

RR 838

L'Univers: Edat i Evolució

.....
INAUGURACIÓ

DEL CURS

ACADÈMIC

90'91

.....



UNIVERSITAT DE BARCELONA

RR-859

INAUGURACIÓ DEL CURS ACADÈMIC 90-91

L'UNIVERS: EDAT I EVOLUCIÓ

Discursos dels professors:

RAMON CANAL
i
BERNARD PAGEL

BIBLIOTECA DE LA UNIVERSITAT DE BARCELONA



0701461930



Publicacions de la Universitat de Barcelona
Gran Via de les Corts Catalanes 585 - 08007 Barcelona
Dipòsit Legal: B-35.394-90
Disseny: Cesca Simón
Imprimeix: Ediciones Gráficas Rey, S.L.

ÍNDEX

Les supernoves i l'evolució de l'univers	7
How old is the Universe ?	19

LES SUPERNOVES
I L'EVOLUCIÓ DE L'UNIVERS

Dr. Ramon Canal
Catedràtic d'Astrofísica
de la Universitat de Barcelona

L'Univers després del «*Big Bang*»

L'Univers que coneixem, tan enllà en el passat com la Física actual ens permet de reconstruir-lo, va tenir una fase primitiva de densitat i temperatura elevadíssimes i, globalment, ha anat només enrarint-se i refredant-se d'aquells moments inicials ençà. És per això que al model cosmològic corresponent hom l'anomena el «de la Gran Explosió» o, més sovint, el «del *Big Bang*». La «Gran Explosió», que assenyala el començament de l'espai i del temps definits pels objectes i processos físics coneguts per nosaltres, va succeir, com el Prof. Bernard Pagel acaba d'explicar-nos, fa uns deu mil milions d'anys.

Dins aquesta immensa durada cal fixar-nos ara, però, en els primers minuts, quan l'Univers era molt més dens i calent que a l'època actual. La Física de les Altes Energies ens permet remuntar-nos (si bé mitjançant atrevides extrapolacions teòriques) fins als moments en què l'edat de l'Univers era només de fraccions petitíssimes de segon. L'estat de la matèria era, llavors, molt diferent de l'actual i ni els acceleradors de partícules més potents poden reproduir-lo. No ens caldrà tanmateix anar tan lluny. Només ens referirem breument als moments en els quals la temperatura de l'Univers era ja inferior a cent mil milions de graus i encara per sobre, però, dels cent milions de graus. L'edat de l'Univers era compresa llavors entre la centèsima de segon i els cinc minuts. En aquesta fase és quan els protons i els neutrons es combinaren per primera vegada i van formar nuclis atòmics. Aquesta època encara molt calenta de l'Univers no va durar prou, però, perquè es formessin la gran majoria dels elements químics que coneixem. Només es van crear els més lleugers: els dos isòtops estables de l'hidrogen

(^1H , el més abundant, i el deuteri, ^2H), els dos de l'heli (^3He i ^4He), i un dels del liti (el ^7Li). De la resta, només traces infinitesimals. Caldrà esperar molt més, encara un mil de milions d'anys, per començar a tenir un Univers amb una composició més variada.

L'Univers va seguir expandint-se i refredant-se. Quan va complir els 300.000 anys, els electrons es combinaren amb els nuclis d'hidrogen i d'heli per formar els primers àtoms elèctricament neutres (un 90 % hidrogen i un 10 % heli, aproximadament). Fins llavors l'aspecte de l'Univers era el d'una boira molt espessa. D'aquell moment ençà esdevingué gairebé «transparent». La radiació va començar a propagar-se lliurement, tot refredant-se a mida que l'Univers seguia expandint-se. Avui en dia encara podem detectar-la com un fons de microones a molt baixa temperatura: uns -270°C . És el vestigi d'aquell passat incandescent de l'Univers.

F

Formació de les galàxies i dels estels

L'Univers va seguir expandint-se i refredant-se. Quan va complir els 300.000 anys, els electrons es combinaren amb els nuclis d'hidrogen i d'heli per formar els primers àtoms elèctricament neutres (un 90 % hidrogen i un 10 % heli, aproximadament). Fins llavors l'aspecte de l'Univers era el d'una boira molt espessa. D'aquell moment ençà esdevingué gairebé «transparent». La radiació va començar a propagar-se lliurement, tot refredant-se a mida que l'Univers seguia expandint-se. Avui en dia encara podem detectar-la com un fons de microones a molt baixa temperatura: uns -270°C . És el vestigi d'aquell passat incandescent de l'Univers.

Les protogalàxies, al mateix temps que s'agrupaven (també per efecte de la gravitació) formant cúmuls i estructures encara molt més grans, esdevenien cada cop més denses. Condensacions més petites, dins d'elles, es contreien encara més de pressa i es fragmentaven. Els trossos més petits esdevingueren els estels: boles de gas finalment de nou incandescent en ésser comprimides per llur pròpia gravitació. Les seves masses: entre un centenar de vegades i unes centèsimes la del Sol.

A l'interior dels estels tornaren a donar-se temperatures com les que hi hagué a tot l'Univers un miler de milions d'anys abans. Però, ara, en comptes de durar menys de cinc minuts, es mantindran per milers de milions d'anys, de generació en generació d'estels, fins arribar a l'època actual. Els estels aniran canviant a poc a poc la composició de l'Univers: de l'hidrogen i de l'heli inicials en sorgirà tota la diversitat dels altres elements que coneixem. Fracció mínima tanmateix: no arriba ni al 4% del total en el gas d'on s'han format els estels més joves, els que han condensat més recentment. Però de molt interès per a tots nosaltres!

Evolució dels estels i els seus possibles finals

Quan les temperatures a les regions centrals dels estels arriben a la desena de milions de graus, llur contracció s'atura momentàniament (per unes desenes de milers d'anys només en els més massius, per molts milers de milions d'anys en els de masses més petites). La seva evolució estarà controlada, a partir d'aquest moment, per la combustió termonuclear de

l'hidrogen, primer, i dels successius elements que s'aniran produint, a continuació.

La primera etapa de combustió transforma l'hidrogen (l'element més abundant, com hem vist, i amb nucli de càrrega elèctrica més petita) en heli. Exhaustiu l'hidrogen al centre de l'estel, aquest es contrau, s'escalfa (fins a un centenar de milions de graus) i comença a continuació la transformació de l'heli en una barreja de carboni i d'oxigen. Nova contracció, nou escalfament i transformació, per combustió termonuclear del carboni (a uns set-cents milions de graus), del centre de l'estel en una barreja d'oxigen, neó i magnesi. Després el neó (a uns mil tres-cents milions de graus) es desintegra per produir més oxigen i magnesi. Segueix la combustió de l'oxigen, (a uns mil vuit-cents milions de graus): produeix silici, fòsfor i sofre. Finalment, a uns tres mil milions de graus, aquesta darrera barreja es «fon» per donar-ne una d'isòtops del ferro i del níquel (principalment). Això culmina l'evolució termonuclear de l'estel: la gravitació domina de nou, amb les conseqüències que ara veurem.

L'evolució que molt breument acabem de descriure no solament és tant més ràpida com més gran és la massa de l'estel sinó que s'accelera també en passar d'una etapa de combustió a la següent: d'una durada que pot ésser deu milions d'anys per a la primera fins a menys d'un dia per a la darrera! Molts d'altres elements, a més dels principals «combustibles», resulten de múltiples reaccions secundàries a cada etapa. L'estructura final de l'estel és de capes sobreposades amb composicions químiques diferents les unes de les altres: els elements més pesants, els darrers d'ésser produïts, prop del centre i els més lleugers a les capes més externes.

No tots els estels passen per totes aquestes fases de combustió termonuclear: només els que tenen masses superiors a unes deu vegades la del Sol. És a dir: una fracció força petita del nombre total d'estels d'una galàxia. Els altres (com el nostre Sol) no arriben a poder contraure's prou com perquè la temperatura en el seu centre permeti la combustió del carboni. Amb masses prou petites, ni la combustió de l'heli és possible. Els objectes menys massius, la contracció dels quals s'atura abans de poder cremar l'hidrogen, no es consideren pròpiament estels i no contribueixen, és clar, a l'evolució química de l'Univers.

Quina és la fi d'aquesta gran majoria d'estels? La seva contracció gravitatòria, en exhaurir-se un determinat combustible termonuclear, queda aturada per la pressió molt elevada que produeixen els electrons a molt altes densitats. Després d'expulsar bastant suauement una part de les seves capes més externes (que formaran una *nebulosa planetària*, estrats de gas que acabaran barrejant-se amb els núvols de matèria interestel·lar), es transformarà en una *nana blanca*, un fòssil estel·lar que només anirà refredant-se fins a deixar d'ésser un objecte lluminós. Per això cal, tanmateix, que la massa de l'estel sigui a la fi més petita que, aproximadament, vegada i mitja la del Sol. És a dir: o bé que ho fos ja quan l'estel es va formar, o bé que s'hagi reduït després degut a l'emissió d'un *vent estel·lar* prou intens. En cas contrari, s'enfonsarà sota la seva pròpia gravitació.

La contribució dels estels que acaben formant nanes blanques al contingut de l'Univers en elements més enllà de l'hidrogen i de l'heli és, precisament, el que el vent estel·lar és capaç d'arrossegar. Això és, en general, molt poc: bàsicament el vent conté, un cop més, hidrogen i heli amb, de vegades, un excés de

nitrogen, de carboni i d'oxigen (relatiu a la composició del gas d'on es va formar l'estel). Són els estels més massius (més de deu vegades la massa del Sol, com ja hem dit) els que produeixen la gran majoria dels elements químics, que el «*Big Bang*» no va arribar a sintetitzar. Però: com acaba l'evolució dels estels massius?

Supernoves

Hem vist que, a uns tres mil milions de graus, la matèria esdevé principalment una barreja d'isòtops del ferro i del níquel. No és possible extreure'n més energia mitjançant reaccions termonuclears. La densitat a la qual ha calgut comprimir-la per assolir aquestes temperatures és també molt alta: típicament, al voltant de les *mil tones per centímetre cúbic* (1). La bola central de «ferro-níquel», la massa de la qual va creixent, és doncs del tot semblant a una *nana blanca*. Això vol dir que en arribar als voltants d'una vegada i mitja la massa del Sol (el que es coneix com la *massa límit de Chandrasekhar*), la pressió del gas (deguda en la seva més gran part als electrons) esdevé insuficient per contrarestar la gravitació. La bola central s'enfonsa, *col.lapsa*. Si res no l'atura, això xuclarà tot l'estel: tots els preciosos elements químics que aquest ha produït durant la seva evolució (i que, com hem dit, no existeixen enlloc més) quedaran atrapats per sempre en un *forat negre*, un objecte d'on ni la llum no en pot sortir!

Què pot aturar el col.lapse de l'estel? Només una nova font de pressió: la dels protons i els neutrons quan la densitat de la matèria, durant el col.lapse,

esdevingui semblant a la dels nuclis atòmics, és a dir, *més de cent milions de tones per centímetre cúbic!* L'energia gravitatòria alliberada pel col.lapse quan s'arriba a aquestes densitats és també immensa: 10^{53} erg, és a dir, tota l'energia que produeix una galàxia sencera, de cent mil milions d'estels, durant deu anys. Però en un segon i dins una bola de només uns deu quilòmetres de radi: l'esdeveniment més violent després del «*Big Bang*»! Aquesta mena d'esdeveniments són les *supernoves* i han estat observats a la nostra pròpia galàxia (la darrera vegada el 1604, però) i molt més sovint a d'altres galàxies (vint-i-cinc al llarg només dels vuit primers mesos d'aquest any). El més ben estudiat, el que ens ha permès comprovar que les idees bàsiques que en teníem eren correctes i que ha sortit fins i tot a les portades de les revistes de més gran difusió, ha estat la supernova 1987A, apareguda al Gran Núvol de Magalhães, una petita galàxia satèl.lit de la nostra, visible només des de l'hemisferi sud.

El cas de la supernova 1987A és únic, fins ara, en dos aspectes molt importants: sabem quin és l'estel que va esclatar (un estel blau, brillant i massiu: Sanduleak -69° 202) i han estat detectats els neutrins (partícules elementals que interactuen molt feblement amb la resta de la matèria) produïts pel col.lapse de la bola central de «ferro-níquel» en formar una mena de nucli atòmic gegantí, un *estel de neutrons*. Que es formen estels de neutrons a les explosions de supernoves era ja conegut en haver-se observat la presència de *pulsars* a la Nebulosa del Cranc (produïda per la supernova de l'any 1054, aquesta a la nostra pròpia galàxia) i a d'altres restes de supernova, però mai no s'havia tingut encara evidència tan directa del procés de formació.

Si bé sabem (i ara amb molta més certesa que fa solament quatre anys) que els estels massius, en col-

lapsar les seves regions centrals, donen lloc a una tremenda explosió que llança els seus fragments a velocitats de l'ordre dels deu mil quilòmetres per segon en totes les direccions de l'espai i que, almenys a vegades, deixen un estel de neutrons com a residu al mig, la manera com això es produeix és un problema encara sense resoldre. Hom pensa que en assolir-se al centre de l'estel la densitat dels nuclis atòmics el collapse s'atura i es produeix un rebot de les capes que hi queien. Això actuaria com un pistó i expulsaria la resta de l'estel (la més gran part d'aquest) amb les velocitats que s'observen. Analitzada amb rigor, però, aquesta idea relativament senzilla presenta moltes dificultats. Gairebé tots els camps de la Física hi intervenen: estat de la matèria a les densitats dels nuclis atòmics, producció i destrucció de partícules elementals, dinàmica del fluid, propagació de tota mena de radiacions... Avui en dia hom pensa més aviat que el primer «rebot» en formar-se l'estel de neutrons no aconsegueix impulsar la resta de l'estel cap a fora, però que uns segons més tard la pressió deguda a interaccions de partícules elementals a prop de la superfície del nucli central acaba expulsant la matèria de més amunt. També és possible que en algunes explosions de supernova s'acabi tanmateix formant un *forat negre*, en créixer l'estel de neutrons més enllà del seu límit d'estabilitat malgrat l'expulsió de la més gran part de la matèria de l'estel. La solució definitiva del problema passa per simulacions numèriques molt detallades de l'explosió, encara lluny de l'abast dels ordinadors actuals. El camí més segur per arribar a obtenir-la és contrastar contínuament els càlculs amb observacions fetes amb grans telescopis i també amb satèl·lits fora de l'atmosfera de la Terra. En aquesta Universitat hi treballem des de fa temps.

No tots els elements químics, tret de l'hidrogen i de l'heli, vénen de les explosions dels estels massius.

Aquests produeixen, per exemple, molt poc ferro. Els elements (i els seus isòtops) al voltant del ferro a la taula periòdica són sintetitzats principalment per explosions d'una altra mena: en cremar-se violentament, en uns pocs segons, alguns dels fòssils estel.lars que l'evolució d'estels menys massius havia deixat enrera. Per això cal que aquests fòssils, *nanes blanques*, siguin a prop d'un altre estel, formant un sistema doble. Llavors el segon estel pot cedir a la nana blanca una part del material de les seves capes més externes. Això comprimeix la nana i duu a la ignició termonuclear explosiva de l'interior d'aquesta. No es tracta ara de col.lapse i rebot sinó de la destrucció total de l'estel, convertit en una immensa bomba termonuclear. Aquestes supernoves es diuen del *Tipus I*, mentre que les produïdes pels estels massius es diuen del *Tipus II*. També la dinàmica de les explosions de les nanes blanques és molt complexa i en certs casos la ignició del material pot acabar en col.lapse i formació d'un estel de neutrons (es pensa que aquest és l'origen de moltes fonts de radiació X). Càlculs intensius amb ordinador i observacions són, un cop més, el que permetrà resoldre el problema. També es treballa força en aquest tema a la nostra Universitat i la recent col.laboració amb la de Tolosa, que ens permet fer observacions de raigs X i γ des de satèl.lits, podrà representar un avenç decisiu, ja que les explosions termonuclears són molt brillants en aquestes radiacions.

Hem vist, doncs, que sense les supernoves poc més hi hauria a l'Univers que hidrogen, heli i fòssils estel.lars fets d'una barreja de carboni i d'oxigen. L'obra del «*Big Bang*», molt pobra pel que fa a la síntesi dels elements, és completada per aquestes erupcions, que alliberen tota la riquesa produïda al si dels estels (augmentant-la fins i tot durant l'explosió). També

amb les supernoves es formen els objectes més extraordinaris de l'Univers: els *estels de neutrons* quan l'explosió de l'estel massiu reïx completament i *els forats negres* quan fracassa o bé té un èxit només parcial.

Les supernoves determinen, junt amb la gravitació, gairebé tota la dinàmica del gas a les galàxies. Aquestes tremendes explosions, que concentren en un instant i en un punt energies molt més grans que la que genera la resta de la galàxia en tot un any i escampada, a més, per un volum immens, escalfen el gas, el barregen, sovint l'expulsen fins i tot de la galàxia (així es creu que perden llur gas les galàxies el·líptiques). Les onades produïdes per les explosions comprimeixen els núvols de gas i de pols interestel·lars i provoquen la formació de nous estels. Aquest darrer procés es troba molt influït, a més, pels canvis en la composició química de la galàxia que les supernoves produeixen.

Les supernoves i l'estructura i dinàmica de l'Univers

Les supernoves, en ser de molt els objectes més brillants en una galàxia (en el seu punt àlgid fins i tot més brillants que la galàxia sencera), es poden veure a molt grans distàncies. Les del Tipus I, les més lluminoses intrínsecament, són també molt homogènies: la lluminositat màxima és molt semblant a totes elles. Això fa d'elles uns fars privilegiats per al sondeig en profunditat de l'Univers: mesurant la brillantor al màxim podem saber la distància! D'ací l'interès suplementari a esbrinar el mecanisme de llur explosió, la qual cosa ens permetria deduir-ne la lluminositat in-

trínseca i la seva evolució temporal. Els resultats fins ara assolits afavoreixen un valor de la *constant de Hubble* (que mesura el ritme d'expansió de l'Univers) de prop $50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, en contrast amb d'altres estimacions que donen un valor del doble: $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

No s'exhaureix amb això la relació de les supernoves amb l'evolució de l'Univers. A un nivell encara bastant especulatiu, alguns cosmòlegs pensen que explosions semblants a les que ara veiem, però produïdes per estels molt més massius que els actuals, formats quan les galàxies començaven tot just a condensar-se, podrien haver escombrat el gas intergalàctic i produït els forats immensos que s'estan ara descobrint a la distribució a molt gran escala de les galàxies, així com «filaments», «parets» i d'altres estructures.

Conclusió

Com acabem de veure, les supernoves no són només fenòmens espectaculars, grans focs d'artifici que assenyalen la mort dels estels més brillants i també d'alguns dels més apagats. Sense elles, les galàxies també s'encendrien, els estels naixerien i es refredarien, però ningú mai no els veuria, ningú no mesuraria el curs dels astres ni es preguntaria pels secrets de la seva vida i de la seva mort. Gasos, uns cops incandescents, d'altres molt freds, potser fins i tot, ací i allà, una mica de gel... Això fóra tot l'Univers. Enlloc les cendres dels estels no formarien planetes i els elements de la vida romandrien per sempre absents. Les parets d'aquesta sala, el paper d'aquest llibret, nosaltres mateixos, som fets d'àtoms que no una sinó varies

vegades han estat al si d'estels molt més grans que el Sol i n'han estat expulsats per explosions com la que en admirà fa poc més de tres anys. Aquestes flamara-des còsmiques, que intenten reproduir el començament de l'Univers, són també l'origen de la nostra pròpia vida.

HOW OLD IS THE UNIVERSE?

(Resum de la conferència)

Professor Bernard Pagel
Nordisk Institut for Teoretisk Fysik

How old is the universe?

This question is meaningful because of strong evidence for a «Hot Big Bang» of the order of 10 thousand million (10^{10}) years ago, only a fraction of a second after the mysterious birth of the universe as experienced by us. We have three methods of estimating the time since the Big Bang: 1. Observation of the speed of recession of galaxies compared to their distance –the so-called Hubble constant. 2. Calculation of the age of the oldest stars that we can see, based on their surface temperatures and luminosities, using an elaborate theory of stellar structure and evolution; and 3. Abundances of radio-active elements in meteorites which give only a lower limit slightly exceeding the well known age of the solar system (4.6×10^9 years).

Whilst the first two methods give answers of the same order of magnitude, there are problems when their results are compared in detail. The Hubble constant is not very well known, but there are reasons to believe that it is at least 70 kilometres per second per megaparsec which gives an age of 14×10^9 years (or less) if galaxies have always been separating from one another at constant speeds (or slowing down). This figure agrees well with the ages estimated for the oldest stars, seen in globular clusters. However, there is a big problem because the so-called Inflationary Scenario, held with tenacious faith by most theoretical cosmologists, requires the universe to contain a sufficient average density of matter to maintain Euclidean (as opposed to Riemannian) geometry, and the gravitational force exerted by this matter would have caused so much deceleration of the expansion that the actual age would only be $2/3$ times as much; ie 9×10^9 years, which is too little for the globular clusters. A

possible way out might be to reintroduce the so-called «cosmological constant» the invention of which was regarded by Einstein as the greatest mistake of his life!

