

Ensino a Distância

COSMOLOGIA

Da origem ao fim do universo

2015

Módulo 9

*Gravitação quântica e os problemas
do espaço e do tempo*



Esta imagem revela uma região do espaço de formação de estrelas conhecida como Nebulosa Trífida, observada a partir do telescópio MPG/ESO de 2,2 metros de abertura do espelho principal. O nome Trífida é por causa das bandas de poeira escura que dividem em três partes a região central da nebulosa. Localizada na direção da constelação de Sagitário, está a uma distância de 5.500 anos-luz do Sistema Solar.

Crédito: European Southern Observatory (ESO)

Ensino a Distância

COSMOLOGIA

Da origem ao fim do universo

2015

Módulo 9

*Gravitação quântica e os problemas
do espaço e do tempo*

58

A energia escura

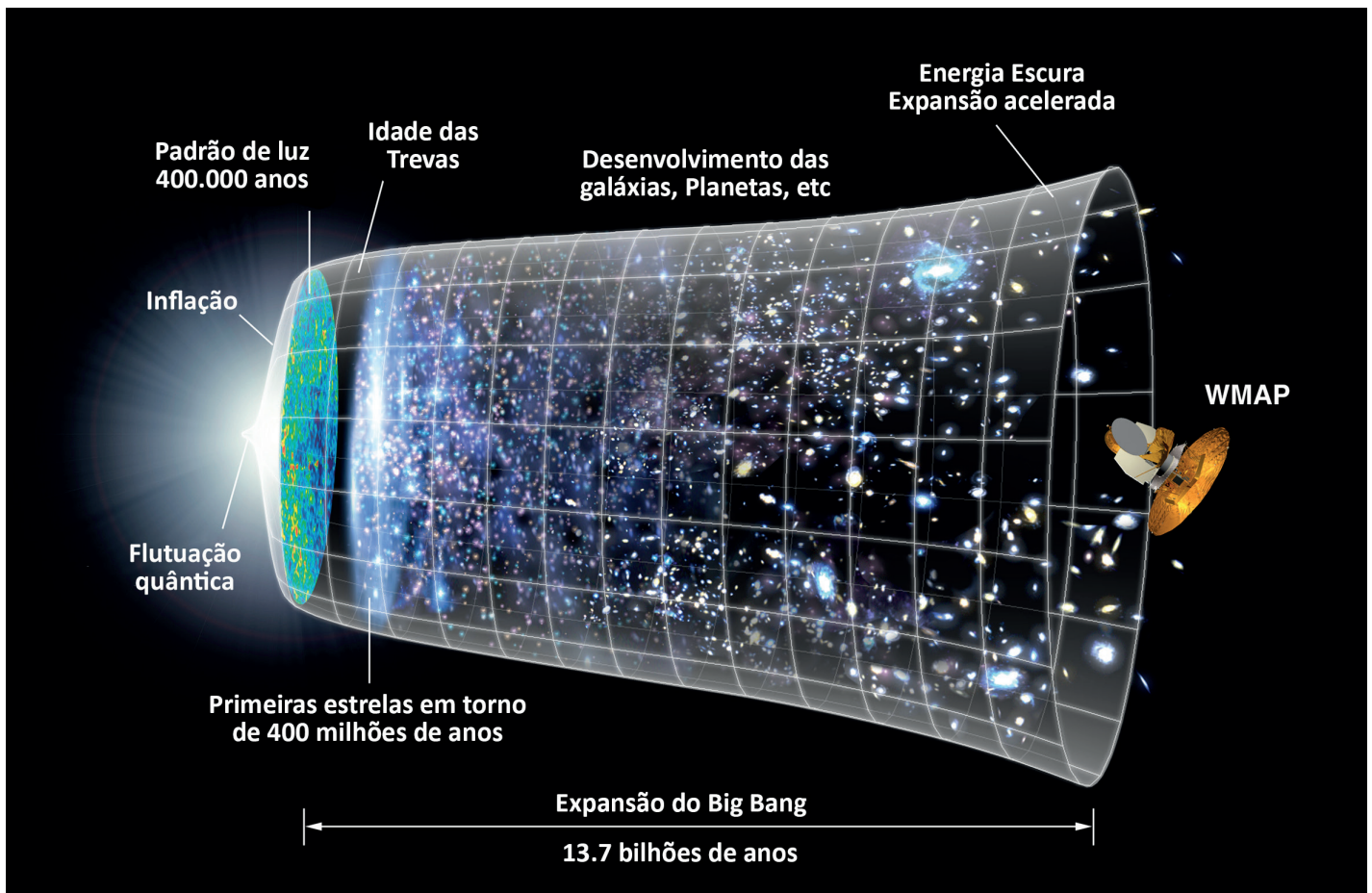
A ENERGIA ESCURA

As medições da relação magnitude-*redshift* para supernovas Tipo Ia revelaram que a expansão do Universo tem acelerado desde que o Universo tinha cerca de metade de sua idade atual. Para explicar essa aceleração a teoria da relatividade geral exige que grande parte da energia no Universo consista de uma componente com grande pressão negativa, que foi chamada de “energia escura”.

A existência da energia escura é indicada por várias outras medições. Por exemplo, medições do fundo de microondas cósmico indicam que o Universo é muito aproximadamente espacialmente plano e, por conseguinte, de acordo com a teoria da relatividade geral, o Universo deve ter quase exatamente a densidade crítica de massa/energia. Mas a densidade de massa do Universo pode ser medida a partir de sua aglomeração gravitacional e o resultado encontrado é somente cerca de 30% da densidade crítica.

Uma vez que a energia escura não se aglomera no modo usual, ela é a melhor explicação para a densidade de energia “que falta”.

A energia escura também é exigida por duas medições geométricas da curvatura global do Universo, uma usando a frequência de lentes gravitacionais e a outra usando o modelo característico da estrutura em larga-escala como uma “régua” cósmica.



Esta ilustração mostra a possível expansão do universo, desde o Big Bang até o momento atual.

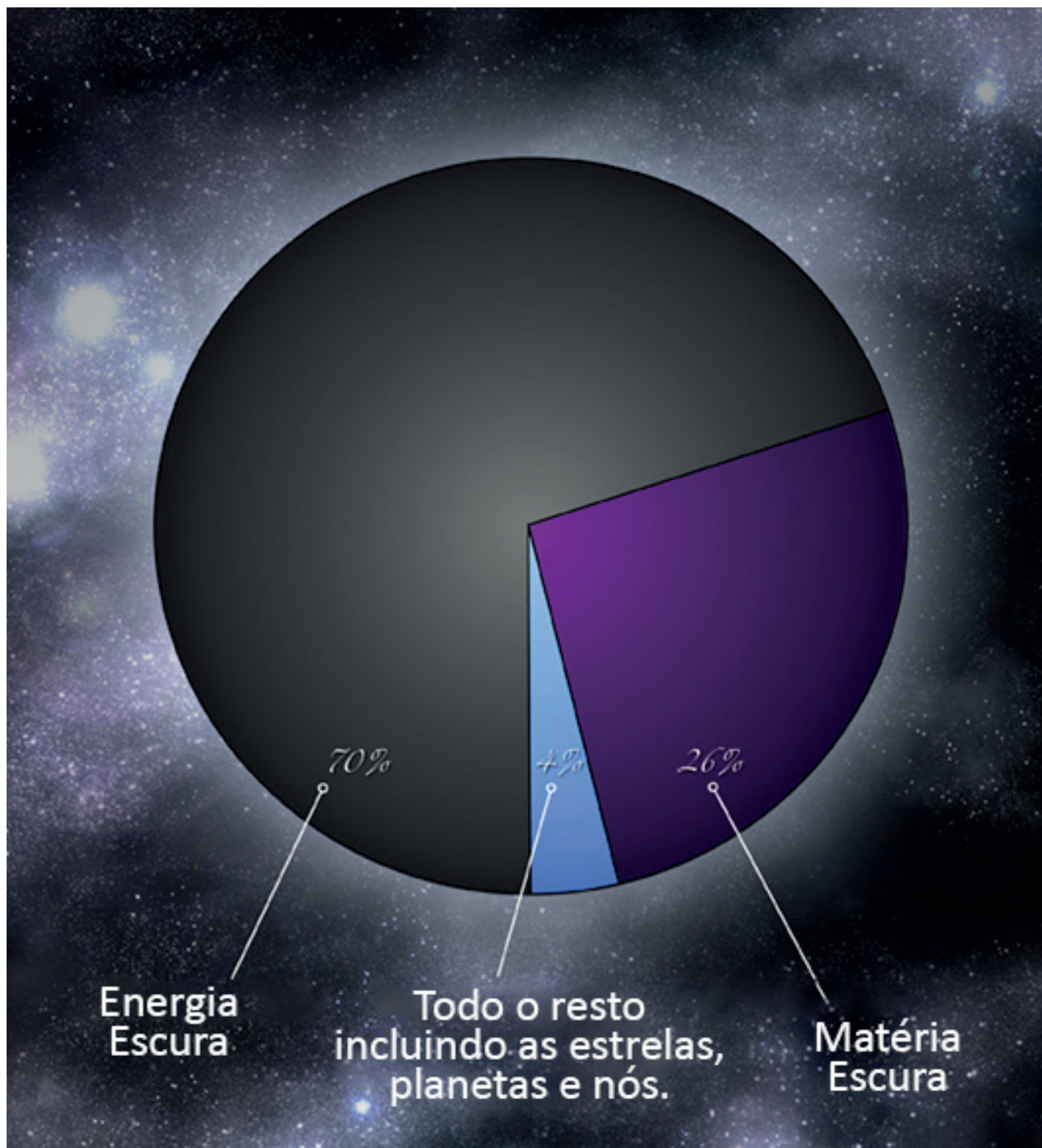
A pressão negativa é uma propriedade da energia do vácuo mas a natureza exata da energia escura permanece como um dos grandes mistérios do Big Bang. Os possíveis candidatos a energia escura incluem a constante cosmológica e a quintessência, que será discutida a seguir.

Resultados obtidos pelo grupo WMAP em 2006, que combinados com os dados obtidos provenientes da CMB e outras fontes, indicam que o Universo hoje é 74% energia escura, 22% matéria escura e 4% matéria regular.

A densidade de energia na matéria diminui com a expansão do Universo, mas a densidade de energia escura permanece (aproximadamente) constante à medida que o Universo se expande. Dessa forma a matéria constituía uma fração maior da energia total do Universo no passado do que é hoje, mas sua contribuição fracional diminuirá no futuro longínquo à medida que a energia escura se torna cada vez mais dominante.

A CONSTANTE COSMOLÓGICA

No modelo Lambda-CDM, o melhor modelo atual do Big Bang (incluindo a constante cosmológica Λ e a CDM (*cold dark matter* ou matéria escura “fria”), a energia escura é explicada pela presença de uma constante cosmoló-



gica na teoria da Relatividade Geral. Entretanto, o tamanho da constante que explica adequadamente a energia escura é surpreendentemente pequeno em relação a estimativas ingênuas baseadas em ideias sobre a gravitação quântica.

A constante cosmológica Λ aparece na equação de campo modificada da teoria relativística da gravitação na forma

$$R_{\mu\nu} - (1/2)Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4) T_{\mu\nu}$$

As observações astronômicas mostram que a constante cosmológica Λ não pode ser maior que

$$10^{-46} \text{ km}^{-2}.$$

A mais simples explicação para a existência da energia escura é que um volume de espaço tem alguma energia fundamental, intrínseca. A essa energia damos o nome de “constante cosmológica” que aparece nas equações relativísticas da gravitação representada por uma letra grega maiúscula Λ .

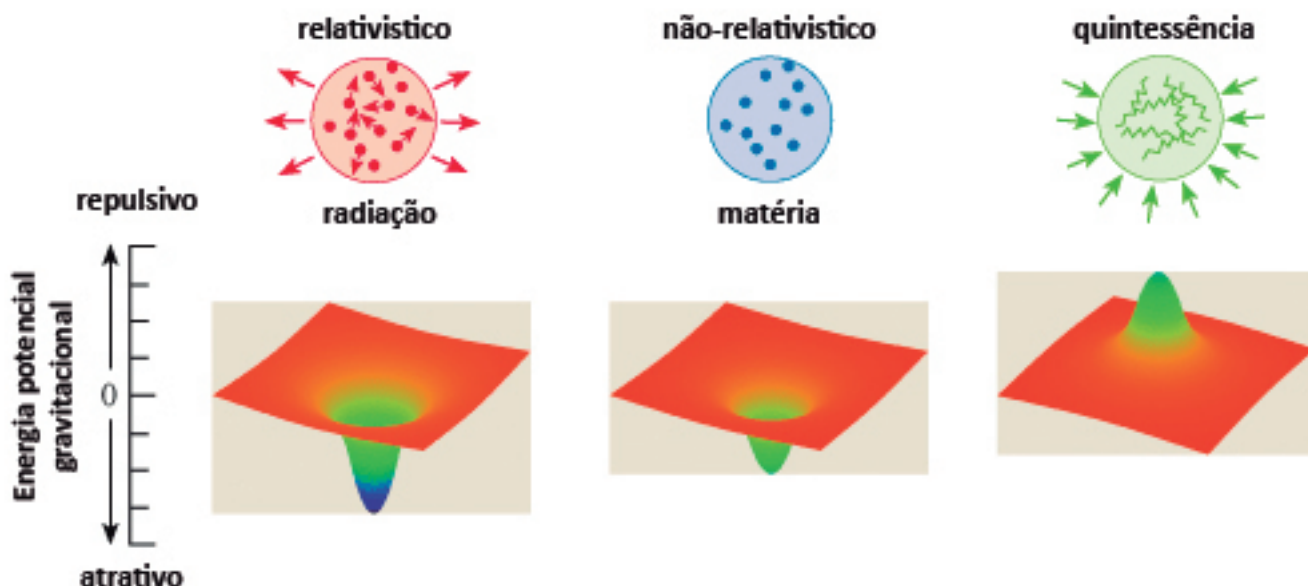
A distinção entre a constante cosmológica e outras possíveis explicações de energia escura é uma área ativa de pesquisas atualmente.

QUINTESSÊNCIA

Nos modelos que explicam a energia escura por meio da “quintessência”, a aceleração observada do universo é causada pela energia potencial de um campo chamado “campo da quintessência”.

De modo um pouco mais elaborado, a quintessência é um campo escalar que tem uma equação de estado (equação relacionando pressão p e densidade ρ) dada por $p = w\rho$, onde w é menor que $-1/3$.

A quintessência difere da constante cosmológica pelo fato de que ela pode variar tanto no espaço como no tempo. A quintessência é dinâmica e tem densidade e equação de estado que podem variar através do espaço e do tempo. No entanto, a constante cosmológica é estática, com uma densidade de energia fixada e $w = -1$.



A figura acima mostra o que é a quintessência. De acordo com a teoria relativística da gravitação, o potencial gravitacional produzido por uma fonte isolada é proporcional a $\rho + 3p$, onde ρ é a densidade de energia e p é a pressão. Para a matéria não relativística a pressão é pequena demais, praticamente desprezível, enquanto que para a radiação $p = (\rho/3)$. Por conseguinte, para o mesmo valor de densidade de energia, a radiação produz um potencial

gravitacional mais profundo e mais atrativo (esquerda) do que a matéria não relativística (centro). Entretanto, se $\rho + 3p$ é negativo, como ocorre no caso da quintessência, temos que $p = (2/3) \rho$ e o sinal do campo gravitacional é transformado de atrativo para repulsivo.

Não existem ainda evidências da quintessência, mas também não há argumento válido que nos obrigue a ignorá-la. Em geral, a quintessência prevê uma aceleração ligeiramente mais lenta da expansão do universo do que o valor previsto pela constante cosmológica.

O nome “quintessência” vem do “quinto elemento” puro, o éter que segundo os filósofos gregos permeava todo o Universo.

AS TEORIAS DE “ENERGIA FANTASMA” (“PHANTOM ENERGY THEORIES”)

Existe um caso particular de quintessência que recebeu um nome característico. Trata-se da chamada “energia fantasma”, em cuja equação de estado $w < -1$.

CONCLUSÕES

Alguns físicos teóricos acham que a energia escura e a aceleração cósmica observada são apenas falhas da teoria relativística da gravitação quando tratamos com escalas muitíssimo grandes do universo, muito maiores do que aquelas que envolvem os superaglomerados de galáxias. Eles consideram que é uma extrapolação tremenda supor que a mesma lei da gravitação que rege o comportamento dos corpos do Sistema Solar funcionaria sem qualquer tipo de correção em escalas tão imensas como as que tratamos ao considerarmos o próprio universo.

Diversas ideias alternativas têm sido propostas como substitutas da energia escura. Elas vêm de outras teorias, também não provadas experimentalmente, tais como a teoria de cordas, a cosmologia de “branas” e até mesmo o chamado princípio holográfico. Outros têm procurado explicar a aceleração do universo por meio de um refinamento da física que já conhecemos.

