

ATENÇÃO: esses resumos visam a **auxiliar** o estudo de cada capítulo, enfatizando os principais pontos levantados em cada trecho do livro *Extragalactic Astronomy and Cosmology: an Introduction*, de Peter Schneider. **De forma alguma** esses resumos podem **substituir** a leitura e estudo do livro, o qual é muito mais completo.

Capítulo 4 – Resumo

Cosmologia ↔ estudo do Universo como um todo.

Por Universo aqui devemos entender algo material, concreto e palpável, qual seja o conjunto de matéria e energia, o espaço por eles ocupado e o tempo ao longo do qual observamos a evolução da matéria, da energia e do espaço.

Como toda a ciência, a Cosmologia vive de observações e da confrontação do dados observados com previsões de modelos. A Seção 4.1 descreve os principais vínculos observacionais em que se baseia a Cosmologia atual. Entre eles destacamos:

- a distribuição de galáxias em grande escala no espaço: galáxias não se distribuem homogeneamente; elas forma estruturas, tais como grupos (inclusive o Grupo Local, ao qual a Galáxia pertence), aglomerados e superaglomerados de galáxias. Por outro lado, os maiores superaglomerados de galáxias têm uma extensão linear da ordem de 100-150 Mpc. Isso ainda é bem menor do que o raio observável do Universo. Em escalas maiores do essas, portanto, podemos dizer que a distribuição de galáxias é consistente com a homogeneidade.
- A radiação cósmica de fundo, no domínio micro-ondas do espectro. Essa radiação é de origem térmica, descrita por uma Planckiana com temperatura de $T=2.728\text{K}$. Ela é isotrópica, ou seja, o espectro é o mesmo em todas as direções, desde que sejam descontados contaminantes óbvios, como a emissão de radiação em micro-ondas por fontes Galácticas e o dipólo causado pelo movimento peculiar do Grupo Local, o qual faz com que a radiação seja, por efeito Doppler, deslocada para o azul (vermelha) na direção contrária a este (deste) movimento. A radiação de fundo é o campo de radiação EM primordial do Universo.
- A expansão do Universo, atestada pelo fato de que as galáxias estão afastando-se de nós, com a exceção de galáxias vizinhas, cuja velocidade radial V_r é de aproximação, em função da atração gravitacional mútua. Pela lei de Hubble, $V_r = H_0 D$, onde H_0 é a constante de Hubble e D a distância. $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$. O inverso da constante de Hubble tem obviamente dimensão de tempo e corresponde a aproximadamente o tempo necessário para a expansão do Universo ter atingido o seu estágio atual. $1/H_0 \approx 10 \text{ Ganos}$ é, portanto, uma medida da idade dinâmica do cosmos.

- A abundância química primordial é mensurável através de análise da composição química de objetos bem velhos ou de sítios astronômicos ainda não submetidos ao processo de enriquecimento químico causado por sucessivas gerações de estrelas. Esse tipo de análise permite estabelecer não apenas que H e He são os elementos químicos mais abundantes no Universo, mas também colocam a fração primordial de He, em termos de massa, na ordem de 25%.
- O Universo tem uma idade mínima de 12 Ganos, pois essa é a idade das estrelas mais velhas de nossa Galáxia. Esse valor é da mesma ordem que $1/H_0$, o que mostra que a dinâmica de expansão do Universo influenciou no processo de formação das galáxias e, dentro delas, das estrelas que hoje vemos.

Essas observações, associadas à contagem de fontes astronômicas vistas a distâncias cosmológicas e ao simples fato de que o céu não totalmente dominado por fontes astronômicas, leva à conclusão de que o Universo está em expansão e, em grande escala, ele é consistente com o que chamamos de Princípio Cosmológico.

Princípio Cosmológico: o Universo é homogêneo e isotrópico em escalas suficientemente grandes. Obviamente, escalas suficientemente grandes aqui precisam necessariamente compreender uma amostragem das maiores estruturas conhecidas, que são os superaglomerados de galáxias, com dimensões lineares de 100Mpc aproximadamente.

Como ponto de partida do estudo quantitativo da Cosmologia, podemos partir de uma esfera de densidade uniforme e em expansão isotrópica e avaliar como sua densidade evolui no tempo, à medida que ela se expande sob o efeito de sua própria gravidade. Essa é a Cosmologia Newtoniana de um fluido em expansão. A premissa de que a gravidade é a interação dominante se justifica pelo fato de que o Universo é eletricamente neutro e que as forças nucleares são de curto alcance, sendo assim irrelevantes em escalas macro.

A Cosmologia Newtoniana é detalhada na parte inicial da seção 4.2 do PS. Em especial, nesta seção são introduzidas grandezas muito úteis para a Cosmologia, como o fator de escala $a(t)$, o parâmetro de Hubble, $H(t) = 1/a \, da/dt$ e o parâmetro de curvatura, K . As eqs da Cosmologia Newtoniana, 4.13 e 4.14 também mostram que o sinal de K , que aparece naturalmente como uma constante de integração nas equações do Universo clássico, determina o destino da expansão: se $K > 0$, o Universo eventualmente para de se expandir e recolapsa, enquanto que sua expansão se dá para sempre se $K < 0$. A partir daí definem-se outros parâmetros especiais, que são a densidade crítica e o parâmetro de densidade, Ω .

As equações de Friedman-Lamaitre, provenientes da Relatividade Geral para o caso de um fluido homogêneo e isotrópico, são bastante semelhantes às da Cosmologia

Newtoniana (eqs 4.18 e 4.19). Algumas diferenças conceituais existem, contudo, e precisam ser enfatizadas:

- O Universo relativístico pode ter não apenas matéria, mas outros componentes na forma de seu equivalente, energia. Então podemos definir outros parâmetros de densidade, que medem a densidade de energia de outros componentes com relação à densidade crítica. Um exemplo óbvio e conhecido é a densidade de energia associada ao campo de radiação eletromagnético, seja gerado por processos astrofísicos (estrelas, meio interestelar e intergaláctico), seja o campo primordial (radiação cósmica de fundo).
- As equações da relatividade acomodam uma constante adicional, a constante cosmológica Λ , a qual corresponde a uma densidade de energia que não se altera no tempo e cujo efeito na dinâmica de expansão é o de acelerar o Universo, contrário portanto ao efeito do componente de matéria.
- Finalmente, a equação da aceleração, 4.19, contém um termo que envolve a pressão interna do fluido, algo que não se vê na eq. 4.13.

Há também modificações conceituais entre a Cosmologia proveniente da relatividade e a clássica, as quais não afetam diretamente a forma das equações. Entre elas destacamos o fato de que, contrariamente ao caso Newtoniano, em que uma esfera se expande a partir de um centro ocupando um volume cada vez maior de um espaço pre-existente, no caso relativístico não há centro e a expansão se dá pela dilatação do espaço. Então o Universo não se originou de ponto central, mas o ponto origem da expansão era o Universo inteiro no passado.

Na verdade, as eqs 4.18 e 4.19 não são independentes. Podemos deduzir a 2a a partir da 1a usando a primeira lei da Termodinâmica para o caso de um fluido em expansão, mas colocando explicitamente a relação de equivalência entre matéria e energia. Então podemos considerar que 4.18 e a 1a lei são as eqs realmente independentes.

Essas equações envolvem 3 incógnitas para cada componente do cosmos: a densidade $\rho(t)$, a pressão $P(t)$ e o fator de escala, $a(t)$. Uma 3a equação é então necessária. Esta é a equação de estado, que estabelece a relação entre a densidade de matéria ou energia de um componente com a pressão que esse componente exerce. Os casos dos principais componentes do Universo (que conhecemos) são então mostrados: matéria não-relativística, radiação EM e partículas relativísticas, e densidade de energia associada à constante cosmológica.

Quando colocados juntos, temos então as eqs 4.29, 4.30 e 4.31, que são as mais gerais para um Universo com matéria, energia escura e radiação. Essas equações mostram que a densidade de cada componente varia com o fator de escala de forma diferente. A

densidade de energia associada à radiação varia mais fortemente com a expansão, sendo dominante na fase inicial do Universo. Após a fase de equilíbrio matéria e energia, a matéria passa a ser o componente dominante. Mas a densidade de matéria cai com a^3 , de forma que eventualmente essa densidade se torna menor do que a densidade de energia (constante) associada à constante cosmológica.

Outra reinterpretação importante dos parâmetros cosmológicos é evidenciada pela eq. 4.30 quanto ao parâmetro de curvatura, K . No caso Newtoniano, seu sinal determina o parâmetro de densidade de matéria (único componente existente no Universo Newtoniano) e o destino da expansão do Universo. Já no caso geral, isso não é mais verdade. O valor de K está associado ao parâmetro de densidade total (somando todos os componentes), mas o futuro da expansão constatada atualmente depende dos valores de cada componente individualmente, em especial dos valores de Ω_Λ e de Ω_m . Mas o valor de K determina a geometria global do espaço, tal como mostrado, para o caso de um espaço bi-dimensional, na Figura 4.6.

A história de expansão no futuro depende então da importância relativa desses componentes, medida no presente pelos respectivos parâmetros de densidade. A seção 4.3 discute os possíveis cenários. O caso sem Λ é qualitativamente igual ao caso Newtoniano, ou seja, a expansão poderá continuar ad infinitum ou parar e se contrair, dependendo da densidade de matéria ser menor ou maior do que o valor crítico, ou seja, $\Omega_m < 1$ ou > 1 .

Se Ω_Λ é não nulo e $\Omega_m > 1$ temos o caso mais interessante, em que o Universo ainda pode recolapsar, desde que o primeiro termo seja pequeno. Caso contrário, o termo da constante cosmológica vai dominar a expansão subsequente à presente época e o Universo vai se expandir para sempre. Outro caso interessante é se $\Omega_\Lambda > 1$, que permite que o Universo tenha tido uma fase de contração no passado, antes de começar a se expandir. A figura 4.7 procura resumir, no plano Ω_Λ vs. Ω_m , os diferentes cenários.

Exceto por esta última possibilidade, o Universo vem de uma singularidade, ou pelo menos de uma fase extremamente densa e quente, ao que chamamos popularmente de *Big Bang*.

Um outro parâmetro cosmológico comumente usado é o parâmetro de desaceleração, q_0 , dado pelas eqs. 4.32 e 4.33. Num Universo exclusivamente de matéria, ele é a metade do parâmetro de densidade, Ω_m e é sempre positivo, portanto. Isso significa que num Universo com matéria a expansão é sempre desacelerada, pelo efeito atrativo da matéria. Daí o nome dado ao parâmetro q_0 . Mas a inclusão da energia escura leva à possibilidade de que $q_0 < 0$, o que significa uma expansão acelerada no presente, atestando o efeito que a constante cosmológica tem sobre a dinâmica do cosmos.

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram a dependência do fator de escala com o tempo para diferentes modelos. O painel inferior da 4.9 mostra a idade do Universo (eq. 4.34) para diferentes escolhas dos parâmetros.

O modelo padrão da Cosmologia atual tem $K=0$ (espaço com geometria plana), $\Omega_m \sim 0.3$ e $\Omega_\Lambda \sim 0.7$, tal como mostrado na expressão 4.35.

A seção 4.3.2 materializa a interpretação correta do que é o desvio para o vermelho. Ele não é causado pelo efeito Doppler. No caso de um universo em expansão, ele é consequência do fato de que o comprimento das ondas EM aumenta à medida que elas se propagam no espaço pelo fato de que o fator de escala está aumentando, ou seja, o espaço entre dois pontos quaisquer (dois máximos de onda, por exemplo) está se dilatando. Dessa forma, prova-se que há uma relação muito simples entre o redshift z e o fator de escala a , como mostrado na eq. 4.38. A Lei de Hubble também é revisitada de acordo com essa interpretação, mostrando-se que, ainda que a relação $v = H_0 D$ seja válida, a relação $v = cz$ (efeito Doppler) só é válida para $z \ll 1$.

Um outro resultado importante diz respeito à dependência da temperatura da radiação de fundo com o fator de escala. Se assumirmos que a radiação de fundo é descrita por uma Planckiana, como de fato o é, e incorporarmos na função de Planck tanto o efeito de diluição da densidade de fótons à medida que o Universo se expande quanto o efeito de atenuação da sua frequência (aumento do comprimento de onda), chegamos à conclusão de que a temperatura é inversamente proporcional a $a(t)$, eq 4.42.

A subseção 4.3.3 define as diferentes medidas de distância em cosmologia, mostrando que, devido à expansão do Universo e ao fato de que a geometria do espaço pode ser curva, distâncias estimadas usando ângulos resultam em valores diferentes do que as baseadas em fluxo, para um mesmo objeto. Não há uma medida única de distância a um objeto, portanto, o valor da distância dependendo de como a medida é feita. A eq. 4.48 estabelece a relação entre a distância por luminosidade, D_L e a por diâmetro, D_A . Mas igualmente importante é notar que ambas são funções do redshift, sendo que essas funções envolvem também os parâmetros cosmológicos. Então a relação distância-redshift depende do modelo cosmológico empregado. No caso de D_A , vide eq 4.47.

Seção 4.4 Universo primordial, História térmica

- fator de escala (a) $\ll 1$ --> Densidade da radiação é maior do que a da matéria e da energia escura
- $a(t)$ proporcional t^2 ; T proporcional a t^{-2}
- partículas que compõem a radiação (partículas relativísticas): fótons, neutrinos, elétrons

e pósitrons

- equilíbrio térmico e químico garantido por reações de criação e aniquilação envolvendo essas partículas

- desacoplamento dos neutrinos --> ocorre quando $T \sim 10^{10}\text{K}$, pois a partir daí as reações, baseadas na interação nuclear fraca se tornam menos frequentes.

- neutrinos evoluem com T proporcional a a^{-1}

- com $T \sim 5 \times 10^9$, reações de criação de par elétron-positron a partir de fótons começam a cessar, mas reações de aniquilação continuam (pois os leptons têm massa de repouso além da energia cinética (térmica) disponível).

– consequência: elétrons e pósitrons se aniquilam em fótons quase que completamente, aquecendo o campo de radiação EM.

– Fótons terminam com mais energia do que os neutrinos. Temperatura de Planck dos fótons hoje (radiação de fundo): $T=2.7\text{K}$. Neutrinos: $T=1.9\text{K}$

- pequeno excesso de elétrons sobre pósitrons resulta num universo eletricamente neutro se este excesso for igual ao número de prótons (Universo com carga nula).

Nucleosíntese primordial

- prótons e neutrons se formaram muito antes do desacoplamento dos neutrinos, dada sua alta massa de repouso (exigem reações de criação mais energéticas)

- neutrons são de maior massa de repouso --> há um excesso de prótons ($n_p \sim 3 n_n$) dado pelo fator de Boltzmann

- quando reações $p \rightarrow n$ se tornam ineficientes ($T \sim 10^{10}\text{K}$, são reações que envolvem neutrinos), o número de neutrons tende a decair rapidamente (decaimento beta)

- a energia de ligação do deutério é apenas um pouco maior do que a energia térmica típica nesta época --> deutério é criado por interações nucleares fortes. Mas também é destruído por foto-dissociação (há muitos fótons para doar energia aos núcleos de D).

- neutrons ligados a núcleos atômicos tendem a ser estáveis.

- aos $t \sim 3\text{min}$ ($T \sim 5 \cdot 10^8$), a fotodissociação deixa de ser eficiente --> formam-se núcleos de D que remanescem

- entre esses dois instantes (10^{10}K e $5 \times 10^8\text{K}$), neutrons livres existem e decaem --> $n_n / n_p = 1/7$

- núcleos de D rapidamente formam núcleos de He4.

- abundância primordial de He4:

$$Y = (\text{massa em núcleos de He4}) / (\text{massa total de bárions}) = 2n_n / (2n_n + n_p - n_n) = 2n_n / (n_n + n_p) = 2 (n_n/n_p) / (1 + n_n/n_p) = (2/7) / (8/7) = 1/4 = 0.25$$

- quantidades pequenas de Li, B, Be também se formam no Universo jovem, mas elementos pesados não se formam pois não há canais de reação com seção de choque suficientemente alta.

- A abundância primordial deduzida acima para o He (25%) e H (75%) é confirmada por observações astrofísicas.

- Tanto a abundância primordial de He quanto a de D dependem do parâmetro de densidade de bárions, W_b . Quanto maior for essa quantidade, mais cedo núcleos de D se formam e maior fica a razão n_n/n_p . Logo maior o valor de Y.

- Já a abundância de D cai com W_b . Isso porque mais núcleos de D são convertidos em He se W_b é maior.

- As abundâncias observadas de He e D permitem concluir que $W_b \sim 0.04$