

Model cosmològic estàndard

Una visió general

Sergi Blanco Cuaresma

28 de juny de 2011

Resum

Visió general sobre el model estàndard cosmològic (SCM, *Standard Cosmological Model*).

Índex

1	Introducció	2
2	Caracterització general	2
2.1	Relativitat general	2
2.2	Principi cosmològic	3
2.3	Mètrica FRWL	3
3	Expansió de l'univers	4
3.1	Redshift	4
3.2	Llei de Hubble	4
3.3	Expansió accelerada	5
3.4	Edat de l'univers	5
4	Estructura còsmica	5
4.1	Origen de les fluctuacions	5
4.2	Evolució gravitacional	6
4.3	Matèria	6
4.4	Halos	7
4.5	Formació de galàxies	8
4.6	Candidats a matèria fosca	8
5	Radiació còsmica microones de fons	8
5.1	Distribució de temperatura	9
5.2	Espectre de potència	9
5.3	Mesures	10
6	Nucleosíntesis primordial	10
6.1	Cronologia	10
6.2	Observacions	11
7	Inflació	11
7.1	Dificultats	11
7.2	Univers inflacionista	12
8	Qüestions obertes	13
8.1	Expansió de l'univers	13
8.2	Radiació còsmica microones de fons	14
8.3	Asimetria matèria-antimatèria	14
8.4	Nucleosíntesis primordial	14
8.5	Formació de galàxies	14
9	Conclusions	15

1 Introducció

La cosmologia és l'estudi de la naturalesa, origen i evolució de l'univers. Aquesta intenta donar resposta a alguns dels grans interrogants filosòfics que es troben presents durant tota l'història de la humanitat com, per exemple, quina és l'edat de l'univers, la seva geometria, el seu contingut, etc. Gràcies al fort desenvolupament de la cosmologia dels darrers anys, actualment es disposa de respostes concretes basades en evidències observacionals i models teòrics. Segons els coneixements actuals l'edat de l'univers és de 13.7 Gyr, el nostre horitzó a l'univers té un radi de 14-15Gpc (46.000 milions d'anys llum) i una geometria plana.

En aquest treball es presenta una visió general sobre els pilars del model cosmològic estàndard, fonamentat en el Big Bang i l'univers inflacionista.

2 Caracterització general

2.1 Relativitat general

L'antesala a la llei de la relativitat general és la **relativitat especial**, a on Albert Einstein va establir que les lleis de la física no depenen de la ubicació de l'experimentador o el seu moviment (sempre que sigui uniforme i constant). Per exemple, dos persones, una en un laboratori fix i un altre en un laboratori en un tren en marxa (velocitat uniforme i constant), no poden efectuar cap experiment que els permeti diferenciar si estan en moviment o fixos.

Per altra banda, la velocitat de la llum és constant ($c = 299.800\text{km/s}$) per qualsevol dels anteriors laboratoris (és independent a que l'observador estigui en moviment o no). Aquest fet implica conseqüències contra-intuitives que han sigut verificades experimentalment com per exemple:

- La contracció de Lorentz: reducció de la grandària d'un cos a mesura que la seva velocitat s'acosta a velocitats comparables amb la de la llum.
- Dilatació del temps: el temps mesurat per un observador en un sistema que està en moviment uniforme respecte un altre, és més gran que el temps que mesura aquest sistema pels esdeveniments que hi ocorren.
- Relativitat de simultaneïtat: La duració de l'interval de temps entre dos esdeveniments depèn del sistema de referència dels observadors (no és absolut).

La relativitat especial combinada amb altres lleis físiques permet relacionar massa i energia:

$$E = m \cdot c^2 \quad (1)$$

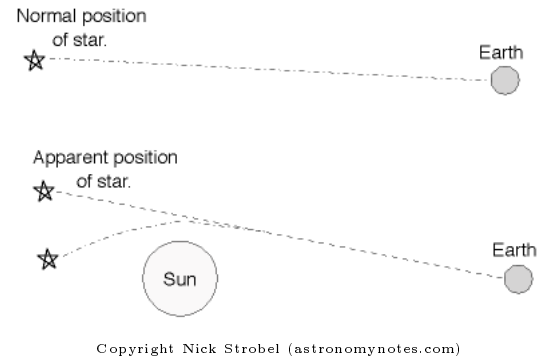


Figura 1: Distorsió de la llum per la gravetat

Per altra banda, a la **relativitat general**, Albert Einstein defineix la gravetat com el resultat de la distorsió del espai-temps al voltant d'un objecte massiu. La relativitat general prediu:

- La llum que passa aprop d'un objecte massiu ha de doblegar-se significativament (com més massiu, més forta serà la distorsió).
- Dilatació del temps: El temps és més lent aprop d'objectes massius.
- La llum que escapa d'un objecte massiu perd energia (la longitud d'ona s'incrementa, donat que la velocitat de la llum és constant).
- Els objectes massius en moviment creen oscil·lacions al espai-temps anomenades ones gravitacionals. Aquestes es desplacen a la velocitat de la llum i a l'actualitat encara no han pogut ser detectades.

L'equació de camp d'Einstein permet relacionar la geometria de l'espai-temps (expressada amb el tensor Ricci $R_{\mu\nu}$) i l'energia i el moment dins l'espai-temps (expressada amb el tensor energia-impuls $T_{\mu\nu}$):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} \quad (2)$$

a on G és la constant gravitacional, $g_{\mu\nu}$ el tensor mètric (dins la geometria de Riemann, s'utilitza per definir conceptes mètrics com distància, angle i volum en un espai localment euclidià), R és l'escalar de Ricci (descriu la curvatura d'una varietat de Riemann) i Λ és la constant cosmològica.

Aquesta equació permet determinar la curvatura de l'espai-temps a partir de la distribució de masses i energies que hi ha en aquest espai-temps, així com determinar com es desplacen les masses a causa de la mateixa curvatura de l'espai-temps. En connexió amb la mecànica newtoniana, la curvatura de l'espai-temps s'interpreta com el camp gravitatori creat per les masses.

Albert Einstein va introduir a la seva formulació la constant cosmològica Λ amb l'objectiu d'obtenir un resultat concordant amb l'univers estacionari. Quan Edwin Hubble va descobrir al 1929 l'expansió de l'univers, Einstein va considerar que la introducció d'aquesta constant havia sigut l'error més gran de la seva vida. Irònicament, actualment Λ resulta necessària per poder explicar la fase inflacionista de l'univers, així com l'expansió accelerada actual (? , ?). No obstant, aquesta és massa petita com per a que siguin visibles els seus efectes a distàncies no cosmològiques.

2.2 Principi cosmològic

El principi cosmològic argumenta que la terra no es troba en cap punt privilegiat de l'Univers i que qualsevol observador de l'univers té una visió aproximadament igual a la que es pot tenir des d'aquí. Per tant, a gran escala l'univers és:

- **Homogeni:** Qualsevol punt a l'univers té les mateixes propietats que qualsevol altre punt.
- **Isotròpic:** No hi ha cap diferència en l'estructura i propietats de l'univers si s'observen diferents regions de cel.

Els catàlegs tridimensionals de galàxies¹ proveeixen suport observacional directe per l'homogeneïtat. No obstant, aquesta es troba menys demostrada que l'isotropia, la qual es pot observar mitjançant la radiació còsmica microones de fons.

Un aspecte important del principi cosmològic es que es troba connectat al fet de que l'univers prové d'un estat inicial en equilibri tèrmic: el Big Bang. D'aquesta forma no és necessari fer referència a cap condició inicial per entendre l'estat actual, simplificant l'estudi de l'univers.

Marc cinemàtic El principi cosmològic, conjuntament amb el principi d'equivalència (un sistema camp gravitatori és indistingible d'un sistema de referència no inercial accelerat), dicta la geometria de l'univers segons la mètrica Robertson-Walker amb coordenades esfèriques comòbils² r , θ i ϕ :

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2(\theta) d\phi^2) \right) \quad (3)$$

a on $a(t)$ és el factor d'escala de l'univers, la constant $k = 1, 0, -1$ especifica el signe de la curvatura de l'univers (convexa, plana, concava) i t és el temps còsmic (mesurat per observadors comòbils en descans respecte a l'expansió). Les velocitats respecte al sistema de coordenades comòbil r , θ i ϕ es denominen peculiars.

El terme diferencial ds reemplaça el concepte newtonià de espai i temps absolut. Si dos observadors comòbils

descriuen dos esdeveniments A i B en termes del seu propi sistema de coordenades 4D (espai i temps), coincidiran en el ds mesurat i els possibles valors d'aquest es poden agrupar en 3 conjunts:

- $ds^2 > 0$: Un observador pot experimentar l'esdeveniment A a on té lloc aquest i desplaçar-se fins al esdeveniment B abans de que tingui lloc per tal d'experimentar-ho també. Aquest desplaçament és factible perquè cal fer-ho a una velocitat inferior a la velocitat de la llum.
- $ds = 0$: Entre els dos esdeveniments cal desplaçar-se a la velocitat de la llum i per tant només es factible pels fotons.
- $ds^2 < 0$: Cap observador pot experimentar els dos esdeveniments a lloc a on es produeixen, donat que s'hauria de desplaçar més ràpid que la velocitat de la llum. No obstant, sempre es pot trobar un marc a on s'observen (des de la distància) els dos esdeveniments simultàniament i $|ds|$ és l'interval d'espai entre els dos.

A la mètrica Robertson-Walker existeixen dos incògnites, la forma de $a(t)$ i la curvatura. En aquest sentit, és necessari una teoria de la gravitació que indiqui com es comporten els objectes sota les forces gravitatòries, així com una equació d'estat que expliqui com es comporten amb l'expansió. La relativitat general proporciona una descripció de la dinàmica de l'univers i una curvatura en termes d'energia-moment del contingut de l'univers.

Contingut de l'univers Per altra banda, el principi cosmològic també restringeix la forma del matèria que conté l'univers. Per tant, el tensor energia-impuls $T_{\mu\nu}$ pel contingut de l'univers pot adoptar la forma de fluid perfecte (que es caracteritza per ser isotròpic i homogeni):

$$T_{\mu\nu} = pg_{\mu\nu} + (p + \rho) u_\mu u_\nu \quad (4)$$

a on p i ρ són la pressió i la densitat d'energia mesurat per un observador comòbil i u^μ és la quadrivelocitat (3 dimensions i el temps).

2.3 Mètrica FRWL

A partir de les equacions gravitacionals de camp i el principi cosmològic, l'estudi de la variació del factor d'escala en funció del temps i les densitats del contingut de l'univers ve determinat per l'equació Friedmann-Lemaître:

1. Per exemple: *2-degree Field Galaxy Redshift Survey* (2dFGRS) i el *Sloan Deep Sky Survey* (SDSS)

2. Distància constant, un cop extret l'efecte de l'expansió de l'univers.

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{1}{3}\Lambda - \frac{k}{a(t)^2} \quad (5)$$

a on $H = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$ és el paràmetre de Hubble (el seu valor actual és denomina constant de Hubble $H_0 = 71 \pm 2.5$ km/s/Mpc), ρ la densitat, Λ la constant cosmològica, k la curvatura de l'univers i $a(t)$ el factor d'escala.

I, per altra banda, l'equació de conservació de l'energia:

$$\frac{d}{dt}(\rho a^3) = -p \frac{d}{dt}a^3 \quad (6)$$

El contingut de l'univers satisfan la relació entre pressió i densitat $p = \omega\rho$:

- $\omega = \frac{1}{3}$: Fotons o matèria relativista
- $\omega = 0$: Matèria no relativista
- $\omega = -1$: Constant cosmològica Λ

Per un univers pla $k = 0$ i constant cosmològica $\Lambda = 0$, la densitat crítica que equilibra l'expansió amb la força de gravetat és $\rho_{crit} = \frac{3H^2}{8\pi G}$. En aquest sentit, és habitual presentar la densitat dels diferents components del contingut de l'univers en relació a la densitat crítica:

$$\Omega_i = \frac{8\pi G\rho_i}{3H^2} \quad (7)$$

Utilitzant aquesta relació, l'equació Friedmann-Lemaître es pot reescriure per a un univers pla:

$$\sum \Omega_i + \Omega_\Lambda = 1 \quad (8)$$

L'evolució temporal de les densitats en funció del *redshift* ve determinada per l'equació de conservació de l'energia i l'equació d'estat:

$$\Omega_i H^2 (1+z)^{(-3-3\omega_i)} = \frac{8\pi G}{3}\rho_i (1+z)^{(-3-3\omega_i)} = const \quad (9)$$

Aquesta determina que, a mesura que evoluciona l'univers (*redshift* va augmentant), les densitats dels components del contingut de l'univers variaran de la següent forma:

- Fotons o matèria relativista ($\omega = \frac{1}{3}$): $\rho \propto a(t)^{-4}$
- Matèria no relativista ($\omega = 0$): $\rho \propto a(t)^{-3}$
- Constant cosmològica Λ ($\omega = -1$): $\rho \propto 1$

En conseqüència, en una edat temprana l'univers era dominat pels fotons, més tard la matèria va ser el component principal i finalment serà la constant cosmològica qui s'imposi a la dinàmica.

3 Expansió de l'univers

Un univers a on la força de la gravetat és la dominant degut a la massa que conté, hauria d'acabar col·lapsant sobre si mateix. En aquest sentit, Isaac Newton va proposar tres opcions per les quals això no tenia lloc:

- L'univers es infinit en volum i massa (opció preferida per Newton).
- L'univers s'està expandint a una velocitat suficient per superar l'atracció gravitatòria.
- L'univers té un principi i un final.

La paradoxa de Olbers postula que si l'univers és infinit, etern i estàtic, llavors el cel hauria de brillar amb la mateixa intensitat que el sol. Si l'univers es uniformement omplert amb galàxies, llavors en qualsevol direcció trobaríem una galàxia. En canvi, el cel visible és fosc.

Einstein va aplicar la seva relativitat general al univers com a conjunt i va mostrar que aquest ha d'expandir-se o contraure's. Com no hi havia evidència d'aquest moviment a gran escala, tal i com s'indica a la secció 2.1, va afegir un terme a les seves equacions anomenat "constant cosmològica" Λ per mantenir l'univers estàtic.

Temps després, Einstein va estar d'acord amb l'astrofísic i religiós belga Georges Lemaître en que l'univers s'està expandint quan Hubble va anunciar les seves observacions al 1929.

Més tard, Lemaître va apuntar sobre com podria haver sigut el principi de l'univers, a la teoria es va anomenar Big Bang i Einstein també la va acceptar.

3.1 Redshift

A mesura que l'univers s'expandeix, la distància entre objectes comòbils i longituds d'ona escalen amb $a(t)$. Per tant, l'energia de la llum es veu reduïda i la brillantor aparent es redueix lo suficient com per fer que el cel sigui fosc (resolent així la paradoxa d'Olbers).

Per altra banda, la pèrdua d'energia de les ones electromagnètiques s'utilitza per definir el *redshift* z (corriment al vermell):

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} \implies 1 + z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}} \equiv \frac{a_{obs}}{a_{em}} \quad (10)$$

3.2 Llei de Hubble

El *redshift* cosmològic mesura el tamany de l'univers quan la llum va ser emesa en relació al tamany actual. No incorpora informació sobre la distància a la font, fins que no s'especifica la forma de $a(t)$. Per exemple, la llei de Hubble permet relacionar el *redshift* amb la distància:

$$z = d \cdot H(t) \quad (11)$$

a on $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$ és el paràmetre de Hubble que, per l'època actual, es denomina la constant de Hubble H_0 definint el ritme d'expansió actual de l'univers.

El valor de la constant de Hubble actualment es troba a $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ amb una incertesa del 5%. La seva determinació ha sigut possible gràcies a l'ús de supernoves de tipus Ia i II com espelmes estàndard.

3.3 Expansió accelerada

Al 1998 dos grups (High z Supernovae Search Team i el Supernova Cosmology Project) van determinar que l'univers es troba actualment en expansió accelerada, el ritme ve determinat pel paràmetre de desacceleració ($q_0 < 0$):

$$q = \frac{1}{2}\Omega_M - \Omega_\Lambda \quad (12)$$

Per a que aquesta acceleració sigui possible, part del contingut de l'univers ha de correspondre a una substància (denominada energia fosca) amb una equació d'estat amb el parametre $w < -\frac{1}{3}$. El candidat natural és una constant cosmològica ($w = -1$), no obstant existeixen altres propostes d'energia fosca com per exemple la quintaessència.

L'univers es troba en expansió accelerada des de $z = 0.46 \pm 0.13$, abans la matèria dominava per sobre de la constant cosmològica.

3.4 Edat de l'univers

L'edat de l'univers es pot estimar a partir de la relació entre la distància recorreguda degut a l'expansió i la velocitat de la mateixa ($time = \frac{distance}{speed}$). Llavors, si es rescric la llei de Hubble $\frac{1}{H_0} = \frac{distance}{speed}$, es pot relacionar el temps de l'univers amb la constant de Hubble:

$$time = \frac{1}{H_0} \quad (13)$$

Aquest valor determina el límit superior de l'edat de l'univers donat que l'expansió s'ha anat aturant per efecte de la gravetat (l'actual constant de Hubble és més gran que al passat). Si es pren en consideració aquest fet, es pot deduir que:

$$time = \frac{2}{3 \cdot H_0} \quad (14)$$

Per tant, com més gran és la constant de Hubble, més petita és l'edat de l'univers.

Paràmetre	Valor
Densitat total	$\Omega = 1$
Densitat d'energia fosca	$\Omega_\Lambda = 0.74$
Densitat de matèria fosca	$\Omega_{DM} = 0.216$
Densitat de matèria bariònica	$\Omega_B = 0.044$
Constant de Hubble	$h = 0.71$
Edat de l'univers	13.8 Gyr
Espectre de potència norm.	$\sigma_8 = 0.75$
Índex de l'espectre de potència	$n_s(0.002) = 0.94$

Taula 1: Paràmetres del model Λ CDM

4 Estructura còsmica

La cosmologia prové un marc teòric per a establir les condicions inicials per l'estudi de la formació i evolució de l'estructura de l'univers. En aquest sentit, el model més acceptat actualment és el de la matèria freda (Λ CDM), el qual ha permès integrar diferents components:

1. El model cosmològic estàndard basat en el Big Bang i la inflació
2. El model estàndard de partícules (física quàntica)
3. Models astrofísics (p.ex. *clustering* jeràrquic)
4. Fenòmens com la radiació còsmica de fons, la matèria fosca, l'energia fosca, la geometria plana i les propietats de les galàxies.

El model Λ CDM estableix que les galàxies que s'observen actualment tenen el seu origen en petites fluctuacions de densitat de l'univers primitiu que han crescut durant l'expansió del mateix.

4.1 Origen de les fluctuacions

Des de l'inici de l'univers (Big Bang) i fins el segon 10^{-43} es denomina època de Planck, a partir de llavors es possible aplicar la física que coneixem per intentar entendre l'evolució de l'univers. Des del segon 10^{-43} fins el 10^{-36} és denomina l'època de la Gran Unificació, l'univers tenia una temperatura de $T \gtrsim 10^{27} \text{ K}$ i la matèria es trobava en un estat de vuit quàntic. Aquest està caracteritzat per canvis temporals en la quantitat d'energia en un punt a l'espai deguts al principi d'incertesa de Heisenberg³. Aquestes fluctuacions quàntiques tenen lloc per parelles de partícula - antipartícula virtuals d'energia (ΔE) que són creades amb un temps de vida molt petit (Δt).

Les fluctuacions quàntiques esdevindran inhomogeneïtats a la densitat de l'univers degut al

3. El Principi d'incertesa d'Heisenberg explica que no es pot saber, al mateix temps i amb total precisió, el valor de certs observables com per exemple la posició i el moment d'una partícula o l'energia i el temps $\Delta E \Delta t \approx \frac{\hbar}{2\pi}$.

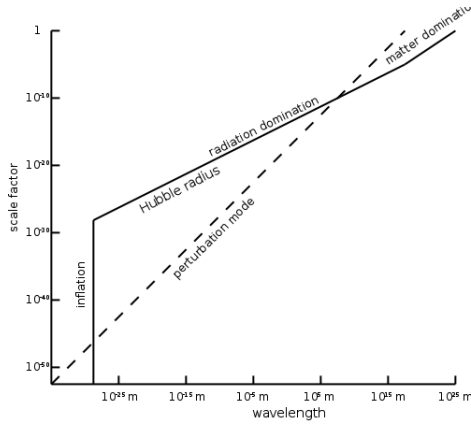


Figura 2: Creixement de la longitud de la pertorbació i radi de Hubble.

període inflacionari (des del segon 10^{-36} fins 10^{-32}). Aquesta època es pot modelar considerant un univers de Sitter a on la geometria és plana i la constant cosmològica domina la dinàmica ($\Omega = \Omega_\Lambda = 1$), per aquest cas la longitud de qualsevol fluctuació creix exponencialment:

$$\lambda_p \propto e^{Ht} \quad (15)$$

a on λ és la longitud d'una fluctuació, $H \equiv \frac{\dot{a}}{a}$ el paràmetre de Hubble (ritme d'expansió, constant per aquest model) i t el temps. Per altra banda, el radi de l'horitzó que està causalment connectat (també conegut com radi de Hubble L_H) és constant i ve determinat per $\frac{c}{H} \equiv \text{const}$, en conseqüència les fluctuacions es faran més grans que l'horitzó.

Un cop acabada l'època de la inflació, el radi de l'horitzó creixerà proporcionalment a la velocitat de la llum i el temps $L_H \propto c \cdot t$ i en algun moment, la pertorbació tornarà a estar causalment connectada i es convertirà en una veritable pertorbació de densitat.

4.2 Evolució gravitacional

Les fluctuacions estan caracteritzades pel contrast de densitat:

$$\delta \equiv \frac{\delta\rho}{\bar{\rho}} = \frac{\rho - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} \quad (16)$$

a on ρ és la densitat de la pertorbació i $\bar{\rho}$ la densitat mitja de l'univers.

El creixement de les pertorbacions es dona en 2 fases:

1. Règim lineal $\delta \ll 1$: la pertorbació creix proporcionalment amb l'expansió de l'univers $\lambda_p = a(t) \lambda_0$, considerant $a(t_0) = 1$ a on t_0 és el moment actual. A la majoria d'escala, les pertorbacions són lineals fins l'època de la recombinació quan l'univers tenia 379.000 anys.

2. Règim no lineal $\delta \rightarrow 1$: la pertorbació es separa de l'expansió, col·lapsa i virialitza (es converteix en una estructura auto-gravitant).

Per les pertorbacions que tenen una dimensió superior al radi de l'horitzó, no importa el material del que estan fets donat que no són possibles els processos microfísics. El creixement d'aquestes vindrà determinat pel component dominant a l'expansió de l'univers (veure taula 2).

Per altra banda, les pertorbacions que ja estan causalment connectades es veuen afectades per processos microfísics (pressió, viscositat, transport radiatiu, etc.) i per tant es poden considerar una pertorbació de densitat real. En aquests casos, existeix una longitud crítica

$\lambda_J = c_s \left(\frac{\pi}{G\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$ a partir de la qual la gravetat guanya a la pressió de la matèria:

- $\lambda_p > \lambda_J$: El contrast de densitat creix exponencialment amb el temps i s'ha de tractar la seva evolució com la d'un fluid perfecte sense pressió.
- $\lambda_p < \lambda_J$: La densitat de la pertorbació es veu esmorteïda per l'expansió de l'univers i la fa oscil·lar com ones acústiques. La seva evolució es pot modelar com un fluid perfecte amb pressió (les equacions resultants a l'espai de Fourier coincideixen amb la d'un oscil·lador harmònic)

El procés evolutiu és relativament lent, les èpoques típiques de formació de galàxies estan a *redshifts* $z \sim 1-5$ (edats $\sim 1.2-6 \text{ Gyr}$) i la formació de cúmuls de galàxies no té lloc fins $z < 1$ (edat de l'univers superior als 6 Gyr).

4.3 Matèria

La matèria bariònica en pertorbacions a on la longitud és $\lambda_p < \lambda_J$, mitjançant interacció electromagnètica (radiació) fa desaparèixer la pròpia pertorbació. Això implica la desaparició de totes les pertorbacions inferiors a una massa M_S fins al temps de la recombinació ($t_{rec} = 379.000$ anys) i degut a que s'ha estimat que $M_s \approx 10^{13} - 10^{14} M_\odot h^{-1}$, no es podrien haver format les galàxies que observem actualment a partir de pertorbacions de matèria bariònica.

Per altra banda, la matèria fosca és acollisional i no interacciona electromagnèticament. Una pertorbació de matèria fosca només desapareix si les partícules són relativistes, donat que podrien propagar-se lliurement cap a regions menys denses. Com més massiva és la partícula de matèria fosca, més aviat es torna no relativista:

- Matèria fosca freda (CDM, *Cold Dark Matter*): deixa de ser relativista molt aviat
- Matèria fosca tèbia (WDM, *Warm Dark Matter*): deixa de ser relativista aviat

Component dominant	Estat inicial	Estat final	Longitud	Contrast de densitat	Expansió	Pressió	Densitat	
Energia del buit	10^{-36}seg	10^{-32}seg	$\lambda_p = a(t) \lambda_0$	$\delta \propto a(t)^{-2}$	$a(t) \propto e^{Ht}$	$P = -\rho$	$\rho = \rho_\Lambda$	$\rho_r \propto a(t)^{-4}$
Radiació	10^{-32}	70.000 anys		$\delta \propto a(t)^2$	$a(t) \propto t^{1/2}$	$P = \frac{1}{3}\rho$	$\rho = \rho_r$	$\rho_m \propto a(t)^{-3}$
Matèria	70.000 anys	5 Gyr		$\delta \propto a(t)$	$a(t) \propto t^{2/3}$	$P = 0$	$\rho = \rho_m$	$\rho_\Lambda \propto 1$
Energia fosca	5 Gyr	(actualitat)		$\delta \propto a(t)^{-2}$	$a(t) \propto e^{Ht}$	$P = -\rho$	$\rho \approx \rho_\Lambda$	

Taula 2: Ritmes d'expansió de l'univers i de creixement de les pertorbacions.

- Matèria fosca calent (HDM, *Hot Dark Matter*): deixa de ser relativista tard

La única partícula no bariònica confirmada experimental són els neutrins lleugers i pertanyen al tipus HDM. No obstant, les pertorbacions que poden donar lloc a les galàxies actuals només poden ser les compostes per matèria fosca freda (la resta desapareixen abans perquè triguen més en fer-se no relativistes). En aquest sentit, les galàxies es formarien al centre d'estructures col·lapsades de matèria fosca freda anomenades halos, a on el gas bariònic seria atrapat pel potencial gravitacional.

4.4 Halos

Les primeres estructures que es formen són les més petites, aquestes participen en un procés denominat agrupament jeràrquic (*hierarchical clustering*, model *bottom-up*) per donar lloc a estructures més grans. Per tant, a *redshifts* z més petits els objectes col·lapsats són més massius (els més petits desapareixen formant part dels de tamany superior).

4.4.1 Funció de masses

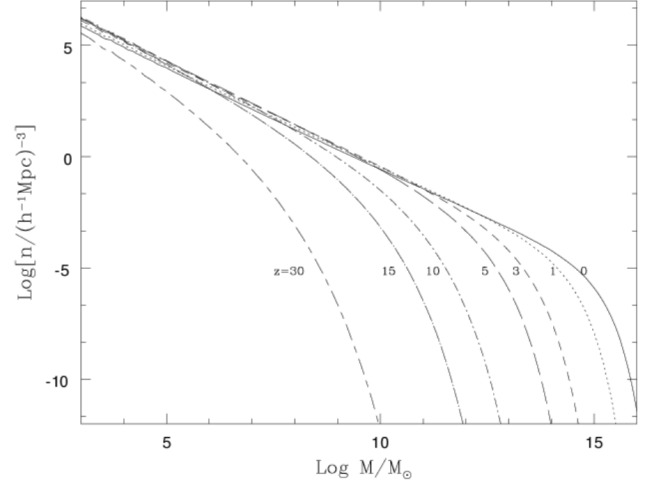
La funció de masses d'halos CDM $n(M, z)$ obtinguda amb simulacions *N-Body* és consistent amb la postulada pel formalisme Press-Schechter. Aquesta és descrita per una llei de potències a baixa massa i una exponencial per la resta.

4.4.2 Subhalos

Les simulacions *N-Body* prediuen que dintre dels halos virialitzats de gran escala, existeixen subhalos que han sobreviscut al col·lapse dels halos de nivell superior. La distribució d'aquest subhalos concorda amb la distribució de galàxies observada als cúmuls, no obstant a més petita escala (p.ex. galàxies satèl·lit de petit tamany) el nombre de subhalos predit per les simulacions és un o dos ordres de magnitud superior al que s'observa.

4.4.3 Perfils de densitat

El perfil de densitat de Navarro-Frenk-White (NFW) representa la distribució espacial de la matèria fosca i va

Figura 3: Funció de masses d'halos CDM a diferents *redshifts* (z)

ser obtingut a partir de simulacions numèriques. No obstant, existeixen lleugeres discrepàncies observacionals: la distribució de matèria fosca a galàxies nanes presenta una densitat constant al nucli mentre que les simulacions denoten nuclis amb densitat creixent.

4.4.4 Relació massa velocitat

La massa és proporcional a la velocitat al cub, $M \propto V_c^3$. Les simulacions numèriques *N-Body* proporcionen uns resultats ($M \approx 5.2 \times 10^4 \left(\frac{V_m}{\text{km} \cdot \text{s}^{-1}}\right)^{3.2} M_\odot h^{-1}$) similars a la relació Tully-Fischer si es considera que $L_{IR} \propto M$ (la lluminositat a l'infraroig és la que millor representarà la massa de la galàxia, donat que pateix menys extinció).

4.4.5 Història de l'agregació de massa

Les estructures còsmiques es formen per un procés d'acreció constant de massa i fusions determinats per la MAH (*mass aggregation history*). Aquesta pot ser calculada semianalíticament amb el formalisme EPS. Cal destacar que observacionalment no seria possible derivar l'història a partir de l'estructura interna d'un halo, donat que els efectes d'aquesta queden esborrats cada cop que el sistema assoleix la virialització.

4.4.6 Moment angular

Els mecanismes pels quals un halo pot obtenir moment angular són per forces de mareas (*tidal torques*) d'altres halos de l'entorn i per la transferència de moment orbital a intern quan es produeix una fusió d'halos col·lapsats.

4.5 Formació de galàxies

Després del temps de recombinació a on la matèria es desacopla de la radiació, els barions comencen a caure als halos i s'escalfen per compressió adiabàtica i xocs al assolir la temperatura virial dels halos. Cal destacar que a cada z , els halos capaços d'atrapar gas són aquells més massius.

Un cop al halo, els barions comencen a perdre pressió i a caure cap al centre, refredant-se per radiació. El refredament augmenta a mesura que es contrau el gas, accelerant la caiguda cap a les zones de major densitat. Finalment, incrementa la seva densitat i la velocitat rotacional, per la conservació del moment angular, fins que s'estableix al disc rotacional.

Com a conseqüència del moment angular guanyat per les forces de marea (*tidal torques*) i les fusions, el perfil de densitat de la matèria bariònica als discs formats dintre d'halos CDM es gairebé exponencial, coincidint amb les observacions. Per altra banda, les corbes de rotació també són consistents.

4.6 Candidats a matèria fosca

El model Λ CDM requereix l'existència de matèria fosca freda no bariònica que encara no ha pogut ser observada. De les alternatives teòriques disponibles, el model més popular correspon a l'extensió supersimètrica al model estàndard de partícules (SUSY). En aquest marc, la partícula candidata correspondria al neutralino (massiu i d'interacció dèbil, WIMP).

La confirmació d'algunes de les partícules candidates a matèria fosca freda podria tenir lloc mitjançant dos tècniques diferents:

- **Detecció directa:** Amb aquest mètode s'ha aconseguit detectar els neutrins (matèria fosca calenta) i millorant la precisió, podria ser un bon mecanisme per a la detecció d'altres partícules. El sistema es basa en les interaccions amb els nuclis atòmics que tenen lloc de forma molt esporàdica degut a la naturalesa no interactiva de la matèria fosca.
- **Detecció indirecta:** Quan una partícula es troba amb la seva anti-partícula es produeix una anihilació que podria ser mesurada. Amb aquest objectiu s'intenten observar zones a on hi hagi més probabilitats de que aquest esdeveniment tingui lloc com, per exemple, el sol, l'halo galàctic o al voltant dels forats negres.

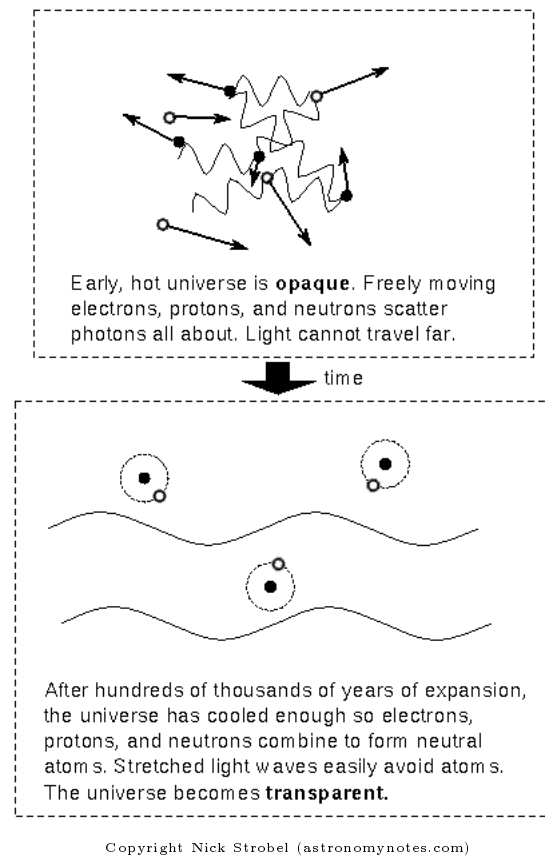


Figura 4: Procés de recombinació

Apart de la matèria fosca freda no bariònica proposada pel model Λ CDM, existeixen altres alternatives com l'ús de dimensions extres o dinàmiques newtonianes modificades que avui en dia encara resulten més difícils de provar experimentalment.

5 Radiació còsmica microones de fons

A l'època de la recombinació (edat de l'univers era de 379.000 anys, redshift $z \sim 1100$ i la temperatura $3000K$) la radiació es va desacoblar de la matèria i els fotons van començar a viatjar lliurement per l'espai. La radiació residual isotròpica procedent d'aquell període és el que es coneix com la radiació còsmica de fons (CMB, Cosmic microwave background radiation).

Per validar les teories sobre l'evolució de les pertorbacions en règim lineal (descriu a la secció 4.2), s'intenta reproduir mitjançant models (p.ex. CAMB⁴) les propietats físiques i estadístiques de la CMB mesurada actualment, així com les petites anisotropies que presenta.

4. <http://camb.info/>

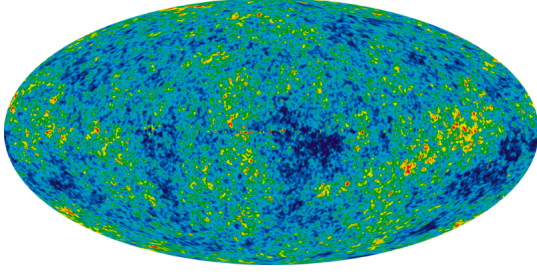


Figura 5: Radiació còsmica de fons (CMB) per WMAP (2010).

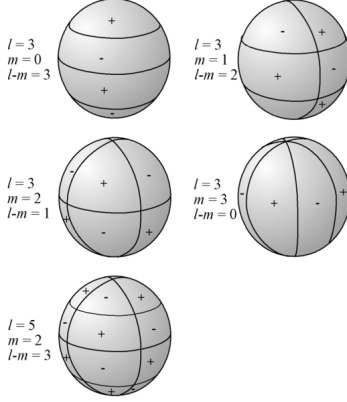


Figura 6: Representació de Y_{lm} sobre una esfera unitària. Y_{lm} és igual a zero sobre els m cercles que passen pels pols i els $l - m$ cercles d'igual latitud. La funció canvia de signe cada cop que es creua una d'aquestes línies.

5.1 Distribució de temperatura

La distribució de temperatura de la CMB definida en l'esfera celest ve determinada per expansions en harmònics esfèrics:

$$T(\theta, \phi) = \sum_{lm} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (17)$$

A on θ i ϕ són els angles polars, $Y_{lm}(\theta, \phi)$ l'harmònic esfèric de Laplace, l i m són el grau i l'ordre de la funció respectivament (6).

La temperatura mitja del CMB obtinguda del component monopol ($l = m = 0$) és de $T = 2.725 \pm 0.001 K$ segons la llei de Planck per la radiació d'un cos negre (figura 7). La major anisotropia es troba al dipol $l = 1$ amb una amplada de $3.346 \pm 0.017 mK$ i es causada per l'efecte doppler degut al moviment del sistema solar respecte a la CMB ($v = 368 \pm 2 km s^{-1}$).

Un cop extret el monopol i el dipol, només queden les anisotropies intrínseques. La majoria de la informació cosmològica es troba continguda en una funció de correlació temperatura-temperatura (mitja) entre diferents direccions al cel n i n' :

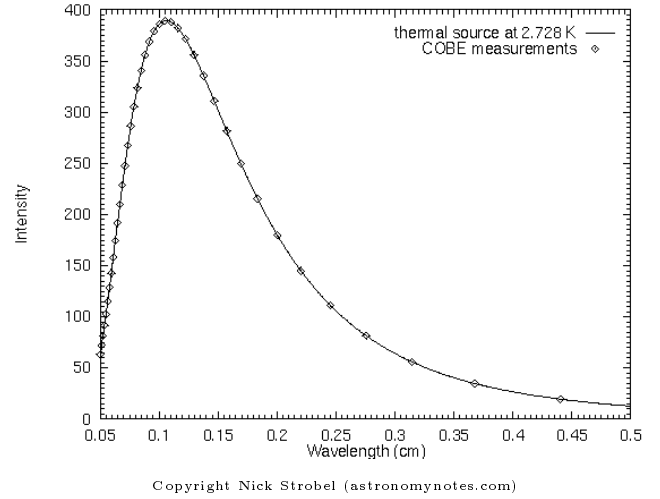


Figura 7: Radiació còsmica microones de fons

$$C(\theta) \equiv \left\langle \frac{\Delta T(n)}{T} \frac{\Delta T(n')}{T} \right\rangle = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{2l+1}{4\pi} C_l P_l(\cos(\theta)) \quad (18)$$

A on C_l són els coeficients d'expansió que al estar representat en funció de l rep el nom de espectre de potència angular i és clau per poder comparar teoria i observacions.

5.2 Espectre de potència

L'espectre de potència $P(k) \equiv |\delta_k|^2$ com a mesura de l'amplitud de la fluctuació a una escala k (quanta diferència és observada en funció de com de lluny es troben les regions) és utilitzat per a estudiar estadísticament la CMB a l'espai de Fourier. L'espectre de potència a la època de la recombinació s'expressa com:

$$P_{rec}(k) = A k^{n_i} \times \left(\frac{D(t_{rec})}{D(t_i)} \right)^2 \times T^2(k) \quad (19)$$

a on el primer terme és l'espectre de potència inicial $P_i(k)$, el segon fa referència al creixement de l'amplitud durant el regim lineal i el tercer és la funció de transferència. Aquesta última contempla la desaparició de pertorbacions formades per barions, HDM i WDM (veure secció 4.3), així com la congelació de les pertorbacions de matèria freda dintre de l'horitzó a l'època dominada per la radiació.

La seva representació (figura 8) conté diversos pics decreixents. Les tres regions fonamentals més importants són:

- L'altipla Sachs-Wolfe per $l \leq 100$: Regions amb escales angulars superiors al radi de Hubble (causalment no connectat) i dominat per l'efecte

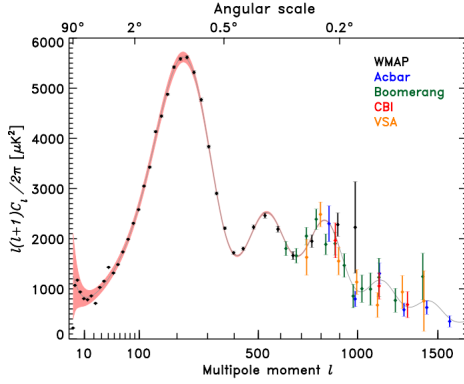


Figura 8: Espectre de potència de la temperatura de les anisotropies de la CMB en termes d'escala angular (o moment multipol). Dades de WMAP (2006), Acbar (2004) Boomerang (2005), CBI (2004) i VSA (2004). Línia continua generada pel model teòric i l'aplicació CAMB.

Sachs-Wolfe, a on els fotons han de perdre energia per sortir de regions més denses.

- Els pics acústics entre $100 < l < 1000$: Abans de desacoblarse, la matèria de la radiació formaven un fluid d'on procedeixen aquestes ones acústiques.
 - L'escala angular del primer pic $l \sim 220$ depèn de la geometria de l'univers, la qual resulta ser plana $\Omega = 1.02 \pm 0.02$. Addicionalment, pel model Λ CDM, la posició del primer pic determina $\Omega_M + \Omega_\Lambda$ (mentre que $\Omega_M - \Omega_\Lambda$ es determina per l'observació de supernoves tipus Ia).
 - El segon pic no és tan alt com el primer perquè els barions noten la pressió de radiació però la matèria fosca no. Per tant, l'alçada relativa del primer amb el segon determina la quantitat de barions que hi ha a l'univers Ω_B .
- Esmorteïment de la cua a $l \geq 1000$: La transició cap a la transparència de l'univers no és instantània i la superfície de la darrera difusió (*last scattering*) té un gruix. Aquest fet fa que l'esmoreïment de les ones sigui suau. A banda, les lents gravitatòries de cúmuls de galàxies a *redshifts* petits també ajuda a deformar i suavitzar l'espectre angular a baixes escales.

5.3 Mesures

L'estudi de la radiació còsmica de fons ha permès:

- Validar les prediccions del model Λ CDM sobre l'evolució de les pertorbacions al règim lineal (secció 4.2).

- La determinació de la geometria de l'univers (pla), la fracció de barions Ω_B i l'índex de l'espectre de potència primordial.
- Determinació de l'època de reionització de l'univers per les primeres estrelles (Població III) a partir de l'anàlisi de mapes de polarització.
- Mesura de l'amplitud (normalització) de la fluctuació primordial de l'espectre de potència, d'utilitat per entendre l'evolució en règim no lineal.

6 Nucleosíntesis primordial

La nucleosíntesis primordial, també anomenada Big Bang Nucleosíntesis (BBN), fa referència a la producció de nuclis diferents de l'hidrogen H durant un breu període de temps (entre el minut 3 i el 20) a l'inici de l'univers.

La densitat de barions (nucleons, n_B) sobre la densitat de fotons CMB (n_γ) és paràmetre clau que permet calcular els resultats de la nucleosíntesis primordial:

$$\eta_{10} \equiv 10^{10} \left(\frac{n_B}{n_\gamma} \right) \quad (20)$$

A mesura que l'univers s'expandeix, la densitat de barions i fotons decreix i, segons el model estàndard, després de la annihilació e^\pm , el nombre de barions i CMB fotons en un volum comòbil no canvia. Per tant, η_{10} mesurat al present, a l'època de recombinació i a la BBN són el mateix.

A partir d'experiments sobre la CMB (WMAP) i observacions de l'estructura a gran escala (LSS), s'ha determinat un valor de $\eta_{10} = 6.11 \pm 0.20$ que és habitualment utilitzat per predir abundàncies d'elements i comparar-les amb les dades observacionals.

6.1 Cronologia

6.1.1 Bariogènesis

La bariogènesis és el terme que rep l'origen de la asimetria entre matèria-antimatèria a l'univers, la qual té lloc abans de la nucleosíntesis primordial.

L'equació de Dirac, formulada per Paul Dirac al 1928 com a part del desenvolupament de la mecànica quàntica relativista, preveu l'existència d'antipartícules. Experimentalment s'ha verificat que efectivament existeixen per cada partícula coneguda. Ambdues tenen la mateixa massa, temps de vida i càrregues elèctriques oposades. Donada aquesta simetria, és una estrany que l'univers no presenti la mateixa quantitat de matèria i antimatèria (no hi ha evidències de concentracions significatives d'antimatèria).

Existeixen dos interpretacions principals:

- L'univers va començar a existir amb un nombre total de barions diferent de zero (ja existia més matèria inicialment).
- L'univers era perfectament simètric inicialment, però algun fenomen no conegut va fer desequilibrar la balança cap a la matèria amb el temps.

La segona opció és la habitualment preferida, donat que es considera que qualsevol asimetria inicial es reequilibraria durant l'inici de l'univers. Per altra banda, si es dona per cert que l'univers ho és tot i res existeix fora d'ell ni abans d'ell, llavors el nombre de barions hauria de ser zero.

Diverses teories intenten explicar aquest procés com per exemple la bariogènesis electrodèbil i la *Gran Unified Theory* (GUT).

6.1.2 BBN

Inicialment, a l'univers primigeni els principals protagonistes de la BBN (neutrinos, parelles e^\pm , fotons i nucleons) es troben en equilibri termodinàmic. Conseqüentment, el rati de neutrons i protons es trobava en el seu valor d'equilibri $\left(\frac{n}{p}\right)_{eq} = e^{-\Delta m/T}$. A mesura que l'univers es continua expandint i refredant, el nombre de protons creix degut a que aquests són menys pesats i el rati decreix fins que el rati excedeix el valor d'equilibri quan l'edat de l'univers era d'un segon.

Durant aquest període es produeixen reaccions nuclears entre els neutrons i els protons (p.ex. $n + p \leftrightarrow D + \gamma$) per produir deuteri, no obstant l'abundant existència de rajos gamma fa que es fotodesintegri al mateix ritme fins el segon 200 (~ 3 minuts), a on s'inicia la nucleosíntesi primordial. A partir d'aquest instant, els protons i els neutrons es combinen ràpidament per formar D , 3H , 3He i 4He (figura 9).

Un coll d'ampolla es produeix a partir de la formació del 4He , donat que no existeixen núclids estables de massa 5. No obstant, quan es donen les condicions adients, també es formen núclids més pesats com el 7Li i 7Be que, més tard, quan l'univers es refreda, el 7Be format captura un electró i decau en 7Li . Finalment, la formació de núclids estables de massa 8 o superiors no té lloc durant la BBN en abundàncies astrofísicament interessants i el procés finalitza quan l'univers té una edat de 20 minuts.

x

En termes generals, la BBN resulta en una abundància en massa del $\sim 75\%$ d'hidrogen ($\sim 90\%$ en nombre), $\sim 25\%$ 4He ($\sim 10\%$ en nombre), $\sim 0.01\%$ de deuteri i traces de liti i beril·li de l'ordre de 10^{-10} .

6.2 Observacions

La teoria darrera la BBN, utilitzant la quantitat de matèria (barions) relativa a la radiació (fotons) η_{10} deter-

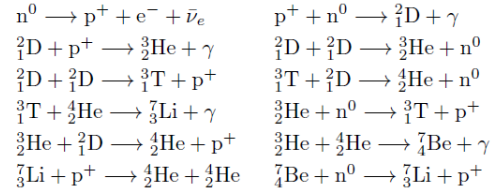


Figura 9: Reaccions a la nucleosíntesi primordial

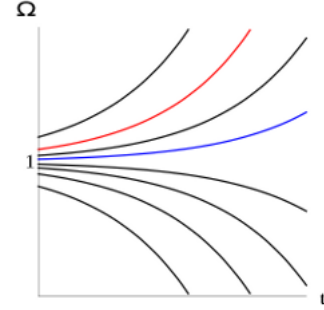


Figura 10: Densitat superior a la crítica (vermell) i densitat actual (blava)

minada observacionalment, proporciona unes abundàncies de deuteri, heli-3, heli-4 i liti-7 resultants del procés. Aquestes quantitats poden ser comparades amb les observacions astronòmiques, com per exemple d'objectes a on no hi ha hagut prou nucleosíntesi estel·lar com per alterar significativament les abundàncies primordials (p.ex. determinades galàxies nanes) o objectes molt llunyans que es troben en una etapa molt primerenca de la seva evolució (p.ex. quàsars).

Actualment, les quantitats predites de deuteri i heli-3 són molt concordant amb les observades. Per l'heli-4, hi ha una certa incertesa però és coherent en un rang de 2σ . En canvi, les discrepàncies són més significatives pel cas del liti-8.

7 Inflació

7.1 Dificultats

7.1.1 El problema de l'univers pla

Les observacions apunten a l'existència d'un univers pla. No obstant, només un reduït conjunt de condicions inicials serien vàlides per donar com a resultat aquest tipus d'univers. Qualsevol petita desviació es magnificaria amb el pas del temps.

Per exemple, si la densitat de l'univers fos lleugerament més gran que la densitat crítica, milers de milions d'anys després del Big Bang l'univers ja hauria col·lapsat (figura 10).

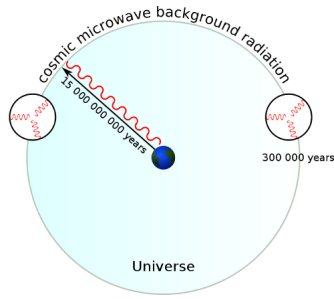


Figura 11: Problema de l'horitzó

7.1.2 El problema de l'horitzó

Qualsevol direcció en la que s'observi l'univers és uniforme, especialment apreciable amb la CMB. No obstant, per a que dos regions tinguin les mateixes condicions (p.ex. temperatura), han d'estar suficientment aprop com per haver intercanviat informació en el temps de vida que té l'univers (la informació no pot viatjar més ràpid que la velocitat de la llum).

Els fotons de la CMB que han viatjat fins a la terra des d'una regió de l'espai no han pogut intercanviar informació amb aquells que procedeixen de la regió oposada (figura 11).

7.1.3 Fluctuacions primordials

El model de Λ CDM explica com l'estructura còsmica actual de l'univers té origen en unes fluctuacions primordials inicials. És necessari que aquestes fluctuacions evolucionin prou ràpid com per a que es formin les galàxies que s'observen avui en dia.

7.2 Univers inflacionista

L'univers inflacionista (figura 12) és una teoria que estableix un curt període d'expansió accelerada a una edat molt temprana (des del segon 10^{-36} fins 10^{-32}). El mecanisme responsable per l'acceleració accelerada és desconegut. Hi ha diverses hipòtesis com que la causant va ser la separació de la força feble de les forces electromagnètiques, o l'existència del camp escalar inflaton, que va actuar com una constant cosmològica. En aquest cas, només extensions del model estàndard de partícules elementals (p.ex. supersimetria, supergravetat o la teoria de cordes) pot encaixar de forma natural amb les propietats requerides d'aquest camp escalar.

Aquesta teoria resol els següents problemes:

- Problema de l'univers pla: Un univers corbat que ha sigut fortament expandit pot semblar pla de forma local (figura 13).

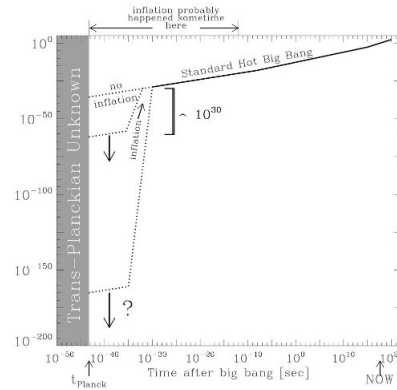
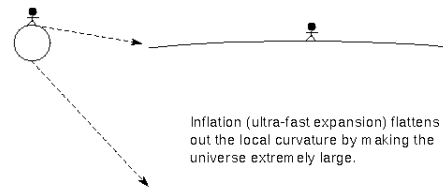


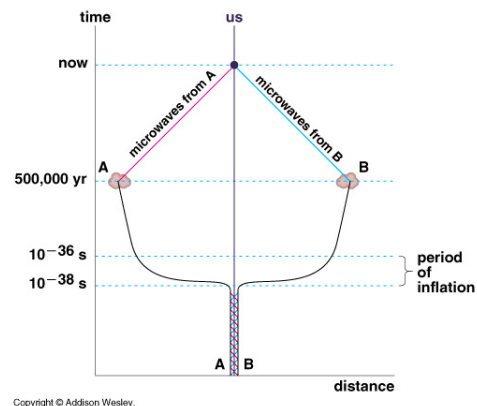
Figura 12: Història de l'expansió de l'univers



Copyright Nick Strobel (astronomynotes.com)

Figura 13: Solució al problema de l'univers pla

- Problema de l'horitzó: hi va haver una època a on les regions que ara observem estaven en contacte (figura 14).
- Degut al període inflacionari, les fluctuacions quàntiques esdevenen in-homogeneïtats a la densitat de l'univers d'un tamany que correspon a les galàxies que s'observen actualment.
- Asimetria entre matèria i antimatèria: La teoria inflacionista prediu que un dels efectes de l'expansió ultra-ràpida és l'existència de matèria que no ha sigut anihilada.



Copyright © Addison Wesley.

Figura 14: Solució al problema de l'horitzó

8 Qüestions obertes

La cosmologia és una ciència que resulta especialment complicada de validar degut a que no és possible reproduir en un laboratori la completa creació d'un univers. Durant els darrers anys, gràcies a les millores tecnològiques i a determinades missions espacials (p.ex. COBE i WMAP), ha sigut possible comprovar i contrastar moltes de les prediccions teòriques amb dades observacionals. Actualment el model estàndard cosmològic és el marc acceptat de treball, al qual s'ha assolit un grau important de concordança entre teoria (Big Bang en un univers inflacionista) i observació. No obstant, existeixen altres teories alternatives com per exemple:

- *Quasi-Steady State Theory*: Proposat al 1993 per Fred Hoyle, Geoffrey Burbidge i Jayant V. Narlikar com una versió renovada de l'antiga teoria del *Steady State Universe* a on l'univers és infinit i semiestàtic [12, 13].
- *Plasma Cosmology*: Atribuïda a Hannes Alfvén (1970), intenta explicar el desenvolupament de l'univers a través de la interacció de forces electromagnètiques en plasma astrofísic.
- *Fractal Universe*: Conjunt de teories cosmològiques que estableixen que la distribució de matèria a l'univers i l'estructura en si mateixa és un fractal.

Cadascuna de les teories anterior presenten els seus propis problemes, i cap d'elles proporciona un nivell de concordança superior al del model estàndard cosmològic. En qualsevol cas, aquest últim també disposa de les seues propis conjunts de problemes per resoldre i, com qualsevol altre, ha de ser entès amb un esperit científic que permeti estar obert a explicacions o models alternatius.

8.1 Expansió de l'univers

Quan Edwin Hubble va establir la relació *redshift*-magnitud aparent de les galàxies, es va prendre com una prova de que l'univers es trobava en expansió. No obstant, podrien existir altres mecanismes que produeixin aquest *redshift* més enllà de l'expansió i l'efecte doppler. Per exemple, l'escenari de la llum cansada (*tired light*) a on els fotons perden energia degut a un procés d'interacció desconegut de fotó-matèria o foto-foto. En aquest sentit, existeixen diverses teories que podrien produir aquest efecte de llum cansada però que incorporen altres problemes com l'efecte dispersiu que el medi intergalàctic produiria i que dependria de la longitud d'ona.

Per validar que l'univers realment s'està expandint es disposa de diverses prediccions que s'haurien de complir, una d'aquestes fa referència a la dilatació del temps: tots els rellotges observats des de la terra a grans *redshifts* semblaran mantenir el mateix ritme $(1+z)$ vegades més

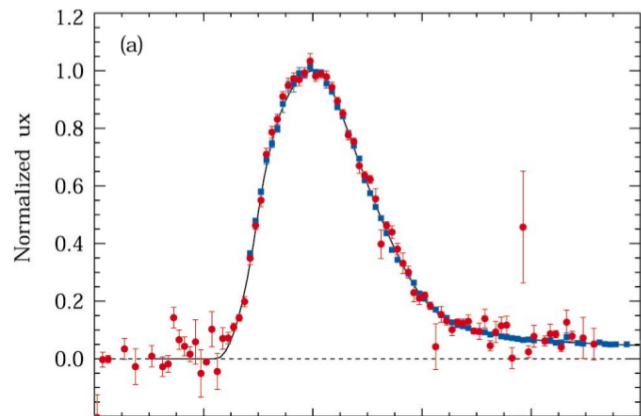


Figura 15: Corba de llum de la supernova tipus Ia SN1995K ajustat l'efecte de dilatació del temps per l'expansió de l'univers.

lent si l'expansió es present. Mitjançant l'anàlisi de la supernova SN1995K de tipus Ia amb $z = 0.479$, la corba de llum observada encaixa amb una corba estirada a l'eix del temps per un factor $(1+z)^b$ on $b = 1.0 \pm 0.06$ [7].

Si bé aquesta és una evidència a favor de l'expansió de l'univers, existeixen altres observacions que no són tan esclaridores. Per exemple, no s'ha obtingut evidència d'evolució de la temperatura del medi intergalàctic a diferents *redshifts* mitjançant l'estudi de boscos Ly α [18], quan en un univers en expansió s'espera que la temperatura decreixi.

Per altra banda, alguns autors defensen l'existència d'objectes connectats o que interactuen entre ells tot i estar a diferents *redshifts*, com és el cas del Quintet d'Stephan [1] a on hi ha 4 galàxies a $z \sim 0.022$ i una aparentment connectada per material que emet en radio a un $z \sim 0.0027$. No obstant, altres estudis no troben cap evidència d'aquesta connexió [11] i per tant, no sembla ser una evidència sòlida en contra del *redshift* produït per l'expansió de l'univers.

En aquest sentit, també existeixen astrònoms que defensen la idea de que els quàsars són ejectats per galàxies de baix *redshift* i més tard es convertiran en galàxies normals. Per exemple, el cas de la galàxia NGC 4319 a $z \sim 0.006$ i el quàsar Mk205 a $z \sim 0.07$, des de la terra es veuen a una distància aparent de 40 segons d'arc al cel, semblen trobar-se connectats i alguns astrònoms [14] defensen que l'alta velocitat del QSO té una component d'efecte transversal doppler degut a la velocitat relativista a la que ha sigut expulsat.

8.1.1 Expansió accelerada

Els estudis de supernoves [15] van determinar que l'univers es troba actualment en expansió accelerada i aquest fet s'atribueix a l'existència de la denominada energia fosca. El candidat natural per aquesta energia és una

constant cosmològica ($w = -1$), no obstant existeixen altres propostes com per exemple la quintaessència.

8.2 Radiació còsmica microones de fons

La radiació còsmica microones de fons (CMB) s'associa a l'alta energia de l'univers primordial segons el model cosmològic estàndard. No obstant, Charles-Edouard Guillaume ja va determinar al 1896 que la temperatura de l'espai hauria de trobar-se al voltant del $6.1K$, i Arthur Eddington al 1926 amb el seu *Internal constitution of the stars* va determinar que un cos a l'espai no pot refredar-se més enllà dels $3K$ degut a la radiació d'estrelles distants. Si bé aquesta explicació té sentit en una galàxia, podria arribar a extrapolar-se a la temperatura de l'espai intergalàctic per causa de la radiació de les galàxies i QSOs. Cal destacar però, que aquesta interpretació utilitzant un model de llum cansada no produiria l'espectre de cos negre que s'observa a la CMB.

En cas de que tota l'abundància d'heli observat hagués sigut produït per fusió nuclear d'hidrogen a estrelles, llavors l'univers ha hagut de passar per una fase a on la densitat de radiació era molt més alta que l'actual [5]. Si aquesta energia es troba termalitzada, la temperatura de cos negre seria de $T = 2.76K$. El mecanisme de termalització és el problema principal d'aquest enfocament.

En definitiva, no existeix una alternativa solida a la interpretació de la CMB fora de l'escenari estàndard.

Per altra banda, les anisotropies de la CMB requereixen de la matèria fosca no bariònica per a que les prediccions encaixin amb les observacions. Actualment no s'ha pogut observar cap candidat a matèria fosca i representa una de les dificultats importants del model cosmològic estàndard. En aquest sentit, les anisotropies poden arribar a ser explicades també amb la Quasi Steady State Theory [13], a on la CMB es produïda pel conjunt d'estrelles i termalitzada per la pols en un univers infinit. El primer pic s'explica en termes de cúmuls de galàxies i el segon és una predicció sense matèria fosca de la Modified Newtonian Dynamics (MOND, 10), aquesta és una hipòtesi que proposa una alternativa a la llei de la gravetat de Newton però que té dificultats per explicar determinades observacions (p.ex. el *Bullet cluster* amb dos cúmuls de galàxies en col·lisió, a on el centre de massa de la matèria visible no encaixa amb el centre del potencial gravitatori).

8.3 Asimetria matèria-antimatèria

Experimentalment s'ha demostrat que per cada partícula coneguda existeix una equivalent amb càrrega elèctrica oposada (antimatèria), per tant seria d'esperar que l'univers presents la mateixa quantitat de matèria i antimatèria.

Una possibilitat seria l'existència de galàxies senceres formades per antimatèria, però aquesta opció es descarta



Figura 16: Cúmulo bala (*Bullet cluster*)

perquè produïrien rajos gamma intensos al entrar en interacció amb el medi intergalàctic i aquests no s'observen.

Si bé existeixen possibles explicacions teòriques a aquesta asimetria dintre del marc del model cosmològic estàndard, no han pogut ser validades experimentalment i la causa exacta és encara desconeguda.

8.4 Nucleosíntesis primordial

La nucleosíntesis primordial (Big Bang Nucleosíntesis o BBN) explica com a l'univers primitiu es van crear elements més pesats que l'hidrogen (p.ex. deuteri, heli-4, heli-3, liti-7) i determina les seves abundàncies de forma que poden ser validades observacionalment. Alternativament, hi han autors que defensen que la quantitat d'heli que s'observa pot haver estat generat per nucleosíntesis estel·lar (estrelles d'hidrogen) i que la resta d'elements es deriven de processos astrofísics[4].

En qualsevol cas, les prediccions de la nucleosíntesis primordial s'ajusten significativament a les observacions i es basen en processos físics coneguts. Actualment, cap alternativa arribar ser tan complet i a obtenir el mateix nivell de detall com la BBN.

8.5 Formació de galàxies

8.5.1 Estructura

El model cosmològic estàndard assumeix el principi cosmològic a on es suposa que l'univers és homogeni i isotropic. Alguns autors es recolzen en observacions com *Las Campanas redshift survey*, d'on extreuen evidències d'una distribució no homogènia de galàxies fins els 200 Mpc [3].

En aquest sentit, no es poden extreure les mateixes conclusions d'estudis més amplis com el *2-degree Field Galaxy Redshift Survey* (2dFGRS) i el *Sloan Deep Sky Survey* (SDSS).

8.5.2 Matèria fosca

El model de matèria fosca freda (Λ CDM) proporciona una explicació a la formació i evolució de l'estructura còsmica. Mitjançant aquest model s'han pogut reproduir moltes de les observacions, no obstant encara romanen diverses discrepàncies, així com aspectes que encara són necessaris millorar o demostrar experimentalment com per exemple:

- No s'ha observat cap partícula que pugui ser classificada com matèria fosca freda.
- La inflació és essencial per a la generació de les fluctuacions primordials i les seves prediccions són consistents amb les observacions. No obstant, seria desitjable tenir més proves directes d'aquesta.
- S'observa que el perfil de densitat al centre dels halos és pla, mentre que el model Λ CDM prediu un perfil creixent.
- El model prediu una existència de subhalos (galàxies satèl·lit) superior a l'observat. No obstant, aquest aspecte pot ser solucionat per la inhibició de formació de galàxies degut a la radiació produïda per la reionització i efectes de retroalimentació.
- La formació de galàxies el·líptiques massives pot tenir lloc al model Λ CDM si els esfèroides són produïts per fusió de discs gasosos i el gas fred es transformat ràpidament en estrelles durant les fusions. Cal demostrar ambdues condicions.
- Segons el model, amb el temps es podria crear de nou un disc al voltant de les galàxies el·líptiques formades per fusió i aquest fet no coincideix amb les observacions. En aquest sentit, un procés guiat per un forat negre central acretant material i retornant part al medi podria inhibir la formació del disc, no obstant serà necessari validar aquesta teoria.
- La formació de bulbs per fusió produeix discs més blaus dels que s'observen.
- Els models de formació estel·lar utilitzats representen grans simplificacions d'un fenomen complex, a on una teoria fonamental és necessària.
- Aproximadament el 9% dels barions es troben a estructures virialitzades i el model Λ CDM mitjançant simulacions *N-Body* prediu que existeix un 50% als halos. No obstant, manca aproximadament un 40% dels barions que no es sap si no han sigut mai atrapat per un halo o han sigut expulsats per mecanismes de retroalimentació.

8.5.3 Galàxies distants i evolució

El model cosmològic estàndard requereix que les quàsars i les galàxies a alts *redshifts* tinguin metal·licitats més baixes que l'entorn proper. En canvi, observacionalment es troben QSOs amb un contingut de metalls superior a l'esperat [6]. Aquest fet s'explica per una ràpida i massiva formació estel·lar que va tenir lloc a l'univers primitiu. En aquest sentit, serà necessari continuar millorant les observacions per tal de poder trobar més evidències com per exemple l'existència d'estrelles de població III.

9 Conclusions

En base al conjunt de qüestions obertes exposades, el model cosmològic estàndard té encara per davant molts reptes a superar. No obstant, si bé poden existir explicacions alternatives als fenòmens observacionals, actualment no es disposa de cap altra alternativa completa amb tan alt grau de concordança.

En aquest sentit, els autors que intenten destacar les inconsistències del model cosmològic estàndard [8], tendeixen a recolzar els seus raonaments en articles antics que no contemplen molt dels avenços de la cosmologia en els últims anys i no incorporen els resultats més acurats i precisos de les darreres missions espacials.

Referències

- [1] H. Arp. Stephan's Quintet of Interacting Galaxies. *apj*, 183:411–440, July 1973.
- [2] V. Avila-Reese. Understanding Galaxy Formation and Evolution. *ArXiv Astrophysics e-prints*, May 2006.
- [3] J. S. Best. An Examination of the Large-Scale Clustering of the Las Campanas Redshift Survey. *apj*, 541:519–526, October 2000.
- [4] G. Burbidge and F. Hoyle. The Origin of Helium and the Other Light Elements. *apjl*, 509:L1–L3, December 1998.
- [5] G. R. Burbidge. Nuclear Energy Generation and Dissipation in Galaxies. *pasp*, 70:83–+, February 1958.
- [6] A. Constantin, J. C. Shields, F. Hamann, C. B. Foltz, and F. H. Chaffee. Emission-Line Properties of $z > 4$ Quasars. *apj*, 565:50–62, January 2002.
- [7] G. Goldhaber, D. E. Groom, A. Kim, G. Aldering, P. Astier, A. Conley, S. E. Deustua, R. Ellis, S. Fabbro, A. S. Fruchter, A. Goobar, I. Hook, M. Irwin, M. Kim, R. A. Knop, C. Lidman, R. McMahon,

- P. E. Nugent, R. Pain, N. Panagia, C. R. Pennypacker, S. Perlmutter, P. Ruiz-Lapuente, B. Schaefer, N. A. Walton, and T. York. Timescale Stretch Parameterization of Type Ia Supernova B-Band Light Curves. *apj*, 558:359–368, September 2001.
- [8] M. López-Corredoira. *Observational Cosmology: caveats and open questions in the standard model*, pages 561–589. 2003.
- [9] A. L. Maroto and J. Ramirez. A Conceptual Tour About the Standard Cosmological Model. *ArXiv Astrophysics e-prints*, September 2004.
- [10] S. S. McGaugh. Distinguishing between Cold Dark Matter and Modified Newtonian Dynamics: Predictions for the Microwave Background. *apjl*, 523:L99–L102, October 1999.
- [11] M. Moles, I. Marquez, and J. W. Sulentic. The observational status of Stephan’s Quintet. *aap*, 334:473–481, June 1998.
- [12] J. V. Narlikar, R. G. Vishwakarma, and G. Burbidge. Interpretations of the Accelerating Universe. *pasp*, 114:1092–1096, October 2002.
- [13] J. V. Narlikar, R. G. Vishwakarma, A. Hajian, T. Souradeep, G. Burbidge, and F. Hoyle. Inhomogeneities in the Microwave Background Radiation Interpreted within the Framework of the Quasi-Steady State Cosmology. *apj*, 585:1–11, March 2003.
- [14] L. M. Ozernoy. NGC 4319/Markarian 205 Association As a Template for Discordant Redshifts Explainable by the Transverse Doppler Effect. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, volume 32 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, pages 1521–+, December 2000.
- [15] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, R. A. Knop, P. Nugent, P. G. Castro, S. Deustua, S. Fabbro, A. Goobar, D. E. Groom, I. M. Hook, A. G. Kim, M. Y. Kim, J. C. Lee, N. J. Nunes, R. Pain, C. R. Pennypacker, R. Quimby, C. Lidman, R. S. Ellis, M. Irwin, R. G. McMahon, P. Ruiz-Lapuente, N. Walton, B. Schaefer, B. J. Boyle, A. V. Filippenko, T. Matheson, A. S. Fruchter, N. Panagia, H. J. M. Newberg, W. J. Couch, and The Supernova Cosmology Project. Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. *apj*, 517:565–586, June 1999.
- [16] D. Scott and G. F. Smoot. Cosmic Microwave Background Mini-review. *ArXiv e-prints*, May 2010.
- [17] G. Steigman. Primordial Nucleosynthesis in the Precision Cosmology Era. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 57:463–491, November 2007.
- [18] M. Zaldarriaga, L. Hui, and M. Tegmark. Constraints from the Ly α Forest Power Spectrum. *apj*, 557:519–526, August 2001.