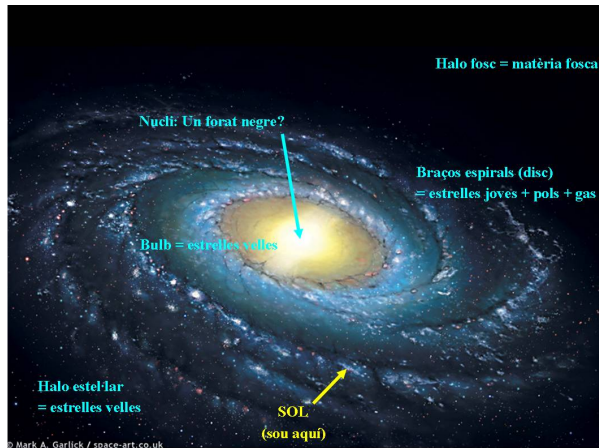


Explorant la Via Làctia

La Via Làctia, la nostra galàxia, és una galàxia espiral barrada, del tipus que els astrònoms anomenem *Sbc*. Amb un diàmetre d'uns 120.000 anys llum, té una massa total que equival aproximadament a 200 bilions de masses solars. Conté entre 200 i 400 milers d'estrelles, a més de gas, pols, altres objectes astronòmics com ara planetes o nanes marrons, i matèria fosca. El nostre sol es troba a uns 28.000 anys llum del seu centre, en l'anomenat *braç espiral d'Orió*, gira entorn del nucli galàctic i fa una volta completa cada 240 milions d'anys.

Mapa urbà de la Galàxia



La nostra galàxia té tres parts clarament diferenciades:

- La part central, anomenada **bulb**, és aproximadament esfèrica i està formada per estrelles relativament velles i groguenques. Cap al centre o **nucli galàctic** s'ha detectat una font de freqüència ràdio molt intensa que rep el nom de Sagitari A*; es creu que podria tractar-se d'un forat negre supermassiu envoltat de gas i pols.



Estrelles, gas i pols envolten la font de freqüència ràdio Sagitari A*, un suposat forat negre en el centre de la Via Làctia

- Al voltant del bulb gira el **disc**, el qual conté els **braços espirals**. Dins els braços trobem estrelles més joves i blavenques, riques en metalls.



El cúmul de les Plèiades (M45)

Aquestes estrelles apareixen sovint agrupades en **cúmul oberts**; el de les Plèiades n'és un dels més coneguts.

L'espai entre els braços espirals no està buit; de fet, conté quasi tantes estrelles com els braços, tot i que no són tan brillants. En aquestes regions és on es formen més estrelles, a partir del gas i la pols que contenen.



La nebulosa Omega o del Cigne (M17) és una regió espectacular de formació estel·lar

Al llarg de la seva vida, a mesura que orbita al voltant del centre galàctic, una estrella pot entrar i sortir diverses vegades dels braços espirals. Les estrelles més massives i brillants, tanmateix, viuen només uns quants milions d'anys i no arriben a sortir mai dels braços espirals. La població estel·lar del disc rep el nom de població I.

- El bulb i el disc estan envoltats per l'halo, compost per estrelles velles i pobres en metalls, tant aïllades com formant part dels anomenats cúmul globulars (dits així per la seva forma esfèrica). A diferència del disc, aquestes estrelles, de l'anomenada població II, tenen òrbites excèntriques que molt sovint creuen el pla galàctic.



El cúmul globular 47 Tucanae (NGC 104)

- A més d'estrelles, es creu que l'halo conté una gran quantitat de matèria fosca. De fet, l'estudi del moviment de la nostra galàxia indica que la major part de la matèria que conté no pot ser detectada amb telescopis. La composició d'aquesta matèria fosca encara no se sap amb exactitud, però ha de ser molt diferent de la matèria ordinària que tots coneixem.

ATENCIÓ, PREGUNTA:

Les estrelles de l'halo són més rogenques i les del disc, més blavenques. A què és degut aquest fet?

(Busca la resposta en la pàgina següent.)

Propietats de les estrelles

Massa: de 0,08 a unes 100 masses solars.

Radi: de 1.000 radis solars a només 10 km (cas dels estels de neutrons).

Temperatura: de 40.000 a 2.000 K, o potser menys.

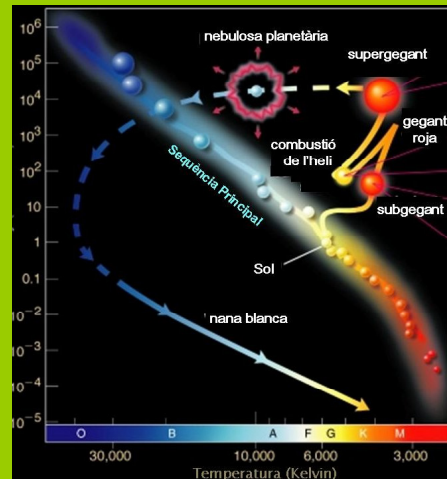
Lluminositat: de 0,0001 a un milió de vegades la lluminositat del Sol.

El **color** d'una estrella depèn de la seva temperatura: com més alta sigui aquesta, més blavenca serà la estrella. Les estrelles més fredes, per contra, tenen colors més rogencs. D'altra banda, la lluminositat està directament relacionada amb la temperatura i la grandària: les estrelles més grans i calentes són també les més brillants.

Vida d'estrella

La vida d'una estrella pot durar des de pocs milions d'anys fins a desenes de milers de milions d'anys. El Sol té actualment una edat de 4.500 milions d'anys, aproximadament la meitat de la seva vida, i es troba en l'anomenada fase de seqüència principal. Durant aquesta fase, que és la més llarga de la vida de qualsevol estrella, es produeix la combustió de l'hidrogen. Un cop esgotat l'hidrogen, el Sol passarà per diverses fases tot cremant elements més i més pesats fins a convertir-se en una nana blanca.

No totes les estrelles tenen vides paral·leles. Depenent de la seva massa, una estrella acabarà la seva existència com a nana blanca o, si és molt massiva, com a estel de neutrons o forat negre (després de patir una explosió de supernova). La massa que té l'estrella quan es forma també determina el ritme al qual evoluciona: com més massa tingui, més curta serà la seva vida.



La vida del Sol representada en un diagrama de Hertzsprung-Russell

Fent la biografia de les estrelles: el diagrama de Hertzsprung-Russell

Si distribuïm les estrelles en un diagrama que tingui com a eix horitzontal la temperatura de l'estrella (en sentit decreixent) i com a eix vertical la seva lluminositat, observarem que tendeixen a concentrar-se en determinades zones. Aquest diagrama, anomenat diagrama de Hertzsprung-Russell o simplement diagrama HR, permet de determinar diversos paràmetres físics de les estrelles.

Una estrella gran i massiva, per exemple, es trobarà en la part superior del diagrama HR, ja que serà molt lluminosa. Si a més es tracta d'una estrella jove, serà també molt calenta i estarà cap a la part esquerra del diagrama. A mesura que una estrella evoluciona, la seva posició en el diagrama HR també va variant. Amb un model d'evolució estel·lar podem, doncs, deduir l'edat de l'estrella a partir de la seva posició en el diagrama HR.

La major part de les estrelles que observem en la Galàxia es distribueixen al llarg de la seqüència principal. Aquestes estrelles es caracteritzen per la fusió contínua de l'hidrogen en els seus nuclis, fet que n'estabilitza la pressió gravitatòria i impedeix que es col·lapsin.

ATENCIÓ, PREGUNTA:

Si la fusió de l'hidrogen equilibra la força gravitacional a dintre una estrella, què succeeix quan l'estrella ha esgotat tot el seu hidrogen?

(Busca la resposta en la pàgina següent.)

La catifa vermella: estrelles particulars



Representació artística del nostre sol com a gegant roja

Gegants i supergegants roges. Quan una estrella de massa similar o superior al nostre sol ha consumit tot el seu hidrogen, comença a contraure's de manera que la temperatura i la pressió augmenten en el seu interior. Això acaba produint una expansió de les capes més externes i un enrogiment de l'estrella, que augmenta de 1.000 a 10.000 vegades la seva lluminositat.

Una estrella molt massiva (de 10 a 70 masses solars) passa de l'etapa de gegant roja a la de supergegant. Aquestes estrelles continuen experimentant processos nuclears i s'expandeixen encara més. Les seves lluminositats poden assolir valors centenars de milers de vegades superiors a la del Sol. Algunes supergegants són molt inestables i formen una classe particular d'estrelles variables anomenades *cefeides*.



La nebulosa planetària IC 418-350. En el centre, una vegada expulsat l'embolcall, quedarà una nana blanca

Nanes blanques. Al final de la fase de (super)gegant roja, l'estrella expulsa les seves capes més externes en forma de *nebulosa planetària*. Resta un nucli de carboni i oxigen que va radiant la seva energia i refredant-se de manera progressiva; aquest objecte rep el nom de *nana blanca*. Si la seva massa és superior a 1,4 masses solars, la nana blanca no pot suportar la seva pròpia pressió interna i esclata en una *explosió de supernova*.



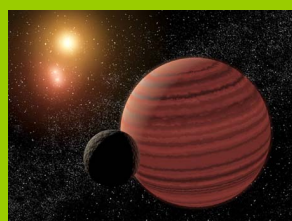
La nebulosa del Cranc, romanent d'una explosió de supernova, amaga en l'interior un estel de neutrons

Estels de neutrons. És el residu d'una estrella massiva (de 1,4 a 5 masses solars) després d'una explosió de supernova. Amb radis de 10 a 20 km, són de 30.000 a 70.000 vegades més petits que el Sol i tenen una densitat comparable a la d'un nucli atòmic. Per damunt de les 5 masses solars, l'estel de neutrons continua irremeiablement el seu col·lapse fins a convertir-se en un *forat negre*.



Representació artística d'una nana roja

Nanes roges. Són estrelles de baixa massa (de 0,3 a 0,08 masses solars) en la seqüència principal. Després de consumir tot el seu hidrogen, aquestes estrelles es contrauen progressivament sense passar per la fase de gegant roja. Però, de fet, aquestes estrelles evolucionen tan lentament que en tota la història de l'Univers cap no ha tingut temps d'abandonar la seqüència principal!



Representació artística d'una nana marró i un petit planeta company en un sistema estel·lar múltiple

Nanes marrons. No són estrelles, ja que no tenen massa suficient per començar la fusió sostinguda de l'hidrogen (que s'estima en aproximadament 0,08 masses solars). Per aquest motiu, la seva lluminositat és molt baixa i, al llarg del temps, van contraent-se i refredant-se cada vegada més.

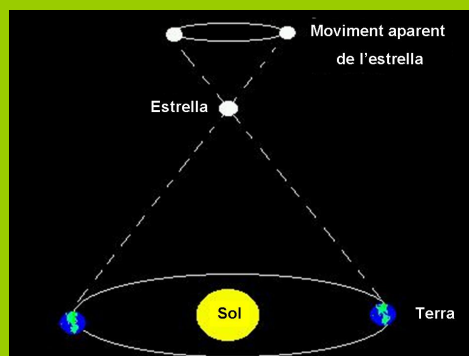
La distància de les estrelles

Conèixer la posició i els moviments de les estrelles permet d'estudiar l'estructura de la nostra galàxia i la seva dinàmica.

La manera clàssica de mesurar la distància a les estrelles és amb la seva paral·laxi. La paral·laxi és l'angle que sembla que es desplaça l'estrella, mesurat amb referència a estrelles més llunyanes, quan l'observem des de dos punts oposats de l'òrbita de la Terra.

La primera paral·laxi d'una estrella no es va aconseguir mesurar fins a l'any 1838. Es tractava de l'estrella 61 Cyg, que es troba a 11,3 anys llum.

En l'actualitat, les mesures per conèixer la distància a la qual es troben les estrelles es duen a terme des de l'espai.



Mesura de la paral·laxi estel·lar

Distàncies astronòmiques

1 any-llum (a.l.) = $9.46 \cdot 10^{15}$ metres

1 parsec (pc) = 3.26 anys-llum

1 Megaparsec (Mpc) = 10^6 pc

Gaia, el detectiu galàctic

El satèl·lit Gaia, que serà llançat a l'espai l'any 2011 per l'Agència Espacial Europea, té l'objectiu ambiciós de dur a terme un estudi acurat de l'estructura, la dinàmica i l'evolució de la nostra galàxia, així com de fer un ampli cens de les estrelles que conté.

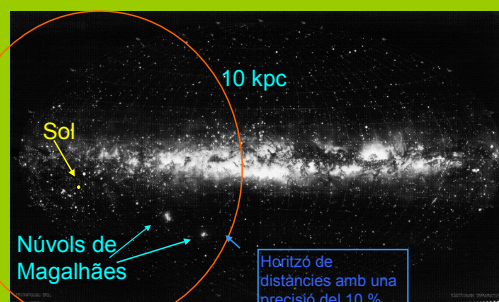
Durant els cinc anys de missió, Gaia determinarà la posició, la distància i les velocitats de 1.000 milions d'estrelles. Mesurarà angles amb una precisió de microsegons d'arc, equivalent al diàmetre d'una moneda d'un euro situada a la Lluna i vista des de la Terra. A més, proporcionarà informació valuosa sobre les propietats físiques de les estrelles observades.

Amb aquestes mesures podrà també:

- Detectar desenes de milers de planetes extrasolars.
- Detectar milers de petits cossos del sistema solar.
- Determinar constants i paràmetres fonamentals,
- ... i, probablement, descobrir nous objectes astronòmics que encara no coneixem.

La Universitat de Barcelona col·labora amb l'ESA i altres instituts i universitats europeus en la fase de disseny i preparació de la missió Gaia:

- Hem participat en la definició del sistema fotomètric de Gaia, el sistema de filtres que permetrà de determinar els colors i les lluminositats de les estrelles.
- Estem desenvolupant un simulador realista de la missió a partir d'un model de la Galàxia, que s'utilitza per a estudis de viabilitat tècnica i científica.
- Treballem en el disseny del sistema de tractament i anàlisi de les dades provinents del satèl·lit. A causa del volum enorme de dades que s'ha de processar, cal trobar un sistema eficient i robust de tractament de les dades, i assegurar que les característiques tècniques del satèl·lit i del sistema de tractament de dades permetin d'assolir la precisió desitjada.



En un radi de 10 kpc, Gaia mesurarà les distàncies i els moviments de les estrelles amb una precisió del 10%. Aquest radi és suficient per observar el centre de la Galàxia

PER SABER-NE MÉS:

Missió Gaia: <http://www.esa.int/science/gaia>
Gaia a Barcelona: <http://gaia.am.ub.es/>

Les galàxies dins l'Univers

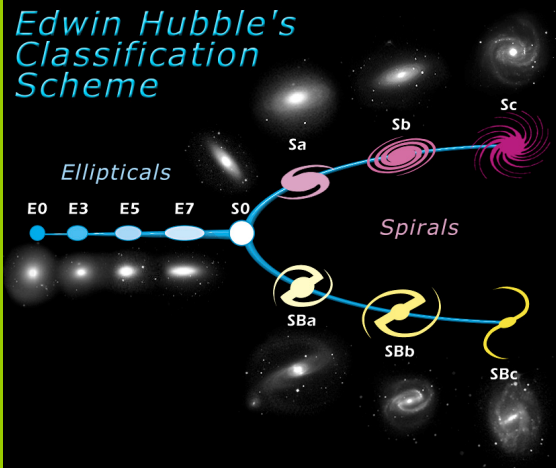
Com són les galàxies?

Les galàxies prenen diverses formes que es poden classificar al llarg de l'anomenada *seqüència de Hubble*. A una banda, les el·líptiques (E), amb la forma característica que els dona nom i una el·lipcitat creixent de 0 (esfèriques) a 7 (les més aplanades); a l'altra banda, les espirals (S), com la Via Làctia, amb un bulb central cada cop menys lluminós i uns braços espirals cada cop més oberts (a, b, c...), que poden ser barrades (B) o no.

Aquesta classificació només s'aplica a les galàxies més brillants. A part, hi ha una gran quantitat de galàxies nanes fora d'aquesta seqüència.

Hubble va proposar aquesta seqüència pensant que hi havia alguna mena d'evolució des dels primers tipus, E, fins als darrers, S. Enmig, les lenticulars (S0), de propietats intermèdies, serien un tipus de transició. Tanmateix, després d'un segle d'estudis intensos encara no està del tot clar el procés de formació i evolució de les galàxies.

En tot cas, està clar que la morfologia de les galàxies està lligada a totes les seves propietats. Així, les E tenen molt poc gas, poca formació estel·lar i són groguenques. A l'altre extrem, les S tenen força gas i pols, una formació estel·lar contínua i són més aviat blaves.



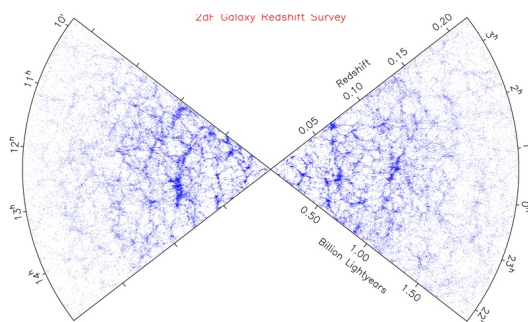
Més informació a: <http://www.astromia.com/universo/clasegalaxias.htm>

Pregunta

Sabem com evolucionen les estrelles de massa diferent en el diagrama Hertzsprung-Russel (anteriorment), a què creieu que és deguda la diferència de colors de les galàxies E i S?

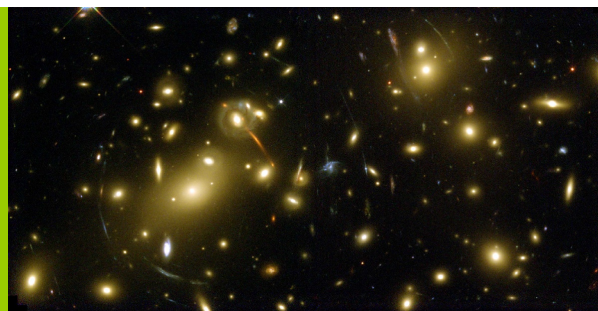
Al fet que les E tenen molt poca formació estel·lar. En efecte, les estrelles més massives, de color blau en la seqüència principal, tenen una vida molt curta, per tant, a les E, que no tenen formació estel·lar, ja no n'hi ha.

On es troben?



Les galàxies estan distribuïdes formant una mena de **xarxa còsmica** (cosmic web) que omple tot l'Univers de manera homogènia.

Per situar-les en profunditat necessitem mesurar-ne la distància. Això es duu a terme utilitzant el desplaçament cap al vermell (en anglès, redshift), que mostra l'espectre de la seva llum. El redshift z de les galàxies és degut a la seva velocitat d'allunyament respecte a nosaltres (igual a cz , on c és la velocitat de la llum) causat per l'expansió de l'Univers.



Als nusos d'aquesta xarxa, hi trobem els **cúmul·ls de galàxies** on se n'hi apleguen fins a milers, al centre més aviat el·líptiques i als afores majoritàriament espirals.

Algunes galàxies que s'observen dins el camp d'un cúmul estan realment molt lluny al darrere. A causa de l'efecte de lent gravitatòria, els raigs de llum d'aquestes galàxies es corben quan travessen el cúmul i produeixen uns arcs petits característics.

Més informació a: <http://skyserver.sdss.org/dr2/sp/astro/structures/structures.asp>

Pregunta

Per què creieu que les galàxies que es troben al centre dels cúmul·ls són més aviat E i les que estan als afores, més aviat S?

Si en tenim alguna idea, ens la podríem donar. Aquesta és una de les preguntes cabdals que volem respondre. La nostra idea és que les E fa més temps que han arribat als cúmul·ls (per això estan a les zones centrals) i S hi han desenvolupat per fusions (vegen el punt 3). A les fusions es produeix un brot molt intens de formació estel·lar i el gas s'esgota ràpidament, de manera que les galàxies que les pateixen ja no poden formar noves estrelles.

Com viuen?

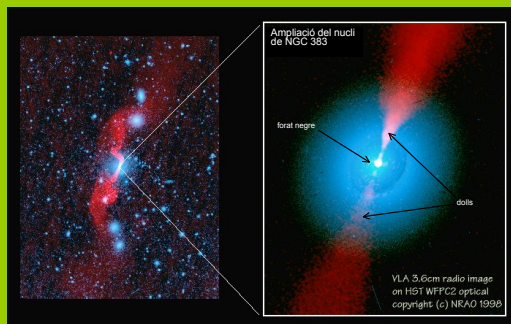
A l'interior dels cúmuls, les galàxies, a més de formar estels, interaccionen, es fusionen, s'arranquen matèria mútuament per efecte de marea o són escombrades pel medi intergalàctic.

L'estudi d'aquestes interaccions és important per tal de comprendre l'evolució de les galàxies i, més concretament, l'abundància dels diferents tipus i la forma que adopten segons el lloc on es troben.

Com a conseqüència de les fusions, al nucli de les galàxies es desenvolupen forats negres supermassius (vegeu anteriorment el cas de la Via Làctia) que, en atreure la matèria que hi ha al seu voltant, l'escalfen i l'acceleren de manera que aquesta emet gran quantitat de radiació. Això permet de detectar-los com a **quàsars**.

Els quàsars poden emetre tanta energia com la galàxia sencera on es troben i, per aquest motiu, es veuen fins als confins de l'Univers. Emeten gairebé a totes les longituds d'ona, des de ràdio fins als raigs X, i acceleren partícules a velocitats lumíniques a través dels seus dolls (*jets*), que s'estenen a grans distàncies de la galàxia, per tot el cúmulo.

Els quàsars també afecten l'evolució de les galàxies, directament, escalfant el seu gas i evaporant-lo i, indirectament, per l'efecte que tenen sobre el medi intergalàctic.



Més informació a <http://www.astronomiaonline.com/informacion/cuasares/>

L'objectiu de la nostra recerca és

Comprendre com i quan s'han format les galàxies, per què són com són, per què estan agrupades i en morfologies diferents segons el lloc, i què ha originat la xarxa còsmica...

Aquest estudi és molt complex, requereix conèixer des de les propietats de l'Univers a més gran escala i la seva evolució al llarg del temps fins a les propietats internes de les galàxies, sobretot pel que fa a la formació i l'evolució estel·lar (vegeu anteriorment), passant per les propietats que mostren les galàxies a escales intermèdies, les interaccions que hi ha entre aquestes i amb el medi intergalàctic (la fitxa present).

L'observació astronòmica

Afortunadament tenim una manera de comprovar les nostres teories: podem viatjar en el temps...

Com que la velocitat de la llum és finita ($c = 300.000 \text{ km/s}$), com més lluny mirem, més retrocedim en el temps (fa més temps que va ser emesa la llum que ens arriba ara).



Pregunta

Tenint en compte que l'edat de l'Univers és de 13.700 milions d'anys i que $1 \text{ Mpc} = 3,086 \cdot 10^{19} \text{ km}$, quina és la distància màxima a la qual podem observar objectes?

4.200 Mpc. Aquest límit constitueix l'horitzó del nostre univers. Molt probablement hi ha molta matèria (poisser infinita) fora de l'horitzó, però no ho podem veure.

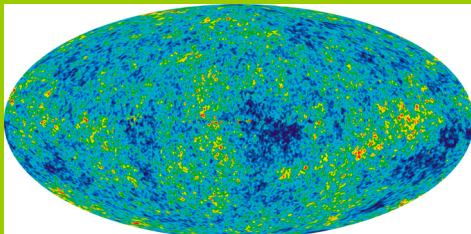
Com van néixer les galàxies?

L'origen dels temps

El Big Bang va tenir lloc fa 13.700 milions d'anys. Fraccions de segon més tard, l'Univers va passar per una fase d'expansió accelerada (inflació) que va fer créixer les fluctuacions de densitat (quàntiques) inicials fins a escales macroscòpiques. Els primers àtoms es van formar al cap de tres minuts i, en acabar, hi va haver una llarga època d'estabilitat. L'Univers es va anar refredant lentament mentre que la radiació, en interacció constant amb la matèria, impedia que les fluctuacions de densitat es desenvolupessin lliurement sota l'acció de la gravetat.

Les llavors primordials

400.000 anys després de la radiació va deixar d'interaccionar amb la matèria i les fluctuacions de densitat van començar a desenvolupar-se. Aquestes llavors de les estructures que presenta avui dia l'Univers les podem veure (viatjant en el temps) quan observem el cel en microones.



A aquestes longituds d'ona, el cel mostra una temperatura uniforme d'uns 3 K (1 K = 1 grau Kelvin). Es tracta de la radiació que es va desprendre de la matèria quan l'Univers només tenia 400.000 anys.

Sobre aquest fons veiem unes petites taques que mostren petites desviacions de la temperatura (vermelles quan són més calentes i blaves quan són més fredes).

Les taques de la radiació de fons de microones ens informen sobre l'amplitud de les fluctuacions de densitat primordials a partir de les quals s'acabarien formant les galàxies, és a dir, les condicions inicials del procés de formació d'estructura a l'Univers.

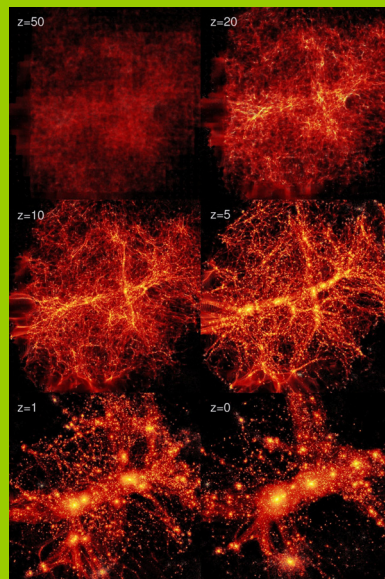
Més informació a: <http://www.astroenlazarador.com/especiales/wmap/inicio.htm>

L'època fosca

Des dels 400.000 anys després del Big Bang fins a la formació dels primers estels (150 milions d'anys) no va succeir res a part del creixement d'halos de matèria fosca.

El 90 % de la matèria que omple l'Univers no interacciona amb la matèria ordinària a través de la radiació; només ho fa a través de la gravetat. Per això diem que és fosca. A l'interior dels halos de matèria fosca també hi havia matèria ordinària en forma de gas. No obstant això, encara no s'havien format les primeres estrelles i, per tant, no hi havia fonts lluminoses. L'Univers era, doncs, fosc i dominat gravitatoriament per la matèria fosca.

Saber com eren i com creixien els halos d'aquesta mena de matèria és indispensable per poder comprendre les propietats de les galàxies d'avui dia. Evidentment, aquestes estructures no es poden veure; només poden ser «simulades» per ordinador, on se segueixen moltes partícules sotmeses a la gravetat amb condicions inicials corresponents a les que es dedueixen de la radiació de fons de microones. La figura mostra la densitat de matèria en una regió de l'Univers per a sis èpoques diferents caracteritzades pel desplaçament cap al vermell z ($z = 0$ correspon al temps present i $z = 20$ a 18 milions d'anys després del Big Bang).



Vegeu-ne una simulació a: <http://cosmicweb.uchicago.edu/filaments.html>

Les primeres galàxies

Les primeres galàxies van aparèixer 150 milions d'anys després del Big Bang. Quan els halos van ser prou densos, el gas que contenien va començar a refredar-se i a contraure's formant estels. L'evolució d'aquests va produir el reescalfament del gas i la ionització del medi intergalàctic, la qual cosa va influir en tot el procés de formació estel·lar posterior.

La modelització de tot aquest procés enrevessat és el que permet de predir les propietats de les primeres galàxies i, seguint-ne l'evolució, la de les galàxies d'avui dia.

A la dreta es mostra el Hubble Deep Field, la imatge aconseguida pel telescopi espacial Hubble d'un camp extremament petit i profund en el cel en el qual veiem les galàxies més llunyanes (i més joves) mai observades.



Metodologia emprada en la nostra recerca

La formació de galàxies és, doncs, un procés retroalimentat, altament complex, que es remunta als inicis del temps. Per estudiar-lo ens calen observacions molt sofisticades, simulacions per ordinador i models físics que tinguin en compte el refredament del gas atrapat dins els halos, la formació d'estels, l'enriquiment del medi de nous àtoms més pesats, el creixement de forats negres al seu centre, les seves interaccions, etc.

