathbf{Mm}}{\mathbf{d}^2}$$

Essa lei descreve a força de atração entre dois corpos de massas M e m , situados a uma distância d . No entanto, a segunda lei de Newton nos diz que, se a massa é mantida constante, força é igual à massa do corpo multiplicada pela sua aceleração.

Vamos então considerar o sistema Terra-(você), onde M é a massa da Terra e m é a massa do leitor. Como você está na superfície da Terra, a distância Terra-você é apenas o raio da Terra. Pela segunda lei de Newton $F = ma$ refere-se à aceleração sofrida pela massa que forma o teu corpo. Podemos então igualar as duas expressões acima, a lei da gravitação universal e a segunda lei de Newton, obtendo

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} \frac{\mathbf{Mm}}{\mathbf{r}^2} = \mathbf{m} \mathbf{a}$$

Como os dois "m" se referem à massa do teu corpo, é fácil ver que

$$\mathbf{a} = \mathbf{G} \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{r}^2}$$

Veja então que para calcularmos a aceleração produzida pela gravidade da Terra temos que obter o produto da constante universal da gravitação **G** pela massa da Terra **M**, e em seguida dividir este resultado pelo raio da Terra, **r**, elevado ao quadrado.

O cálculo acima é apenas aproximado. Por que? Pelo fato de estarmos supondo que a Terra é redonda (na verdade a forma da Terra é a de um esferóide oblatado!) e, portanto, o seu raio é sempre o mesmo. Também introduz erro o fato de estarmos desprezando o raio do objeto (no caso, você!) em relação ao raio da Terra em toda essa discussão. Podemos ficar tranqüilo porque os erros introduzidos são absurdamente pequenos para criar qualquer problema no resultado final do nosso problema (estou descartando desta análise todos os participantes do curso com raios maiores do que um metro!).

Se agora substituirmos os valores numéricos nesta expressão ou seja, $G = 6,67 \times 10^{-11}$ newtons metro²/quilograma², massa da Terra = $5,99 \times 10^{24}$ kg, e raio (médio) da Terra = $6,367 \times 10^6$ metros, iremos obter

$$a = 9,80 \text{ m/seg}^2$$

Este é o valor da aceleração que o campo gravitacional da Terra exerce sobre o seu corpo.

Podemos generalizar a equação acima obtendo a expressão que nos dá a aceleração da gravidade criada por um corpo qualquer de massa **M** a uma distância **d** qualquer:

$$a = G \frac{M}{d^2}$$

A partir do conhecimento da aceleração da gravidade criada por um corpo qualquer de massa **M** podemos determinar uma outra grandeza física importante relacionada com a massa ou seja, o peso do corpo. O peso de um corpo é definido como sendo o produto de sua massa pela aceleração da gravidade que atua sobre ele. Veja, portanto, que o peso de um corpo de massa **m** colocado na superfície da Terra é obtido multiplicando-se sua massa **m** pela aceleração que o campo gravitacional da Terra produz sobre a superfície do nosso planeta.

A expressão matemática do peso é dada por

$$P = M g$$

onde g é a aceleração gravitacional que atua sobre o corpo de massa m .

É importante notar que, no âmbito da física clássica newtoniana, a grandeza massa é invariável. No entanto, a grandeza peso varia: ela depende do valor da aceleração da gravidade que está atuando sobre o corpo de massa m . Enquanto a massa de um corpo é a mesma estando ele na superfície da Terra ou em qualquer outro planeta, seu peso não é o mesmo pois o campo gravitacional, e daí a aceleração da gravidade, varia para cada planeta. Por exemplo, como a Lua possui um campo gravitacional aproximadamente seis vezes menor do que o da Terra, um corpo de massa m na Terra teria a mesma massa mas um peso muito menor na Lua.

Poderíamos questionar: se, pela segunda lei de Newton, $F = ma$ (massa vezes aceleração) e se o peso de um corpo de massa m é dado por $P = mg$ (massa vezes aceleração) então força é o mesmo que peso. Na verdade, o peso é uma força sim mas nem sempre a expressão da força dada pela segunda lei de Newton está nos informando qual o peso de um corpo. Isso se deve ao fato de que na segunda lei de Newton, a aceleração considerada é qualquer uma capaz de fazer variar a velocidade de um corpo enquanto que na expressão do peso a aceleração considerada é sempre aquela produzida por um campo gravitacional.

Um outro ponto importante é que a massa m usada tanto na segunda lei de Newton como na sua lei da gravitação universal desempenha dois importantes papéis:

- na segunda lei de Newton, $F = ma$
a massa m é uma medida de quão fortemente um corpo é acelerado por uma dada força. Ela é uma medida da inércia de um corpo.
Quando está desempenhando este papel dizemos que m é uma **massa inercial**.
- na lei da gravitação universal, m é uma medida de quão fortemente um corpo é afetado pela força da gravidade e também quão forte é a força gravitacional gerada por m .
Quando está desempenhando este papel dizemos que m é uma **massa gravitacional**.

Estas duas quantidades referem-se a propriedades diferentes de um corpo e não necessariamente deveriam ser iguais. No entanto, medições extremamente precisas indicam que elas *são iguais*.

A Cosmologia de Isaac Newton



James Usher (1581-1656)

Newton viveu em uma época em que a religião estava presente em todas as parcelas da vida e, em particular, ainda vigiava os pensadores, embora sem ter mais o peso da famigerada Inquisição.

Nessa época muito se especulava sobre a idade do universo. A maioria dos pensadores procurava se apoiar na Bíblia para descobrir quando Deus fez o universo. Alguns pensadores cristãos daquela

época acreditavam que o universo tinha apenas alguns milhares de anos de existência e que havia sido criado em apenas seis dias, praticamente nas mesmas condições então existentes. Deste ponto de vista a história do universo e a história do ser humano eram as mesmas.

Vários teólogos fizeram cálculos sobre a idade do universo baseando-se exclusivamente no estudo de passagens bíblicas. Uma das "conclusões" mais comentadas sobre a idade do Universo foi divulgada no início do século XVII por James Usher (1581-1656), arcebispo de Armagh, Irlanda. Após uma meticolosa análise da Bíblia, Usher chegou à conclusão que o universo foi criado no dia 23 de outubro 4004 a.C., um domingo. Suas conclusões foram publicadas postumamente no seu livro "The Annals of the World iv" em 1658.



A onipresença de Deus impregnava o cosmos Newtoniano. Newton também calculou a idade do universo com base nos textos bíblicos e estava convencido de que suas descobertas demonstravam as maravilhas criadas por Deus. A presença divina agia como um "éter" imaterial que não oferecia resistência aos corpos mas poderia movê-los por meio da força da gravitação.

A teoria gravitacional Newtoniana exigia praticamente um milagre contínuo para evitar que o Sol e as estrelas "fixas" fossem puxadas umas em direção às outras. Newton imaginava um universo infinitamente grande no qual Deus tinha colocado as estrelas exatamente nas distâncias corretas uma em relação a outra de modo que a ação mútua de suas forças de atração gravitacional fossem canceladas, um equilíbrio tão preciso como o de agulhas equilibradas por suas pontas.

Uma outra possível solução era colocar as estrelas "fixas" tão afastadas umas das outras que elas não podiam ter atraído umas às outras de modo perceptível nos poucos milhares de anos que haviam decorrido desde a Criação Bíblica.

A antiga suposição de que as estrelas eram objetos "fixos" em posição não foi questionada até o ano de 1718 quando o astrônomo inglês Edmond Halley fez uma notável descoberta. Ele verificou que três estrelas brilhantes não estavam mais nas posições determinadas pelas antigas observações. As estrelas estavam livres para se moverem como objetos físicos normais.

Vários filósofos criticaram duramente a visão Newtoniana do cosmos. Suas críticas eram mais incisivas tendo em vista o fato de que os movimentos dos planetas não eram perfeitos: suas órbitas sofriam perturbações criadas pelos campos gravitacionais dos outros corpos celestes. Segundo Newton, o projeto do Sistema Solar mostrava a inteligência e o poder de Deus o fato dos planetas permanecerem em suas órbitas, a despeito dessas perturbações, mostrava que havia uma contínua intervenção de Deus. Para muitos filósofos a simples idéia de uma intervenção ocasional de Deus no universo era um questionamento à perfeição de Deus. Aqueles que apoiavam as idéias de Newton argumentavam que não havia nada de errado ou ofensivo nessa idéia pois essa intervenção era parte integrante do plano Divino para o universo.

A teoria da gravitação proposta por Newton é mesmo universal?

Já vimos que a teoria **clássica** da gravitação é descrita pela **lei de Newton da Gravitação Universal**. Como o nome pode nos levar a crer, essa é uma teoria que vale "universalmente": todos os corpos existentes no universo sentem interações gravitacionais que são dadas pela mesma expressão matemática descoberta por Isaac Newton.

No entanto, isso não é verdade. A teoria da gravitação de Newton é absolutamente satisfatória quando tratamos de processos de interação entre corpos macroscópicos em um universo local. O que queremos dizer é que, ao levarmos em conta a estrutura geométrica do universo ou seja, os fenômenos que resultam do fato da matéria criar uma curvatura no espaço-tempo, a teoria de Newton já não é mais satisfatória. Neste caso ela precisou ser substituída por uma outra teoria que levava em consideração esta geometria: a teoria relativística da gravitação que nos foi apresentada por Albert Einstein.

A teoria da gravitação de Einstein, também chamada de Teoria da Relatividade Geral, nos descreve de que modo matéria e espaço-tempo interagem. Na verdade, a interação gravitacional seria melhor chamada de **Geometrodinâmica**, termo proposto pelo físico norte-americano John Wheeler, uma vez que a relatividade geral geometriza a gravitação.

No entanto, como veremos mais tarde, para descrever os estágios iniciais da formação do Universo nem mesmo a teoria relativística da gravitação é satisfatória. Precisamos agora de uma nova teoria, uma **teoria quântica da gravitação**.

Até agora os físicos ainda não possuem uma teoria como essa, apesar dos enormes esforços desenvolvidos para isto. Existe uma incompatibilidade, ainda não compreendida, entre a teoria relativística da gravitação e a teoria quântica.

As dificuldades para criar uma teoria quantizada para a gravitação têm sido muito grandes: a matemática envolvida é excepcionalmente sofisticada e os conceitos físicos estão na fronteira do nosso conhecimento e imaginação.