

Olhando para o passado

Olhando para objetos cada vez mais distantes conseguimos ver o universo em momentos cada vez mais próximos de seu início. A composição atual (73 % H, 26 % He, 1 % resto), é ligeiramente diferente da prevista pela nucleossíntese primordial (76 % H, 24 % He e traços do resto) e pode ser compreendida pela queima de H nas estrelas.

Isto é verificado experimentalmente, pelo estudo da composição das galáxias mais distantes, que se aproxima daquela primordial.

Com essas observações, podemos investigar o universo até quando ele tinha aproximadamente 1 bilhão de anos. Mas isso ainda não é suficiente, precisamos ir mais além. Mas como?

Radiação Cósmica de Fundo – luz da época em que o universo ficou transparente.

Radiação cósmica de fundo



We can only see the surface of the cloud where light was last scattered



The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.

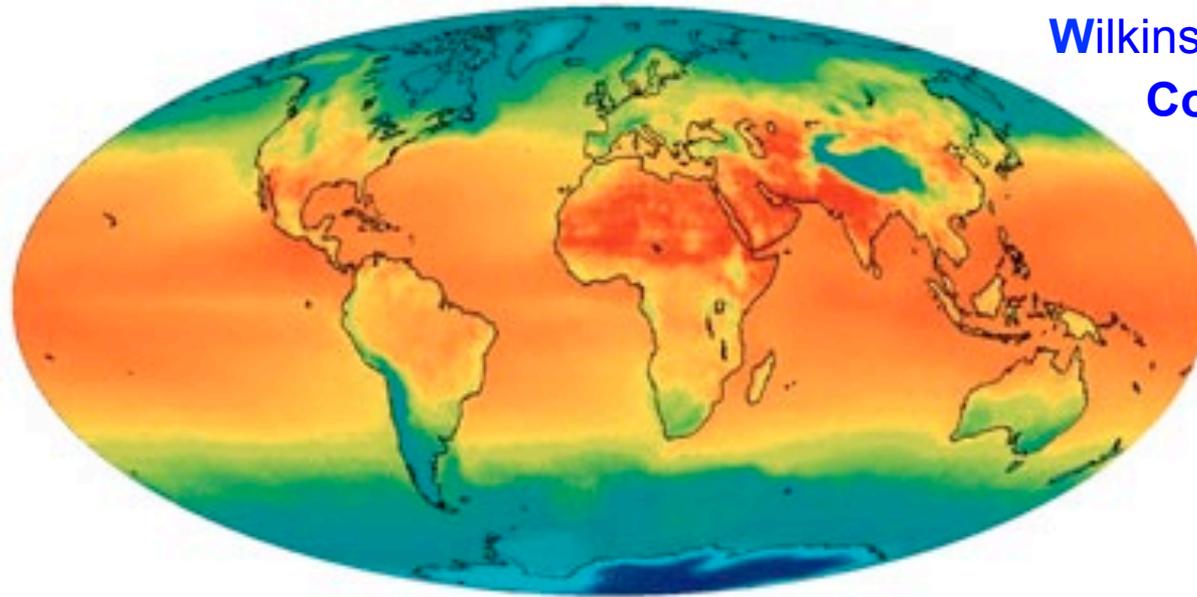
Medidas dos satélites COBE e WMAP

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Cosmic Background Explorer

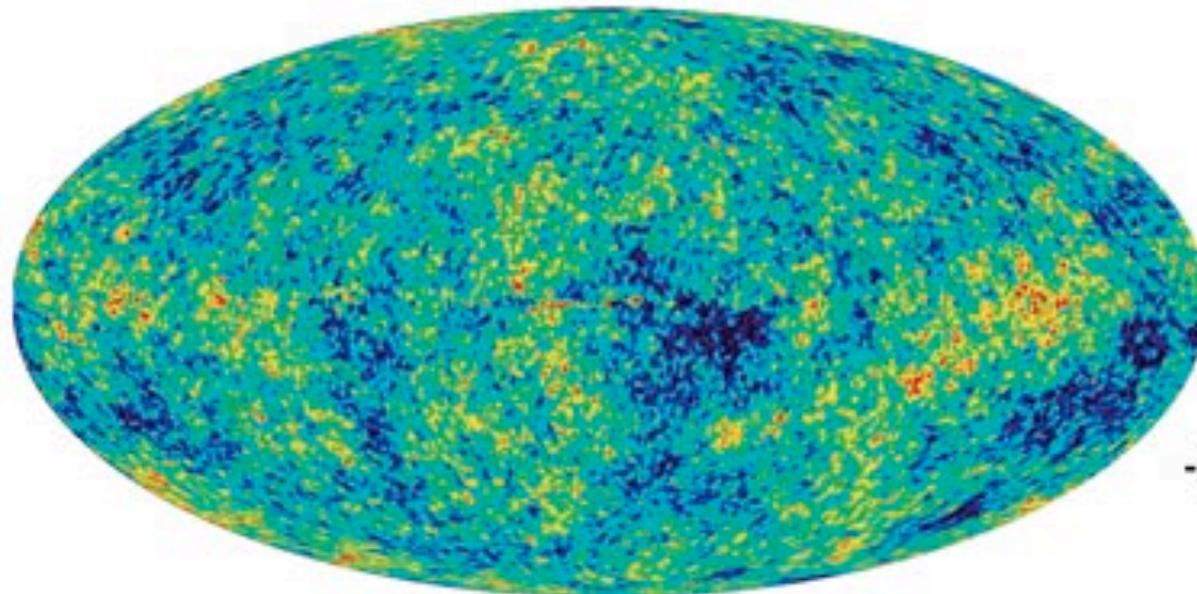
Earth

Temperatures



Microwave Sky

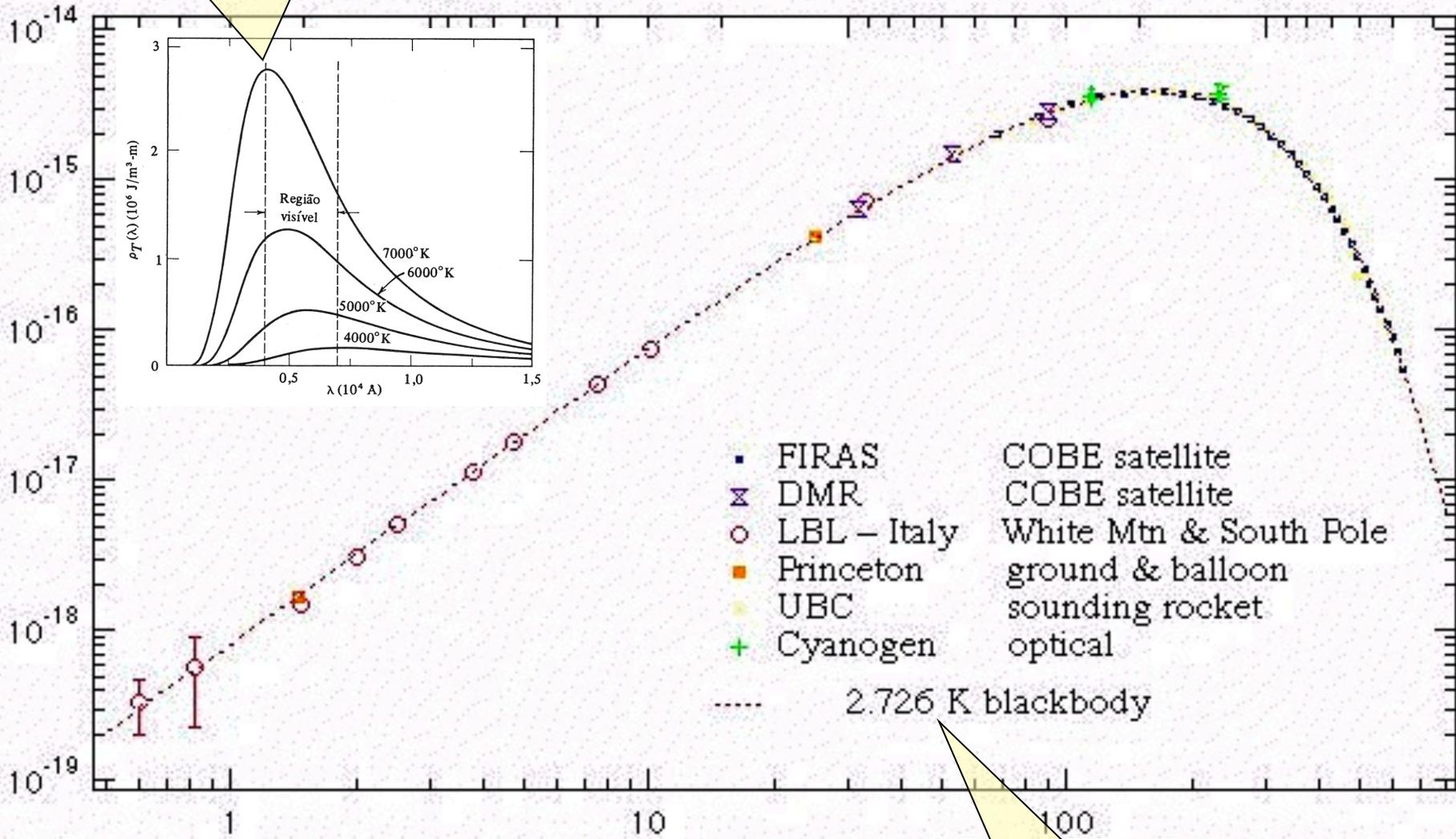
Temperatures



Espectro de radiação de corpo negro

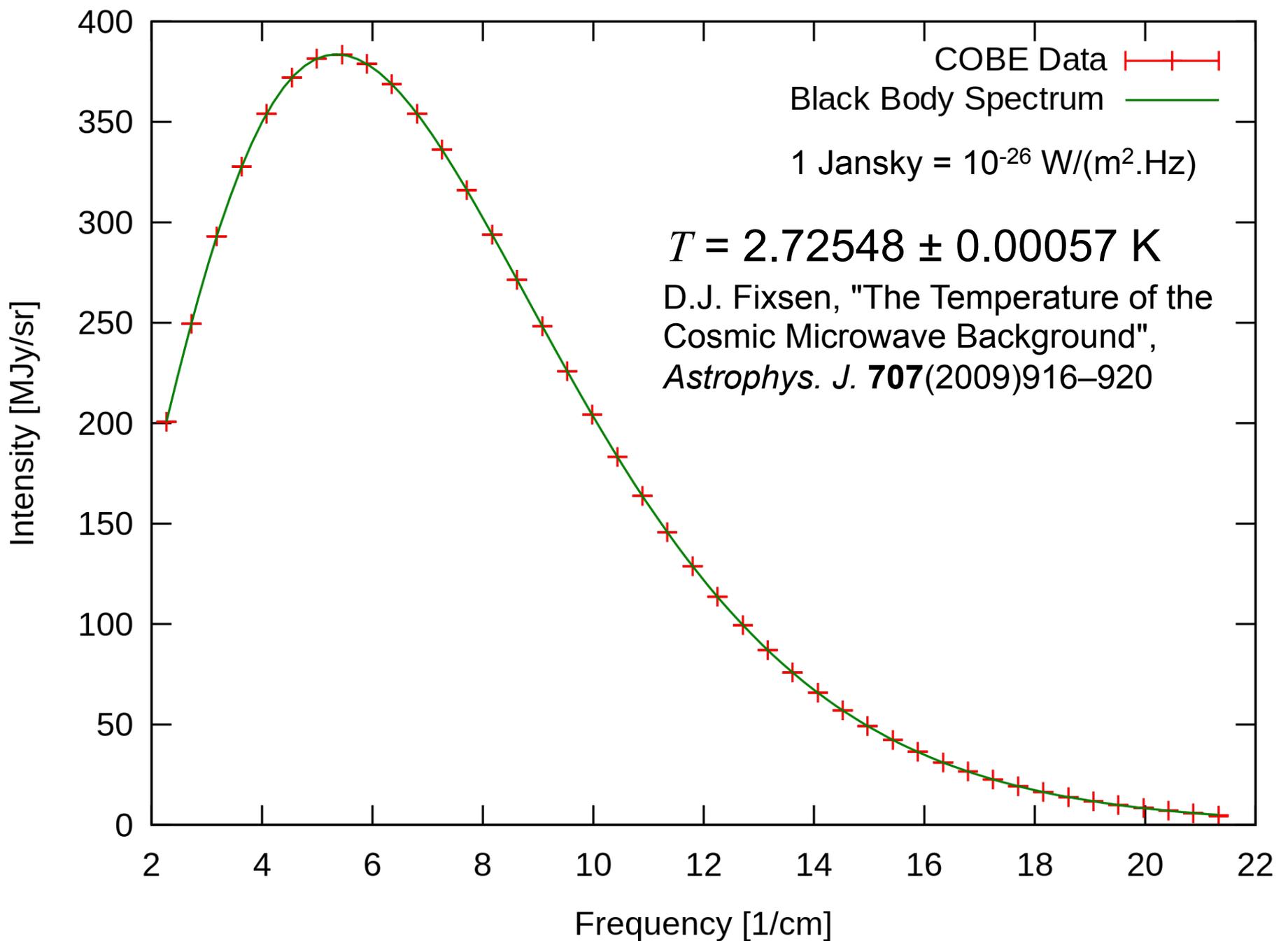
Wavelength [cm]

Brightness L_ν [erg cm⁻² sec⁻¹ sr⁻¹ Hz⁻¹]



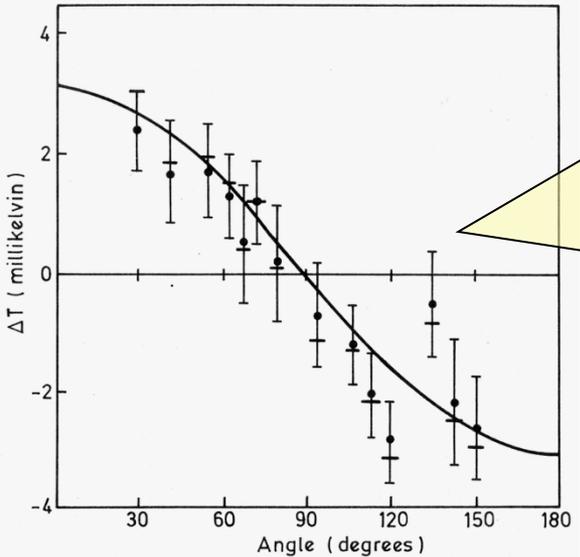
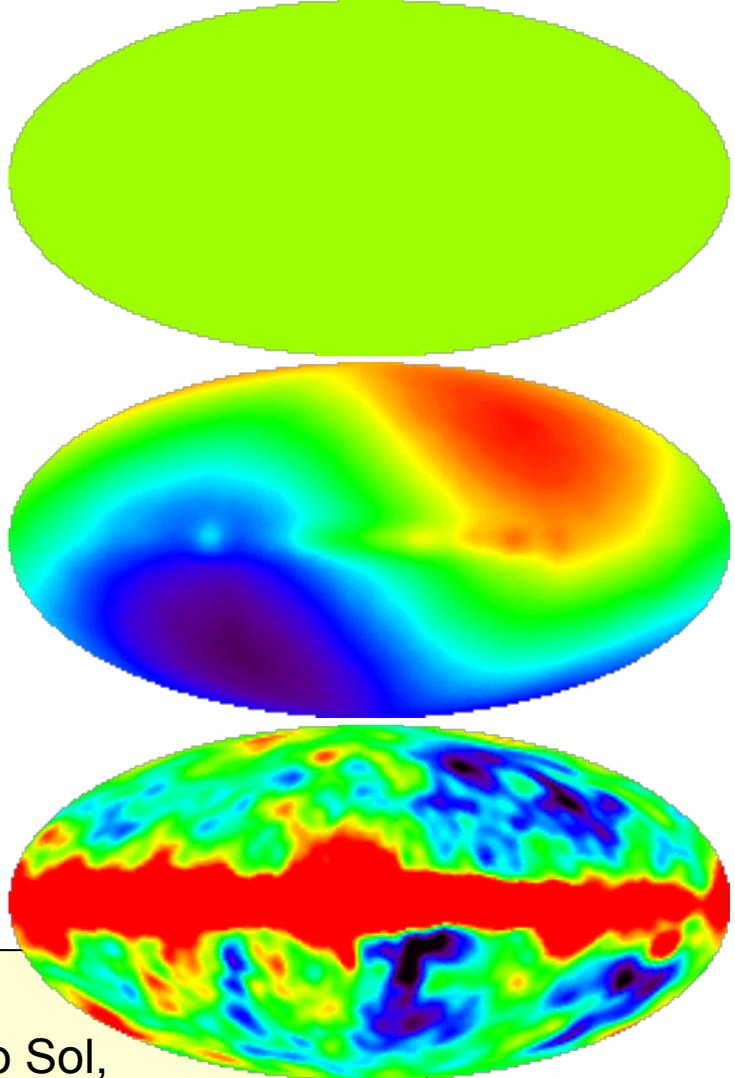
Frequency [GHz]

Temperatura de equilíbrio



Medidas da distribuição de temperatura da radiação cósmica de fundo. Na figura de cima, escala de 0 (azul) a 4 (vermelho) K. Na do meio, a escala vai de 2,721 a 2,729 K. Nessa figura, o plano da Via Láctea corresponde ao plano médio da elipse. A figura tipo yin-yang é devida à anisotropia produzida pelo movimento da Terra.

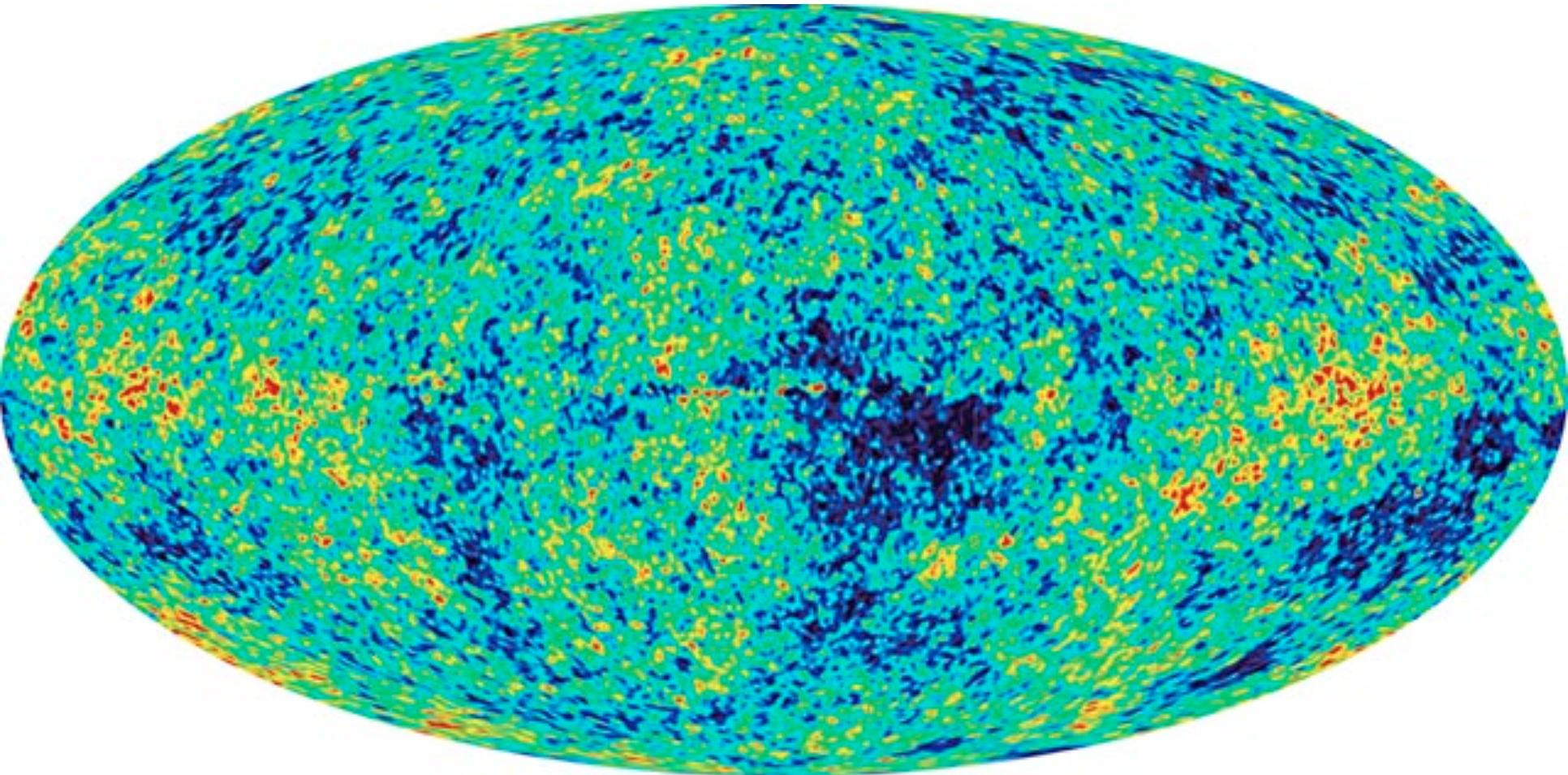
A figura de baixo teve o efeito da anisotropia subtraído. Nesse caso, o vermelho representa regiões 0,2 mK mais quentes que as azuis.



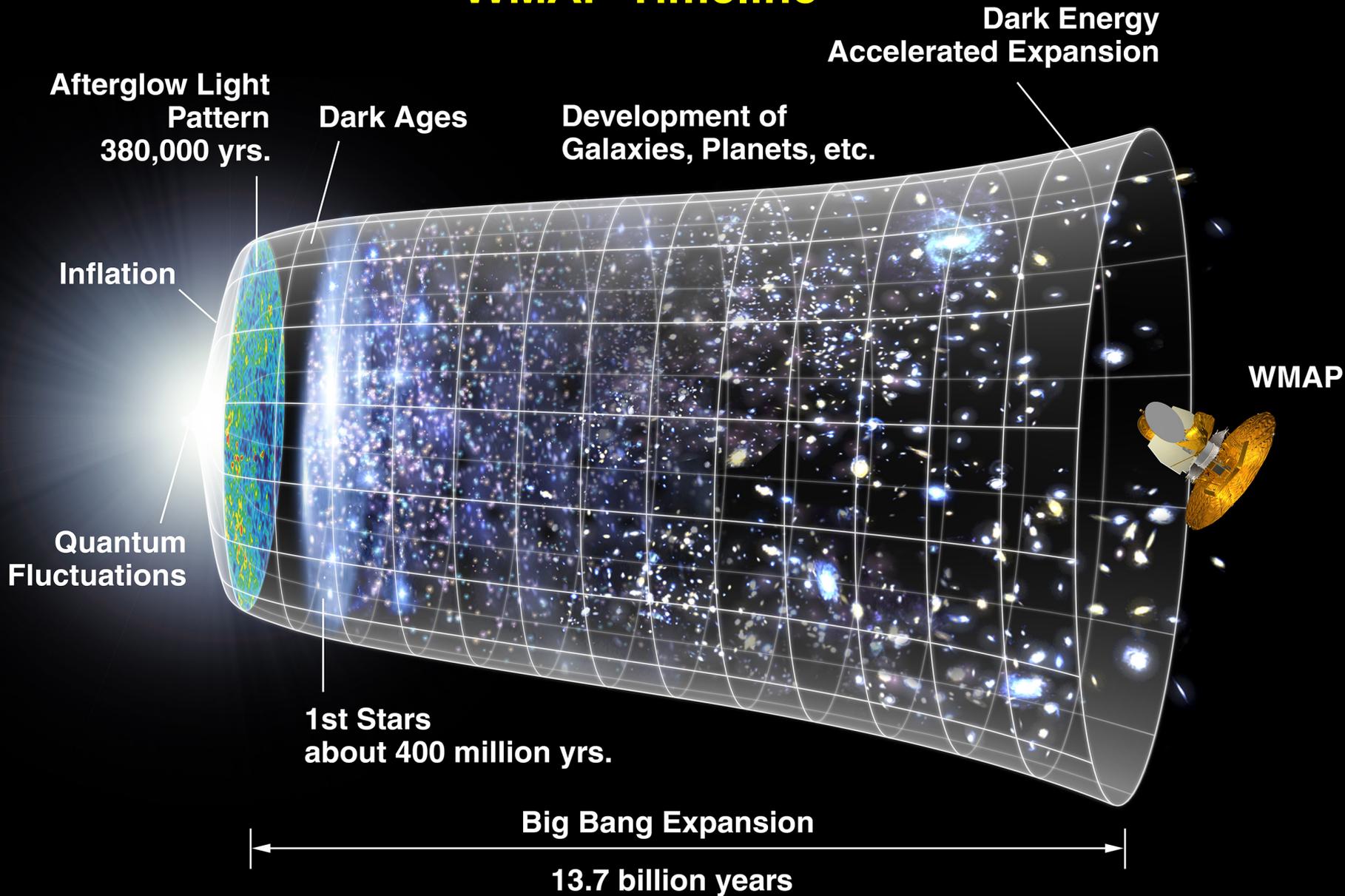
Movimento da Terra: a Terra move-se em torno do Sol, que se move em torno da galáxia, que por sua vez move-se no seu aglomerado. No fim das contas a Terra move-se a ~400 km/s na direção da constelação do Leão.

Resultados do WMAP

Flutuações da temperatura da radiação de fundo (diferenças são da ordem de 10^{-5} , tipicamente).



WMAP Timeline

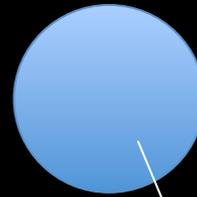


<http://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>

Uniformidade e Inflação

Radiação de fundo de 3 K

Radiação de fundo de 3 K



Você está aqui



Uniformidade e Inflação

Como pode o universo ser tão uniforme se a luz de um “lado” não teve chance de chegar até o outro? Equilíbrio térmico requer algum tipo de contato. Sem isso, como pode ter sido alcançado? Em 1979, Alan Guth, A. D. Linde e outros, deram início a uma série de trabalhos que tentavam explicar a uniformidade do universo. O processo levou o nome de inflação, em homenagem à situação econômica da época.

A ideia é que, quando o universo tinha $\sim 10^{-34}$ s ele se expandiu muito rapidamente, dobrando a cada período de 10^{-34} s. Assim, aos 2×10^{-34} s ele tinha dobrado de tamanho. Aos 3×10^{-34} s havia quadruplicado. Aos 10^{-33} s havia se expandido de um fator 2^{10} , ou 1024. Aos 2×10^{-33} s, por um fator 2^{20} , ou um milhão de vezes.

Então, se o processo inflacionário realmente aconteceu, o universo pode ter se expandido enormemente em uma pequena fração de segundo.

Uniformidade e Inflação

Ninguém sabe ao certo por quanto tempo o processo inflacionário se manteve, mas há sugestões de que tenha durado algumas centenas de períodos de duplicação (10^{-34} s).

Suponhamos que o universo, como a teoria do Big Bang sugere, tenha explodido de uma singularidade, com uma descomunal densidade de energia. Aproximadamente 10^{-34} s depois, o universo tinha $\sim 6 \times 10^{-26}$ m de diâmetro, ou seja, da ordem de 3×10^{-11} do tamanho de um próton, embora este valor seja totalmente especulativo.

Especulativo ou não, nessas condições, todas as partes do universo estavam em contato térmico umas com as outras. Aos aproximadamente 10^{-32} s de idade, o universo deixa o período inflacionário, depois de algumas centenas de períodos de duplicação.

Como ilustração, vamos supor 200 períodos.

Uniformidade e Inflação

Neste intervalo o universo se expandiu por um fator:

$2^{200} = 2 \times 10^{60}$, ou seja, o tamanho do universo passou a ser da ordem de 10^{35} m, imensamente maior que o universo observável.

Tamanho do universo observável:

$1,5 \times 10^{10}$ anos $\times \pi \times 10^7$ s/ano $\times 3 \times 10^8$ m/s $\approx 1,5 \times 10^{26}$ m.

O que pode ter causado o processo inflacionário?

Não sabemos, mas uma possibilidade é algum tipo de transição de fase, que poderia fornecer a energia necessária para a expansão.

Uma das transições de fase ocorreu ~ 380 k anos depois do Big Bang, quando elétrons, prótons e alfas se condensaram em átomos neutros.

Uniformidade e Inflação

Uma outra transição de fase, possível, mas muito especulativa, está relacionada ao – ainda por ser confirmado – Mecanismo de Higgs. Acima de uma certa temperatura os bósons da força eletrofraca eram todos sem massa.

Assim que o universo esfriou o suficiente, a situação mudou, deixando o fóton ainda sem massa, mas as W e a Z com massa e o que parecem ser duas forças distintas (a eletromagnética e a fraca).

É possível que uma transição de fase desse tipo tenha sido o “gatilho” do processo inflacionário (se é que ele ocorreu de fato).

O Começo

Vamos discutir o que ocorreu logo após o Big Bang.

O que é, onde estava, de onde veio, ou o que provocou o aparecimento da singularidade que deu origem ao universo são assuntos que, no meu entender, estão além do escopo da física, que é uma ciência experimental. Pode ser que, eventualmente, venha a ser. Aí, então, a gente rediscute estes assuntos.

O que é interessante é, com base no que conhecemos e no que estamos procurando conhecer, tentar determinar o que ocorreu logo após o Big Bang.

Vamos lá.

No instante $\sim 10^{-43}$ s, entramos na escala de Planck ($t > t_{\text{Planck}}$).

O universo era pequeno: há estimativas que vão do comprimento de Planck até décimos de milímetro.

A temperatura era $\sim 10^{32}$ K e a densidade $\sim 10^{90}$ kg/cm³.

O Começo

O acontecimento crucial neste instante, é que a força gravitacional, por algum mecanismo ainda desconhecido, torna-se diferente (e muito mais fraca) que as outras 3 forças.

A quebra da uniformidade primordial para atual diversidade começou aí.

O universo, neste ponto, começa a parecer um pouco mais familiar. Partículas e antipartículas existem (ou cordas, se elas de fato existirem).

O que interessa é que o universo vai esfriando sem grandes tropeços até $t = 10^{-34}$ s, quando, mesmo se as cordas de fato tiverem existido, elas saem de cena.

Até então as forças forte, fraca e eletromagnética estavam unificadas; neste ponto, a força forte se separa.

O Começo

O processo deve ser bem mais brutal que o da separação da gravidade, e alguns acham que esta transição de fase é responsável pelo processo inflacionário.

É neste ponto, também, que a assimetria entre matéria e antimatéria se manifesta: para cada 10^9 antipartículas, havia $10^9 + 1$ partículas. Elas continuaram coexistindo, mas com populações ligeiramente diferentes.

Com a energia gerada por esta transição de fase, a inflação tem início. Após algo como 200 ciclos de duplicação, o universo atinge um tamanho muito maior que o universo visível.

Na expansão, as não uniformidades de densidade do tecido quântico devem ter se expandido para proporções cosmológicas e produziram, eventualmente, as sementes que originaram galáxias, ...

O Começo

No intervalo entre o final da inflação ($\sim 10^{-32}$ s) até um pouco antes de $\sim 10^{-10}$ s nada muito significativo acontece.

Se a SUSY é real, partículas supersimétricas devem ter deixado de ser produzidas ao final desse período.

Quarks e léptons existiam, assim como seus anti-análogos. A aniquilação de matéria e antimatéria estava em andamento, mas praticamente finalizada ao fim desse período.

As 3 gerações de partículas existiam com igual probabilidade, uma vez que a temperatura estava acima do limiar além do qual o mecanismo de Higgs gera massa. Assim, todos os quarks e léptons tinham massa nula.

Energia do Tevatron (Fermilab): $\sim 4 \times 10^{-12}$ s.

Energia do LHC: 10^{-13} s.

Mas a energia disponível nos quarks é menor, assim não passamos dos 10^{-10} s.

O Começo

Em 10^{-10} s, muito havia acontecido. Partículas e antipartículas se aniquilaram, sobrando uma partícula para cada 10^9 pares aniquilados.

O universo havia esfriado abaixo do limiar de Higgs, então quarks e léptons haviam adquirido suas respectivas massas. As 3 gerações estavam estabelecidas.

Nesse ponto a temperatura havia baixado o suficiente para os quarks se combinarem em bárions e mésons. A maioria deles iria decair, sobrando prótons e nêutrons, mas ainda com excesso de energia para formar núcleos.

O universo era formado de prótons, nêutrons e neutrinos. Elétrons e pósitrons também existiam, ainda sem terem se aniquilado para deixar o excesso de elétrons que observamos.

O Começo

A ~ 1 s, a temperatura havia caído o suficiente para que pósitrons e elétrons se aniquilassem, processo que gerou um grande número de fótons ($\sim 10^9$ para cada próton). A densidade havia caído o suficiente para que os neutrinos parassem de interagir.

É bastante aceito que os neutrinos gerados no Big Bang interagiram pela última vez quando o universo tinha ~ 1 s. Eles devem ser uma excelente fonte de informação sobre o universo primordial.

O problema é que, assim como os fótons de alta energia viraram a radiação de 3 K, os neutrinos também tiveram sua energia enormemente reduzida, tornando-os muito difíceis de detectar. Se alguém descobrir um jeito de detectá-los, pode reservar a passagem para Estocolmo.

O Começo

A história agora avança em escalas mais humanas. Entre 1'' e 3', o universo esfriou o suficiente para que prótons e nêutrons pudessem combinar. A nucleossíntese primordial ocorreu neste período, com a formação de 76 % de H, 24 % de He e traços do resto. Os 76 % incluem os nêutrons que foram formados e que decaíram para prótons depois.

Depois de 3' a temperatura já não era suficientemente elevada para que fusão nuclear ocorresse. Assim, dos 3' até os ~400k anos, o universo consistia de prótons (núcleos de H), alfas (núcleos de He) e elétrons, todos banhados por fótons que os impediam de se combinar para formar átomos, por conta da alta energia (além dos neutrinos, que navegavam impávidos).

O Começo

Em ~ 380.000 anos, a temperatura havia caído o suficiente para que os elétrons pudessem ser capturados pelos prótons e alfas.

Os fótons não têm mais energia suficiente para arrancar os elétrons de suas órbitas.

O universo passa de sua fase de plasma, para a fase atômica, tornando-se neutro e, assim, transparente aos fótons.

Começa o domínio da gravitação.

A ~ 400 milhões de anos formam-se as primeiras estrelas ...

Massa do Universo

Existem várias evidências de que há mais massa no Universo do que aquela que podemos “ver”.

Lente gravitacional – Imagem do Hubble mostrando deformações nas imagens, produzidas pela curvatura da luz ao passar por um aglomerado de galáxias – o Abell 2218. Os arcos representam galáxias distantes, cuja imagem foi deformada pela gravidade.



Pela deformação observada pode-se inferir a massa do aglomerado e, com isso, determinar as distâncias de objetos que aparecem distorcidos na imagem.

Essa diferença é tão significativa, que, aparentemente, trata-se de um tipo de matéria não bariônica, ou seja, não do mesmo tipo daquela de que somos feitos – ou o nosso planeta.

Outro processo é a **dinâmica de galáxias espirais**.

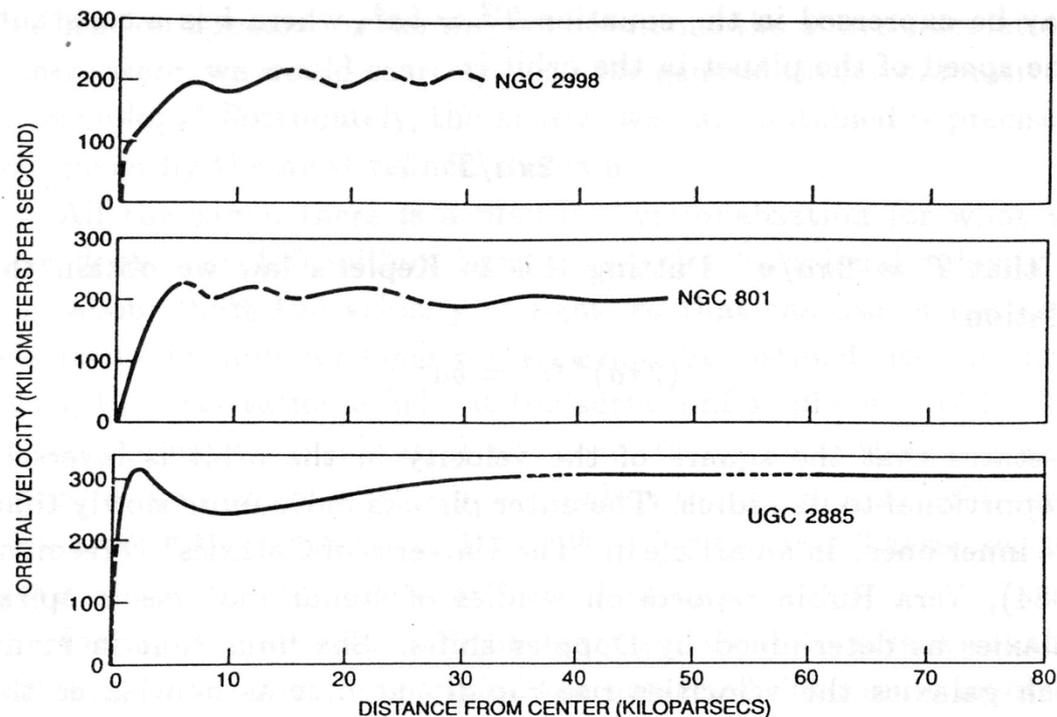
Lei de Kepler: $T^2 = ba^3$ onde T é o período da órbita, b uma constante e a é proporcional à dimensão da órbita.

Para órbitas pouco excêntricas (como as dos planetas do sistema solar), temos:

$v = 2\pi a/T$. Substituindo na equação da lei de Kepler:

$$(2\pi a)^2/v^2 = ba^3 \Rightarrow v^2 \propto a^{-1}.$$

Assim, os planetas mais distantes movem-se mais devagar em torno do Sol. Isso acontece também com os braços de galáxias espirais.



Perguntas (im)pertinentes

- Porque existem quarks e léptons e o que os faz diferentes?
- Porque existem 3 gerações, cada uma contendo um par de quarks e um par de léptons?
- Porque existem 4 forças e porque elas têm as intensidades relativas que observamos?
- É possível que todas as 4 forças conhecidas sejam apenas facetas diferentes de uma mesma interação?
- O mecanismo de Higgs é correto?
- Será possível juntar relatividade geral e mecânica quântica?
- Porque é que parecemos viver em 3 dimensões espaciais e uma dimensão temporal?
- O que faz o tempo diferente do espaço?
- Se TRG e a MQ puderem ser unificadas, isso significa que o espaço e o tempo são granulares?