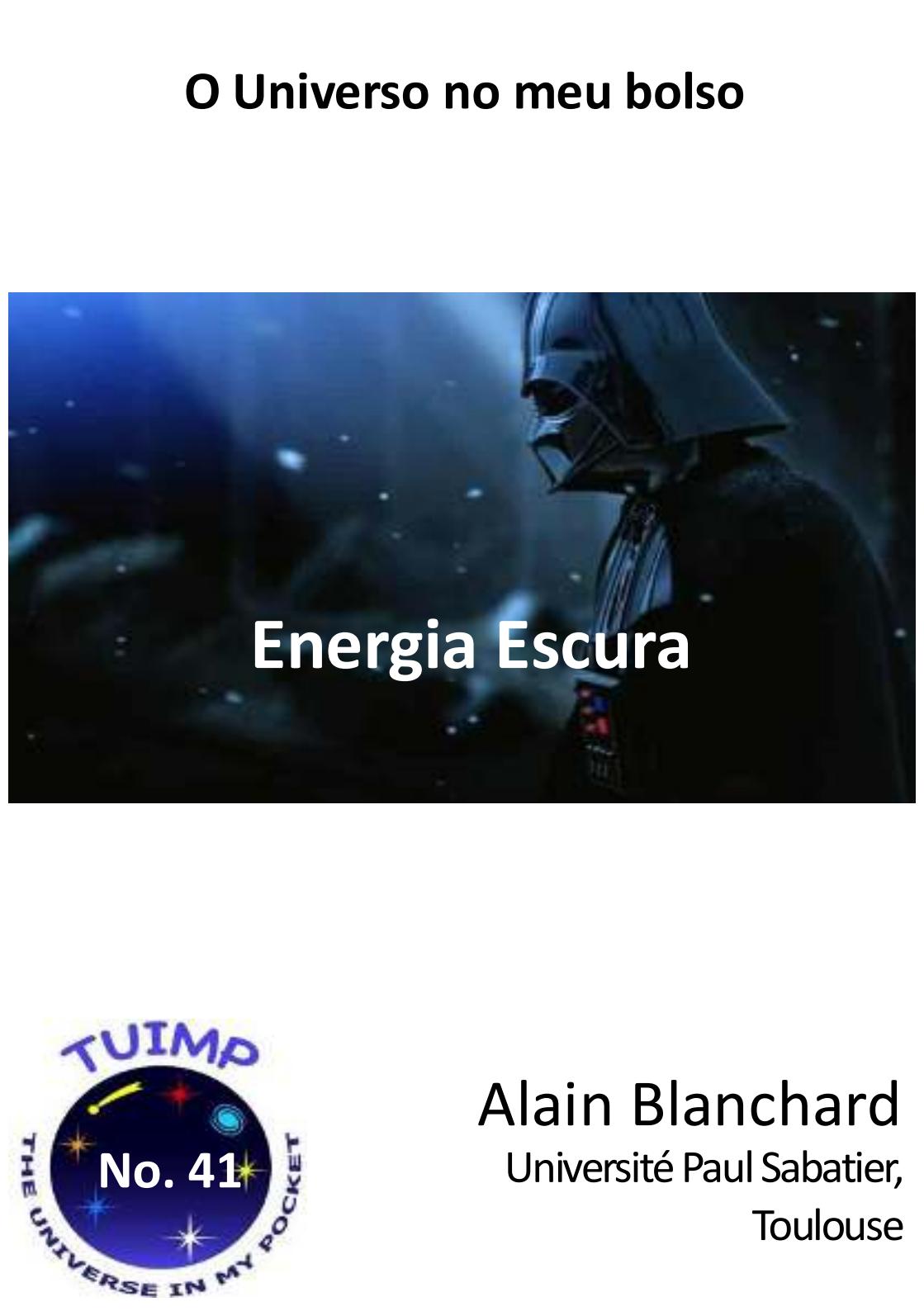


O Universo no meu bolso



Energia Escura



Alain Blanchard
Université Paul Sabatier,
Toulouse

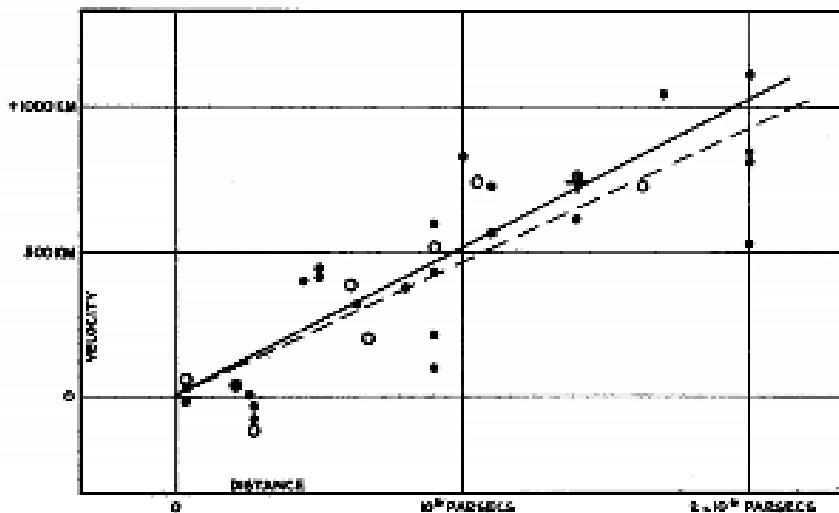


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

O diagrama de Hubble original (Hubble 1929).

Ele mostra a velocidade medida V das galáxias em função de sua distância D , sendo esta última deduzida usando a relação período-luminosidade para estrelas Cefeidas estabelecida alguns anos antes por Henrietta Leavitt (ver TUIMP 15).

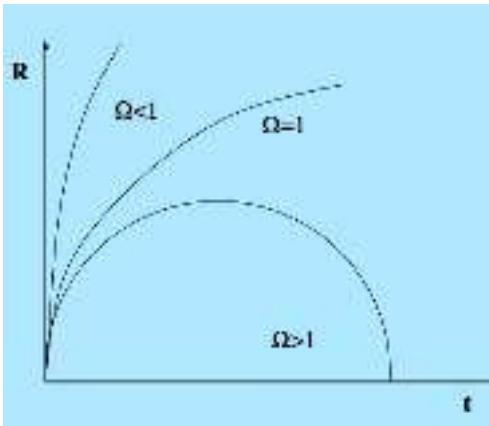
A relação $V = H_0 \times D$, chamada lei de Hubble-Lemaître, mudou drasticamente nossa visão do Universo.

O valor de H_0 , a constante de Hubble, foi estimado inicialmente em cerca de 500 km/s por Mpc, depois em cerca de 100 km/s por Mpc no início dos anos 1960. As estimativas atuais são de cerca de 73 km/s por Mpc.

Logo após o Grande Debate em 1925, que concluiu que existem galáxias fora da nossa, Edwin Hubble observou que as velocidades de recessão dessas galáxias eram proporcionais às suas distâncias. Georges Lemaître interpretou isso como um efeito da expansão do Universo.

A expansão do Universo é um conceito não trivial de entender: deixando de lado os movimentos individuais que acompanham a estrutura da Teia Cósmica (ver TUIMP 13), as galáxias se afastam umas das outras com uma velocidade proporcional às suas respectivas distâncias.

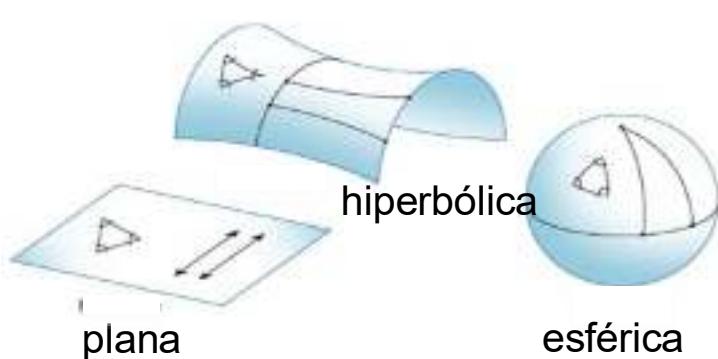
O que governa essa velocidade é a gravitação, como jogar uma pedra para cima: se a velocidade inicial for baixa, a pedra sobe e depois cai novamente. Se a velocidade inicial for alta o suficiente (esquecendo a atmosfera da Terra), a pedra sobe indefinidamente.



A evolução do raio do Universo em função do tempo para diferentes valores da densidade da matéria Ω

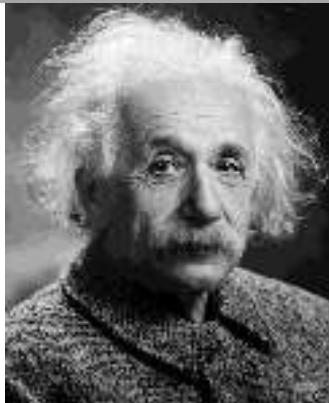
https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu

A velocidade das galáxias devido à expansão é conhecida pelas observações, mas não conhecemos a força da gravitação da matéria, que é controlada por sua densidade. Se a densidade for alta o suficiente ($\Omega > 1$), a expansão irá parar e o Universo irá se contrair. Se a densidade for muito baixa ($\Omega < 1$), a força gravitacional não é forte o suficiente e a expansão continuará para sempre. O caso limite entre essas duas possibilidades acontece quando a densidade é igual à densidade crítica ($\Omega = 1$).



Diferentes geometrias do Universo correspondem a diferentes valores de Ω . (crédito: Tom Dunne)

O destino do Universo



Albert Einstein

A expansão é melhor descrita pela teoria da relatividade geral, publicada por Albert Einstein em 1915. Esta teoria nos diz que a geometria do espaço está ligada à densidade do Universo.

Einstein não ficou satisfeito com a primeira versão de sua teoria, por ser inconsistente com um Universo estático (ou seja, não em expansão). Ele, portanto, introduziu em 1917 um novo termo, **a constante cosmológica Λ** .

Seria o início de uma saga que, mais de um século depois, está agora talvez no seu auge...



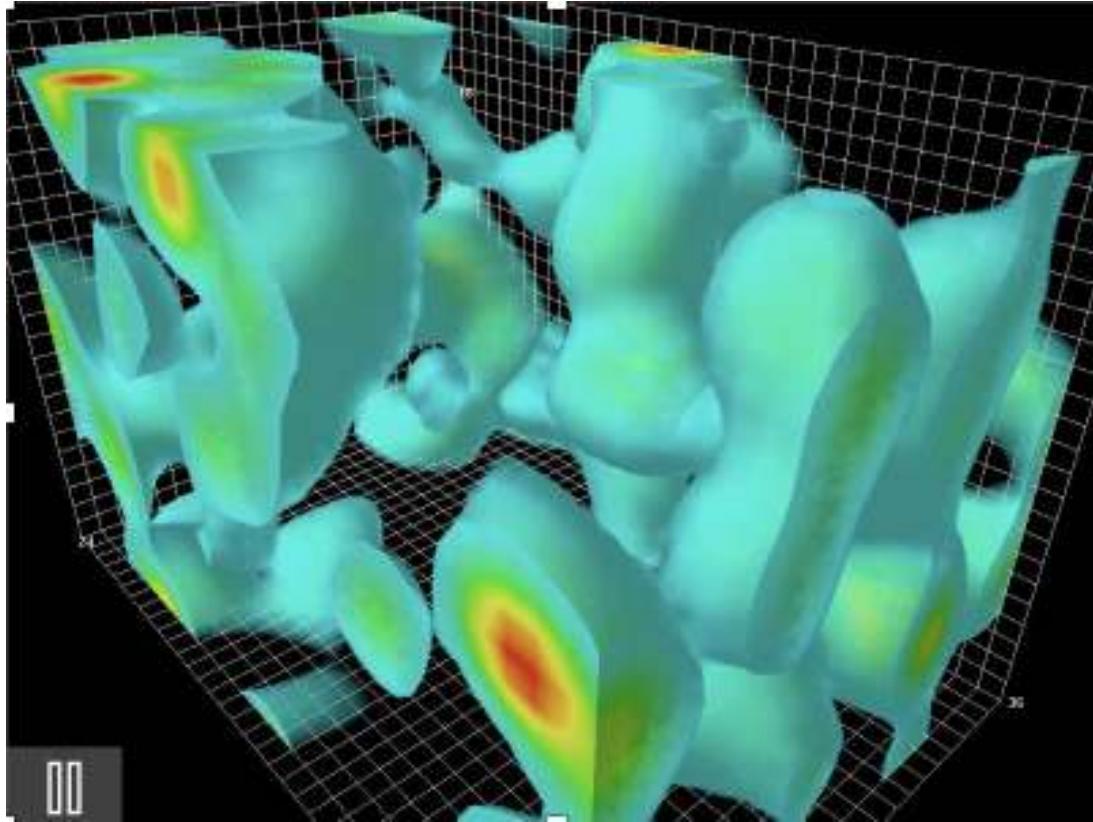
Albert Einstein e Georges Lemaître

Em 1948, Georges Lemaître construiu o primeiro modelo cosmológico lidando com a fase inicial do Universo, chamado de 'átomo primordial', o ancestral do Big Bang. Ele notou que, dada a velocidade de expansão medida por Hubble, o Universo seria mais jovem do que a idade da Terra, a menos que se defendesse uma constante cosmológica (C.C.), um argumento que não persuadiu Einstein, que abandonou a C.C. após a descoberta da expansão. Com o valor da constante de Hubble conhecido hoje, a discrepância entre a idade do Universo e a da Terra desaparece.



A descoberta da expansão do Universo levou a constante cosmológica a ser consignada ao **baú** de curiosidades inúteis na física, com a concordância de Einstein...

Mas em 1931, Lemaître fez uma observação crucial que passou despercebida na época: a constante cosmológica, antes vista como um termo adicional na parte geométrica das equações de Einstein, pode ser atribuída à pressão e à densidade de um fluido, sendo o fluido **o vácuo do espaço!**



<https://physicscommunication.ie/nothing-matters-how-the-study-of-vacuum-energy-is-proving-catastrophic>

Acesse este site para ver a animação

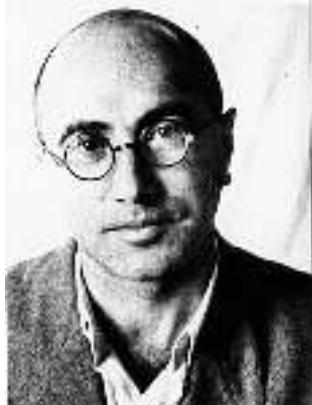
De acordo com a mecânica quântica, o vácuo não é a ausência de tudo, mas sim um enxame permanente de partículas e antipartículas, aparecendo e desaparecendo continuamente.

O vácuo deve, portanto, ter uma densidade não nula.

O vácuo quântico



Wolfgang Pauli



Yakov Zeldovich



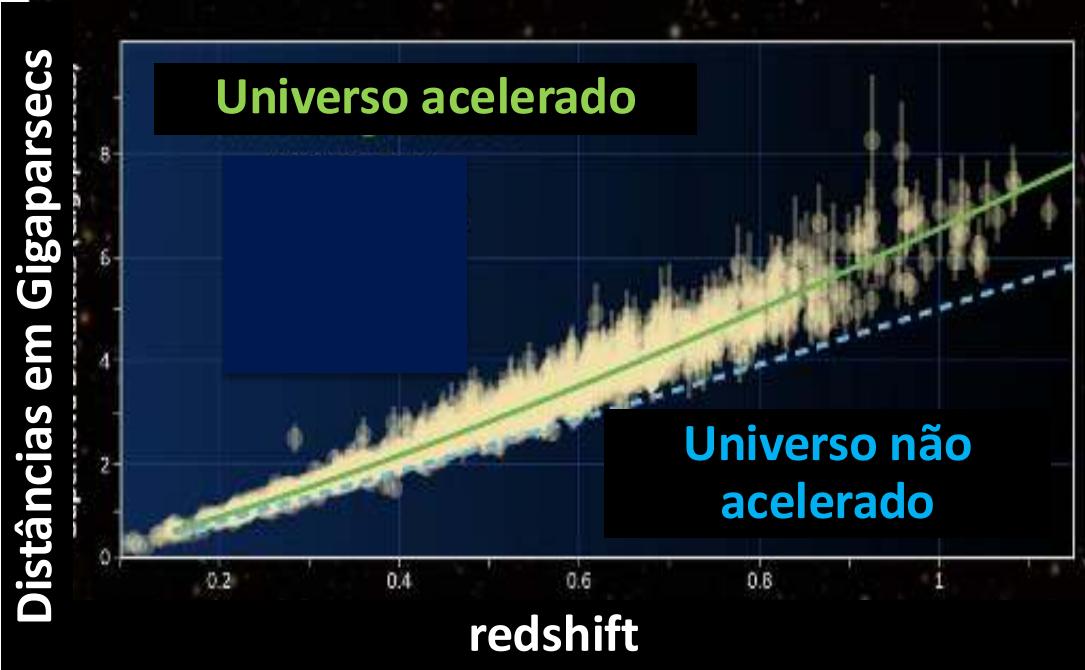
Steven Weinberg

Três dos maiores físicos do século 20 examinaram a questão do **vácuo quântico**, notando o valor incrivelmente grande previsto para a densidade do vácuo quântico em comparação com o deduzido das observações. O valor quântico é cerca de 10^{120} vezes * maior; isso é frequentemente descrito como o cálculo de ordem de magnitude mais errôneo em toda a física.

Novamente, uma questão que poderia ter permanecido no **baú** de curiosidades inúteis na física.

* $10^{120} = (10 \times 10 \times 10 \dots 10)^{120}$ vezes

O diagrama de Hubble de Supernovas



Adaptado da colaboração NOIRlab DES

As supernovas selecionadas para este estudo foram do tipo Ia por terem uma luminosidade muito regular, podendo ser usadas de forma confiável para determinar distâncias.

A versão moderna do diagrama de Hubble usando [supernovas do Tipo Ia](#) mostrou que a expansão está acelerando. Esta descoberta ganhou o Prêmio Nobel de Física de 2011 para Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt e Adam G. Riess. Este resultado é bastante surpreendente: significa que, na escala do Universo, [a gravitação atua como uma força repulsiva](#).

A expansão acelerada

Em 1998, duas equipes que estudavam o diagrama de Hubble de supernovas distantes fizeram uma descoberta que revolucionou a cosmologia e a física fundamental.

Essas supernovas são tão distantes que a luz detectada delas foi produzida quando o Universo era muito mais jovem. Isso torna possível comparar a velocidade de expansão do Universo naquela época com sua velocidade atual.

Em um Universo dominado pela matéria, a velocidade de expansão diminuiria. O diagrama de Hubble de supernovas revelou que **a velocidade de expansão do Universo está aumentando**.

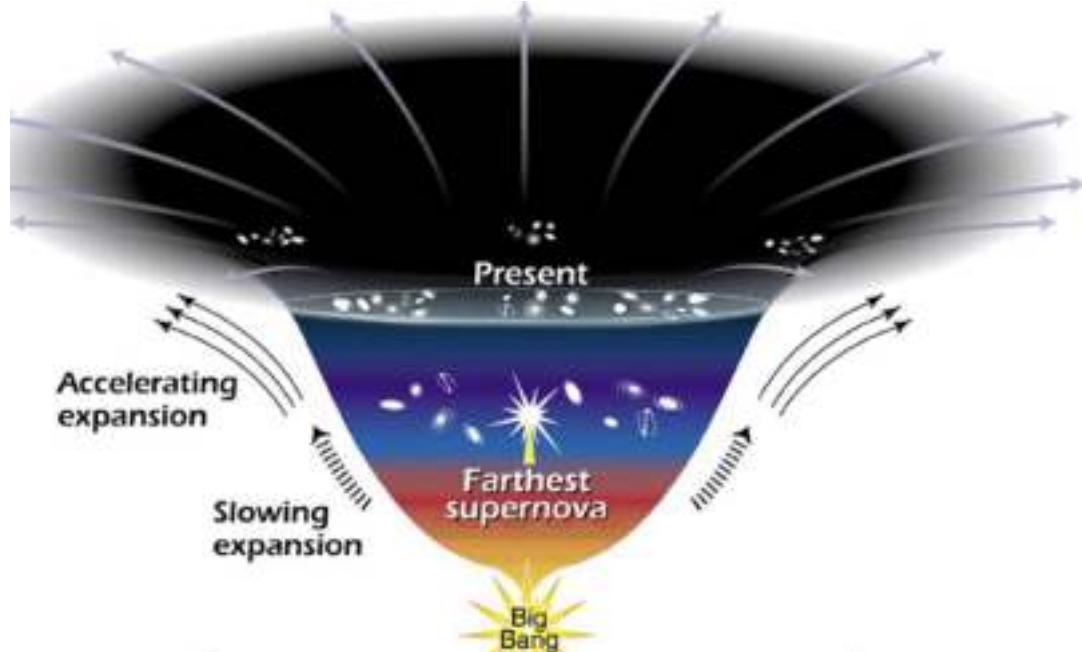


Diagrama representando a expansão acelerada do Universo.

Crédito: Design Alex Mittelmann, Coldcreation

Explicar a expansão acelerada do Universo levou a uma grande diversidade de teorias. **Nem precisa** dizer que descrever essas teorias em detalhes é matematicamente complicado.

Outra solução possível consiste em modificar a teoria da gravidade de Einstein. Existem muitas maneiras de conseguir isso, mas é difícil fazê-lo sem violar uma ou mais das muitas previsões bem-sucedidas da relatividade geral. Finalmente, ambas as abordagens podem ser combinadas de diferentes maneiras...

Energia Escura

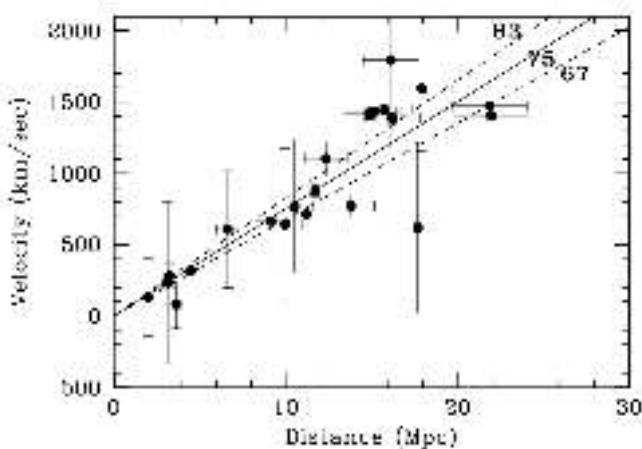
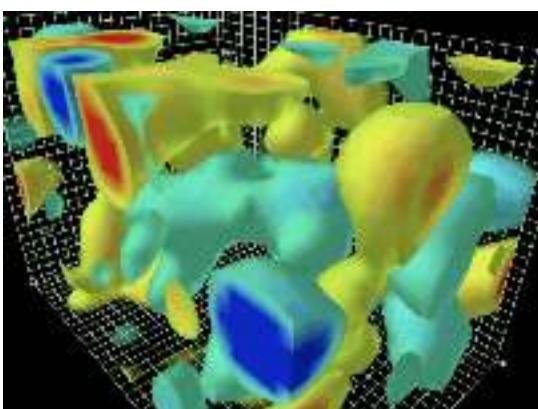
A constante cosmológica introduzida por Einstein é muito artificial do ponto de vista teórico. O valor do vácuo quântico previsto pela teoria quântica de campos excede o valor deduzido das observações em 120 ordens de magnitude.

Portanto, muitas explicações alternativas para a origem da expansão acelerada foram propostas, uma origem apelidada de '[energia escura](#)'.

A quintessência é a forma mais simples de energia escura: é um componente hipotético que interage com o resto do Universo apenas através da gravidade. Sua densidade pode variar ao longo do tempo, mas também pode se comportar de maneira muito semelhante a uma constante cosmológica, dependendo do potencial que governa sua evolução.

Em 2024, a colaboração DESI afirma ter encontrado alguns indícios de tal energia escura evoluindo.

Quiz



Qual dessas imagens mostra:

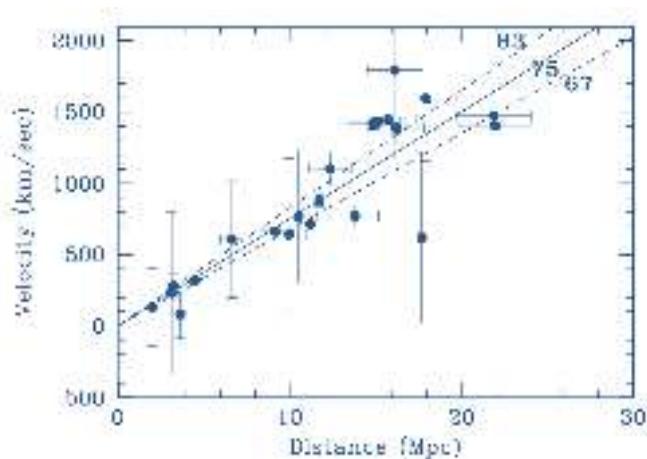
- Diferentes geometrias do espaço
- Uma representação do vácuo quântico
- O diagrama de Hubble



Respostas no verso

Respostas

Uma representação do vácuo quântico



O diagrama de Hubble das observações do Telescópio Espacial Hubble de Cefeidas em galáxias distantes.

(Freedman et al 2001)

Diferentes geometrias do espaço

Crédito: MARK

GARLICK/SCIENCE

PHOTO



O Universo no meu bolso No. 41

Este livrinho foi escrito em 2024 por Alain Blanchard da Université Paul Sabatier e revisado por Stan Kurtz do IRyA (México).

Nº 41

Imagen da capa :

Darth Vader da série Star Wars é o personagem que ‘passou para o lado negro da Força’. O próprio Universo está sujeito a uma força desconhecida cuja origem misteriosa foi chamada de ‘Energia Escura’.



Para saber mais sobre esta série e sobre os tópicos apresentados neste livrinho, visite <http://www.tuimp.org>

Tradução:: Fábio Herpich

TUIMP Creative Commons

