



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

**EL BIG BANG I L'UNIVERS PRIMITIU: EXPANSIÓ I
ABUNDÀNCIES PRIMORDIALS**



Memòria i Annexos

Autor: Sílvia Farràs Aloy
Director: Jordi José Pont
Convocatòria: Juny 2020

Resum

L'objectiu del present treball és l'estudi i caracterització de l'Univers primitiu, mitjançant l'anàlisi d'algunes de les evidències experimentals en què es fonamenta la teoria del Big Bang.

El projecte consta de dos blocs principals. Un primer, de caire conceptual, on es detalla la base teòrica a partir d'una recerca centrada en les observacions cosmològiques fonamentals, els models cosmològics i la teoria del Big Bang.

Posteriorment, en un segon bloc, s'aborda primerament l'estudi de l'expansió (Llei de Hubble) i edat de l'Univers, a partir de l'anàlisi de dades observacionals d'un conjunt de galàxies i espectres electromagnètics. A continuació, mitjançant il·lustracions gràfiques de simulacions computacionals referents a l'etapa de la nucleosíntesi primordial es caracteritza la composició química de l'Univers primitiu i l'evolució que presenta al llarg d'aquest període. Finalment, les abundàncies d'alguns elements creats en aquest període s'han comparat gràficament amb les que hi ha actualment en el Sistema Solar.

Els resultats obtinguts en aquest estudi son plenament compatibles amb els valors més precisos que la comunitat científica ha publicat, tant sobre l'edat de l'Univers com sobre la composició de l'Univers primitiu. Finalment, aquest treball proposa una sèrie d'experiments destinats a millorar el nostre coneixement de les fases inicials de l'Univers, basats en la modificació d'algunes variables amb les que s'ha treballat a les simulacions computacionals.

Resumen

El objetivo del siguiente trabajo es el estudio y la caracterización del Universo primitivo, mediante el análisis de algunas de las evidencias experimentales en que se fundamenta la teoría del Big Bang.

El proyecto consta de dos bloques principales. Un primer bloque, de aspecto conceptual, donde se detalla la base teórica a partir de una investigación centrada en las observaciones cosmológicas fundamentales, los modelos cosmológicos y la teoría del Big Bang.

Posteriormente, en un segundo bloque, se aborda el estudio de la expansión (ley de Hubble) y edad del Universo, a partir del análisis de los datos observados de un conjunto de galaxias y espectros electromagnéticos. A continuación, mediante ilustraciones gráficas de simulaciones computacionales referentes a la etapa de la nucleosíntesis primordial se caracteriza la composición química del Universo primitivo y la evolución que presenta a lo largo de este periodo. Finalmente, la gran cantidad de algunos elementos creados en este periodo se han comparado gráficamente con las que hay actualmente en el Sistema Solar.

Los resultados obtenidos en este estudio son totalmente compatibles con los valores más precisos que la comunidad científica ha publicado, tanto sobre la edad del Universo así como la composición del Universo primitivo. Por último, este trabajo propone una serie de experimentos destinados a mejorar nuestro conocimiento de las fases iniciales del Universo, basados en la modificación de algunas variables con las que se ha trabajado en las simulaciones computacionales.

Abstract

The aim of this work is the study and characterisation of the early Universe, through the analysis of some of the experimental evidence on which the Big Bang theory is based.

The project consists of two main parts. The first part sets the context by summarising researches on fundamental cosmological observations, cosmological models and the Big Bang theory.

The second part begins by addressing the study of the expansion (Hubble's law) and age of the Universe, based on the analysis of observational data from a set of galaxies and electromagnetic spectra. Then, multiple graphical illustrations of computational simulations of stages of the primordial nucleosynthesis where are used to characterise the early Universe and the evolution that occurs throughout this period. Finally, the abundances of some elements created in this period has been compared graphically with those currently in the Solar System.

The results obtained in the study are consistent with the most accurate values that the scientific community has published, based on the age of the universe and on the composition of the early Universe. Finally this work proposes a series of experiments aimed at further improving our knowledge of the initial phases of the Universe, based on the modification of some variables that have been worked on in these computer simulations.



Agraïments

Tota aquesta investigació no hagués arribat al final sense el suport incondicional dels meus amics i companys, que sempre m'han entès i m'han ajudat en tot allò que he necessitat en el decurs d'aquesta etapa.

Gràcies també a la meva família per la paciència que han tingut i agrair, especialment al meu cosí, Tomeu Orfila, per totes les seves aportacions i aclariments relatius a la redacció de la memòria.

I sens dubte al meu tutor, Jordi José, que amb la seva exigència ha aconseguit rendibilitzar al màxim el meu esforç. Sense la seva guia, aquest vaixell difícilment hagués trobat port.

Gràcies de tot cor a tots vosaltres.





Glossari

G	constant gravitacional newtoniana
c	velocitat de la llum
\hbar	constant reduïda de Planck
l_p	longitud de Planck
M_p	massa de Planck
t_p	temps de Planck
t_0	temps de Hubble
t_e	temps anterior al temps de Hubble
E_p	energia de Planck
k	constant de Boltzmann
L	lluminositat estel·lar mitjana
r	radi
J	intensitat total de llum estel·lar
t	temps
r	punt arbitrari en l'espai-temps
λ	longitud d'ona
λ_{rec}	longitud d'ona observada
λ_{em}	longitud d'ona en repòs
z	desplaçament de la longitud d'ona
$\mathcal{E}_{\gamma,0}$	densitat d'energia actual del CMB
$n_{\gamma,0}$	densitat numèrica de fotons CMB
$T(\theta,\phi)$	temperatura del CMB en un punt arbitrari
a	factor d'escala còsmica
$E_{\text{mean}}(t)$	energia mitjana per fotó
p	protó
n	neutró
$D, {}^2\text{H}$	deuteri
Y_p	relació entre la densitat de massa d'heli i la densitat total de massa bariònica
Q_n	energia en repòs d'un neutró
e^-	electró
e^+	positró
ν_e	neutrí
$\bar{\nu}_e$	antineutrí
γ	fotó
H	hidrogen
${}^3\text{H}$	triti
${}^3\text{He}$	isòtop de l'heli (3 nucleons)
${}^4\text{He}$	isòtop de l'heli (4 nucleons)
${}^6\text{Li}$	isòtop del liti (6 nucleons)
${}^7\text{Li}$	isòtop del liti (7 nucleons)

${}^7\text{Be}$	isòtop del beril·li (7 nucleons)
${}^8\text{Be}$	isòtop del beril·li (8 nucleons)
$\frac{\dot{a}}{a}$	grau d'expansió
ρ	densitat
R_0	radi de curvatura
κ	constant de curvatura
ε	densitat d'energia
H_0	taxa d'expansió actual
U	constant d'integració
r_s	radi d'una esfera
η	relació barió-fotó
(r, θ, φ)	coordenades per definir la distància d'un observador fins a una galàxia
Ω	paràmetre de densitat
Ω_R	paràmetre de densitat de la radiació
Ω_M	paràmetre de densitat de la matèria
$\Omega_{\text{CMB},0}$	paràmetre de densitat del CMB
Λ	constant cosmològica
\mathcal{E}_w	densitat d'energia no relativista
\mathcal{E}_m	densitat d'energia relativista
\mathcal{E}_r	densitat d'energia de la radiació
\mathcal{E}_n	densitat d'energia dels neutrins
\mathcal{E}_{CMB}	densitat actual del CMB
v	velocitat relativa de la galàxia
d	distància d'un objecte respecte a la nostra galàxia
a	diàmetre angular de la galàxia
s	diàmetre real de la galàxia
q	paràmetre de desacceleració
$a_{m\Lambda}$	relació entre la densitat d'energia Λ i la densitat d'energia en la matèria
$a_{r\Lambda}$	relació entre la densitat d'energia de radiació i la d'energia en la matèria
x	posicions de les galàxies estudiades respecte a la nostra
y	velocitats (v) corresponents a les galàxies estudiades
y'	menció de y a l'hora de fer la relació lineal
N	nombre de mesures
A	pendent de la recta de regressió lineal
B	terme independent
σ_A	error del pendent
σ_B	error del terme independent
$t_{\alpha/2; N-2}$	paràmetre estadístic
S_x^2	variància d' x
\bar{X}	valor mig de les x
S_{ey}	paràmetre utilitzat en l'estudi d'errors
r	coeficient de correlació lineal
\mathcal{E}_y	propagació de l'error de la constant de Hubble
\mathcal{E}_{x_i}	error de cada valor individual
t_0	edat de l'Univers
H_0	constant de Hubble
δt_0	error de l'edat de l'Univers
δH_0	error de la constant de Hubble

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	V
GLOSSARI	VII
1. PREFACI	1
1.1. Origen del treball	1
1.2. Motivació.....	2
1.3. Requeriments previs.....	2
2. INTRODUCCIÓ	5
2.1. Objectius del treball	5
2.2. Abast del treball	5
3. COSMOLOGIA: OBSERVACIONS FONAMENTALS	7
3.1. Paradoxa d'Olbers.....	8
3.2. Principi cosmològic	10
3.3. Evidències experimentals	11
3.3.1. Expansió de l'Univers.....	12
3.3.2. Radiació de fons còsmic	14
3.3.3. Nucleosíntesi primordial	17
4. MODELS COSMOLÒGICS	26
4.1. Einstein	26
4.1.1. Teoria de la relativitat especial	27
4.1.2. Teoria de la relativitat general	28
4.2. Hubble	30
4.2.1. Classificació morfològica de les galàxies	34
4.3. Alexander Friedman.....	35
4.4. Georges Lemaître.....	36
5. TEORIA DEL BIG BANG	38
5.1. Curvatura de l'Univers	40

5.2. Densitat crítica	43
5.3. Models d'Univers.....	45
6. CONSTANT DE HUBBLE I EDAT DE L'UNIVERS	48
6.1. Determinació de les velocitats i distàncies de recessió	50
7. ESTUDI DE LA NUCLEOSÍNTESI PRIMORDIAL	70
7.1. La composició química de l'Univers primitiu	73
7.1.1. Fluxos de les reaccions nuclears en diferents instants.....	82
8. ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL	105
CONCLUSIONS	107
PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA	109
BIBLIOGRAFIA	113
ANNEX A: IMATGES DE LES GALÀXIES	119
ANNEX B: ESPECTRES DE LES GALÀXIES	128
ANNEX C: DETERMINACIÓ DE LA VELOCITAT I EL DESPLAÇAMENT DE CADA GALÀXIA EN ELS TRES ESTUDIS REALITZATS	151
ANNEX D: ESTUDI D'ERRORS PER MÍNIMS QUADRATS	217
ANNEX E: ESTUDI NUCLEOSÍNTESI PRIMORDIAL	226

1. Prefaci

La passió cap a les dues branques principals d'aquest projecte, l'enginyeria i l'astrofísica, han estat el principal motor d'aquest treball. La metodologia seguida s'ha basat en els coneixements adquirits al llarg dels estudis de Grau, permetent relacionar-los i aprofundir en ells. No obstant això, donada la focalització del treball en un camp científic concret, on les eines de partida eren molt bàsiques, ha estat necessari destinar gran part del temps a l'adquisició de nous coneixements, imprescindibles per al desenvolupament de les diferents tasques realitzades (des de programació en FORTRAN, a coneixements bàsics de física nuclear o cosmologia).

1.1. Origen del treball

L'auge de la recerca científica, fa que els avenços tecnològics i científics creixin de manera exponencial en els darrers anys. En tenim exemples en els descobriments assolits en diversos camps, com podria ser el de l'astrofísica. Podem afirmar que les hipòtesis i revelacions relatives a l'estudi de l'Univers, així com la concepció de la tecnologia necessària per assolir-les han estat, i segueixen sent, elements crítics en el progrés de la humanitat.

L'invent del telescopi, de diverses tècniques observacionals i de la seva millora en són clars exemples. L'estudi realitzat sobre l'expansió de l'Univers ha requerit l'accés a fotografies de galàxies de gran resolució, que requereixen l'ús de telescopis d'altres prestacions. Així doncs, l'anàlisi dels espectres d'aquestes galàxies ha estat possible gràcies al desenvolupament dels actuals models de telescopi, que han evolucionat de forma extraordinària a partir dels primers prototipus, i als que s'han pogut acoblar càmeres digitals i espectroscopis. D'altra banda, l'ús dels satèl·lits –tant estès al llarg de les darreres dècades– ha permès crear un mapa del fons de microones de l'Univers primitiu, en constant perfeccionament, que ha resultat essencial com a font d'informació relativa a les primeres etapes de l'Univers. Aquesta informació ha estat necessària per dur a terme la part experimental/numèrica d'aquest treball.

També els avenços en el càlcul computacional han estat imprescindibles per a la darrera part del projecte. Mitjançant programari informàtic, desenvolupat en part al Grup d'Astronomia i Astrofísica de la UPC, s'han obtingut les diverses simulacions de les quals es deriven gran part de les conclusions del projecte.

Gràcies a la disposició dels recursos esmentats així com de la informació teòrica necessària per adquirir els coneixements previs ha estat possible iniciar aquesta recerca. No obstant això, cal tenir en compte altres característiques de l'àmbit en el qual s'està treballant, com poden ser també les dificultats

derivades de l'enorme quantitat de fenòmens desconeguts i qüestions per esbrinar. No oblidem que, en el camp de l'astrofísica, la quantitat de preguntes sense resposta és infinitament superior al coneixement de l'Univers de què es disposa actualment.

1.2. Motivació

La passió per l'Astrofísica i, en general, tot allò relacionat amb l'Univers ha estat la principal motivació per a la realització del treball. La combinació dels coneixements i metodologies pròpies amb les de l'àmbit de l'Enginyeria, han estat claus per a poder assolir els resultats del projecte endegat.

La inquietud per poder combinar els dos vessants ha estat present des d'abans dels inicis de la formació universitària, derivant en l'objectiu de donar sentit a la formació en l'àmbit de l'Enginyeria, prenent la direcció d'uns estudis posteriors relacionats directament amb el camp de l'Astrofísica. Així doncs, s'ha valorat de forma molt positiva l'opció de poder-s'hi introduir basant el Treball de Fi de Grau en el Big Bang i la formulació de l'Univers primitiu.

Cal tenir en compte però, que l'Astrofísica és una disciplina molt àmplia, que engloba una gran quantitat de temàtiques. El naixement de l'Univers i les diferents hipòtesis sobre aquest s'ha considerat un dels temes més atractius per a poder-hi aprofundir, després d'haver cursat les matèries del Grau en Enginyeria Mecànica, a més de centrar el principal interès dins del camp de l'Astrofísica.

1.3. Requeriments previs

Per a poder realitzar aquest treball assolint tots els objectius han estat necessaris una sèrie de requeriments previs. Al llarg del Grau, s'han cursat assignatures bàsiques per a poder endegar les bases del treball. Tot i això, el vessant del treball centrat en un àmbit molt específic de la ciència i amb molts conceptes no treballats a la Universitat, ha requerit invertir una gran quantitat de temps de preparació.

Primerament, s'ha realitzat una àmplia recerca d'informació sobre la història de l'Univers, per tal de comprendre i assolir els coneixements que engloba aquest projecte. Un cop definits, s'ha començat l'estudi de cada una de les etapes de l'Univers primitiu per aconseguir consolidar els conceptes i, sobretot, per saber diferenciar quines de les hipòtesis que han fet els grans científics al llarg de la història són considerades vàlides i quines són encara una incògnita. Així doncs, aquest estudi ha permès conèixer en detall la visió actual de l'Univers primitiu.

Atès que durant la investigació de la història de l'Univers han aparegut molts conceptes i fenòmens, s'ha considerat necessari elaborar uns apunts i un glossari per a la seva comprensió. Aquesta documentació també s'ha incorporat a la memòria.

Pel que fa a la part conceptual, tant la comprensió i domini del llenguatge informàtic que utilitza el programa emprat, com un estudi acurat del funcionament del programa, han estat necessaris per a poder optimitzar els resultats obtinguts.



2. Introducció

2.1. Objectius del treball

L'objectiu principal del treball, és el d'adquirir i comprovar experimentalment una sèrie de coneixements i hipòtesis relatives a l'Univers que s'han anat formulant al llarg de la història. Aquest objectiu ha estat desgranat en diferents objectius secundaris als que s'ha fet front amb diferents metodologies.

En primer lloc, s'ha realitzat un estudi amb la finalitat d'esbrinar l'edat aproximada de l'Univers. Per a dur a terme aquesta aproximació, s'ha utilitzat la constant de Hubble (H_0), també anomenada constant de proporcionalitat. Aquesta constant correspon a la velocitat d'expansió actual de l'Univers; a través d'ella, i efectuant una sèrie de càlculs, és possible estimar l'edat de l'Univers. Per a realitzar aquests càlculs ha estat necessari començar l'estudi analitzant un conjunt d'imatges i espectres de diferents galàxies. Tota la metodologia seguida a continuació ha partit de les dades obtingudes a partir d'aquesta anàlisi. A l'hora d'obtenir el resultat final, s'ha dut a terme una optimització dels resultats obtinguts, intentant minimitzar els errors de càlcul.

En segon lloc s'ha dut a terme un estudi acurat de l'etapa de la nucleosíntesi de l'Univers primitiu amb la finalitat d'investigar l'evolució dels elements que es formen durant aquest període. Així doncs, s'ha procedit al seu estudi a través d'un programa computacional anomenat 'nucleo' que, entre d'altres, proporciona, en diferents instants, el flux de les reaccions necessàries per crear els primers elements de la taula periòdica i els valors de les seves abundàncies. Tanmateix, aquest permet fer modificacions en algunes variables per tal de realitzar diverses investigacions de l'evolució dels elements en diferents escenaris.

2.2. Abast del treball

Per tal d'aconseguir els objectius proposats, amb la finalitat de partir amb els nous coneixements consolidats i, així doncs, poder realitzar tots els propòsits amb la menor dificultat possible, s'ha seguit una metodologia que ha comportat una gran part de la durada total del projecte.

Els primers coneixements adquirits fan referència a la història del nostre Univers de forma general, tant de les diferents etapes en què s'ha dividit -algunes estipulades- com dels diferents fenòmens físics i teories demostrades i les hipòtesis actuals amb les quals s'intenta trobar resposta a les grans preguntes de la humanitat. Una vegada determinat aquest marc general s'ha concretat la recerca

d'informació en els àmbits específics que requeria el treball. Aquesta recerca i adquisició de nous coneixements han conformat el primer bloc del treball.

El segon bloc del treball, de caire experimental, està estructurat en dues parts diferenciades. La primera part es focalitza en l'obtenció i estudi de les imatges i dades de les galàxies amb les què s'ha treballat. La comprensió dels fonaments i l'evolució al llarg dels darrers anys del marc tecnològic que ha permès proporcionar aquestes imatges ha estat essencial en el procés d'estudi. Al final d'aquest procés, ha estat possible identificar determinats fenòmens físics, com ara l'expansió de l'Univers, que han permès quantificar una sèrie de valors amb els quals s'ha procedit a calcular la constant de Hubble i l'edat de l'Univers.

Per a dur a terme la part final del segon bloc del treball, ha estat necessari l'aprenentatge bàsic d'un llenguatge de programació, anomenat FORTRAN, per tal de poder adaptar un programa a les necessitats del nostre treball. D'altra banda, també ha estat necessària arribar a un nivell de comprensió més acurat de la nucleosíntesi, tot relacionant els fenòmens associats a aquesta etapa amb altres la resta d'etapes estudiades.

3. Cosmologia: observacions fonamentals

La cosmologia, la més antiga de les ciències, és l'estudi de l'estructura de l'Univers en la seva totalitat, és a dir, a gran escala. L'única manera d'aconseguir-ho donada la riquesa i complexitat de l'Univers és condensar la seva història per a simplificar-la. Així doncs, la seva estructura amb una ampla gamma d'escala -com les que caldria considerar per estudiar les òrbites dels planetes al voltant de les estrelles, les galàxies que formen aquestes, els cúmuls a causa de l'atracció gravitacional de les galàxies i els supercúmuls formats per aquests a mesura que l'Univers evoluciona- es suavitza sovint per aconseguir la simplificació a gran escala única. Pot resultar difícil pensar en una ciència que considera galàxies com a objectes petits com a un camí per resoldre les preocupacions fonamentals de la humanitat, però així és. La cosmologia descriu el passat, explica el present i predica el futur de l'Univers.

Quan es treballa en aquest àmbit, és d'esperar que les unitats del SI estàndard, el metre, el kilogram i el segon, no siguin convenientes. És per això que per tractar amb grans distàncies s'ha adoptat unes noves unitats desenvolupades pels astrònoms, com per exemple la Unitat Astronòmica, equivalent a la distància mitjana entre la Terra i el Sol, $1AU = 1,5 \times 10^{11}m$. D'altra banda, per mesurar distàncies interestel·lars s'utilitza el parsec, equivalent a $3,1 \times 10^{16}m$ i, en el cas de longituds intergalàctiques, s'utilitza el megaparsec ($1Mpc = 10^6pc = 3,1 \times 10^{22}m$). Pel que fa a altres magnituds, com la massa o la lluminositat - la velocitat que irradia l'energia en forma de llum-, els astrònoms recorren a la massa la lluminositat del Sol, que corresponen a $2 \times 10^{30}kg$ i $3,8 \times 10^{26}W$ respectivament. Quant al temps, els astrònoms solien utilitzar com a unitat bàsica la durada que tarda la Terra a donar una volta al voltant del Sol (l'any). És obvi que aquesta mesura, en el context cosmològic, segueix sent un període curt i, per això s'utilitzen els 'Gyr' que són equivalents a 109 anys.

Tanmateix, la cosmologia no només tracta a gran escala, sinó que també engloba aquells fets minúsculs que van tenir lloc al principi de la seva història mentre transcorrien alguns fenòmens interessants de la física de partícules. Per això els científics submergits en la cosmologia van veure necessari introduir-hi també unitats pròpies. Actualment la unitat d'energia del SI és el 'joule' encara que els físics teòrics tendeixen a mesurar-ho en electronvolts.

Tot i que aquests sistemes d'unitats faciliten considerablement el llenguatge matemàtic, es va idear un sistema d'unitats més universal, anomenat sistema de Planck (1), basat en la constant gravitacional newtoniana (G), la velocitat de la llum (c) i la constant reduïda de Planck ($\hbar = h/(2\pi)$). Combinant aquests termes s'obté la longitud, massa i temps de Planck:

$$l_p = \left(\frac{G\hbar}{c^3} \right)^{1/2} = 1,6 \times 10^{-35}m \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$M_P = \left(\frac{\hbar c}{G}\right)^{1/2} = 2,2 \times 10^{-8} \text{ kg} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$t_P = \left(\frac{G \hbar}{c^5}\right)^{1/2} = 5,4 \times 10^{-44} \text{ s} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Si ara s'utilitza la relació d'Einstein entre massa i energia (2), l'energia de Planck queda definida de la següent manera:

$$E_P = M_P c^2 = 1,2 \times 10^{28} \text{ eV} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

La temperatura de Planck (3) es mostra a través de la següent expressió en introduir la constant de Boltzmann (k):

$$T_P = \frac{E_P}{k} = 1,4 \times 10^{32} \text{ K} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

En resum, la cosmologia es basa en les darreres observacions de l'Univers que ens envolta. La metodologia que emprava, es fonamenta en les observacions -tot i que incompletes- des dels seus inicis. Van ser els egipcis qui a través dels seus estudis van desenvolupar un model erroni de l'Univers en què la Terra era plana. Més endavant, els grecs van concloure que la Terra i la Lluna eren esfèriques, que el Sol està molt més lluny de la Terra que la Lluna, i que la distància de la Terra a les estrelles és molt més gran que el mateix diàmetre d'aquesta; tot gràcies a observacions força més precises. No obstant això, tots els models cosmològics que no puguin ser validats a partir de les observacions, hauran de ser recolzats per evidències que es mantenen per especulacions.

3.1. Paradoxa d'Olbers

Heinrich Olbers va escriure un document científic l'any 1826 conegut com a Paradoxa d'Olbers (4), tot i que altres científics ja hi havien fet referència amb anterioritat. Olbers afirma que el cel nocturn d'un univers estàtic i infinit hauria de ser totalment brillant sense regions fosques. La majoria de nosaltres simplement dona per fet que el dia és brillant i la nit fosca però també és interessant qüestionar-se el motiu i poder trobar-hi l'explicació.

Va ser al 1576 quan Thomas Digges (5) juntament amb astrònoms postcopernicans, va adoptar un model en què les estrelles eren grans esferes brillants disperses per l'espai infinit. Era una evolució del model cosmològic de Copèrnic, en què requeria que la distància a les estrelles fos més gran que una unitat astronòmica. També es tractava d'un sistema en què les estrelles podien estar a diferents distàncies del Sol i no unides a una esfera celeste giratòria.

Aquesta paradoxa es centra en la lluminositat del cel nocturn. Una possible manera d'analitzar aquesta lluminositat, podria ser a partir de l'estudi matemàtic d'un model. Així doncs, es calcula com de brillant s'espera que sigui el cel nocturn en un univers infinit. Sigui 'n' la densitat numèrica mitjana de les estrelles en l'Univers i 'L' la lluminositat estel·lar mitjana, el flux que rep la Terra des d'una estrella a una distància 'r' i amb una lluminositat 'L', quedaria definida per l'expressió (Eq. 3.6).

$$f(r) = \frac{L}{4\pi r^2} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Si ara es considera una capa esfèrica fina d'estrelles, centrada respecte la Terra, amb un radi 'r' i un gruix 'dr', la intensitat de radiació de les estrelles es defineix mitjançant la fórmula (Eq. 3.7).

$$dJ(r) = \frac{L}{4\pi r^2} n r^2 dr = \frac{nL}{4\pi} dr \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Així doncs, com que la intensitat total de llum de les estrelles depèn del gruix i no de la distància respecte la Terra es pot calcular la intensitat total de llum estel·lar a l'Univers.

$$J = \int_{r=0}^{\infty} dJ = \frac{nL}{4\pi} \int_0^{\infty} dr = \infty \quad (\text{Eq. 3.8})$$

D'aquesta forma s'ha demostrat que el cel nocturn és infinitament brillant. És obvi que aquesta conclusió no té sentit i, per tant, alguna de les suposicions de partida és errònia. Al segle XX, Albert Einstein va demostrar la possibilitat que l'Univers no obeís les lleis de la geometria euclidiana (6) i, si aquest està en expansió o contracció, la llum de les fonts llunyanes experimentarien un desplaçament al vermell, en el cas d'energies fotòniques més baixes, o cap al blau si es tractés d'energies fotòniques més altes. Així doncs, el model de l'Univers euclidià infinitament gran de Thomas Digges i els seus successors no podia ser correcte.

Un cop estudiats tots els escenaris que hi ha hagut al llarg de la història intentant justificar una qüestió tan senzilla a priori, finalment es van trobar diverses explicacions per aquesta paradoxa; en totes, es suggereix que l'Univers no és infinit, ni ha sigut sempre igual, ni les estrelles que l'ocupen es distribueixen uniformement. En conclusió, hi ha dos possibles explicacions: la primera és que si l'Univers existeix des d'una quantitat finita de temps, només la llum d'una quantitat finita d'estrelles ha tingut temps d'arribar; alternativament es pot considerar el desplaçament cap al vermell de la llum que ens arriba de les estrelles més llunyanes, a causa de l'expansió de l'Univers, disminueix la intensitat de la llum, tal com Einstein havia demostrat.

3.2. Principi cosmològic

Un univers isotòpic és aquell que es caracteritza per tenir les mateixes propietats físiques independentment de la direcció en què són examinades i, si també està format per una estructura uniforme, tindrà la qualitat d'homogeneïtat. Aquest és el cas del nostre Univers, que a gran escala presenta aquestes dues característiques. La isotopia de l'Univers no és immediatament evident ja que, a petites escales, presenta un grau important d'anisotropia. Per exemple, si es considera una esfera de 3Mpc de diàmetre, la lluminositat produïda per aquest petit cúmul equivalent a unes 40 galàxies, serà molt diferent en funció de la direcció des de la qual es mesuri. No és fins que s'arriba a escales considerablement més grans, aproximadament 100 Mpc, que l'Univers es pot considerar isotòpic.

En el cas d'estudiar la densitat en un diàmetre de 3 metres, s'obté un valor molt més petit que el de l'Univers en el seu conjunt, així doncs, amb el segon concepte característic en l'estructura de l'Univers, l'homogeneïtat, passa el mateix. No obstant això, pel que s'ha pogut conèixer i observar, l'Univers resulta ser bastant homogeni. Així doncs, mentre la isotopia implica la irrellevància en examinar les propietats físiques en diferents direccions, l'homogeneïtat comporta la mateixa naturalesa en tota l'estructura de l'Univers.

L'astrònom britànic Edward Arthur Milne, juntament amb altres cosmòlegs moderns, van postular l'any 1933 el principi cosmològic (7). Aquest principi afirma que no hi ha res especial en la nostra ubicació de l'Univers respecte a qualsevol altra, per tant, donat que tots els punts de l'Univers són isotòpics i aquest principi afirma que qualsevol regió de l'Univers és la mateixa, s'al·lega que l'Univers es isotòpic en el seu conjunt.

El principi cosmològic proporciona una solució simple a les equacions de la teoria de la relativitat general -explicada posteriorment- i té el nom alternatiu de 'principi copernicà' com a homenatge a Copèrnic, que va assenyalar que la Terra no és el centre de l'Univers. Més aviat, no hi ha cap centre per a l'Univers, tampoc el Sol és el centre del Sistema Solar ni la nostra galàxia del Grup Local. Aquest principi va més enllà, no és tan simple com afirmar que l'Univers té la mateixa aparença en totes parts.

Per una banda, els objectes més llunyans estan compostos per les mateixes substàncies fonamentals que trobem a la Terra i el que la rodeja. I, per altra banda, les lleis físiques que experimentem a grans distàncies no canvien. De fet, es pot argumentar que els aspectes més importants del principi cosmològic es relacionen amb la uniformitat de les lleis físiques.

No obstant això, si es pensa en la possibilitat que l'Univers no sigui isotòpic en la seva distribució de la matèria, no es podria esperar entendre un univers en què les lleis físiques variessin segons la regió que s'observés. De fet, si els mateixos elements tinguessin propietats diferents en algun altre lloc, es desconxeria gran part de la informació actual sobre les galàxies o quàsars distants. Ara bé, com molts postulats científics, aquesta possibilitat no és demostrable del tot i, per tant, passa a ser una suposició sobre la naturalesa de l'Univers.

S'ha parlat que el principi cosmològic fa referència a un Univers homogeni, però en cap moment s'ha senyalitzat la necessitat de què sigui estàtic o immutable. Tot i això, tenint en compte el temps es va postular un principi més restrictiu, conegut com a principi cosmològic perfecte. Aquest principi establia que, en cada moment, l'Univers havia de ser el mateix en cada punt de l'espai. Aquesta idea causa fou refutada ja que les observacions dutes a terme posteriorment mostren un univers amb punts que evolucionen en el temps.

3.3. Evidències experimentals

Fins al moment hi ha hagut moltes maneres diferents d'entendre l'Univers i, encara en l'actualitat, existeixen moltes hipòtesis i teories, algunes contradictòries, que podrien ajudar a entendre'l completament. Tot el que es pot apreciar de forma física, és a dir, la totalitat del continu espai-temps en què ens trobem, juntament amb la matèria i energia que existeix, s'entén com a Univers.

Actualment, els professionals en aquest camp comparteixen la idea de l'existència d'un període de l'Univers que no es pot observar, és a dir, es considera impossible l'observació completa de l'Univers. Així doncs, es duu a terme a gran escala la seva primera divisió; el conegut i el visible -també anomenat observable-. Aquesta primera divisió implica una major dificultat a l'hora d'investigar l'inici de la història de l'Univers i el coneixement anterior a la seva creació. Tot i això, s'ha realitzat una distribució de les diferents etapes, algunes purament teòriques, que hi ha hagut des del seu origen.

El factor més important en l'evolució de la cosmologia han estat les observacions realitzades al llarg dels anys. L'aspecte més important d'aquestes és la velocitat absoluta de la llum, ja que ens permet mirar cap al passat. A una distància de 10 mil milions d'anys llum, observem galàxies en estat evolutiu quan l'Univers tenia només un terç de la seva edat actual. Això implica que només es poden observar punts en l'espai-temps que segueixin la següent expressió (con de llum cap enrere).

$$|r| = c(t_0 - t)$$

(Eq. 3.9)

El fet que les nostres observacions astronòmiques estiguin limitades a fonts que es troben a un punt arbitrari (r, t) en l'espai-temps, implica que les nostres possibilitats d'observar l'Univers són limitades. Si passa algun fenomen important molt lluny, a causa del nostre 'petit' camp de visió de l'Univers, no ho podrem observar fins que ens arribi al nostre abast. En els darrers anys, hi ha hagut avenços molt significatius pel que fa a la cosmologia -en gran part degut a la nova tecnologia- que han permès realitzar observacions gràcies a aparells molt complexos. Però també altres observacions senzilles han estat molt rellevants. A continuació es fa referència i s'expliquen les que es consideren més destacades.

3.3.1. Expansió de l'Univers

Durant molt temps la humanitat ha intentat comprendre la història de l'Univers mitjançant els diferents sentits que disposa, l'experiència que s'ha anat adquirint i la capacitat de raonar. La diferència entre els cosmòlegs antics i els científics moderns és el progrés que s'ha experimentat, és a dir, les eines amb les quals s'estudia la cosmologia són cada vegada més complexes i precises, l'experiència s'ha acumulat i registrat a través de generacions i la idealització de llenguatges matemàtics que sistematitzen el raonament. Tot això, ha permès fer un dels grans descobriments de la història, l'Univers en expansió.

La major part del coneixement de l'Univers a gran escala, s'estableix a partir de la informació que arriba en forma de radiació electromagnètica. Cada detall de la interpretació d'aquesta informació aporta un aprenentatge molt important per tal de poder seguir avançant en les investigacions. L'altra part del coneixement fa referència a aquella sèrie d'objectes que s'han pogut fer arribar a la Terra de l'exterior, com ara les mostres de roques lunars o els meteorits que han col·lidit amb el nostre planeta.

La llum, o radiació electromagnètica, es pot trobar en una gamma completa d'energies que constitueix l'espectre electromagnètic. En aquest, s'hi troba l'anomenada llum visible, és a dir, l'observable a ull nu. Ara bé, el coneixement complet d'un objecte astronòmic requereix l'observació en la totalitat de l'espectre i, també, de la mesura de la quantitat d'energia lluminosa en cada longitud d'ona o freqüència, aconseguint així una informació el més completa possible.

Quan un astrònom compara l'espectre d'una estrella o una galàxia amb els estàndards de laboratori, les línies d'emissió o d'absorció associades a molècules i elements individuals normalment no es troben a la mateixa localització que la longitud d'ona proporcionada per aquests estàndards. Actualment, donat que es considera que hi ha uns coneixements dels elements relativament extensos, es descarta la hipòtesi d'una existència de nous elements. Aquesta discrepància s'explica majoritàriament a través

de l'efecte Doppler, ja que, és el responsable del moviment relatiu de la font de la llum i del nostre detector. Com a conseqüència, s'observa un canvi global en l'espectre, tant per longituds d'ona més llargues i energies inferiors, com per longituds d'ona més curtes i energies superiors. Aquesta discrepància s'explica per un canvi global en l'espectre, tant per longituds d'ona més llargues i energies inferiors, com per longituds d'ona més curtes i energies superiors. Atès que l'espai relatiu entre les línies d'un determinat element no canvia mai i el desplaçament al vermell o al blau es troba en tot l'espectre, és possible identificar elements en aquest desplaçament comparant-ho amb les mesures fetes en els laboratoris terrestres. Els canvis Doppler es detecten fàcilment per a objectes propers i són una font molt important d'informació sobre els moviments de l'Univers. La fórmula de l'efecte Doppler no relativista (8) és la següent.

$$z = \frac{\lambda_{rec} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} = \frac{v}{c} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

El desplaçament en la longitud d'ona fa referència a 'z' i proporciona una quantitat positiva quan la llum es desplaça cap al vermell, és a dir, quan λ_{rec} és més gran que λ_{em} , i negatiu quan es desprèn. S'ha de tenir en compte que cal modificar aquesta equació quan es tracti de velocitat relativistes.

Molts objectes mostren un espectre que proporciona un canvi tant cap al vermell com cap al blau, això indica que una part d'aquest objecte s'acosta i una part retrocedeix. És per això que aquests tipus d'espectres revelen que l'objecte gira, i fins i tot, permet conèixer la seva velocitat de rotació. En alguns casos l'espectre d'una estrella es desplaça cap endavant i cap enrere en un interval regular, fet que indica que l'estrella es troba en òrbita al voltant d'un objecte difícil d'observar, sigui per la lluminositat d'un objecte proper o, fins i tot, per la presència d'un forat negre. L'efecte Doppler és, sense dubte, un dels fenòmens més importants en l'astronomia.

Una altra font que provoca el canvi espectral és el desplaçament gravitacional. El desplaçament gravitacional cap al vermell es produeix quan els fotons surten d'un lloc amb una càrrega gravitacional molt forta fins a un més feble, en canvi, quan és a la inversa es produeix un desplaçament gravitacional cap al blau. Donat que la Terra proporciona una força de gravetat feble en comparació a la majoria d'objectes que componen l'Univers, qualsevol canvi gravitatori observable seria un desplaçament al vermell. Però, aquest fenomen, no és apreciable si no es tracta de cossos com ara estrelles de neutrons o nanes blanques. El desplaçament al vermell explicat per Karl Schwarzschild (9), és un exemple de com la curvatura d'espai-temps pot afectar a la llum mentre es desplaça pel fet que l'Univers no és estàtic ni estacionari, sinó que és un espai-temps dinàmic i canviant.

3.3.2. Radiació de fons còsmic

Els físics Ralph Alpher, George Gamow i Robert Herman van postular l'existència del fons còsmic de microones (CMB) al 1948 (10). Va ser quasi vint anys més tard quan dos astrònoms anomenats Arno Penzias i Robert Wilson (11), treballaven amb una antena antiga de microones i es van adonar que aquesta detectava un soroll de fons en totes les direccions interferint amb l'estudi que estaven realitzant. Van intentar solucionar-ho però res resultava ser el problema. Així doncs, van concloure que aquest soroll era informació de l'origen de l'Univers tal com s'havia predit. En aquest moment, es va validar una de les hipòtesis més revolucionària i exitosa per corroborar la teoria del Big Bang.

Henrich Olbers no hauria formulat la Paradoxa d'Olbers si hagués pogut observar a longituds d'ona mil·limètriques, ja que, la major part de la llum de l'Univers no ens prové de les estrelles, sinó que ens arriba del fons còsmic de microones. En realitat, el cel que coneixia és uniformement brillant a una temperatura de 2,725 K (12). La densitat d'energia actual del CMB és la següent.

$$\varepsilon_{\gamma,0} = 0,261 \text{MeV}m^{-3} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

En canvi, tenint en compte que l'energia per fotó CMB és petita ($6,34 \times 10^{-4} \text{eV}$), la densitat numèrica de fotons CMB en l'Univers té el següent valor.

$$n_{\gamma,0} = 4,11 \times 10^8 m^{-3} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

L'energia actual per fotó CMB, aproximadament de $6 \times 10^{-4} \text{eV}$, és petita en comparació amb l'energia necessària per trencar un nucli atòmic (1MeV) o fins i tot per ionitzar un àtom ($\sim 10 \text{eV}$). Tanmateix, l'energia fotònica mitjana és comparable a l'energia de vibració o rotació d'una molècula petita com la de l'aigua. Així doncs, els fotons CMB poden lliscar durant més de 13 mil milions d'anys a través d'un mitjà tènue i, posteriorment, ser absorbits per una molècula d'aigua a l'atmosfera. És més, la radiació amb una longitud d'ona, aproximadament més curta que 3 cm, és fortament absorbida per molècules d' H_2O . L'espectre de la longitud d'ona CMB assoleix el seu pic quan λ té un valor al voltant de 2 mm. A l'hora de realitzar la seva mesura, una bona opció pot ser des del Pol Sud o des d'un globus a gran altitud, on es manté una baixa humitat atmosfèrica gràcies a les baixes temperatures. Tot i això, la millor opció és fer-ho des d'altituds per sobre de l'atmosfera humida de la Terra.

En un univers on hagi tingut lloc aquesta gran explosió, una radiació còsmica de fons sorgeix de manera natural sempre que la partícula inicial tingués una gran temperatura i densitat. Suposant que la temperatura de l'Univers primitiu fos molt alta, la seva matèria bariònica estaria totalment ionitzada i

els electrons lliures farien que fos opac. Per tant, la radiació d'un cos negre que contempla l'Univers actualment, s'explica com una relíquia de l'època en què l'Univers era prou calent i dens per ser opac. A una temperatura de 3000 °C els fotons van poder desplaçar-se i, és d'aquest precís moment del què s'obté, mitjançant el satèl·lit Cosmic Background Explorer (COBE) (12), el primer mapa detallat del cel i el valor de la temperatura actual de l'Univers: 2,725 K. Aquest valor va ser aproximadament 3,5 K més alt del que s'esperava.

El satèl·lit COBE estava comprès per tres instruments diferents (13). El primer fa referència a l'Experiment Difús per al Fons d'Infrarojos (DIRBE), dissenyat amb la finalitat de mesurar la radiació en el rang $0,001 \text{ mm} < \lambda < 0,24 \text{ mm}$, ja que, en aquestes longituds d'ona principalment es detectava estrelles i pols de la nostra galàxia. El segon, l'Espectrofotòmetre Absolut de l'Infraroig Llunyà (FIRAS), mesurava l'espectre CMB en el rang $0,1\text{mm} < \lambda < 10 \text{ mm}$. Per últim, el tercer instrument, anomenat Radiòmetre Diferencial de Microones (DMR), s'ocupava de realitzar els mapes del cel en tres longituds d'ona diferents; 3,3, 5,7, 9,6 mm. En la Figura 3.1 s'observa el primer resultat en què l'espectre del fons còsmic de microones tendeix al d'un cos negre ideal en qualsevol posició angular en el cel.

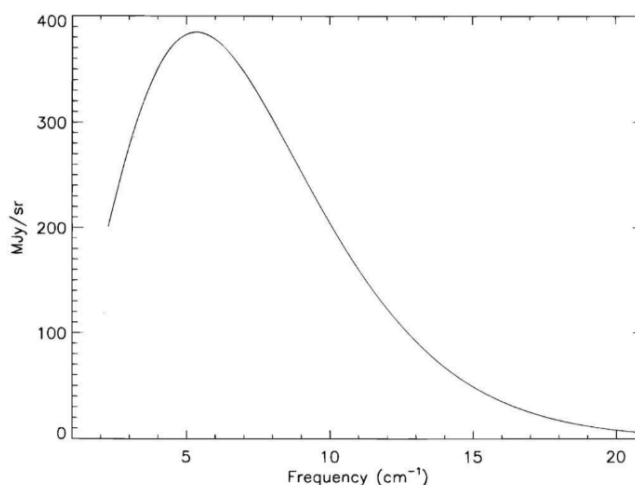


Figura 3.1. L'espectre del fons còsmic de microones, mesurat per l'instrument FIRAS al satèl·lit COBE. Les incerteses en la mesura són menors que el gruix de la línia (14).

Encara que cada punt del cel té un espectre de cos negre, en cada meitat es mostra un desplaçament diferent. A temperatures altes es tracta d'un desplaçament cap al blau i a temperatures més baixes cap al vermell. Aquest fenomen, mostrat pel segon resultat, és conseqüència del moviment net del satèl·lit COBE en relació a la isotopia donada per CMB. Donada la temperatura del CMB en un punt del cel, $T(\theta, \phi)$, fent la mitjana en totes les ubicacions s'obté l'expressió de la temperatura mitjana:

$$\langle T \rangle = \frac{1}{4\pi} \int T(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi = 2,725\text{K} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Aquesta última expressió correspon al tercer resultat que, juntament amb el segon, es comproven a la Figura 3.2. D'aquest últim també es va extreure, entre d'altres, la fluctuació de temperatura adimensional en un punt donat del cel.

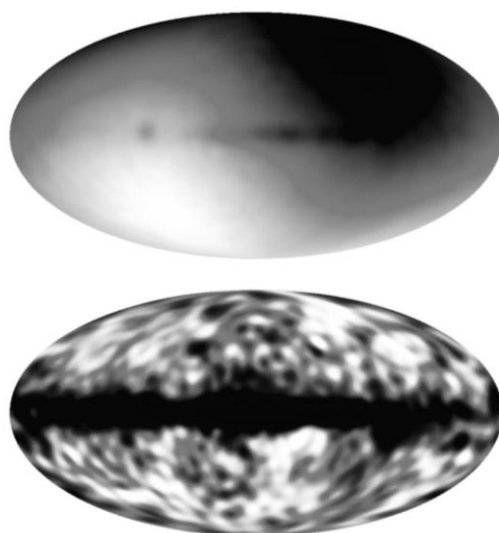


Figura 3.2. Tauler superior: les fluctuacions de la temperatura en el CMB, mesurades per COBE. Taula inferior: Les fluctuacions de la temperatura que queden després de restar el dipol a causa del moviment adequat del satèl·lit. La banda del centre es deu a l'emissió del disc de la nostra pròpia galàxia (12).

Així doncs, les observacions mostren que l'espectre del CMB correspon al d'un cos negre quasi perfecte i isotòpic, ja que la variació de temperatura en les diferents regions varien només $30 \mu\text{K}$. Un fons de microones de radiació d'un cos negre quasi isotòpic és natural si l'Univers alguna vegada ha estat calent, dens, opac i quasi homogeni, tal com formula la teoria del Big Bang.

Posteriorment a aquest primer satèl·lit se'n va dissenyar un de nou, anomenat WMAP (15), amb la finalitat d'estudiar les inhomogeneïtats de la radiació de fons de microones (CMB), ja que en el primer mapa obtingut -tal com s'havia predit de forma teòrica- es mostraven irregularitats a conseqüència de la presència de més matèria en algunes regions de l'Univers que en altres. Aquestes inhomogeneïtats van ser crucials per a l'evolució dels objectes que componen el nostre Univers; les petites concentracions de matèria en van atraure més per gravetat i d'aquesta manera es van formar les primeres estructures presents a l'Univers. Va ser l'any 2003 quan es van presentar per primer cop les dades obtingudes per WMAP i, gràcies a la precisió dels resultats, es van poder extreure moltes característiques no apreciables en la primera imatge realitzada pel satèl·lit COBE. Aquestes noves mesures van servir bàsicament per determinar paràmetres fonamentals de l'evolució cosmològica com ara la quantitat de matèria fosca i energia fosca de l'Univers.

El progrés va continuar i, l'any 2009, es va llançar Planck (16), un nou satèl·lit molt més modern que l'anterior. Tan sols quatre anys després es va obtenir la imatge del CMB, d'una precisió incomparable amb les obtingudes mitjançant els dos satèl·lits anteriors. En aquest cas es van poder arribar a diferenciar regions al cel de les quals difereixen únicament en una milionèsima de grau.

3.3.3. Nucleosíntesi primordial

Els rajos còsmics i els neutrins han aportat una part de la informació sobre l'Univers. Però quan es tracta de distàncies més enllà del Sistema Solar, els fotons han estat els transmissors, fins i tot d'aquella informació que mai es podria observar a causa de l'opacitat de l'Univers primitiu. Des d'un punt de vista cosmològic, la diferència més significativa entre diferents objectes de l'Univers és que estan constituïts per partícules elementals diferents. La següent taula mostra quines són les més importants.

particle	symbol	rest energy (MeV)	charge
proton	p	938.3	+1
neutron	n	939.6	0
electron	e^-	0.511	-1
neutrino	ν_e, ν_μ, ν_τ	?	0
photon	γ	0	0
dark matter	?	?	0

Figura 3.3. Algunes de les partícules principals que constitueixen l'Univers (17).

No obstant això, el component més misteriós de l'Univers és la matèria fosca. Quan els astrònoms observacionals hi fan referència, és solen referir a qualsevol component massiu de l'Univers que sigui massa tènue per ser detectat fàcilment mitjançant tecnologia actual. De vegades, per referir-se a matèria fosca, s'utilitzen els termes de restes estel·lars de neutrons i forats negres, ja que, una resta estel·lar aïllada és extremadament feble i difícil de detectar. Amb la mateixa finalitat, també es fa referència a objectes subestel·lars, com les nanes marrons, ja que, són massa baixes en massa per a què es produeixi la fusió nuclear als seus nuclis.

En algunes extensions del model estàndard de física de partícules, hi ha partícules massives que interaccionen, com els neutrins, només a través de la força nuclear feble i la gravetat. Aquestes partícules, que encara no s'han detectat al laboratori, s'anomenen genèricament com a partícules massives que interaccionen dèbilment, o WIMPs.

Des d'un punt de vista teòric, moltes de les propietats de l'Univers primitiu haurien de ser relativament senzilles. A un temps d'aproximadament 47 mil anys quan la radiació dominava sobre la matèria, l'expansió de l'Univers seguia la llei de potència següent.

$$a(t) \propto t^{1/2} \tag{Eq. 3.14}$$

La temperatura dels fotons d'un cos negre en l'Univers primitiu està definida per l'expressió (Eq. 3.15) tenint en compte que aquesta disminueix a mesura que l'Univers s'expandeix.

$$T(t) \approx 10^{10} K \left(\frac{t}{1s} \right)^{-1/2} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

A causa de l'alta quantitat d'energia de l'Univers primitiu, es van poder generar partícules d'energia molt alta, fenomen que només es pot reproduir costosament i de forma artificial als laboratoris. Actualment, s'ha assolit la creació d'un disseny per accelerar protons a una energia de 10^{12} eV, un teraelectró-volt. Aquesta energia és la que dominava tot l'Univers d'edat entre 10 i 12 segons després de la gran explosió. L'energia mitjana per fotó tenia el següent valor.

$$E_{mean}(t) \approx 2,7kT(t) \approx 3MeV \left(\frac{t}{1s} \right)^{-1/2} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Posteriorment, a mesura que l'Univers es va anar expandint i refredant, l'energia mitjana per fotó va disminuir fins als valors actuals. Valors que presenten una certa variabilitat, ja que quan s'estudia l'Univers durant la seva expansió, s'obtenen mostres de més de 31 ordres de magnitud en energia de partícules.

Actualment, hi ha una divisió en diferents etapes per comprendre i explicar l'Univers primitiu. Algunes d'elles tan sols són suposicions, però d'altres, com és el cas de la nucleosíntesi primordial, s'ha tingut a l'abast les eines necessàries per a poder-les conèixer i estudiar amb precisió. Així doncs, per fer front a l'estudi de la nucleosíntesi primordial, els físics nuclears no es centren tant amb la ionització i la recombinació, sinó que es focalitzen amb els processos d'alta energia de fusió i fissió; la divisió o unió de nuclis atòmics.

Un nucli atòmic conté dos tipus de nucleons, els protons (Z) i els neutrons (N), on $Z \geq 1$ i $N \geq 0$. El nombre total de nucleons dins d'un nucli atòmic, el número de massa (A), equival a la suma dels protons i neutrons. Cada nucli d'un mateix element atòmic ve determinat pel mateix nombre de protons que conté el mateix nucli. Tot i això, els àtoms d'un mateix element poden tenir diferent nombre de neutrons, en aquest cas es fa referència als seus isòtops. L'energia alliberada quan un nucleó es fusiona a partir de protons i neutrons individuals s'anomena energia d'unió B i, a continuació, se'n mostra un exemple amb el deuteri.



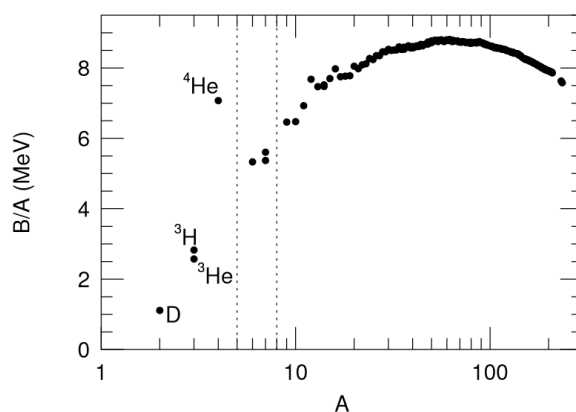


Figura 3.4. Aquesta gràfica mostra la relació entre l'energia d'unió per nucleó (B/A) i el número de massa (A) (17).

La nucleosíntesi primordial va començar amb la creació de deuteri a partir de la fusió de neutrons i protons. Donat que l'energia d'unió del deuteri és major que l'energia de ionització de l'hidrogen, aquella necessària per a extreure un electró d'un àtom neutre o molècula del seu estat fonamental, s'esperaria que la síntesi de deuteri transcorris a una temperatura equivalent a $1,6 \times 10^5$ vegades major que la temperatura de recombinació -que és el factor de diferència entre les esmentades energies-. Seguint amb la seva evolució, a mesura que transcorria el temps s'anaven formant nuclis cada cop més pesats a causa dels continus actes de fusió. La fracció d'heli primordial de l'Univers, és a dir, la fracció d'heli abans que la nucleosíntesi comences a les estrelles, s'expressa normalment com a un nombre adimensional.

$$Y_p \equiv \frac{\rho(^4\text{He})}{\rho_{\text{bary}}} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

És a dir, Y_p correspon a la relació entre la densitat de massa d'heli i la densitat de massa de tota la matèria bariònica. Quan s'observen objectes astronòmics de diferents tipus, es troba un valor de $Y_p = 0,24$, per tant, els objectes bariònics com les estrelles i els núvols de gas tenen almenys un 24% d'heli.

A mesura que s'ha anat estudiant aquesta etapa, els protons i neutrons han resultat ser els seus components bàsics. L'energia en repòs d'un neutró és major que la d'un protó.

$$Q_n = m_n c^2 - m_p c^2 = 1,9 \text{ MeV} \quad (\text{Eq. 3.19})$$

El neutró lliure és inestable, té un temps de descomposició igual a 890 segons i la reacció següent fa referència al procés d'aquesta.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (\text{Eq. 3.20})$$

Quan l'Univers tan sols tenia 0,1 segons d'edat, la seva temperatura era de $3 \times 10^{10} \text{K}$ i la seva energia mitjana per fotó de 10 MeV, molt més gran que l'energia en repòs d'un electró o positró, pel que podem dir que aquests ja hi eren presents. En aquest instant, els protons i neutrons estaven en equilibri tèrmic entre ells a través d'interaccions.

$$\gamma + \gamma \rightleftharpoons e^- + e^+ \quad (\text{Eq. 3.21})$$

$$n + \nu_e \rightleftharpoons p + e^- \quad (\text{Eq. 3.22})$$

$$n + e^+ \rightleftharpoons p + \bar{\nu}_e \quad (\text{Eq. 3.23})$$

Les dues últimes equacions, fan referència a la interacció d'un barió amb un neutrí o antineutrí. Es tracta d'una interacció a través de la força nuclear feble. Les àrees efectives per on passa un neutró quan es capturat per un nucli atòmic, s'anomenen seccions transversals. En el cas de tractar-se d'interaccions febles, aquestes seccions disminueixen a causa del domini de la radiació a l'Univers i, per tant, la velocitat amb la qual els neutrons i protons interactuen amb els neutrins descendeix ràpidament.

És en el moment en què els neutrins es desacoblen dels protons i neutrons que la relació entre aquests dos queda congelada. Un càlcul exacte de la temperatura T_{freeze} requereix d'un coneixement de la secció transversal exacta del protó i neutró per a interaccions febles. Aquesta temperatura resulta tenir un valor experimental de 0,8 MeV quan l'Univers té una edat d'1 segon. La relació de protons i neutrons es congela quan la temperatura descendeix per sota T_{freeze} .

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp\left(-\frac{Q_n}{kT_{\text{freeze}}}\right) \approx \exp\left(-\frac{1.29 \text{ MeV}}{0.8 \text{ MeV}}\right) \approx 0,2 \quad (\text{Eq. 3.24})$$

El motiu pel qual la nucleosíntesi del Big Bang va ser tan incompleta, ja que va deixar tres quarts dels barions en forma de protons no fusionats, és l'escassetat de neutrons en relació amb el nombre de protons. Un neutró es fusiona amb un protó molt més fàcilment que un protó amb un altre protó, ja que, s'ha d'emetre un positró per conservar la càrrega. Això significa que també és necessària l'emissió

d'un neutrí electrònic per a poder conservar el nombre quàntic d'electrons. El fet que sigui una reacció amb la presència d'un neutrí justifica la petita mesura de la secció transversal; per contra, l'opció que no aparegui un neutrí a la reacció, el que seria indicador de la fusió d'un neutró amb un protó, implica una interacció forta i, per tant, una major secció transversal. Pel que fa a la fusió entre dos neutrons, hi ha dues raons que justifiquen que la velocitat de fusió entre dos protons és molt més lenta que la velocitat de fusió entre un protó i un neutró. La primera fa referència a la importància en la mesura de la secció transversal per a la fusió entre un protó i un neutró enfront de la fusió entre dos protons a causa de la interacció feble d'aquests últims. En segon lloc, donat que tots els protons estan carregats positivament, han de superar la 'barrera de Coulomb' entre ells per fusionar-se. La barrera de Coulomb és la barrera d'energia degut a la interacció electroestàtica que el nucli atòmic ha de superar per experimentar una reacció nuclear. Així doncs, transcorreguda una hora des de la gran explosió, la temperatura i la densitat havien baixat massa perquè es produís aquest tipus de fusió.

Donada la rapidesa de la fusió entre neutrons i protons quan es compara amb la velocitat de fusió entre protons i de protons i neutrons, s'estableix que la nucleosíntesi del Big Bang continua fins que cada neutró lliure s'uneixi en un nucli atòmic amb la resta de protons que queden lliures. Mitjançant aquesta aproximació, és possible calcular el valor màxim de Y_p , la fracció de massa bariònica en forma de ${}^4\text{He}$. Suposant que cada neutró s'incorpora en un nucli d'heli després de la congelació; així doncs, donada una relació de protons i neutrons d'1/5 es pot considerar un grup representatiu de 2 neutrons i 10 protons. Aquests neutrons poden fusionar-se amb 2 dels protons per acabar formant un nucli d'heli i, per tant, 8 es queden sense fusionar.

$$Y_{max} = \frac{4}{12} = \frac{1}{3} \quad (\text{Eq. 3.25})$$

El valor de Y_p , 0,24, és més petit que Y_{max} tal com s'havia predit. Això pot ser per diferents causes que actuen per reduir el valor real de Y_p per sota del seu màxim teòric. En primer lloc, si la nucleosíntesi no actués immediatament després de la congelació, aproximadament 1 segon després de la gran explosió, la descomposició espontània dels neutrons reduiria inevitablement la relació de protons i neutrons i, conseqüentment, la quantitat d'heli produïda. En segon lloc, si alguns neutrons escapen de la fusió, o acaben en nuclis més lleugers que l'heli, no contribuiran a Y_p . Per últim, si la nucleosíntesi continués el temps suficient per produir nuclis més pesats que l'heli, també reduiria la Y_p .

A partir de la densitat numèrica d'aquests dos nucleons -que és definida per les equacions de Maxwell-Boltzmann (18)- i tenint en compte els seus pesos estadístics, la relació de protons i neutrons simplificada és la següent,

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp\left(-\frac{Qn}{kT}\right) \quad (\text{Eq. 3.26})$$

a temperatures equivalents a $T \gg 1,5 \times 10^{10}$ K i un temps, $t \ll 1$ s, el número de neutrons es quasi igual al nombre de protons. No obstant això, quan la temperatura comença a disminuir els protons predominen més i la relació evoluciona de forma exponencial. Aquesta variació és fonamental perquè si hi seguís havent equilibri a mesura que transcorre el temps, als sis minuts hi hauria un neutró per cada milió de protons.

A un temps de 2 segons, just després que es completi la congelació de protons i neutrons, té lloc la segona etapa de la nucleosíntesi del Big Bang amb una relació de protons i neutrons de 0,2. Els neutrins es trobaven desacobrats per l'Univers després d'haver acabat la interacció amb els electrons, protons i neutrons, en canvi, els fotons estaven fortament acoblats als protons i neutrons. El primer pas essencial de la nucleosíntesi del Big Bang és la fusió d'un protó i un neutró on es crea el deuteri. En aquesta reacció s'emet un fotó de rajos gamma, ja que té lloc a través de la força nuclear forta; en canvi, en el cas de la fotoionització entre un protó i un electró, s'emet un fotó ultraviolat, ja que s'uneixen mitjançant la força electromagnètica i el resultat és la formació d'un àtom d'hidrogen neutre.



La temperatura precisa, T_{nucl} , a la que té lloc la nucleosíntesi del deuteri fa referència al moment on la meitat dels neutrons lliures s'han fusionat en nuclis de deuteri, i té un valor de $7,6 \times 10^8$ K quan l'edat de l'Univers era de 200 segons. Un cop s'ha format una quantitat significativa de deuteri, hi ha moltes reaccions nuclears possibles que donen lloc a elements com ^3He , ^3H , ^4He , ^6Li , ^7Li , ^7Be i ^8Be .





En resum, un cop el deuteri comença a formar-se, la fusió fins a assolir el nucli d'heli avança ràpidament; per contra, la fusió de nuclis més pesants transcorre molt més lentament. Els rendiments precisos dels diferents isòtops presents en la nucleosíntesi del Big Bang són complexos de calcular i habitualment s'utilitza un codi d'ordinador, com és en el cas d'aquest treball. Aquesta dificultat és deguda a la quantitat de reaccions possibles, totes amb seccions transversals que depenen de la

temperatura, un cop s'ha format el deuteri. La Figura 3.5 mostra una solució típica d'aquest codi en la que se segueix la fracció de massa de diferents isòtops a mesura que l'Univers s'expandeix i es refreda. Inicialment $T \gg 10^9$ K, gairebé tota la massa bariònica apareix en forma de protons i neutrons lliures. A mesura que la densitat del deuteri puja, s'assoleix el punt on es formen quantitats significatives de ^3He , ^3H i ^4He . Quan l'edat de l'Univers és de 10 minuts i la seva temperatura de 4×10^8 K, la nucleosíntesi del Big Bang essencialment ha acabat i quasi tots els barions estan en forma de protons lliures o nuclis de ^4He .

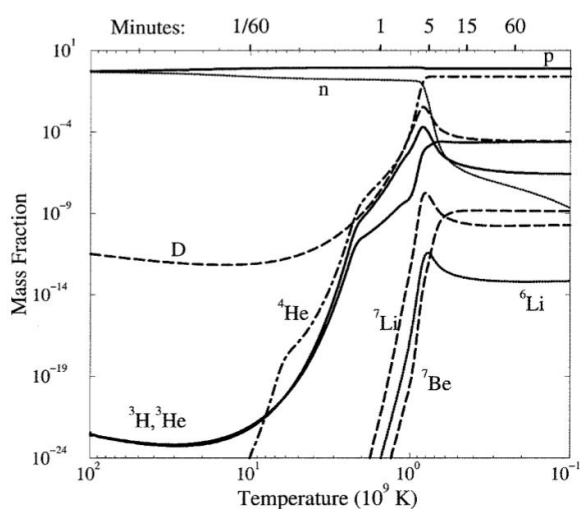


Figura 3.5. Fracció de massa de diferents isòtops a mesura que l'Univers s'expandeix i es refreda (17).

Els pocs neutrons lliures restants es descomponen en protons i queden petites quantitats de ^2H , ^3He , ^3H . Posteriorment, es formen quantitats petites de ^6Li , ^7Li i ^7Be . Els rendiments d'aquests elements restants depenen de diferents paràmetres físics; el més important és la relació del barió amb el fotó ja que, com més alta sigui la relació, més augmenta la temperatura T_{nuc} a la que es produeix la síntesi de deuteri i, per tant, es dona un avenç al començament de la nucleosíntesi del Big Bang. Si es fa un estudi en què es redueixen els valors de la densitat i la temperatura de l'Univers, més aviat s'inicia la nucleosíntesi i més eficiència en la producció de ^4He i, per tant, menys neutrons lliures.

A la següent figura es mostra una gràfica de la fracció de massa de diversos elements produïts per la nucleosíntesi del Big Bang. S'ha de tenir en compte que els valors més grans de la relació barió-fotó (η) produeixen valors més grans de Y_p i valors més petits per la densitat de deuteri. La dependència de la densitat de ^7Li en η és més complexa. En el rang de η en la Figura 3.6, la producció directa de ^7Li a conseqüència de la fusió de ^4He i ^3H és una funció decreixent de η , mentre que la producció indirecta de ^7Li per la captura d'electrons ^7Be és una funció creixent de η . La densitat pronosticada de ^7Li té un valor mínim de 3×10^{-10} .

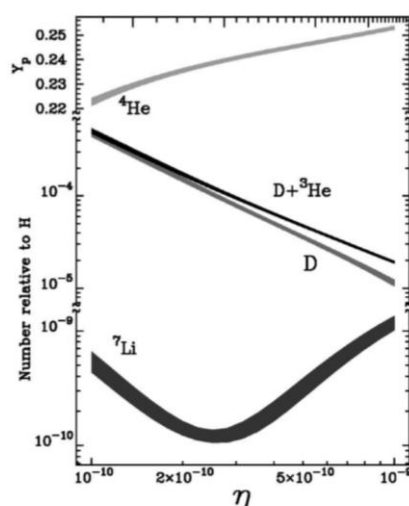


Figura 3.6. Número relatiu a H en funció de la relació barió-fotó. S'observa que la producció directa i indirecta de ${}^7\text{Li}$ (17).

La relació de densitat entre el protó i el barió, no pot ser més petita que 10^{-12} ja que, si es donés el cas, la nucleosíntesi del Big Bang produiria quantitats petites d'heli, $Y_p < 0,01$. Aquesta relació tampoc pot tenir un valor més gran a 3×10^{-7} , ja que seria un indicador de que la nucleosíntesi hauria transcorregut abans que els neutrons haguessin tingut la possibilitat de descompondre's, els deuteris haguessin estat essencialment lliures i el valor Y_p s'aproximaria al valor màxim permès de 0,33. Per determinar amb exactitud el valor de η s'ha d'observar les densitats dels elements de la llum abans que la nucleosíntesi en les estrelles comencés a alterar la composició química de l'Univers. Per buscar el seu valor amb exactitud caldria determinar l'abundància de deuteri amb precisió, ja que, hi depèn en gran manera. Per contra, la fracció d'heli primordial, Y_p , no té gaire dependència amb η .

Un problema important per a determinar l'abundància de deuteri primordial és la seva facilitat de destrucció en les estrelles donat que, en la creació d'aquestes, les primeres reaccions que transcorren impliquen la fusió de deuteri en heli. És per això que l'abundància de deuteri a l'Univers tendeix a disminuir a mesura que passa el temps. Habitualment, està definida per la relació entre el nombre d'àtoms del deuteri i de l'hidrogen (D/H). Actualment, la forma més fiable de trobar aquest valor és observant els espectres dels quàsars distants. Quan s'estudia el desplaçament cap al vermell de la llum d'un quàsar que ha passat a través d'un núvol intergalàctic, s'observa una línia d'absorció forta a causa de l'absorció de l'hidrogen ordinari i una línia d'absorció molt més feble a causa de l'absorció del deuteri. Els estudis detallats de les forces de les línies d'absorció en els espectres de diferents quàsars donen un resultat consistent a la relació (D/H) amb un valor equivalent a $(3 \pm 0,4) \times 10^{-5}$.

4. Models cosmològics

El desenvolupament d'un model real, que pugui proporcionar una explicació completa del nostre Univers és des de fa temps un dels grans reptes científics en curs. Tot i la complexitat que suposa la comprensió de determinats fenòmens i la dificultat a l'hora d'obtenir informació de l'origen de l'Univers, l'adaptació del principi cosmològic és un punt de partida per la formulació de les hipòtesis que intenten sustentar els diferents models cosmològics. Actualment, la construcció d'aquests models es basa en la resolució de les equacions de la relativitat general d'Einstein per a un Univers isòtop i homogeni.

4.1. Einstein

Albert Einstein va néixer el 1879 i és considerat el científic més important, conegut i popular del segle XX (19). Va cursar els seus estudis a Zurich i va obtenir, l'any 1900, el seu doctorat en física.

Es va introduir al món laboral com a examinador de patents a l'Oficina de Patents de Berna. Tot i això, l'any 1905 ja publicava tres articles científics.

En el primer, fa referència al treball sobre el moviment de partícules petites a causa dels nombrosos impactes entre les molècules d'aire o aigua. En el segon, va donar explicació a l'efecte fotoelèctric, el fenomen que transcorre quan la llum colpeja la superfície d'un metall. Aquesta va ser una de les primeres aplicacions de la mecànica quàntica amb la qual va obtenir el Premi Nobel de física (20).

Per últim, en el tercer article hi va exposar la teoria de la relativitat especial i, des d'aquell moment, la visió de l'espai i el temps absoluts de Newton va canviar. Va demostrar que l'electromagnetisme de Clerk Maxwell (21) era més precís que la mecànica de Newton, que només és vàlida a velocitats limitades en relació amb la velocitat de la llum. La necessitat de la teoria de la relativitat especial no es va percebre fins al moment en què es va descobrir una contradicció.

Posteriorment a la mecànica, Einstein es va trobar més complicacions en recórrer a la gravitació. Va ser al voltant de la Primera Guerra Mundial quan va trobar la resposta a un nou estudi, a través de la matemàtica presentada per Marcel Grossman (21), que va donar lloc a les equacions de la relativitat general, publicades a finals del 1916 (7). Un any més tard, ell mateix les va aplicar a la cosmologia i, posteriorment, ho van fer altres científics com Willem de Sitter, Alexander Friedmann i Georges Lemaître (22)(23)(24).

La teoria especial només requereix de la comprensió de conceptes bàsics d'àlgebra, tot i que els detalls de la seva aplicació requereixen d'una matemàtica més complexa. D'altra banda, la teoria general té una dificultat molt més elevada. Si bé les idees fonamentals no són intrínsecament difícils, el que

resulta més complex, si més no al principi, és el nou marc mental en el que es basen aquestes grans idees, tan significants en la física del segle XX.

4.1.1. Teoria de la relativitat especial

Les ones sonores són ones de pressió que es mouen a través d'un medi. La velocitat serà específica i relativa al medi en el que es propaguen, com per exemple la velocitat del so a l'aire, 344,2 m/s (a una temperatura de 20°C) (25). Considerant que la llum es tractava d'una ona, calia considerar que es propagava a través d'un medi; per a poder explicar la propagació de la llum al llarg de l'Univers (i per tant, al llarg d'espais buits) es va suposar l'existència d'un medi teòric anomenat èter. Considerat aquest medi, les ones de llum sempre s'hi havia de propagar a la velocitat de la llum en relació amb l'èter.

Les equacions de Maxwell descriuen el comportament dels fluxos elèctrics i magnètics que depenen específicament de la velocitat de la llum. D'aquí que la velocitat de la llum, c , aparegui en les equacions de Maxwell de manera fonamental, sense tractar-se d'una quantitat invariant galileana. Maxwell apostava per un marc de referència especial en el què les seves equacions fossin correctes, el que requeria d'un marc en què l'èter es trobés en repòs. No obstant això, l'any 1887 Michelson-Morley (26) va concloure, després de dur a terme el seu experiment, que no existia cap prova d'aquest suposat èter i el que posava en dubte la seva existència. A partir d'aquí calia considerar dos possibles escenaris: la possibilitat d'un possible error en les equacions de Maxwell o, alternativament, la validesa de la transformació galileana que posava en qüestió la mecànica de Newton. Finalment, Ernst Mach (27) va presentar una proposta amb la què es descartava qualsevol moviment relatiu a l'èter, consegüentment, també la seva existència.

Diversos científics, van demostrar que les equacions de Maxwell eren invariables sota un nou tipus de llei de transformació, coneguda com la transformació de Lorentz, mentre que les equacions de Newton ho eren sota la transformació galileana. La transformació de Lorentz, amb la seva dilatació del temps i la contracció de l'espai, s'oposa directament al temps i l'espai absoluts de Newton. Va ser Albert Einstein qui va decidir abandonar completament la relativitat galileana i la mecànica newtoniana, enunciar l'anomenat principi de la relativitat, primer postulat de la Teoria de la Relativitat Especial (28), en el què es fonamenta la igualtat que presenten les lleis de la naturalesa en tots els marcs de referència inercials. Amb la finalitat de preservar el principi de la relativitat en les equacions de Maxwell, s'adopta el segon postulat de la relativitat que nega la validesa de l'experiment de Michelson-Morley (26), afirmant que la velocitat de la llum en el buit és la mateixa en tots els marcs de referència inercials.

4.1.2. Teoria de la relativitat general

La teoria de la relativitat especial va portar la mecànica i l'electromagnetisme a la total consistència, però en cap moment fa referència a la gravetat ni a l'acceleració. És per això que Einstein va introduir la teoria de la relativitat general el 1915 (29). Aquesta tenia un principi fonamental dominat pel principi d'equivalència, segons el qual un sistema immers en un camp gravitatori és puntualment indistingible d'un sistema de referència no inercial accelerat.

Segons Newton, quan un cos cau lliurement no té pes i, per tant, en l'estat de caiguda lliure és com si la força de gravetat quedés cancel·lada. També va fomentar una llei en què la força gravitatòria sobre un cos és proporcional a la seva massa, anomenada llei de la gravitació universal (30). L'experiment ha demostrat que l'acceleració deguda a la força de gravetat que actua sobre un cos és independent de la massa d'aquest cos i, això només és vàlid si es compleixen dues condicions; que la massa inercial i gravitatòria siguin la mateixa i que la força gravitatòria sigui proporcional a la massa. Sabent que en absència d'altres forces, com la resistència de l'aire, tots els cossos cauen amb la mateixa acceleració sota la influència de la gravetat, es pot concloure que les forces inercials són proporcionals a la massa tal com ho és la força gravitatòria.

L'afirmació que la gravetat és completament indistingible o equivalent a qualsevol altra acceleració s'anomena principi d'equivalència newtoniana. A diferència d'aquest, el principi d'equivalència d'Einstein estableix que tots els marcs inercials i de caiguda lliure són completament equivalents i no hi ha cap experiment que pugui distingir-los; per tant, no només fa referència a la mecànica, sinó a tota la física.

Així doncs, la relativitat general relaciona els conceptes d'un marc inercial amb l'acceleració, fonamentalment lligats a la naturalesa de l'espai i el temps, amb la finalitat d'unificar aquests conceptes separats fins al moment. En la relativitat especial, la llum sempre viatja en línia recta a través de l'espai-temps, en canvi, el principi d'equivalència d'Einstein exigeix que aquesta trajectòria hagi de ser corba a causa de la gravetat. En aquest fet rau la idea que la presència de gravetat en la matèria afecta l'espai-temps, canviant les línies mundials inercials -fins aleshores rectes- a línies corbes. Aquesta és la base fonamental de la relativitat general. Einstein s'enfrontava amb el problema de determinar com la matèria podia establir trams inercials i, és per això, que va considerar que és la matèria qui determina la caiguda de les trajectòries.

Les equacions d'Einstein han estat resoltes només per alguns casos simples ja que no són lineals; si per exemple es vol esbrinar quina és la gravetat en un punt al voltant de dues estrelles esfèriques, no es pot assumir que resultarà ser la suma de les gravetats al voltant de cadascuna d'elles. Tot i que aquestes equacions poden arribar a ser molt complexes, en la seva essència afirmen que la geometria correspon a la suma de la matèria i l'energia. La geometria existeix independentment de la presència

de matèria. La gravetat, en si mateixa, resulta ser una forma d'energia, de manera que la matèria no només crea gravetat, és a dir, curvatura, sinó que la gravetat actua sobre si mateixa per crear gravetat. Fins i tot, pot existir una curvatura d'espai-temps i actuar de forma dinàmica, sense la presència de cap matèria o energia no gravitatòria.

Les equacions d'Einstein van superar definitivament un dels problemes amb la llei de la gravitació de Newton en incorporar el temps i una velocitat, amb la propagació finita, a la gravetat. D'aquesta manera, i tenint en compte les equacions d'Einstein, es pot afirmar que les masses en moviment poden generar ones de curvatura o radiació gravitatòria. Si la matèria canvia, segons les equacions d'Einstein la geometria també canviarà. Així, un camp gravitatori que varia en el temps pot produir una ona en la curvatura del mateix espai-temps tractant-se d'una ona gravitatòria. Per una banda, la radiació gravitacional es propaga lluny de la seva font a la velocitat de la llum i, per altra banda, les ones gravitacionals són ondulacions en l'espai-temps, com les ones d'aigua que pertorben la superfície d'un estany.

Tot i que, la teoria de la relativitat general compleix els requisits per a una teoria científica, l'equació d'Einstein no és una prova, és una hipòtesi. Les diferències entre la gravetat Newtoniana i Einsteiniana són més pronunciades en zones gravitacionalment fortes, com la d'un forat negre. No obstant això, tots els àmbits gravitacionals al voltant de la Terra tenen la curvatura d'espai-temps menys pronunciada i, en conseqüència, les desviacions de les prediccions de la teoria Newtoniana són també més petites.

S'han realitzat algunes proves experimentals enginyoses per a demostrar la validesa de la teoria de la relativitat general. Una d'elles ha estat l'estudi, durant un eclipsi solar total, de la flexió de la llum estel·lar al passar prop del Sol, quan cau en el seu terreny gravitacional i viatja a través d'un espai-temps corbat. Aquest experiment, realitzat per Arthur Eddington l'any 1919 (7), va resultar ser coherent amb la predicció de la relativitat general. Un altre exemple, és la justificació de les misterioses desviacions en l'òrbita de Mercuri. Aquest tipus de mesures han estat molt més precises gràcies a l'ajuda de la tecnologia espacial des de finals del segle XX. A través d'ones de radar, que es reflecteixen a les superfícies de Venus i Mercuri, es va poder determinar les seves posicions i òrbites amb gran precisió. Aquestes mesures d'òrbites planetàries permeten assenyalar el terreny gravitacional del Sol amb una precisió extrema. Un cop més, els resultats foren coherents amb les prediccions de la relativitat general.

El 1974 es va descobrir el púlsar binari (31) i, arrel d'això, es va poder dur a terme una prova que resulta molt interessant. El púlsar binari és un estel de neutrons que emet radiacions periòdiques amb un company estel·lar, que sovint és un altre púlsar. La relativitat general prediu que dos objectes compactes i massius en òrbita, un al voltant de l'altre, irradiaran ones gravitacionals. La pèrdua d'energia en aquestes ones provocarà que les òrbites es descomponguin i els objectes passin a girar

cap a l'interior a causa de la gravetat. Com que un púlsar actua com un rellotge transmissor molt precís, permet realitzar un seguiment del moviment al llarg de la seva òrbita i, per tant, determinar el període orbital d'una manera molt exacta. L'observació continua d'aquests púlsars binaris, ha confirmat que l'òrbita canvia exactament de la manera prevista per la teoria de la relativitat general. Així doncs, el púlsar binari serveix com una detecció indirecta de la radiació gravitacional.

No obstant això, és preferible la detecció directa d'ones gravitacionals. Com que la curvatura d'espai-temps està canviant localment en una ona gravitacional, s'indueix una força en qualsevol objecte físic a través del qual passa l'ona i, en principi, és possible detectar-la. Una tecnologia prometedora per localitzar aquest fenomen és l'interferòmetre làser, un dispositiu en el qual un divisor de feixos de llum en crea dos que s'envien per un recorregut d'anada i tornada per camins perpendiculars. Si la distància en qualsevol de les dues direccions canvia en el temps, a causa d'un estirament o compressió per una ona gravitatòria, el patró d'interferència canvia quan es recombinen els feixos de llum. La relativitat general ha demostrat com relacionar la matèria i la geometria de l'espai-temps, ha proporcionat noves visions sobre el funcionament de l'Univers i ha predit alguns fenòmens notables. Té un profund impacte en la cosmologia alterant, fonamentalment, la nostra visió de la relació de l'espai i el temps.

4.2. Hubble

El 1924 (32), un dels astrònoms que va aconseguir canviar la visió del nostre Univers de forma més significativa, Edwin Hubble, va detectar una estrella -anomenada variable cefeida- a la Nebulosa d'Andròmeda -actualment coneguda com a Galàxia d'Andròmeda-. Una estrella variable és aquella en què la lluminositat varia considerablement al llarg del temps. Poden ser extrínseques, és a dir, tenir una variabilitat produïda per efectes externs, o intrínseques, en què la variabilitat és provocada per mecanismes propis com és el cas de l'estrella detectada per Hubble.

Aquesta estrella es caracteritzava per presentar pulsacions amb un període extremadament regular, en què, la periodicitat era una funció de la lluminositat màxima de l'estrella; de fet, el període de la pulsació era proporcional a la seva lluminositat. Hubble va poder calcular la lluminositat de cefeida i, per tant, la distància a la nebulosa on suposadament es creia que es trobava. En poc temps va descobrir que les nebuloses espirals eren galàxies externes i, així doncs, la Via Làctia no era l'única del nostre Univers.

Tot i el valor d'aquests descobriments, la contribució més important de Hubble a la cosmologia va ser en un altre àmbit. Després del descobriment de Vesto Slipher (33) es va saber que la galàxia Andròmeda i la Via Làctea orbiten entre si. Arrel d'això, mitjançant l'espectre electromagnètic, es va concloure que s'estan aproximant a causa del desplaçament cap al blau que s'hi observava. Així doncs, Hubble, ajudat per Milton Humason, va obtenir dotzenes d'espectres galàctics amb el telescopi Mt.

Wilson de 100 polzades (34). Aquests espectres ens proporcionen el desplaçament, normalment cap al vermell, dels objectes que s'observen i, en aquell moment, va servir per saber que la majoria de galàxies estaven retrocedint. Tot i això, van seguir el seu estudi combinant dades de desplaçaments al vermell amb les distàncies mesurades a les galàxies.

Hubble va començar per les cefeïdes, però es va adonar que ràpidament s'enfosquien i, per tant, no ho va poder utilitzar com a referència pel posterior estudi a galàxies més llunyanes. Així doncs, van utilitzar les estrelles gegants més brillants d'una galàxia assumint que aquestes tindrien aproximadament la mateixa lluminositat. Aquesta hipòtesi es va verificar mitjançant l'estudi de galàxies seves les distàncies a les quals s'obtenien a través de cefeïdes. Com que, a distàncies cosmològiques, pot ser molt difícil distingir les regions d'emissió d'una estrella o, fins i tot, pot ser possible que les estrelles més brillants quedin enfosquides en la brillantor general de la galàxia, cal recórrer a altres tècniques. Així doncs, a grans distàncies, Hubble i Humason van utilitzar l'aparent lluminositat de les galàxies en conjunt. Sabien que la lluminositat intrínseca de les galàxies probablement variava molt, però esperaven limitar la variació comparant galàxies que Hubble havia classificat com a similars 4.2.1. Malgrat l'error comès, quan van representar els valors de desplaçament al vermell envers la distància a nosaltres, van trobar que en la recta hi havia una correlació lineal entre els dos valors.

Hubble va interpretar els desplaçaments cap al vermell extragalàctics com a desplaçaments Doppler. Això és cert quan es tracta de galàxies properes i els desplaçaments al vermell més petits a 0,1, casos en què es pot utilitzar la relació de proporcionalitat entre la velocitat i el desplaçament al vermell. En aquestes condicions, el gràfic de velocitat envers la distància també mostra una correlació lineal i, el desplaçament al vermell, es pot equiparar a una velocitat de recessió. El pendent que s'obté en aquesta representació gràfica fa referència al valor atribuït a la constant de Hubble. La llei de Hubble és una descripció teòrica del comportament de l'Univers.

A l'hora de determinar H_0 es treballa amb dos aspectes. Per una banda, els canvis de Doppler observats als espectres electromagnètics de les galàxies observades i, per altra banda, la distància absoluta d'aquestes respecte la Terra. Ara bé, aquest últim és el principal problema per a aquesta determinació, ja que, els canvis Doppler són fàcilment mesurables. Els primers càlculs no foren coherents, donat que l'edat de l'Univers resultant era més menor que l'edat de la Terra obtinguda a través d'estudis realitzats mitjançant isòtops de roques. No va ser fins al 1956 quan Sandage (35) va publicar un article on indicava un valor de l'edat de l'Univers més coherent, tot i que el valor era poc precís i es comprenia en una franja que anava des dels 10.000 milions d'anys fins als 20.000 milions d'anys. Aquesta incertesa va desaparèixer quan es va utilitzar el telescopi espacial Hubble. Mentre es duia a terme aquest estudi, paral·lelament es va revelar, mitjançant observacions de supernoves, que existeix algun altre factor que impulsa l'expansió de l'Univers, l'anomenada energia fosca.

Hubble va creure que les galàxies eren, de mitjana, molt més petites que la Via Làctea a causa d'errors sistemàtics. Els més destacables van ser dos; per una banda, menysprear l'expansió de l'Univers i, per altra, un error de calibració a l'hora de mesurar la relació entre la lluminositat i el període de les cefeides. Aquest error va ser degut al desconeixement de Hubble de l'existència de les cefeides de tipus II, una segona classe d'estrelles cefeides, que va ser identificada amb posterioritat l'any 1952 (36).

Pel que fa a la mesura de llargues distàncies, una novetat important va ser el llançament del Telescopi Espacial Hubble (HST), que s'utilitza per estudiar estrelles com a objectes individuals a una distància molt superior a la de la majoria de telescopis terrestres. Un dels projectes principals que es va dur a terme amb aquest telescopi va ser el de trobar cefeides en una mostra de galàxies a 20Mpc per mesurar les diferents distàncies respecte a nosaltres i obtenir així el valor de la constant de Hubble.

Per altra banda, Hubble va dedicar també part de la seva investigació a dur a terme una recopilació de dades del cúmul de Virgo. Aquest, és el cúmul de galàxies més proper a la Via Làctea i s'hi han realitzat observacions detallades durant moltes dècades. En particular, s'ha mesurat la corba de llum referent a les supernoves detectades i, a causa de la seva uniformitat, s'ha pogut establir un tipus específic de supernova, anomenat tipus Ia, que resulta de l'explosió d'una nana blanca. Aquestes supernoves tenen una brillantor màxima molt alta que mostra relativament poca variació d'un tipus Ia a un altre. Durant molt de temps es va creure en aquesta estandardització de supernova perquè mai se n'havia observat cap en una galàxia respecte a la qual se'n conegués la distància. Gràcies al seu estudi, Hubble es va adonar que el pic de la corba de llum de tipus Ia es correlacionava amb la velocitat de disminució de la llum segons una relació inversa –a menys velocitat, més brillantor- millorant. Aquest descobriment (37) va permetre millorar l'estandardització d'aquest tipus de supernoves.

En el cas de que no es conegui la galàxia d'on prové la supernova caldria utilitzar altres tècniques. L'obtenció de distàncies a galàxies espirals, anomenada relació Tully-Fisher (38), és una de les més fiables. Es basa en una correlació entre l'amplada d'una línia d'emissió particular d'hidrogen, que es troba a una longitud d'ona de 21 cm en el marc de repòs de l'hidrogen, i la lluminositat de la galàxia espiral a partir de la qual s'observen les emissions. Aquesta precisió en la distància és gràcies a la velocitat de rotació de la galàxia. Una part del gas s'acosta, mentre que l'altra part retrocedeix, tot i que, quan s'estudia en les observacions, només es detecten els fotons col·lectius de tot el gas de la galàxia fent que la línia d'emissió s'enfonsi en una part. Com més ampla sigui la banda, més ràpida serà la rotació de la galàxia i més lluminositat tindrà. Encara que, la relació Tully-Fisher és experimental, ja que es basa en observacions de moltes galàxies, també té una explicació qualitativa i senzilla. Com més brillant sigui una galàxia, més massa té en les estrelles; així, s'esperaria que la massa global sigui també més gran, inclosa la matèria no lluminosa que hi pugui haver. Si per la majoria de les galàxies es considerés que la relació entre massa total i massa lluminosa és aproximadament constant, hi hauria d'haver una relació entre la brillantor de les emissions de qualsevol galàxia espiral i la seva massa total.

Tanmateix, implicaria que la línia de 21 cm es podria representar aproximadament per a la lluminositat total. S'ha demostrat que aquesta relació és un dels indicadors de distància més útils per a galàxies més remotes, tot i que també té les seves limitacions, ja que, a partir d'aproximadament 200Mpc, l'amplada de la línia d'emissió es converteix en una mesura més complexa.

Per altra banda, bona part de la dispersió en un diagrama típic de Hubble (Figura 6.4) no es deu només a errors de distància, sinó, al fet que el desplaçament al vermell observat és un compost de desplaçaments vermells i blaus a causa de totes les velocitats i els efectes gravitacionals.

El moviment intrínsec d'un objecte a causa de les seves reaccions particulars a les forces a les que està sotmès -com ara les atraccions gravitacionals locals- s'anomena moviment peculiar de l'objecte i es produeix a una velocitat que anomenem la velocitat peculiar. Aquest terme fa referència a la velocitat única que té una galàxia a banda del produït per l'efecte Hubble; i que es tradueix al desplaçament Doppler clàssic i ordinari. Per tant, el desplaçament al vermell net és una superposició del desplaçament Doppler peculiar sobre el canvi cosmològic al vermell.

Els objectes més propers, com els altres membres del Grup Local, estan dominats pels seus propis moviments i, essencialment, no estan afectats per la llei de Hubble (39), ja que, aquest efecte augmenta amb la distància. En el cas del cúmul de Virgo, es complica més, ja que, en termes cosmològics, és molt proper a nosaltres. Les seves galàxies tenen moviments interns complicats i, el cúmul en si, és un centre d'atracció per a la Via Làctea i el que l'envolta, augmentant encara més l'efecte Doppler a causa de moviments relatius i peculiars. Tot plegat crea un desplaçament al vermell significatiu en comparació amb el desplaçament al vermell cosmològic. Per tant, aquestes mesures per a les galàxies del cúmul de Virgo revelen un desplaçament al vermell ambigu. Per obtenir un valor per a la constant de Hubble en aquest cúmul, cal utilitzar un model per als moviments de la galàxia estudiada i del moviment de la Via Làctea cap a elles per interpretar les dades.

En canvi, per a objectes llunyans, tots els cosmòlegs presenten un suport aclaparador cap a les dades obtingudes referents a la interpretació dels seus desplaçaments al vermell, ja que no es deuen a moviments peculiars, sinó, a l'expansió de l'espai en si. Aquest és un concepte nou i desafiant, observat en totes les galàxies que no estan gravitacionalment lligades a la Via Làctea, donat que mostren un desplaçament cosmològic al vermell i mai al blau i, per tant, s'allunyen de nosaltres. Aquesta observació implica que l'espai s'està expandint a tot arreu, és a dir, cada galàxia veu a les altres allunyant-se d'ella. El moviment global de les galàxies allunyades les unes de les altres a causa de l'expansió general de l'Univers, s'anomena expansió de Hubble.

4.2.1. Classificació morfològica de les galàxies

La nostra galàxia, la Via Làctia, és només una entre totes les que hi ha a l'Univers. Aquest fet és conegut des de fa menys d'un segle, tot i que estudis anteriors ja incorporaven imatges on és possible apreciar-ho. En són un exemple les fotografies del catàleg de Charles Messier (1730-1817) (40) on s'hi recull 103 objectes difusos, entre ells la galàxia Andròmeda o M31 i també el contingut d'aproximadament 8.000 objectes del Nou Catàleg General publicat per John Dreyer (1852-1926) (41). Més endavant, l'any 1912, Vesto Slipher (33) va descobrir la rotació de les nebuloses espirals mitjançant l'anàlisi espectroscòpic però, en aquell moment, se'n desconeixia el seu origen. Va ser el 1925 (42), quan Edwin Hubble va descobrir M31 utilitzant la relació de lluminositat del període obtenint una distància de 285kpc. Aquest valor, tot i ser un factor de 3 menor que la distància de M31 que actualment es considera, va proporcionar evidències clares que M31 i aquestes nebuloses espirals havien de ser extragalàctiques. Aquest va ser l'inici de l'astronomia extragalàctica.

Històricament, la fotometria òptica era el mètode utilitzat per a observar galàxies. La classificació morfològica definida per Hubble és, encara avui en dia, la més coneguda. En la següent figura, es mostra l'esquema d'aquesta classificació.

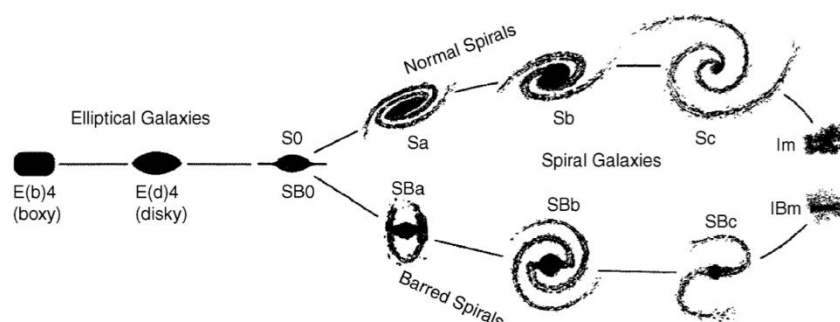


Figura 4.1. Aquesta imatge mostra la classificació de les galàxies definida per Hubble i, com es pot observar, hi ha els tres principals tipus en què les va dividir; el·líptiques, espirals i lenticulars (32).

D'una banda, les galàxies el·líptiques es caracteritzen per tenir una forma aproximadament el·lipsoidal i no destaquen per tenir trets distintius. Es divideixen segons la seva el·lipticitat $\epsilon = 1 - b/a$, on a i b fan referència als semieixos major i menor respectivament, i es troben en un rang relativament ampli: $0 < \epsilon < 0,7$. Els valors de lluminositat, massa i grandària d'aquestes galàxies també presenten rangs de valors molt amplis. Pel que fa a les seves característiques comunes, aquestes són l'absència o insignificant de moment angular, de quantitat de matèria interestel·lar, d'estrelles joves i de cúmuls oberts (tret d'excepcions puntuals) i la seva composició sobretot per estrelles antigues, anomenades població II. Físicament també es poden dividir en dos tipus, les quadrades on la forma es determina

per moviments aleatoris de les seves estrelles, i les discoidals, on les estrelles solen tenir velocitats similars però estan relativament aplanades a causa de la rotació de la galàxia.

D'altra banda, les galàxies espirals consisteixen en un disc galàctic giratori pla que conté estrelles, gas, pols i una concentració central d'estrelles coneguda com a protuberàncies. Aquestes estan envoltades per una regió d'espai, d'aproximadament 15 kpc, format per gas interestel·lar poc dens, estels vells i matèria fosca anomenat halo galàctic. També contenen un forat negre supermassiu al centre de la protuberància central. S'anomenen així degut a la seva estructura espiral que s'estén des del centre cap als seus braços. Aquests llocs de formació estel·lar constant, brillen més que el disc que l'envolta a causa de les estrelles joves calentes que els formen. Aquestes es troben sobretot a les regions de baixa densitat. Als anys 90 (43), es va confirmar que la nostra galàxia és una espiral barrada, a causa de les evidències d'una estructura rectangular cap al centre.

Finalment, les galàxies S0, també anomenades lenticulars, són una combinació entre el·líptiques i espirals. Contenen una voladura i una gran regió de brillantor relativament mancada d'estructura que sovint apareix com a disc sense braços en espiral. Les el·líptiques i les S0 es coneixen com a galàxies de tipus precoç, mentre que les espirals són galàxies de tipus tardà.

A més dels principals tipus de morfologies de galàxies esmentats, n'hi ha altres que no entren en l'esquema de Hubble. Moltes d'aquestes són presumptament causades per la interacció entre galàxies.

4.3. Alexander Friedman

Alexander Friedman, nascut al 1888, va ser un matemàtic i meteoròleg rus especialitzat en cosmologia relativista. Un cop iniciada la seva carrera científica com a meteoròleg, va aprendre pel seu compte la relativitat general i va utilitzar les seves equacions per descriure com un univers espacialment homogeni i isotòpic s'expandeix o es contrau en funció del temps. Els primers resultats que va obtenir els va publicar set anys abans que es publicés la llei de Hubble el 1929 (39). Desafortunadament els seus documents van ser considerats de poca importància per part de la comunitat científica. Fins i tot Einstein inicialment va considerar el seu treball una curiositat matemàtica i no el va relacionar amb l'Univers en què vivim. Va ser després de publicar-se els resultats de Hubble, quan Einstein va reconèixer la realitat de l'Univers en expansió, tot i que Friedman ja havia mort.

En un context cosmològic, les equacions d'Einstein es poden utilitzar per a trobar la relació entre $a(t)$, κ i R_0 , que descriuen la curvatura de l'Univers, la densitat d'energia $\epsilon(t)$ i la pressió $P(t)$ del contingut de l'Univers. L'equació que uneix $a(t)$, κ , R_0 i $\epsilon(t)$ es coneix com l'equació de Friedman (32) qui la va formular des d'un punt de vista newtonià, començant per la llei de la gravetat i la segona llei del moviment.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) + \frac{2U}{r_s^2} \frac{1}{a(t)^2} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Una derivació de l'equació de Friedman correcta, inclosa la possibilitat de curvatura espacial, ha de començar amb les equacions d'Einstein. És per això, que a partir d'aquesta formulació, va començar a fer alguns canvis amb la finalitat de relacionar els conceptes esmentats. El primer canvi va ser la substitució de la densitat de massa per una densitat d'energia dividida pel quadrat de la velocitat de la llum. També va realitzar una modificació a partir de la idea d'Einstein referent a la determinació de la influència gravitacional d'una partícula, ja que la quantitat important no era la seva massa sinó la seva energia. No obstant això, quan es vol aplicar l'equació de Friedman a l'Univers real, s'ha de poder vincular d'alguna forma amb propietats observables. Per exemple, aquesta equació pot estar relacionada amb la constant de Hubble H_0 , per tant, al paràmetre de Hubble, $H_0(t)$. L'equació de Friedman avaluada en aquest moment és la (Eq. 4.2).

$$H_0^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \varepsilon_0 - \frac{\kappa c^2}{R_0^2} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

El subíndex '0' indica el valor d'una quantitat de temps avaluat al present. Per tant, l'equació de Friedman proporciona una relació entre H_0 -que informa de la taxa d'expansió actual-, ε_0 -indicador de la densitat d'energia actual- i κ/R_0^2 -la curvatura actual-. Ara bé, per fer referència a l'equació de Friedman en termes generals es recorre a la (Eq. 4.3).

$$H(t)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \varepsilon(t) - \frac{\kappa c^2}{R_0^2 a(t)} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

4.4. Georges Lemaître

Va ser un matemàtic i astrofísic belga nascut al 1894. Durant la seva carrera professional es va dedicar a estudiar especialment la teoria de la relativitat general d'Einstein 4.1.2 i les aplicacions que aquesta tenia en la cosmologia. També va centrar els seus estudis en la interpretació de les galàxies en la teoria de l'Univers en expansió i la recessió que tenen aquestes. El valor que va obtenir quan va calcular la velocitat en que s'allunyen les galàxies va resultar ser més alt que l'actual. Tot i així, degut a la quantitat que va obtenir, va pensar que la mida de l'Univers en un passat era molt més petita. En el cas que s'hagués seguit un ritme d'expansió lineal, l'edat de l'Univers seria inferior al valor obtingut per la Terra. És per això, que Lemaître va considerar una expansió exponencial on la mida de l'Univers en els seus primers moments era pràcticament constant.

Al 1927 (44) va publicar un informe en el qual hi havia la solució de les equacions d'Einstein, tot i que Friedman ja les havia resolt però Lemaître ho desconeixia. Va ser en aquest mateix informe on suggeria l'expansió de l'Univers i justificava l'observació d'un desplaçament cap al roig en la llum de les nebuloses espirals que havien observat dos científics anomenats Slipher i Wirtz (33). No obstant això, aquesta teoria va ser estudiada i valorada per grans científics de la època com Eddington o el mateix Einstein. Aquest últim no va estar d'acord amb els estudis que presentaven tan Friedman com Lemaître perquè s'esperava que la solució que proposaven constituís la única descripció possible de l'Univers. En canvi, Eddington va ser una excepció ja que a part d'admetre l'expansió de l'Univers, va reconèixer la brillant solució de Lemaître.

Finalment, al 1931 (45) va proposar la idea de l'origen de l'Univers com una gran explosió d'un àtom primigeni, la que posteriorment es va anomenar teoria del Big Bang. El seu interès per l'origen del cosmos va seguir-hi present. Des de feia temps s'havia plantejat la possibilitat de comprendre la infinitud, tenia una confiança profunda en la racionalitat del món i en la capacitat de la intel·ligència humana per assolir la de la totalitat de l'Univers. També es va arribar a qüestionar la compatibilitat de la física amb el principi de l'Univers. I així doncs, al no trobar cap contradicció va començar a fer alguna modificació en el seu model cosmològic, com ara donar una edat finita a l'Univers, a partir de la mecànica quàntica.

5. Teoria del Big Bang

Tal com s'ha indicat anteriorment (4), la teoria del Big Bang es considera el model cosmològic predeterminant pels períodes coneguts més antics de l'Univers i la seva evolució posterior a gran escala. A partir de la Gran Explosió es va crear la matèria, el temps i l'espai. Des d'un punt de vista físic es tracta d'una singularitat, ja que fa referència a una zona de l'espai-temps on no es pot definir cap magnitud física relacionada amb els camps gravitacionals. En les equacions d'Einstein, per exemple, apareixen moltes singularitats com ara la descripció de forats negres o la descripció de l'origen de l'Univers.

L'estat a partir del qual l'Univers va iniciar la seva expansió és extremadament dens i calent; es més, durant un breu instant després del Big Bang, la densitat de l'Univers hauria d'haver estat superior a la densitat de Planck (46). Per a poder estudiar aquest fenomen des d'un punt de vista teòric caldria recórrer a una nova teoria -encara desconeguda- relativa a la gravetat quàntica ja que, en la física actual no hi ha cap teoria -ni la pròpia teoria de la relativitat general 4.1.2- que sigui capaç d'explicar el Big Bang i els inicis de l'Univers en la seva totalitat. Tanmateix, aproximadament un microsegon després de la gran explosió, l'Univers ja s'havia expandit i refredat a uns valors suficients per a què la seva evolució posterior estigués determinada per processos observables en la física de partícules.

La teoria del Big Bang s'ocupa de l'evolució de l'Univers en un rang temporal comprès entre el temps de Planck (47), aproximadament 10^{-43} segons després del Big Bang, i 400.000 anys més tard quan ja es van començar a formar àtoms estables i l'Univers es va fer visible. Per assolir aquest model cosmològic, molts científics han anat construint el camí que porta a la gènesi d'aquesta explicació a partir de les observacions de l'estructura de l'Univers i dels avenços teòrics. Tanmateix, el Big Bang depèn de dues grans suposicions essencials; la universalitat de les lleis físiques i el principi cosmològic. D'altra banda, tal i com s'ha explicat en apartats anteriors, es considera l'existència de tres grans proves empíriques per donar suport a aquesta teoria: l'expansió de l'Univers, les mesures detallades de la radiació còsmica de fons i l'abundància d'elements lleugers.

Degut a la complexitat de la seqüència teòrica, el Big Bang es divideix en diferents etapes:

- L'era de Planck: és la fase en què les teories físiques actuals esdevenen no vàlides. Es requereix un avenç en la cosmologia quàntica, és a dir, en la investigació basada en la descripció de l'Univers per a temperatures aproximadament com la de Planck (48), que podria ser explicada a través d'alguna formulació com la teoria de les cordes.
- La inflació còsmica: una fase d'expansió exponencial molt ràpida i accelerada poc després del Big Bang, entre 10^{-36} i 10^{-33} segons (49), a causa d'una energia del buit positiva.

- L'era de la gran unificació: es preveu que tingui lloc aproximadament a una temperatura de 10^{16} GeV (50) i que doni lloc a la teoria de la gran unificació, aquella en què es postula que les forces electromagnètiques, feble i forta són aspectes diferents d'una interacció única. També podria ser l'origen de la matèria fosca i de la bariogènesi.
- La bariogènesi: tot i que és una etapa molt poc coneguda, fa referència a aquella en què es produeix una asimetria entre els barions i anti-barions, és a dir, el fenomen que permet passar d'un estat on la matèria i l'antimatèria es troben en quantitats iguals, a un en el que hi ha un excés de matèria en comparació amb l'antimatèria.
- El desacoblament dels neutrins: en aquesta fase l'Univers s'ha refredat a una temperatura que permet acabar amb l'equilibri tèrmic dels neutrins.
- L'anihilació electrons-positrons: quan la temperatura és superior a 0,5 MeV (51), les interaccions entre electrons i fotons poden crear de manera espontània parells d'electró-positró, no obstant, quan la temperatura disminueix fins a aquest valor, es produeix l'anihilació dels parells electrons-positrons i es formen els fotons, produint un excés d'electrons provinent de la bariogènesi.
- Nucleosíntesi primordial: explicada detalladament a l'apartat 3.3.3, quan l'Univers s'ha refredat i assoleix un valor per a la temperatura de 0,1 MeV (52), aproximadament un segon després de la gran explosió, s'inicia la combinació entre els nucleons per a formar nuclis atòmics.
- Recombinació: aquesta etapa ve determinada per l'inici de la propagació de la llum un cop l'Univers va assolir una densitat suficientment baixa i va començar a tenir lloc la creació d'àtoms com a conseqüència de la recombinació entre els electrons i els nuclis atòmics.
- Finalment, milions d'anys després, s'arriba al dia d'avui amb l'estructura de l'Univers actual.

Ara bé, una part d'aquesta teoria es basa en fenòmens físics que no han estat observats en experiments de laboratori, com per exemple la bariogènesi. Aquest fenomen proporciona explicacions dels trets importants de l'Univers primitiu satisfactòries però no deixa de ser una especulació; podria ser substituïda per una altra hipòtesi sense afectar a la resta de la teoria. Hi ha moltes incògnites no contrastades i, per això, és imperfecta. A continuació es fa referència als principals problemes d'aquesta teoria.

- La matèria fosca: les característiques de gran part de la massa de l'Univers són desconegudes ja que està constituïda per diferents partícules que encara no s'han identificat actualment.
- L'instant inicial: no hi ha cap teoria que unifiqui la teoria de la relativitat general amb la mecànica quàntica.
- L'acceleració de l'expansió de l'Univers: l'expansió de l'Univers es troba en estat d'acceleració, la qual cosa no sembla lògica en el cas de que l'única força que actua a gran escala sigui la

gravetat. La relativitat general explica aquest fenomen requerint l'existència d'un component energètic amb una pressió negativa: l'energia fosca.

- Problema de l'horitzó: res pot viatjar més ràpid que la velocitat de la llum, per tant dues regions separades per una distància més gran que la velocitat de la llum multiplicada per l'edat de l'Univers, no poden estar connectades de manera causal si es tracta d'un univers d'edat finita. Tot i així, al 2003 (53) es va postular una teoria en què la velocitat de la llum es variant, el que podria ser la solució a aquesta qüestió.
- Problema de la planor: com s'explica en el següent apartat, l'Univers pot tenir tres tipus de curvatura segons la densitat d'energia total; negativa si aquesta és menor que la densitat crítica, zero si té el mateix valor i positiva si és més gran. No obstant això, l'Univers mai ha arribat a cap 'big crunch', teoria cosmològica que proposa un destí final pel nostre Univers. Segons aquesta, si l'Univers realment té una densitat crítica, l'expansió de l'Univers s'anirà frenant lentament fins que, novament, tota la seva matèria es comprimeixi en una regió d'espai-temps on no es pugui definir cap magnitud física relacionada amb els camps gravitacionals. Una possible explicació pot ser la provenença del període d'inflació de l'Univers, ja que l'espai-temps s'hauria expandit ràpidament acabant amb les curvatures residuals que hi poguessin haver, conduint així l'Univers a un estat gairebé pla i amb un valor de densitat d'aproximadament al de densitat crítica.
- Asimetria de barions: no s'acaba de trobar una explicació pel predomini de matèria respecte a antimatèria, ja que, el coneixement de la bariogènesi i les condicions necessàries per a què es dugui a terme, no són suficients per a explicar aquesta asimetria de barions.

5.1. Curvatura de l'Univers

Al desenvolupar una teoria matemàtica de la relativitat general, en què la curvatura d'espai-temps està relacionada amb la densitat de massa-energia, Einstein necessitava una forma de descriure-la matemàticament. Una bona manera de començar l'estudi és suposar un espai bidimensional, per exemple, la superfície d'una esfera. En aquest cas, com es mostra a la Figura 5.1 i Figura 5.2, hi ha la possibilitat d'una curvatura positiva o negativa.

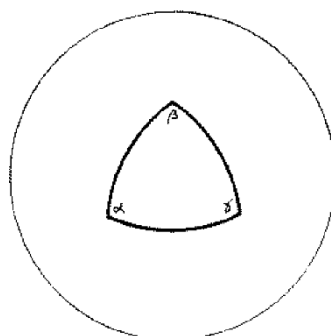


Figura 5.1. Curvatura de l'espai-temps quan $\kappa > 0$. La suma dels angles del triangle és més gran que 180° .

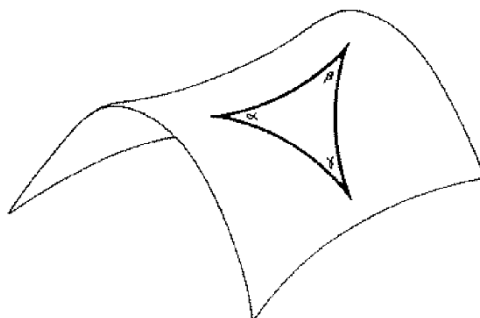


Figura 5.2. Curvatura de l'espai-temps quan $\kappa < 0$. La suma dels angles del triangle és més petita que 180° .

No obstant això, per a què un espai bidimensional sigui homogeni i isotòpic només hi ha tres possibilitats: l'espai pot ser uniformement pla, pot tenir una curvatura positiva uniforme o pot tenir una curvatura negativa uniforme. Per tant, si un espai bidimensional té una curvatura que es homogenia i isotòpica, la seva geometria es pot especificar a través de R i κ . Si l'espai es corbat, el valor de R fa referència al radi de la curvatura i té dimensions de longitud, mentre que κ defineix la constant de curvatura.

Un univers simple és aquell que està buit, és a dir, sense radiació, sense la constant cosmològica (54) de l'equació d'Einstein i sense contribució a ϵ de cap tipus. L'equació de Friedmann per aquest tipus d'univers és la següent.

$$a^2 = -\frac{\kappa c^2}{R_0^2} \tag{Eq. 5.1}$$

En el cas de que 'a' i κ equivalguin a 0, totes les transformacions de la relativitat especial són certes. El valor de κ igual a 0 equival a un espai pla. Ara bé, si $\kappa=-1$ es parla d'un espai corbat negativament. No obstant, la possibilitat restant per a κ en què té un valor més gran que 0, un espai corbat positivament, està descartada ja que comportaria un valor imaginari de 'a' en l'equació.

Un univers buit i amb una curvatura negativa s'ha d'estar expandint o contraient segons l'equació (Eq. 5.2).

$$\dot{a} = \pm \frac{c}{R_0} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Per altra banda, pel que fa a la forma de l'Univers, sabent que es tracta d'un univers en expansió, la integració d'aquesta relació produeix un factor d'escala amb la següent forma on $t_0=R_0/c^2$.

$$a(t) = \frac{t}{t_0} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Un univers buit i en expansió pot semblar una simple curiositat teòrica i matemàtica. No obstant, si la densitat d'un univers, ϵ , es molt petita en comparació amb la crítica, ϵ_c , el factor d'escala lineal de l'equació anterior és una bona aproximació del factor d'escala real.

Ara suposem que el nostre univers està en expansió i amb un valor insignificant del paràmetre de densitat Ω , de manera que es pot aproximar raonablement com a un univers buit, corbat negativament i amb un t_0 igual al temps de Hubble (55). Si s'observa una font de llum distant que té un desplaçament cap al vermell 'z', la llum observada quan $t=t_0$ es va emetre en un moment anterior, és a dir, quan $t=t_e$.

$$1 + z = \frac{1}{a(t_e)} = \frac{t_0}{t_e} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

D'aquesta manera és fàcil calcular el moment en què es va emetre la llum que s'observa des de la font.

$$1 + z = \frac{1}{a(t_e)} = \frac{t_0}{t_e} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

Sabent que la distància adequada actual per un observador fins a una galàxia ubicada en aquestes coordenades (r, θ, φ) és la següent:

$$d_p(t_0) = a(t_0) \int_0^r dr = r \quad (\text{Eq. 5.6})$$

Si la galàxia emet llum en el temps t_e i l'observador la detecta en el temps t_0 , la seva distància respecte la galàxia segueix l'expressió (Eq. 5.7):

$$d_p(t_0) = c \int_{t_e}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} \quad (\text{Eq. 5.7})$$

Aquesta expressió és vàlida quan es vol fer referència a un univers buit i en expansió. I en aquest cas, si es busca una expressió en funció del desplaçament al vermell 'z' de la galàxia observada, s'obté l'equació (Eq. 5.8).

$$d_p(t_0) = \frac{c}{H_0} \ln(1+z) \quad (\text{Eq. 5.8})$$

A distàncies $d_p(t_0) \gg c/H_0$ el desplaçament cap al vermell augmenta exponencialment amb la distància, tot i que a primera vista pot semblar contradictori que hi hagi una font de llum a una distància molt més gran que c/H_0 quan l'edat de l'Univers és només $1/H_0$. No obstant això, si $d_p(t_0)$ és la distància a la font de llum en el moment de l'observació, la distància $d_p(t_e)$ era menor, en un factor $a(t_e)/a(t_0) = 1/(1+z)$, en el moment de l'emissió. És per això que, en un univers buit i en expansió, la distància adequada en el moment de l'emissió s'expressa mitjançant l'expressió (Eq. 5.9):

$$d_p(t_e) = \frac{c}{H_0} \frac{\ln(1+z)}{1+z} \quad (\text{Eq. 5.9})$$

En aquest tipus d'univers, $d_p(t_e)$ té un màxim per a objectes amb un desplaçament aproximat al vermell de 1,7. Els objectes que tenen aquests desplaçaments molt més alts fan referència a una època molt primerenca en la història de l'Univers.

La geometria de l'espai-temps va ser mesurada pel satèl·lit WMAP (56), i es va obtenir un resultat que indicava que l'Univers té una geometria gairebé plana, és a dir, el paràmetre de curvatura κ és aproximadament 0.

5.2. Densitat crítica

El paràmetre de densitat (Ω) es defineix com la relació de la densitat actual (ρ) respecte a la densitat crítica (ρ_c) de l'univers de Friedmann (57), tots els seus models assumeixen que la constant cosmològica

(Λ) equival a 0 (58). Una possible expressió per la densitat crítica, quan s'estableix una curvatura igual a 0, és l'equació (Eq. 5.10).

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (\text{Eq. 5.10})$$

També s'obté la fórmula per a poder comparar diferents models cosmològics a partir del paràmetre de densitat.

$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{8\pi G}{3H^2} \rho \quad (\text{Eq. 5.11})$$

Si s'assumeix una densitat d'energia del buit nul·la, amb un paràmetre de densitat més gran que 1, la geometria serà tancada i l'univers eventualment parará la seva expansió i es col·lapsarà. En canvi, un valor de Ω menor que 1, correspondrà a una geometria oberta i l'univers s'expandirà sempre. Finalment, si aquest paràmetre té un valor igual a 1, els termes de curvatura i d'energia del buit es poden sintetitzar en una expressió més general. La primera equació de Friedmann 4.3 algunes vegades s'escriu de la següent forma a través del paràmetre de densitat.

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \Omega_R a^{-4} + \Omega_M a^{-3} + \Omega_\Lambda - \kappa c^2 a^{-2} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

L'evolució del nostre Univers es complicada ja que involucra diferents components amb diverses equacions d'estat. Actualment s'afirma que l'Univers conté matèria i radiació no relativistes i, amb el resultat de l'equació (Eq. 5.13) es pot concloure que la densitat d'energia ε_m associada amb la matèria no relativista disminueix a mesura que l'Univers s'expandeix amb la dependència $\varepsilon_m(a) = \varepsilon_{m,0}/a^3$.

$$\varepsilon_w(a) = \varepsilon_{w,0} a^{-3(1+w)} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

En canvi, la densitat d'energia en radiació, ε_r , disminueix a una velocitat més pronunciada.

$$\varepsilon_r(a) = \varepsilon_{r,0}/a^4 \quad (\text{Eq. 5.14})$$

Pel que fa a la densitat d'energia dels fotons, quan es fa referència al del fons còsmic de microones, resulta ser més gran que la densitat d'energia de tots els fotons emesos per totes les estrelles en la història de l'Univers. La densitat d'energia actual del CMB (17), que té una temperatura $T_0=2,725\text{K}$, és la següent.

$$\varepsilon_{CMB,0} = 0,260 \text{ MeV}m^{-3}$$

Això produeix un paràmetre de densitat pel CMB ($\Omega_{\text{CMB},0}$) de 5×10^{-5} (17). Aquestes dues estimacions resulten ser molt aproximades i s'ha pogut concloure que en el passat, la relació entre la densitat de llum de les estrelles i la densitat de CMB era fins i tot més petita que l'actual.

Ara bé, si es vol estudiar un temps anterior respecte el fons còsmic de microones, apareix el moment en què l'Univers era suficientment calent i dens com per ser opac als neutrins i, en conseqüència, de la mateixa manera que es coneix el CMB també hi ha el fons còsmic de neutrins. Tot i així, els neutrins procedents d'aquest fons còsmic, encara no s'han detectat a causa de l'abast limitat de la tecnologia actual. La densitat d'energia dels neutrins ha de ser comparable a la dels fotons, però no igual.

$$\varepsilon = 0,227 \varepsilon_{\text{CMB}} \quad (\text{Eq. 5.15})$$

$$\Omega_\nu = 0,681 \Omega_{\text{CMB}} \quad (\text{Eq. 5.16})$$

Desafortunadament, la densitat d'energia total de la matèria no relativista es poc coneguda, a l'igual que la densitat d'energia de la constant cosmològica. Per tant, si es vol treballar amb un model que coincideixi amb les propietats observades de l'Univers, es fa referència al model amb la següent relació entre la densitat d'energia Λ i la densitat d'energia en la matèria.

$$a_{m\Lambda} = 0,75$$

En canvi, el moment de la igualtat entre la radiació i la matèria va tenir lloc en un factor d'escala equivalent (a_{m}) a $2,8 \times 10^{-4}$ (17). Així doncs, l'evidència indica que vivim en un univers on la radiació dominava les primeres etapes de la seva història fins que, posteriorment, va començar a dominar la matèria.

En un univers que es troba en expansió contínua, el factor d'escala (a) és una funció creixent de 't' i, per tant, aquest es pot utilitzar com un substitut del temps. Tanmateix, degut a la senzilla relació entre el factor d'escala i el desplaçament al vermell, $a = 1/(1+z)$, els cosmòlegs utilitzen aquest desplaçament usualment per fer referència al temps.

5.3. Models d'Univers

Al llarg de la història hi ha hagut molts científics que s'han dedicat a estudiar les lleis que governen el nostre Univers i la seva evolució. Tot i que aquests estudis segueixen evolucionant, s'han realitzat una sèrie d'hipòtesis amb la finalitat d'explicar tot allò que governa el nostre Univers. Inicialment, la cosmologia tractava a l'Univers com a un model lineal, és a dir, amb un principi i un final. No obstant això, en les darreres dècades hi ha hagut un avenç important i la visió d'aquest model ha canviat.

Una proposta va ser una nova visió en la descripció quàntica, on s'unificaven totes les interaccions, incloent la gravetat, en què es considera els objectes unidimensionals com a constituents fonamentals de la matèria. La idea essencial que constitueix aquesta proposta, anomenada teoria de cordes (59), és que els components fonamentals de tot allò que ens rodeja són cordes d'una longitud com la de Planck (56), és a dir, amb un ordre de 10^{-35} m, i vibren a freqüències de ressonància. Aquesta hipòtesi, postulada per Jöel Scherk i John Henry Schwarz en un article que van publicar al 1974 (60), també indica que aquestes cordes, que suposadament es cargolen al voltant de diferents dimensions, no mostren cap diferència quan ho fan al voltant de dimensions més petites o més grans que les seves. D'acord amb aquesta teoria, depenent de com vibrés una corda es podria observar un fotó, un quark o qualsevol altra partícula del model estàndard (61). També s'ha de tenir en compte que aquesta teoria només té sentit si l'Univers està governat per onze dimensions. La no visibilitat d'aquestes dimensions addicionals estaria relacionada al fet de la compacitat entre elles i, així doncs, només serien rellevants a escales més petites comparables amb la longitud de Planck (56).

La teoria de cordes no és una única teoria, existeixen cinc versions que estan molt relacionades amb les quals s'intenta justificar quina és la compacitat del nostre Univers. Tot i que inicialment es creia que les diferents versions eren molt diferents, actualment es parla d'una connexió entre elles ja que totes aporten la mateixa informació, però cadascuna ho fa de manera diferent.

No obstant això, encara es desconeix quants tipus de compactificacions hi ha. Pot ser que la teoria de cordes justifiqui les diferents maneres de crear un univers i que el nostre estigui dotat per només una d'elles. Si es així, hi hauria la possibilitat de que hi hagués altres universos amb diferents compactacions al nostre i es podria parlar d'un multi-univers. Va ser al 1995 quan Edward Witten va conjecturar que les cinc diferents teories de supercordes són casos límits d'una desconeguda teoria d'onze dimensions anomenada Teoria-M (61). En aquesta, no només intervenen cordes unidimensionals, sinó que també ho fan una varietat d'objectes no pertorbatius, estesos en varies dimensions, anomenats p-branes.

Un altra concepció que va aparèixer i -com en el cas del multi-univers- fa referència a més d'un univers, és la possibilitat d'universos paral·lels. En aquest cas, cada univers governaria realitats completament diferents i independents. Una de les versions científiques més curioses d'aquesta possibilitat, postulada per Hugh Everett, és la interpretació dels universos múltiples (IMM) (62). Això podria ser una solució al problema de mesurament, aquell que altera de forma incontrolada l'evolució del sistema. És un error pensar, en aquest marc de la física, que mesurar es revelar propietats que estaven al sistema anteriorment, ja que, la informació que proporciona la funció d'ona és la distribució de probabilitats amb les que es podrà mesurar un valor de la quantitat corresponent. La mecànica quàntica ha estat la teoria física més precisa fins al moment, permetent fer càlculs teòrics amb molta precisió i proporcionant una gran quantitat d'aplicacions pràctiques; però la interpretació d'alguns resultats i fonaments resulta molt complexa.

D'altra banda, s'ha especulat en diferents possibilitats d'accedir a aquests diferents universos a través de la recerca d'una solució per a les equacions d'Einstein. Aquelles regions de l'espai-temps creades per l'explosió d'algunes estrelles quan col·lapsen amb la seva pròpia gravetat i que ni la pròpia llum en pot escapar ja que absorbeixen tot allò que es troba a una certa distància, s'anomenen forats negres. Segons Stephen Hawking (63) els forats negres podrien ser l'entrada als universos paral·lels i, en una de les seves últimes idees, explica que passa amb la informació física absorbida ja que es una qüestió molt desconcertant a la que s'afronten els físics. Tot el que ens envolta està codificat mitjançant la mecànica quàntica i, segons Hawking, aquesta informació no hauria de desaparèixer. Hauria de conservar-se fins i tot si es absorbida per un forat negre. Hawking també va afirmar que el forat hauria de ser molt gran i que es comportaria com a passatge cap a un altre univers en el moment de produir-se el seu gir, això sí, sense la possibilitat de retorn al nostre.

6. Constant de Hubble i edat de l'Univers

El desplaçament de les galàxies (l'allunyament de la Via Làctia que experimenten totes les galàxies més enllà del Grup Local) és un dels descobriments més importants que va fer Edwin Hubble. En la famosa llei que va postular, la llei de Hubble, hi apareix una constant de proporcionalitat que està relacionada amb l'edat de l'Univers. Tot i que, originàriament, el valor d'aquest paràmetre apareixia com una constant, els models cosmològics relativistes en què es basa la teoria del Big Bang suggereixen que, realment, es tracta d'un paràmetre que varia lentament amb el temps. De la proporcionalitat entre velocitat de recessió o allunyament i distància, $v = H_0 D$, és fàcil veure que la constant de Hubble, H_0 , té dimensions de temps elevat a la -1. És a dir, $1/H_0$ té dimensions de temps. Si suposem que l'expansió de l'Univers s'ha produït a ritme constant, $1/H_0$ proporciona una estimació de la durada d'aquesta fase d'expansió, o el que és el mateix: l'edat de l'Univers. Així doncs, a partir del valor d' H_0 és possible estimar quant de temps ha passat des que va tenir lloc la gran explosió.

La constant de Hubble es relaciona amb el paràmetre de desacceleració 'q', definit per la següent equació:

$$q = -H_0^{-2} \left(\frac{dH_0}{dt} + H_0^2 \right) \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Durant molt temps es pensava que el signe de 'q' era positiu (és a dir, que l'expansió de l'Univers es frenava amb el temps; d'aquí el nom que rep el paràmetre), però el 1998 es va descobrir que el valor de q és aparentment negatiu i això significa que l'Univers podria ser més vell que $1/H_0$.

Al llarg de la història, s'han fet moltes estimacions del valor d' H_0 i dels anys que han passat des de l'inici de l'Univers. El 2006, gràcies a mesures de molta precisió de la distribució de la radiació de fons cosmològica realitzades per la sonda espacial WMAP, es va obtenir un valor de 70 km/(s Mpc), que implicava una edat de l'Univers de 13.978 milions d'anys (64). Al mateix any, un estudi basat en la combinació d'observacions en raigs X mitjançant el telescopi espacial 'Chandra' i observacions radio de 38 cúmuls de galàxies, van permetre obtenir una nova (i independent) estimació de la constant de Hubble de 77 km/(s Mpc), amb un error estimat en un 15% (65). El 2009 es va obtenir la primera mesura amb un error inferior al 5%. I dos anys més tard, l'estudi de la recessió de més de 125.000 galàxies realitzat per l'equip de Florian Beutler (66)(67), va aconseguir una nova mesura amb més precisió, en aquest cas de 67,32 km/(s Mpc).

Els darrers anys, s'han publicat diferents estimacions basades en les mesures de la missió espacial Planck d'anisotropies al fons còsmic de microones (68), incidint novament en un valor per la constant de Hubble de 67,3 km/(s Mpc). La recent detecció d'ones gravitacionals produïdes durant la

coalescència de dues estrelles de neutrons ha permès també obtenir un valor independent de la constant de Hubble, $H_0 = 70 \text{ km}/(\text{s Mpc})$ (69)(70), tot i que amb una barra d'error major.

Finalment, un estudi publicat el 2018 (71), basat en lents gravitacionals (efecte produït quan la llum procedent d'objectes llunyans es desvia per la deformació de l'espai-temps produïda per un objecte massiu, per exemple una galàxia, situat entre l'objecte emissor i el receptor), suggereix un valor de la constant de Hubble de $64 \text{ km}/(\text{s Mpc})$.

Tal com es mostra en l'estudi original publicat per Edwin P. Hubble (1929)(72), la velocitat de recessió d'una galàxia és proporcional a la seva distància a la nostra galàxia, en la forma:

$$v = H_0 d \quad (\text{Eq. 6.2})$$

On 'v' és la velocitat de la galàxia relativa a la Via Làctia ($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$) i 'd' és la distància a la galàxia (Mpc). La velocitat es determina mitjançant l'efecte Doppler: la radiació emesa per un objecte en moviment, com una galàxia, mostra un desplaçament (*redshift*) de la seva longitud d'ona en l'espectre electromagnètic respecte el valor en repòs. Per a velocitats de recessió petites, la variació relativa de la longitud d'ona es pot escriure com:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

En aquesta definició, λ és la longitud d'ona en repòs, i $\Delta\lambda = \lambda_{obs} - \lambda$ és el canvi de longitud d'ona respecte al valor en repòs. En cosmologia, el quocient $\Delta\lambda/\lambda$ es defineix com desplaçament o redshift, 'z'. Pel que fa a 'c', la velocitat de la llum al buit, té un valor constant de $299.792,458 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Aquesta és la metodologia que s'ha seguit en aquest treball per a determinar la velocitat de recessió d'un conjunt de galàxies.

La determinació de distàncies intergalàctiques és més complexa. En aquest treball, s'ha utilitzat un mètode que es basa en la hipòtesi que totes les galàxies espirals tenen aproximadament la mateixa mida física. Així doncs, es pot determinar la distància a una galàxia, d, a partir del seu diàmetre angular, a, i del diàmetre real de la galàxia, s, mitjançant la següent expressió:

$$a = \frac{s}{d} \quad (\text{Eq. 6.4})$$

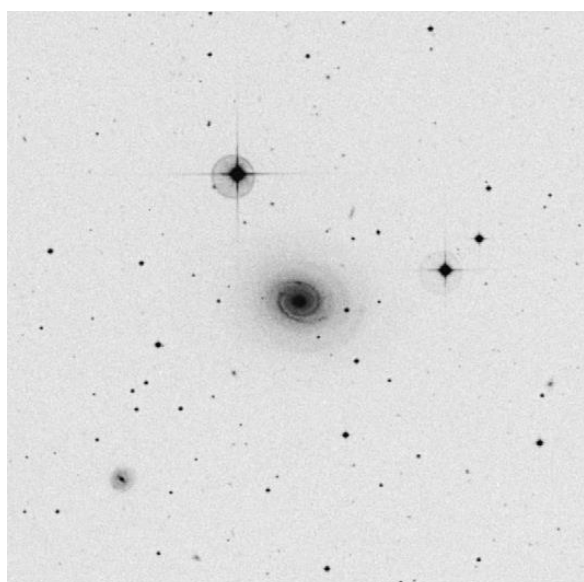
On s'ha fet servir que $\text{tg } a \sim a$, per a angles petits.

Aquests conceptes han sigut fonamentals per a realitzar la part d'anàlisi de dades experimentals d'aquest treball, que té com a objectiu obtenir la constant de Hubble i l'edat de l'Univers d'una manera aproximada. La metodologia específica seguida en aquest treball s'explica en el següent apartat.

6.1. Determinació de les velocitats i distàncies de recessió

L'estudi presentat en aquest treball es basa en la informació compilada a una web de la University of Washington (73) que recull espectres i imatges reals de vint-i-set galàxies espirals. Els espectres van ser obtinguts per Robert C. Kennicutt (1992). Les imatges digitals de les galàxies es basen en observacions realitzades per l'observatori de Mt. Palomar.

En primer lloc, s'ha determinat el diàmetre angular de cada galàxia a partir de mesures sobre la seva imatge. Aquest procés s'ha realitzat de forma manual seleccionant els dos extrems més allunyats de la galàxia, obtenint-ne les coordenades (x_1, y_1, x_2, y_2) corresponents. La Figura 6.1, a tall d'exemple, les mesures realitzades amb la galàxia NGC 1357.



NGC 1357 Galaxy Image

1. Determine the extent of the long axis of the galaxy as projected on our night sky (the galaxy located in the very center of the image at the left).
2. Click on one end of the long axis of the galaxy. The window will display the x,y pixel coordinates you have selected.
3. Click on the other end of the long axis of the galaxy (measurement may need to be a diagonal). The window will report the second set of x,y coordinates.
4. Record the **angular size** of the galaxy as reported.
5. If you make a mistake please click the "Try Again" link

1. Use the "Back" icon to return to the galaxy selection page.

Pixel values

The x1 value is 246
The y1 value is 229

Please Select a Second Point

[Try Again](#)




Figura 6.1. Metodologia per a calcular manualment el diàmetre d'una galàxia (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Un cop obtingut el diàmetre angular, a , i assumint un diàmetre d'una galàxia espiral típica de $s = 22$ kpc, es pot determinar la distància a la galàxia mitjançant l'equació (Eq. 6.4).

Pel càlcul de les velocitats de recessió, la web proporciona espectres a diverses bandes. Aquest treball, està basat en un subconjunt de línies espectrals concretes: les línies d'absorció del calci 'K' i 'H', i la línia d'emissió d'hidrogen 'H- α '. Seguint amb la mateixa galàxia de l'exemple anterior, el tauler inferior de la figura 6.2 mostra una part del seu espectre. Les línies de calci K i H són clarament identificables i corresponen a les dues línies d'absorció ("depressions" respecte al nivell del continu) a uns 3965Å i 4000Å; les línies verticals curtes, etiquetades com a 'Ca K' i 'Ca H', corresponen als valors mesurats al

laboratori (repòs) d'aquestes línies d'absorció del calci, 3933,7Å i 3968,5Å respectivament. En aquest treball, s'ha fet servir la posició del mínim d'aquestes línies d'absorció per a inferir el valor de les longituds d'ona de les línies Ca K i H.

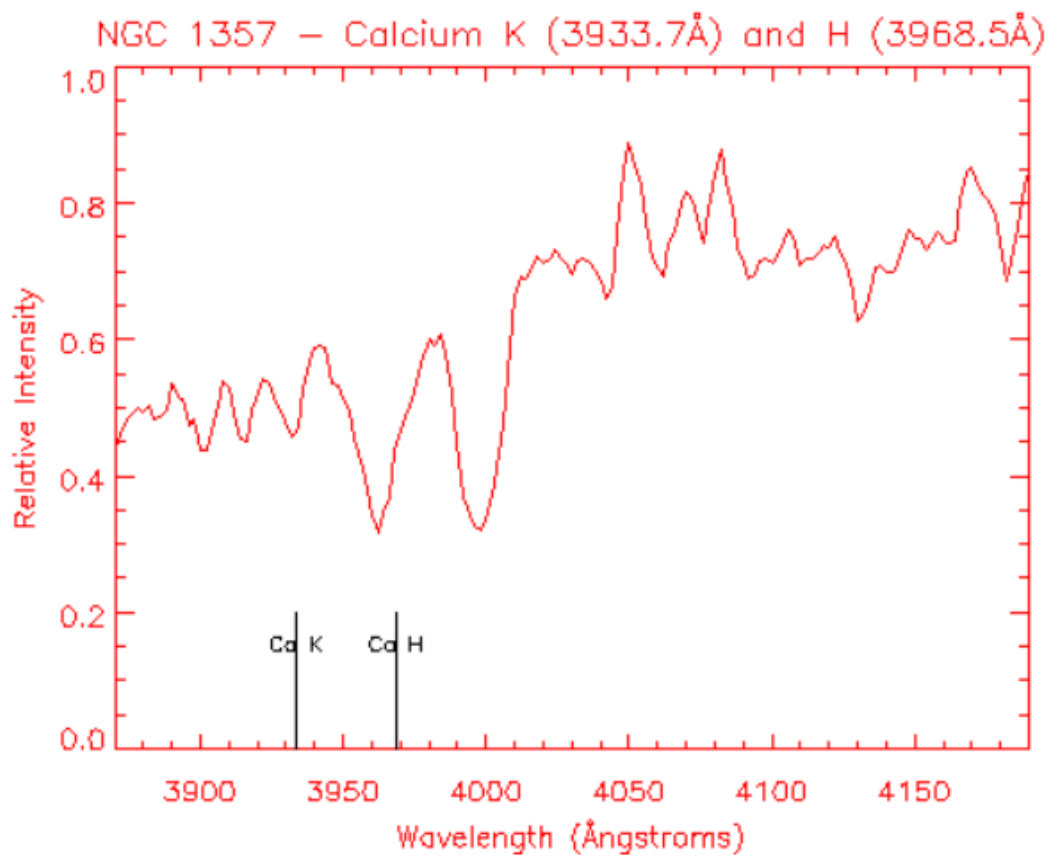


Figura 6.2. Part de l'espectre que conté les línies d'absorció Ca K i Ca H, per a la galàxia NGC 1357 (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Un procediment similar s'ha adoptat per a la línia d'emissió H- α . Com es pot observar en la Figura 6.3, el valor mesurat al laboratori (repòs) és de 6562,8Å i l'obtingut mesurant la posició del màxim de la línia (que, a la figura, correspon al màxim absolut d'intensitat relativa) té un valor de 6608,2Å.

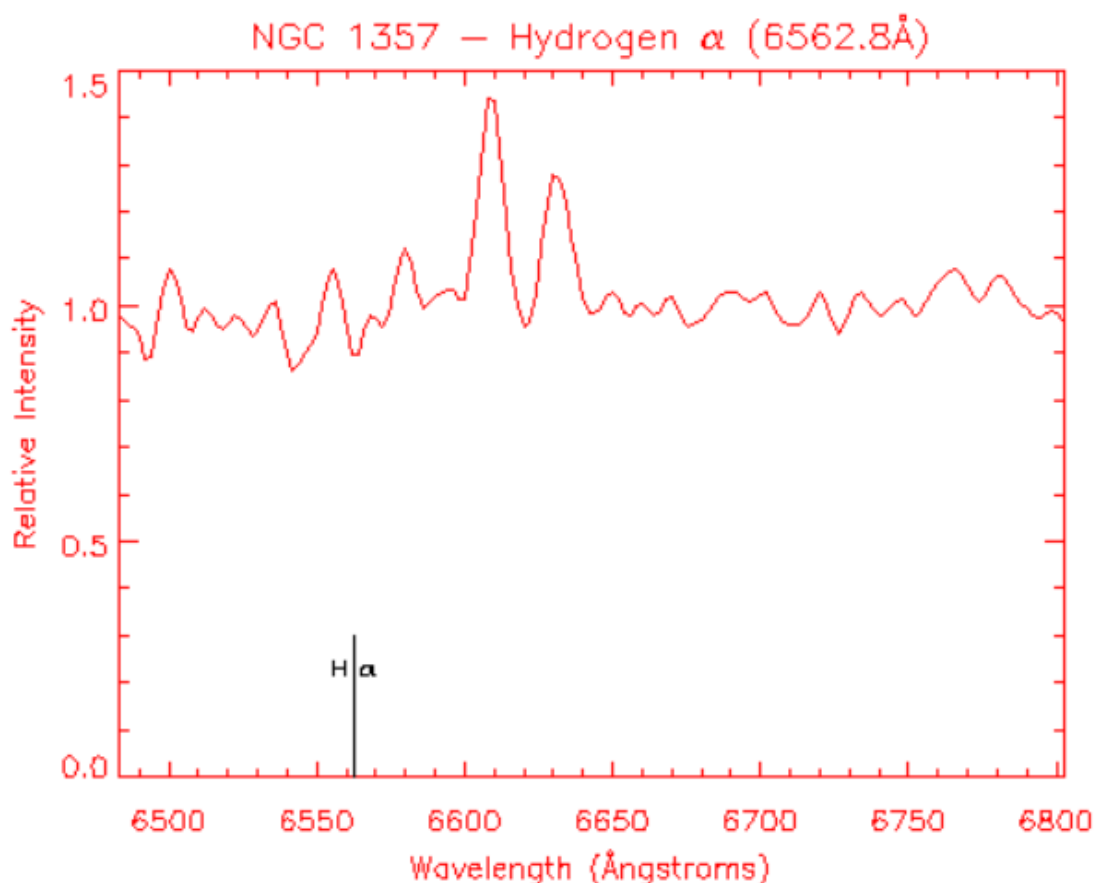


Figura 6.3. Part de l'espectre que conté la línia d'emissió H- α , per a la galàxia NGC 1357. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Seguidament, s'ha procedit al càlcul de la diferència de longituds d'ona entre el valor observat i el valor en repòs, per a les línies d'absorció Ca K i Ca H, i posteriorment, per a la línia d'emissió d'H- α . És important destacar que la velocitat de recessió es pot obtenir, en principi, amb una sola línia. El fet d'utilitzar-ne tres, ajuda, en principi, a minimitzar possibles errors d'implementació.

Les mesures realitzades directament en pantalla corresponen a valors en píxels. De cara a la transformació en unitats de distància (habitualment, àngstroms, en espectroscòpia) s'ha fet servir que la resolució del detector que va enregistrar aquests espectres és de 0,76Å per píxel. La variació relativa de la longitud d'ona d'una línia, ja sigui per a les línies d'absorció CaK i CaH, o d'emissió d'H- α , proporciona el valor del redshift z :

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (\text{Eq. 6.5})$$

'z' permet determinar directament la velocitat de recessió de la galàxia, en la forma:

$$v = c z \quad (\text{Eq. 6.6})$$

A tall d'exemple, es mostra una taula (Taula 6.1) creada per tal de facilitar la determinació de la velocitat i el desplaçament de cada galàxia. La part de l'esquerra mostra els càlculs i mesures preses directament sobre la imatge digital de la galàxia NGC 1357. A la dreta, es mostren els valors basats en mesures dels espectres de la galàxia.

Taula 6.1. Taula a partir de la qual es fan els càlculs per a determinar la distància i velocitats de recessió, per a la galàxia NGC 1357.

Galaxy img	NGC 1357	Galaxy spct	NGC 1357
X1	241	Ca K rest	3933,7
Y1	230	Ca H rest	3968,5
X2	309	H α	6562,8
Y2	299	Ca K meas.	3962
Angular size	0,9	Ca H meas.	3997,2
		H α meas.	6606,7
A	68	$\Delta\lambda$ Ca K ang.	28,3
B	69	$\Delta\lambda$ Ca H ang.	28,7
c en píxels	96,8762097	$\Delta\lambda$ H α ang.	43,9
c en μ rad	900,94875	z (Ca K)	0,00719424
		z (Ca H)	0,00723195
		z (H α)	0,00668922
s (kpc)	22	v (Ca K) km.s ⁻¹	2156,78027
a (mrad)	0,9	v (Ca H) km. s ⁻¹	2168,08455
D	24,4444444	v (H α) km. s ⁻¹	2005,37711

Després d'una primera anàlisi de les vint-i-set galàxies disponibles a la web, s'ha decidit eliminar cinc galàxies de la mostra, atès que la imatge digital proporcionada era de baixa qualitat, la qual cosa dificultava la identificació de les dimensions d'aquestes galàxies i introduïa errors importants en l'estudi .

Per tant, el treball que aquí és presentat es basa en l'estudi de vint-i-dues galàxies. La Taula 6.1 mostra els valors de distància i velocitat de recessió obtinguts per a aquestes vint-i-dues galàxies pel cas de la línia d'absorció Ca K. La distància a la galàxia, d, es representa en l'eix d'abscisses, mentre que la seva velocitat de recessió, v, es representa al d'ordenades.

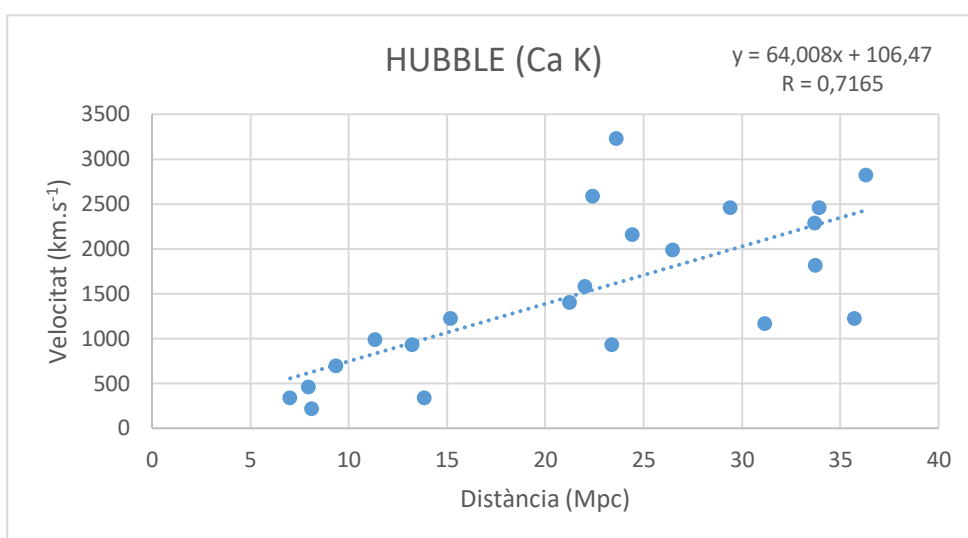


Figura 6.4. Gràfic corresponent a la línia d'absorció Ca K per a vint-i-dues galàxies de la mostra.

En aquest estudi s'ha fet ús d'un mètode basat en mínims quadrats a l'hora de valorar els errors estadístics associats al conjunt de mesures. Seguint amb el cas de la línia d'absorció Ca K, el primer pas s'il·lustra amb la següent taula corresponent a l'estudi fet amb les vint-i-dues galàxies.

Taula 6.2. Taula corresponent a l'estudi d'errors per mínims quadrats de línia d'absorció Ca K, per a una mostra de vint-i-dues galàxies.

Posicions x	Velocitat y	$y'=64,008x+106,47$	$y-y'$	$(y-y')^2$
24,4444444	2156,78027	1671,11	485,670273	235875,614
26,4741276	1989,11538	1801,02596	188,089419	35377,6296
29,4117647	2461,62554	1989,05824	472,567306	223319,859
22,022022	1577,57426	1516,05559	61,518678	3784,54774
7,02426564	335,329795	556,079195	-220,7494	48730,2977
8,1120944	221,01282	625,708938	-404,696119	163778,948
22,4032587	2583,56365	1540,45778	1043,10587	1088069,85
31,1614731	1166,03315	2101,05357	-935,020418	874263,182

23,6051502	3231,35984	1617,38845	1613,97139	2604903,65
11,3460547	990,747122	832,708267	158,038855	24976,2797
36,3036304	2819,81873	2430,19277	389,62596	151808,388
7,96812749	457,267902	616,493904	-159,226002	25352,9197
9,36170213	693,522985	705,69383	-12,1708444	148,129452
23,3793836	929,778068	1602,93759	-673,159519	453143,738
15,1724138	1227,0022	1077,62586	149,376343	22313,2918
33,7423313	1813,82935	2266,24914	-452,419795	204683,671
13,229104	929,778068	953,238491	-23,4604223	550,391414
13,8451857	335,329795	992,672643	-657,342848	432099,62
33,9506173	2461,62554	2279,58111	182,044431	33140,1747
35,7142857	1227,0022	2392,47	-1165,4678	1358315,18
21,2355212	1402,28823	1465,71324	-63,425009	4022,73176
33,6906585	2286,33951	2262,94167	23,3978432	547,459066
suma				7989205,55

De cara a millorar la correlació obtinguda, s'ha procedit a eliminar els tres valors de la Taula 6.2 que apareixen en vermell, atès que són els punts que més s'allunyen de la recta de regressió, com es pot veure a partir dels valors obtinguts per a $y-y'$ (desviació del valor de la velocitat respecte al valor que proporciona la recta). Cal tenir en compte, que una font habitual d'error en astronomia són les diferents condicions ambientals existents al moment d'observar el cel. Per això, és important filtrar la mostra i quedar-se amb les millors imatges, que permeten estudis sense ambigüitats. En aquest estudi, s'ha optat per eliminar les tres galàxies que presenten més dispersió respecte la recta de regressió, la qual cosa correspon a eliminar aproximadament el 15% de la mostra en totes les línies analitzades (tot i que les galàxies eliminades no són les mateixes per a totes les línies estudiades en aquest treball).

Un cop realitzat aquest filtre, s'ha procedit a reavaluar els paràmetres de la recta de regressió per a cada línia. Les noves gràfiques obtingudes, amb els corresponents ajustos, es mostren a la Figura 6.5, Figura 6.6 i Figura 6.7.

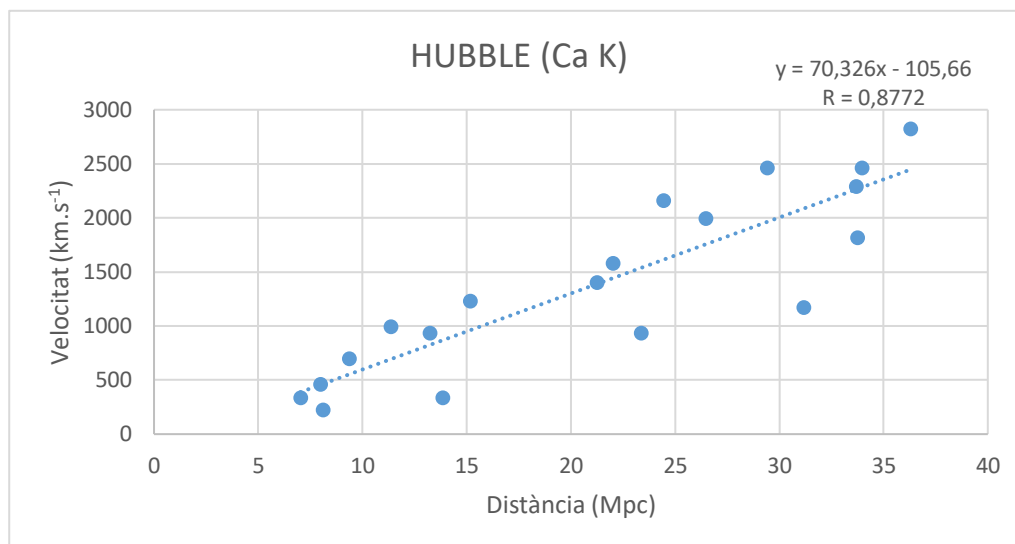


Figura 6.5. Gràfic corresponent a la línia d'absorció Ca K, un cop eliminat el 15% de les galàxies de la mostra.

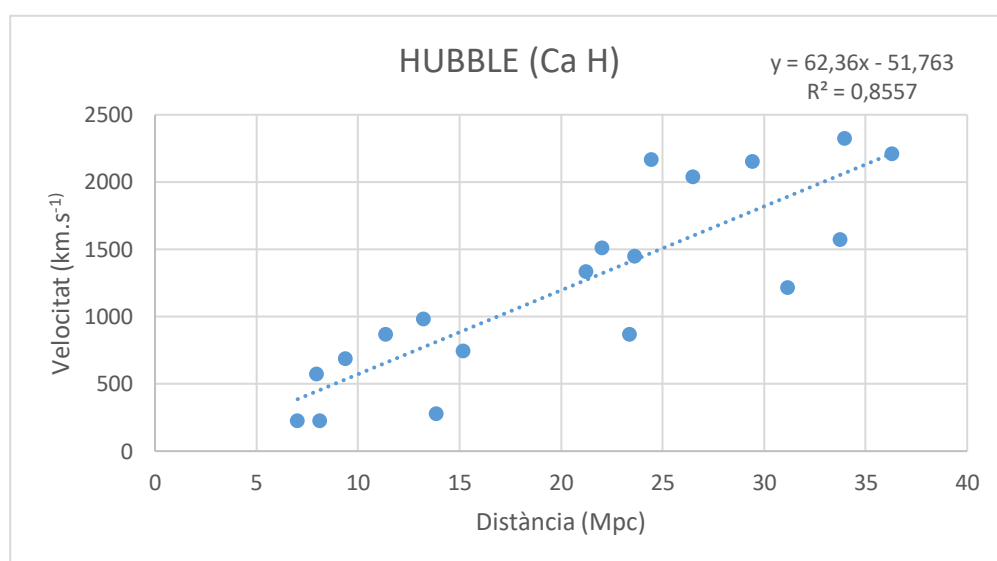


Figura 6.6. Gràfic corresponent a la línia d'absorció Ca H, un cop eliminat el 15% de les galàxies de la mostra.

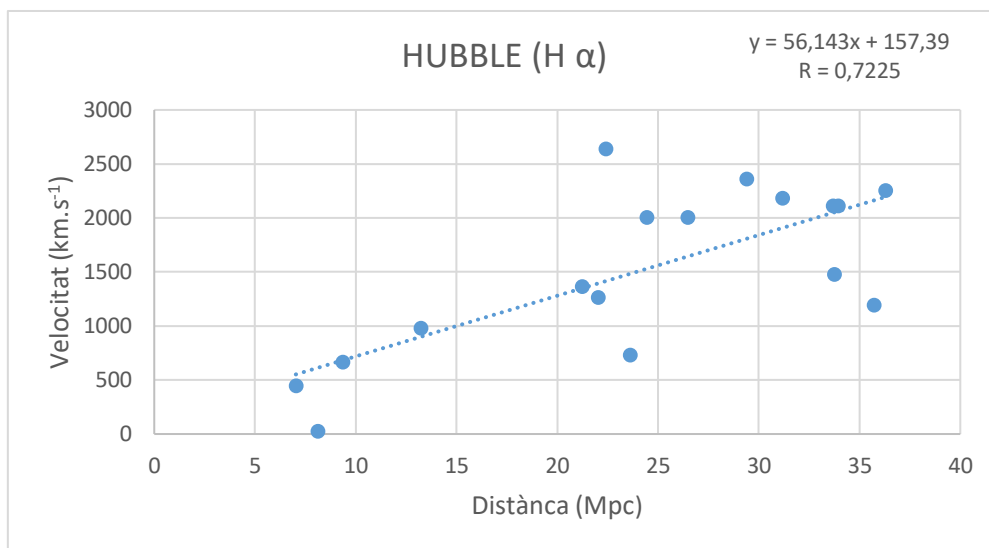


Figura 6.7. Gràfic corresponent a la línia d'emissió H- α , un cop eliminat el 15% de les galàxies de la mostra.

Com es pot comprovar, el coeficient de regressió lineal per a Ca K quan es realitza l'estudi amb les divuit galàxies resultants, 0,88, és més gran que en el cas on es tenen en compte totes les galàxies de la llista, 0,72. En el cas de la línia d'absorció Ca H passa el mateix ($r = 0,86$; $r = 0,77$). Així doncs, es corrobora la millora en l'ajust, a l'eliminar el 15% de galàxies de la mostra. No obstant això, quan es realitza l'estudi amb la línia d'emissió H- α el coeficient de correlació lineal és molt petit que el corresponent a les línies d'absorció del Ca, i la gràfica mostra una major dispersió. Aquests tipus de línies provenen majoritàriament del gas, excitat per les estrelles joves, que es troba al disc de la galàxia. En canvi, les línies d'absorció ens arriben bàsicament de la pols i el gas presents en la zona central de la galàxia. Per tant, el desplaçament al vermell de les línies d'absorció té menys dispersió a diferència de les d'emissió que varien entre dos valors extrems sent, així doncs, més amples i, en conseqüència, més difícils d'analitzar. D'aquesta manera es verifica la major facilitat a l'hora d'identificar línies d'absorció, en aquest cas Ca K i Ca H, en comparació a línies d'emissió com per exemple la utilitzada, H- α . De fet, la major part dels estudis espectroscòpics professionals es fan amb línies d'absorció. La Figura 6.8 mostra part de l'espectre al voltant de la línia d'H- α pel cas de la galàxia NGC 4472 i, com es pot comprovar, il·lustra les dificultats d'identificar, en alguns casos, la línia H- α . És per això, que s'ha decidit continuar l'estudi només amb les línies d'absorció Ca K i Ca H per a què els resultats siguin més fiables.

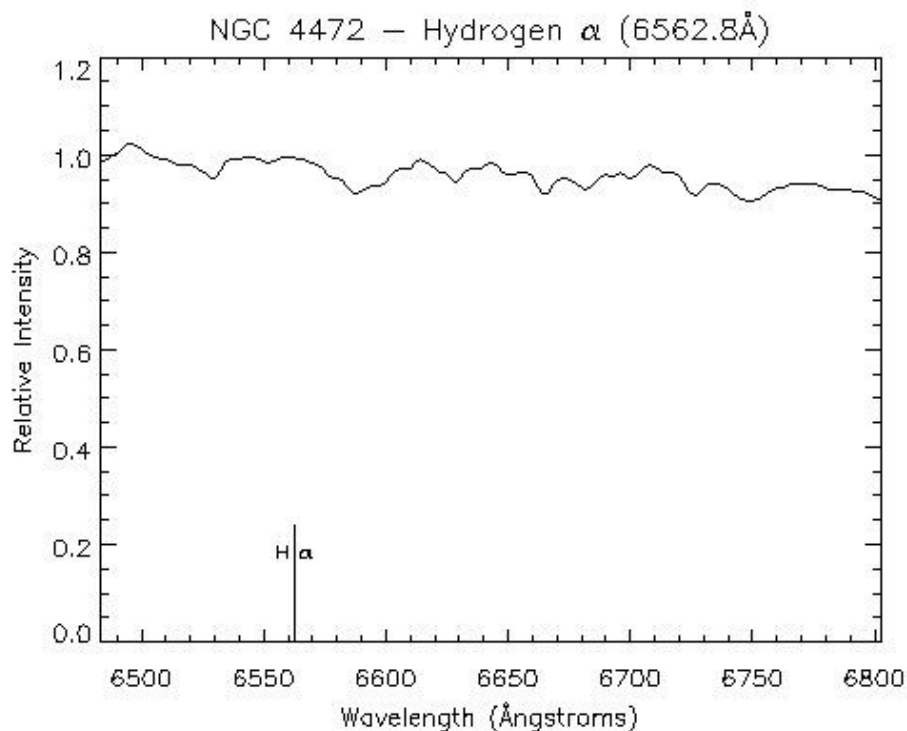


Figura 6.8. Part de l'espectre que conté la línia d'emissió H- α , per a la galàxia NGC 4472. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Un cop reduïda la mostra a divuit galàxies amb qualitat acceptable, s'ha procedit al càlcul de mínims quadrats. En aquest procediment, els punts experimentals estan distribuïts simètricament entorn de la recta de regressió i la seva distància (quadràtica) a la mateixa és la mínima possible.

$$y = Ax + B \quad (\text{Eq. 6.7})$$

Perquè aquesta recta compleixi aquestes condicions, la següent expressió ha de tenir un valor mínim.

$$D_q = \sum_{i=1}^N (y_i - Ax_i - B)^2 \quad (\text{Eq. 6.8})$$

A tal efecte, derivem D_q respecte a A i B i igualem a zero les dues derivades, obtenint un sistema lineal de dues equacions i dues incògnites:

$$A \sum_{i=1}^N x_i^2 + B \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N x_i y_i$$

$$A \sum_{i=1}^N x_i + N B = \sum_{i=1}^N y_i \quad (\text{Eq. 6.9})$$

La solució d'aquest sistema proporciona els valors del pendent de la recta, A, i l'ordenada a l'origen, B. Pel que fa a l'error associat a aquests dos paràmetres, es pot estimar mitjançant les relacions estadístiques:

$$\sigma_A = t_{\alpha/2; N-2} s_{ey} \sqrt{\frac{1}{(N-1)S_x^2}} \quad (\text{Eq. 6.10})$$

$$\sigma_B = t_{\alpha/2; N-2} s_{ey} \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{\bar{X}^2}{(N-1)S_x^2}} \quad (\text{Eq. 6.11})$$

On:

$$s_{ey} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2 - B \sum_{i=1}^N y_i - A \sum_{i=1}^N x_i y_i}{(N-1)S_x^2}} \quad (\text{Eq. 6.12})$$

$$S_x^2 = \frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} \right) \quad (\text{Eq. 6.13})$$

$$\bar{X}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (\text{Eq. 6.14})$$

$t_{\alpha/2; N-2}$ és un paràmetre estadístic associat a una distribució *t Student*, que per $\alpha/2 = 0,2$ garanteix que la probabilitat de què una nova determinació de A i B estigui als intervals $A \pm \sigma_A$ i $B \pm \sigma_B$ sigui del 60%. Els valors de $t_{\beta; \nu}$ estan tabulats (veure la 0, pel cas $\beta=0,2$).

Taula 6.3. Taula corresponent als valors de $t_{\beta;v}$ per $\beta=0,2$.

v	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{\beta;v}$	1,376	1,061	0,978	0,941	0,920	0,906	0,896	0,889	0,883	0,879
v	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$t_{\beta;v}$	0,876	0,873	0,870	0,868	0,866	0,865	0,863	0,862	0,861	0,860
v	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$t_{\beta;v}$	0,859	0,858	0,858	0,857	0,856	0,856	0,855	0,855	0,854	0,854

Aquest mètode s'utilitza sempre que existeixi una llei física que comporti una relació lineal entre les variables 'y' i 'x'. De cara a quantificar fins a quin punt la relació entre 'x' i 'y' és lineal, es determina el coeficient de correlació lineal, r, en la forma:

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sqrt{(N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \sum_{i=1}^N x_i^2)(N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \sum_{i=1}^N y_i^2)}} \quad (\text{Eq. 6.15})$$

El valor d'aquest coeficient¹ està comprès entre -1 i 1. En el cas que els valors siguin propers a 1, hi haurà una gran dependència lineal i creixent entre els diferents punts (x,y). La dependència lineal és decreixent per a valors propers a -1.

La Taula 6.4 i Taula 6.5 mostren els resultats estadístics de l'estudi de regressió lineal realitzat per a la mostra de 18 galàxies, per a les línies Ca H i K.

¹ Cal mencionar que el programa Excel proporciona un ajust lineal a un conjunt de punts introduït. En aquest cas, però, el programa utilitza un interval de confiança del 68%. Com era esperable, els valors que proporciona l'Excel son molt semblants, però no idèntics, als valors presentats en aquest estudi, i han servit per validar el mètode utilitzat.

Taula 6.4. Taula corresponent als resultats obtinguts amb el mètode de mínims quadrats per a la línia d'absorció Ca K.

A	70,326264
B	-105,661220
S_{ey}	401,972240
s_x²	102,941445
\bar{X}	21,151312
t₁₆	0,863
σ_A	8,058895
σ_B	188,119779
r	0,877146

Taula 6.5. Taula corresponent als resultats obtinguts amb el mètode de mínims quadrats per a la línia d'absorció Ca H.

A	70,326264
B	-105,661220
S_{ey}	401,972240
s_x²	102,941445
\bar{X}	21,151312
t₁₆	0,863
σ_A	8,058895
σ_B	188,119779
r	0,877146

Un dels problemes inherents d'aquest estudi, és la dispersió en les mesures realitzades manualment (en especial, la determinació dels límits de les galàxies en les imatges digitals). De cara a pesar aquesta dispersió intrínseca en les mesures, s'ha repetit dues vegades més tot el procediment, en dies successius. És a dir, s'ha tornat a repetir el procés de mesura per a totes les divuit galàxies de la Taula 6.2, obtenint nous valors obtinguts de distàncies, velocitats, línies d'absorció Ca K i Ca H, i s'ha procedit a repetir tots els gràfics i el càlcul d'errors. A continuació es mostren els gràfics obtinguts i les taules de resultats d'aquestes dues repeticions.

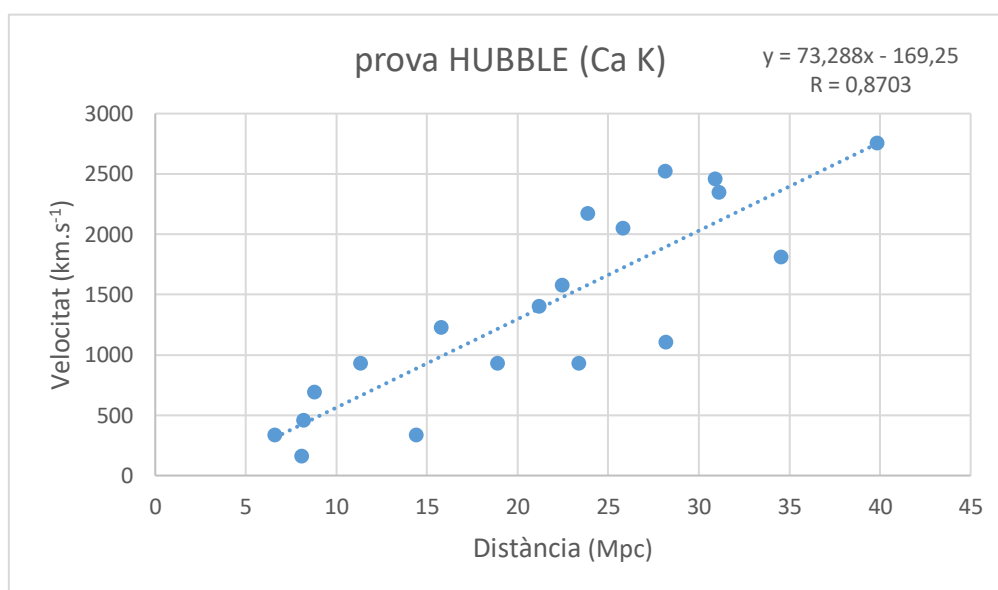


Figura 6.9. Gràfic corresponent a la línia d'absorció Ca K de la segona tanda de mesures.

Taula 6.6. Taula corresponent als resultats obtinguts amb el mètode de mínims quadrats per a la línia d'absorció Ca H de la segona tanda de mesures.

A	73,287599
B	-169,246161
S_{ey}	419,140045
s_x²	96,510944
\bar{X}	20,620496
t₁₆	0,863
σ_A	8,678515
σ_B	201,290725
r	0,870362

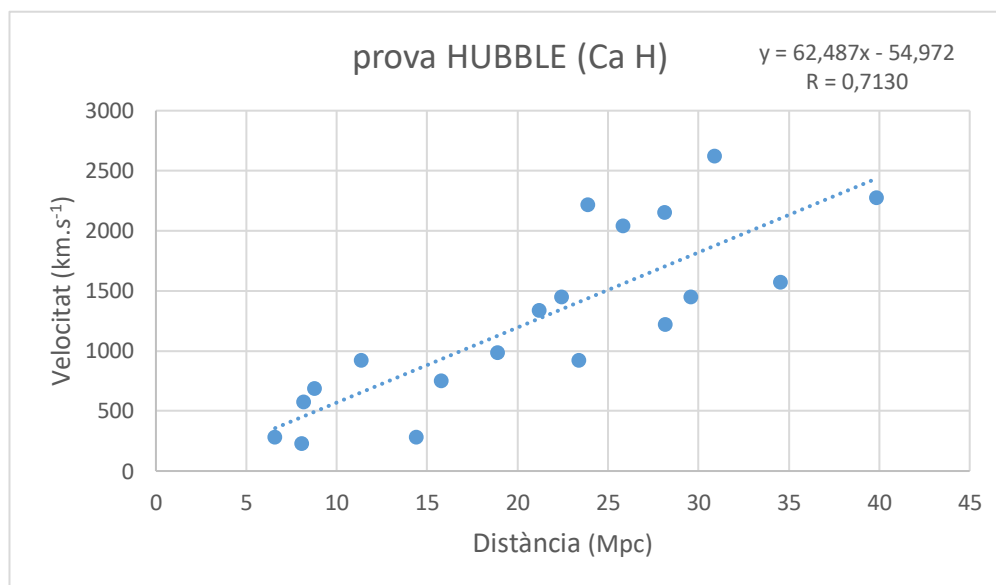


Figura 6.10. Gràfic corresponent a la línia d'absorció Ca H de la segona tanda de mesures.

Taula 6.7. Taula corresponent als resultats obtinguts amb el mètode de mínims quadrats per a la línia d'absorció Ca H de la segona tanda de mesures.

A	62,486911
B	-54,972127
S_{ey}	424,178834
S_x²	94,919945
\bar{X}	21,049972
t₁₆	0,863
σ_A	8,856147
σ_B	204,464907
r	0,828032

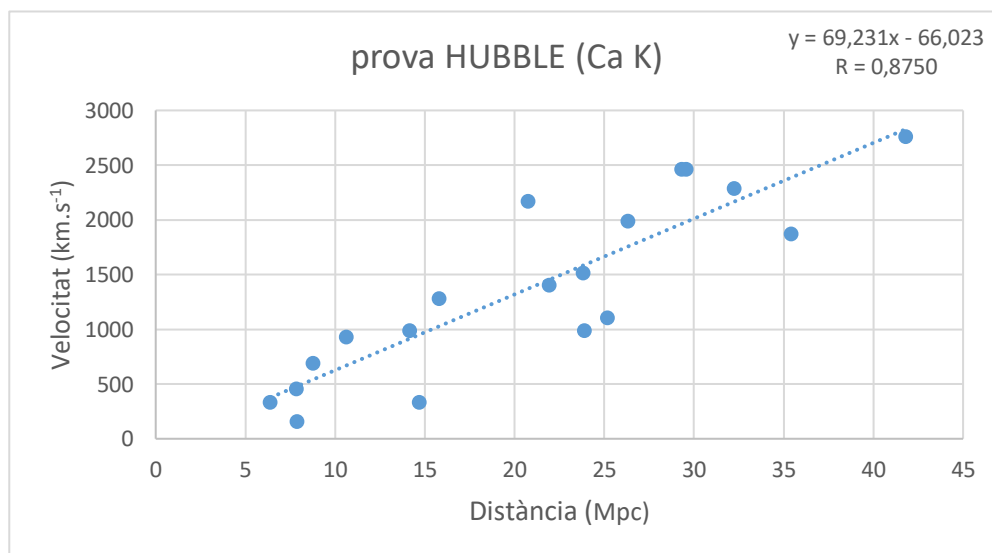


Figura 6.11. Gràfic corresponent a la línia d'absorció Ca K de la tercera tanda de mesures.

Taula 6.8. Taula corresponent als resultats obtinguts amb el mètode de mínims quadrats per a la línia d'absorció Ca K de la tercera tanda de mesures.

A	69,230701
B	-66,022708
S_{ey}	405,198400
s_x²	105,695214
\bar{X}	20,872914
t₁₆	0,863
σ_A	8,017050
σ_B	185,75376
r	0,875008

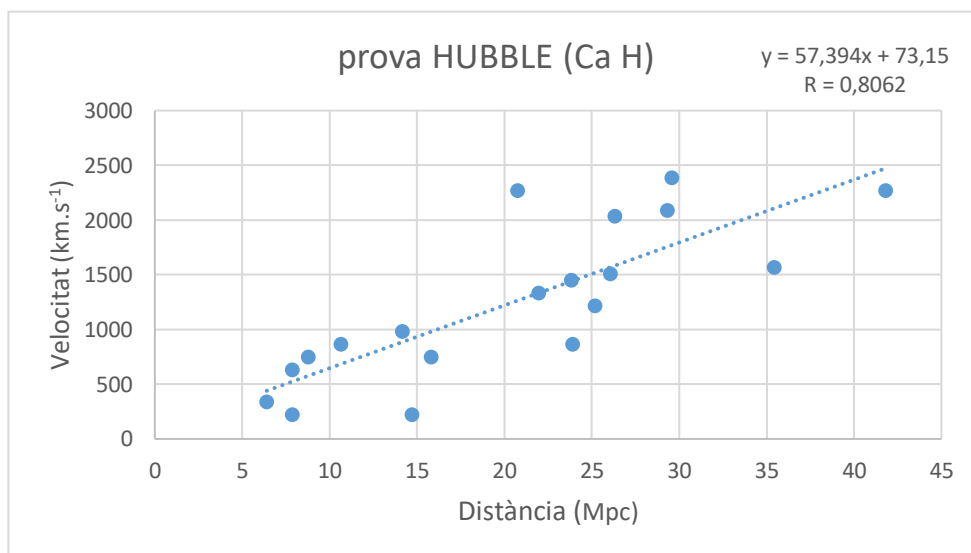


Figura 6.12. Gràfic corresponent a la línia d'absorció Ca H de la tercera tanda de mesures.

Taula 6.9. Taula corresponent als resultats obtinguts amb el mètode de mínims quadrats per a la línia d'absorció Ca H de la tercera tanda de mesures.

A	57,393867
B	73,149957
S_{ey}	433,131737
s_x²	99,880345
\bar{X}	20,547034
t₁₆	0,863
σ_A	8,815654
σ_B	200,409130
r	0,806209

El pendent de la recta de regressió correspon al valor de la constant de Hubble en km/(s/Mpc). En aquest estudi, s'ha obtingut sis valors diferents (per a les línies Ca H i Ca K, repetint 3 cops les mesures). La mitjana dels sis valors obtinguts, proporciona una estimació estadística d'aquesta constant:

$$H_0 = \frac{70,3263 + 62,3602 + 73,2876 + 62,4867 + 69,2307 + 57,3939}{6}$$

$$H_0 = 65,8476 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} / \text{Mpc}$$

Per a calcular l'error de la mitjana, i partint de l'error individual dels sis valors de la constant de Hubble, avaluem la propagació d'error com:

$$\varepsilon_y = \sqrt{\left(\frac{\delta y}{\delta x_1} \varepsilon x_1\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\delta x_2} \varepsilon x_2\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\delta x_3} \varepsilon x_3\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\delta x_4} \varepsilon x_4\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\delta x_5} \varepsilon x_5\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{\delta x_6} \varepsilon x_6\right)^2} \quad (\text{Eq. 6.16})$$

On $y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ correspon a la mitjana dels sis valors i ϵx_i és l'error de cada valor individual. En el nostre cas,

$$\epsilon y = \sqrt{\left(\frac{1}{6}\epsilon x_1\right)^2 + \left(\frac{1}{6}\epsilon x_2\right)^2 + \left(\frac{1}{6}\epsilon x_3\right)^2 + \left(\frac{1}{6}\epsilon x_4\right)^2 + \left(\frac{1}{6}\epsilon x_5\right)^2 + \left(\frac{1}{6}\epsilon x_6\right)^2}$$

$$\delta H_0 = \frac{1}{6} \sqrt{8,82^2 + 8,02^2 + 8,86^2 + 8,68^2 + 7,89^2 + 8,06^2} = 3,43 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} / \text{Mpc}$$

Finalment, el valor obtingut per a la constant de Hubble en aquest treball, amb el seu corresponent marge d'error és:

$$H_0 = 65,85 \pm 3,43 \approx 66 \pm 4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} / \text{Mpc}$$

A partir d'aquest valor mig de la constant de Hubble, i tenint present la equivalència

$$1 \text{ km} = 3,24078 \times 10^{-14} \text{ pc}$$

obtenim un valor de la constant de Hubble en unitats de t^{-1} de $2,134 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$. Suposant que l'expansió de l'Univers s'ha produït a ritme (velocitat) constant des del seu començament, la seva edat vindria donada per $1/H_0$:

$$\frac{1}{2,134 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}} = 4,6861 \times 10^{17} \text{ s} = 14,848,8 \times 10^6 \text{ anys}$$

En aquest cas, l'error associat, determinat a partir de l'equació (Eq. 6.16), resulta:

$$\delta t_0 = \frac{\delta H_0}{(H_0)^2} \quad (\text{Eq. 6.17})$$

$$\begin{aligned} \delta t_0 &= \frac{\delta H_0}{(H_0)^2} = \frac{3,43 \cdot 3,24078 \times 10^{-20}}{(2,134 \times 10^{-18})^2} = 2,4409 \times 10^{16} \text{ s} \\ &= 773,5 \times 10^6 \text{ anys} \end{aligned}$$

Per tant, es pot concloure que l'edat de l'Univers amb el seu error associat té el següent valor:

$$t_0 = (14.800 \pm 800) \times 10^6 \text{ anys}$$

Per completesa, s'adjunten també els resultats corresponents a les estimacions màxima i mínima de la constant de Hubble amb els errors respectius, extrets del conjunt de valors obtinguts en aquest estudi:

$$H_{0,max} = 73,2876 \pm 8,6785 \text{ km. s}^{-1}/\text{Mpc}$$

Procediment de manera anàloga al que s'ha descrit abans amb la mitjana de la constant de Hubble, expressant $H_{0,max}$ en s^{-1} (transformant els km de les unitats a Mpc) i calculant l'invers, s'obté un valor de l'edat de l'Univers de:

$$\frac{1}{2,3751 \times 10^{-18} s^{-1}} = 4,2104 \times 10^{17} s = 13351 \text{ milions d'anys}$$

amb un error de:

$$\begin{aligned} \delta t_{0,max} &= \frac{\delta H}{(H)^2} = \frac{8,6785 \times 3,24078 \times 10^{-20}}{(2,3751 \times 10^{-18})^2} = 4,987 \times 10^{16} s \\ &= 1581,37 \times 10^6 \text{ anys} \end{aligned}$$

Per tant,

$$t_0(H_{0,max}) = (13.400 \pm 1600) \times 10^6 \text{ anys}$$

Anàlogament pel valor mínim d' H_0 ,

$$H_{0,min} = 62,3602 \pm 7,8928 \text{ km. s}^{-1}/\text{Mpc}$$

→

$$\frac{1}{2,021 \times 10^{-18} s^{-1}} = 4,9482 \times 10^{17} s = 15690 \text{ milions d'anys}$$

amb un error de

$$\begin{aligned} \delta t_{0,min} &= \frac{\delta H}{(H)^2} = \frac{7,8928 \times 3,24078 \times 10^{-20}}{(2,021 \times 10^{-18})^2} = 6,26 \times 10^{16} s \\ &= 1.985,12 \times 10^6 \text{ anys} \end{aligned}$$

d'on:

$$t_0(H_{0,min}) = (15.700 \pm 2000) \times 10^6 \text{ anys}$$

Finalment, cal destacar que els valors obtinguts per a la constant de Hubble i l'edat de l'Univers, amb els seus corresponents errors (13400 – 15700 milions d'anys, amb un millor valor de 14800 ± 800 milions d'anys), son plenament compatibles amb el valors més precisos actualment acceptats, deguts a les missions espacials WMAP i PLANCK, de 13800 milions d'anys (64)(68), concordança que valida l'estudi presentat en aquest treball, tenint present les seves limitacions.

7. Estudi de la nucleosíntesi primordial

L'estudi de la nucleosíntesi primordial és, en principi, senzill. Hi ha diversos codis numèrics disponibles en diferents webs. L'estructura d'aquests codis és similar: inclouen una llista d'isòtops més o menys llarga, començant per neutrons, protons, els isòtops pesats de l'hidrogen (deuteri, D, i triti, T) i l'heli (^3He i ^4He), isòtops d'alguns elements lleugers com el beril·li (Be) i el bor (B) i prescindint dels elements més pesats a partir d'un determinat element, ja sigui el carboni (C), el fluor (F), o el neó (Ne). La xarxa de núclids es connecta mitjançant diversos canals, habitualment reaccions de desintegració β , de captura de protons, del tipus (p, γ) , (p, α) o (p, n) , que comporten la captura d'un protó i la subseqüent emissió de radiació gamma, d'una partícula alfa o d'un neutró, respectivament, i de captura de neutrons o de nuclis atòmics molt lleugers (D, T, ^3He). A partir d'un fitxer amb dades de temperatura i densitat en funció del temps durant els primers minuts de l'Univers, obtinguts per integració de les equacions del Big Bang, cada codi disponible utilitza diversos algorismes numèrics per a obtenir la nova composició química dels primers minuts de l'Univers, fent un balanç entre el nombre de reaccions de destrucció d'una determinada espècie nuclear i el de les reaccions de creació. En aquest TFG, s'ha utilitzat un codi de nucleosíntesi titulat `nucleo.f`, disponible al Grup d'Astronomia i Astrofísica de la UPC, que ha publicat nombrosos estudis de nucleosíntesi estel·lar amb diverses versions d'aquest codi. Es tracta d'un programa molt complet, escrit en llenguatge de programació FORTRAN, que cada dt segons proporciona les noves abundàncies dels 59 isòtops de la xarxa, considerats en aquest treball, així com els fluxos nuclears (nombre de reaccions nuclears d'un tipus concret per unitat de temps i de volum) de les 386 reaccions nuclears considerades.

Tal com es pot apreciar en les següents figures (Figura 7.1, 0 i Figura 7.3) l'expansió de l'Univers (vegeu al capítol 6) fou la responsable del ràpid ritme de refredament i dilució de l'Univers. Als primers instants del mateix (fraccions de segon), l'Univers era massa calent per a permetre l'acoblament de partícules elementals (els *blocs* de la construcció) en nuclis més complexos. Quan l'Univers es va finalment refredar, de manera que el nombre de fotons d'alta energia s'havia reduït de manera apreciable, va començar la fase de nucleosíntesi primordial: neutrons i protons van començar a formar isòtops pesats d'hidrogen (D, T) i ^3He .

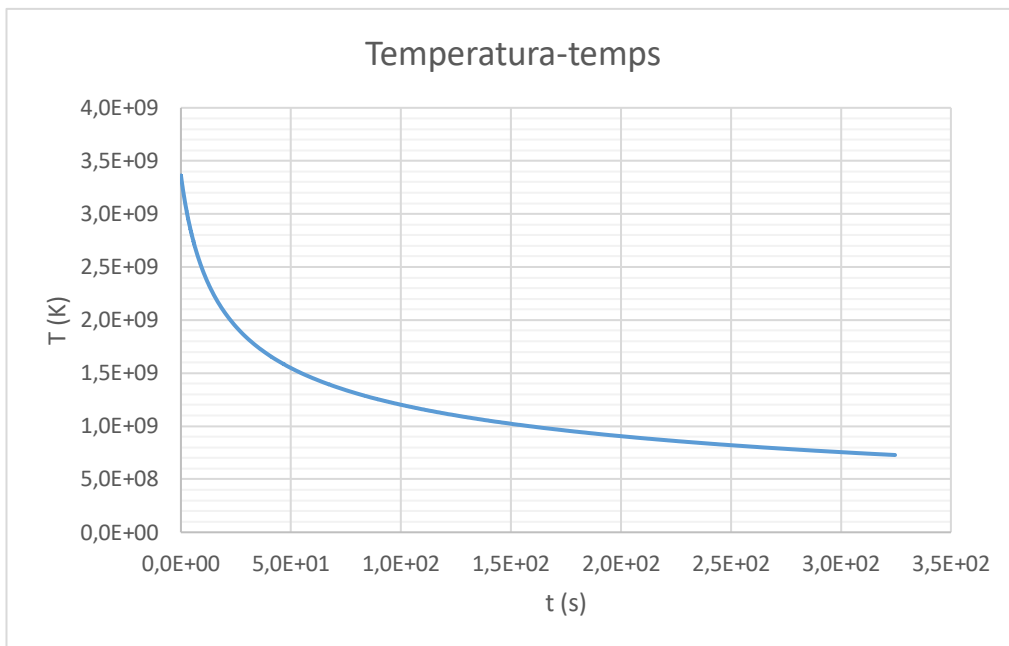


Figura 7.1 Evolució de la temperatura mitjana de l'Univers en funció del temps, després del Big Bang.

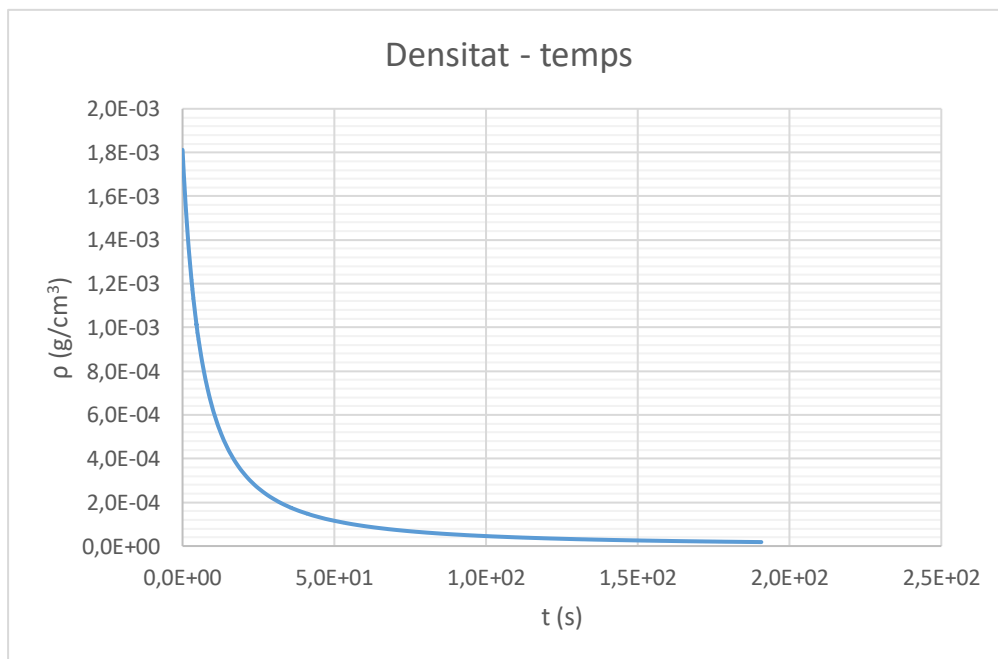


Figura 7.2 Evolució de la densitat mitjana de l'Univers en funció del temps, després del Big Bang.

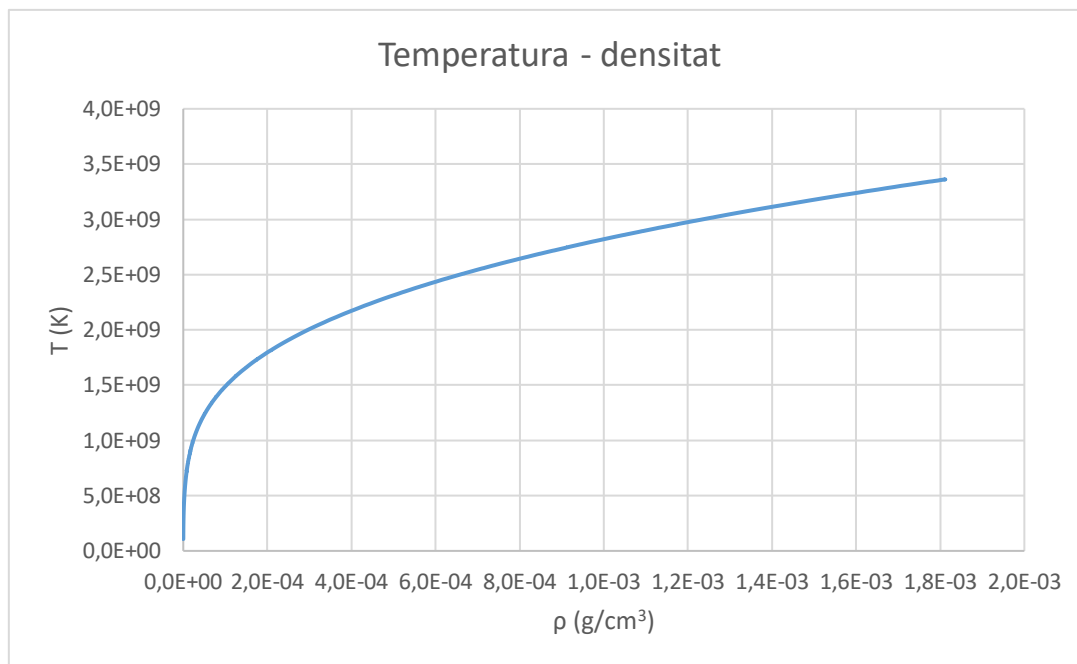
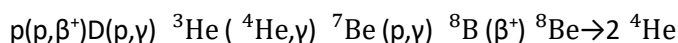
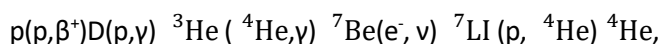


Figura 7.3 Temperatura en funció de la densitat de l'Univers, després del Big Bang.

Els perfils de temperatura i densitat en funció del temps (Figura 7.1 i 0), així com la proporció entre protons i neutrons, són els únics paràmetres inicials que utilitza el codi de nucleosíntesi nucleof. Els isòtops i reaccions (interaccions) nuclears utilitzades en aquest estudi de nucleosíntesi primordial, es troben en l'Annex E.

De cara a il·lustrar com el codi nucleof determina la variació d'abundàncies de cada espècie nuclear, es discutirà breument i a tall d'exemple, un cas concret. L'isòtop ^3He forma part de les anomenades cadenes protó-protó de fusió d'hidrogen i constitueix un element clau en l'activitat nuclear del nostre Sol:



La seva evolució reflecteix la pugna entre una munió d'interaccions que tendeixen a destruir l'element i una segona bateria de reaccions que tenen com a producte aquesta espècie. Globalment, la seva evolució es pot descriure mitjançant la següent equació diferencial (74):

$$\frac{d(^3\text{He})}{dt} = \frac{(H)^2}{2} \langle \sigma v \rangle_{pp} - (^3\text{He})^2 \langle \sigma v \rangle_{33} - (^3\text{He})(^4\text{He}) \langle \sigma v \rangle_{34} \quad (\text{Eq. 7.1})$$

On H , ${}^3\text{He}$ i ${}^4\text{He}$ són les abundàncies de l'hidrogen (protons) i dels dos isòtops estables de l'heli, i $\langle\sigma v\rangle_{pp}$, $\langle\sigma v\rangle_{33}$ i $\langle\sigma v\rangle_{34}$ són els ritmes de les reaccions $p(p,\beta^+)D(p,\gamma) {}^3\text{He}$, ${}^3\text{He}({}^3\text{He},2p) {}^4\text{He}$ i ${}^3\text{He}({}^4\text{He},\gamma) {}^7\text{Be}$ respectivament. Com es pot apreciar la primera reacció és el mecanisme nuclear dominant en la síntesi/creació de l' ${}^3\text{He}$, mentre que les dues reaccions restants són els canals de destrucció principals d'aquest isòtop.

Per exemple, i en aquest cas concret, si es volgués saber quina és l'abundància d'equilibri del ${}^3\text{He}$, caldria imposar

$$\frac{d({}^3\text{He})}{dt} = 0 \quad (\text{Eq. 7.2})$$

I trobar les arrels de la corresponent equació. L'única solució físicament acceptable ve donada per:

$$({}^3\text{He})_e = \frac{1}{2\langle\sigma v\rangle_{33}} \left(-({}^4\text{He})\langle\sigma v\rangle_{34} + \sqrt{2(H)^2\langle\sigma v\rangle_{pp}\langle\sigma v\rangle_{33} + ({}^4\text{He})^2\langle\sigma v\rangle_{34}^2} \right) \quad (\text{Eq. 7.3})$$

Habitualment, però, el càlcul de les abundàncies químiques dels isòtops, que involucren diverses reaccions de creació i destrucció, no admet solució analítica i cal fer una aproximació a diferències finites per a resoldre la corresponent equació. Seguint amb l'exemple de l' ${}^3\text{He}$, es pot aproximar la derivada per l'expressió en diferències finites:

$$d({}^3\text{He})/dt = [({}^3\text{He})_{\text{nou}} - ({}^3\text{He})_{\text{vell}}]/\Delta t$$

$$({}^3\text{He})_{\text{nou}} = ({}^3\text{He})_{\text{vell}} + d({}^3\text{He})/dt \cdot \Delta t$$

On nou i vell representen el nou i l'anterior valor de l'abundància d' ${}^3\text{He}$ i Δt el temps transcorregut entre els dos instants. En particular, el codi nucleof utilitza un algorisme de doble pas (Wagoner 1969) (75).

7.1. La composició química de l'Univers primitiu

Als primers instants de l'Univers, el cosmos estava regit per condicions d'equilibri tèrmic. En aquestes condicions, el quocient entre la quantitat de neutrons i protons de l'Univers primitiu venia donat pel quocient expressat en l'equació (Eq. 7.4).

$$\frac{n}{p} = \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (\text{Eq. 7.4})$$

On Q té un valor de 1293,3 keV i fa referència a la diferència de massa (energia) entre un neutró i un protó, n i p són les abundàncies de neutrons i protons, T és la temperatura mitjana de l'Univers i k la constant de Boltzmann. Quan comença la nucleosíntesi, $n/p \sim 1/7$. Ates que n i p tenen aproximadament la mateixa massa, es pot determinar les fraccions en massa d'aquests nucleons en aquest instant, fent:

$$\frac{n}{p} = \frac{1}{7}$$

$$n + p = 1$$

D'aquest sistema d'equacions, s'obté que $n = 0,125$ i $p = 0,875$. A partir d'aquestes abundàncies es determina trivialment quina serà l'abundància final de ${}^4\text{He}$ i H quan s'acaba la fase de nucleosíntesi primordial. Un nucli de ${}^4\text{He}$ està format per dos neutrons i idèntica quantitat de protons, per tant, suposant que tots els neutrons de l'Univers primitiu deriven en nuclis d'heli (juntament amb la mateixa proporció de protons) s'obté que $X({}^4\text{He}) = 2n = 2 \times 0,125 = 0,25$.

La resta de protons lliures, $0,875 - 0,125 = 0,75$ (que han anat a formar ${}^4\text{He}$), serà la fracció en massa d'hidrogen. Lògicament, aquests valors són aproximacions, tot i que, molt prou propers als obtinguts en les simulacions que es descriuen en aquest Treball de Fi de Grau.

Així doncs, suposant una concentració de neutrons i protons de $n=0,17$ i $p=0,83$, respectivament, i utilitzant els perfils de temperatura i densitat mitjanes en funció del temps per l'Univers primitiu, el codi `nucleo.f` proporciona la distribució final d'abundàncies en finalitzar l'etapa de nucleosíntesi primordial (l'expansió de l'Univers fa que, passats uns pocs minuts després del Big Bang, la temperatura mitjana hagi caigut per sota del llindar necessari per a formar més espècies per fusió nuclear). Les abundàncies finals que s'obtenen en finalitzar la nucleosíntesi primordial es mostren a la Taula 7.1 en fraccions en massa (és a dir, en tant per u; la suma de totes les diferents fraccions està normalitzada a la unitat). Aquesta primera simulació l'anomenem model 1 i és el referent amb el qual es compararan simulacions posteriors.

Taula 7.1. Abundàncies de l'Univers primitiu, en fraccions en massa, d'acord amb les simulacions del Model 1.

Abundàncies finals	
^1H	$7,4 \times 10^{-1}$
^1Ne	$1,8 \times 10^{-9}$
^2H	$3,9 \times 10^{-5}$
^3H	$1,9 \times 10^{-7}$
^3He	$2,3 \times 10^{-5}$
^4He	$2,6 \times 10^{-1}$
^6He	$6,1 \times 10^{-82}$
^6Li	$6,2 \times 10^{-14}$
^7Li	$1,6 \times 10^{-10}$
^7Be	$2,7 \times 10^{-9}$
^8Li	$7,1 \times 10^{-23}$
^8Be	$9,0 \times 10^{-15}$
^8B	$3,0 \times 10^{-20}$
^9C	$4,1 \times 10^{-33}$
^9Be	$1,6 \times 10^{-18}$
^9Li	$3,5 \times 10^{-36}$
^{10}Be	$4,1 \times 10^{-27}$
^{10}B	$3,7 \times 10^{-20}$
^{10}C	0

^{11}N	0
^{11}C	$1,6 \times 10^{-17}$
^{11}Be	$2,6 \times 10^{-39}$
^{11}B	$3,4 \times 10^{-15}$
^{12}N	$1,1 \times 10^{-32}$
^{12}Be	$5,2 \times 10^{-53}$
^{12}B	$4,7 \times 10^{-29}$
^{12}C	$6,5 \times 10^{-15}$
^{13}N	$7,9 \times 10^{-23}$
^{13}O	$1,3 \times 10^{-46}$
^{13}C	$1,4 \times 10^{-15}$
^{13}B	$1,0 \times 10^{-43}$
^{14}B	$5,1 \times 10^{-55}$
^{14}N	$5,8 \times 10^{-16}$
^{14}C	$1,6 \times 10^{-16}$
^{14}F	$1,1 \times 10^{-37}$
^{14}O	$8,9 \times 10^{-34}$
^{15}Ne	0
^{15}O	$3,2 \times 10^{-27}$
^{15}C	$2,1 \times 10^{-30}$
^{15}N	$2,5 \times 10^{-19}$

^{16}C	$6,7 \times 10^{-45}$
^{16}F	$6,1 \times 10^{-37}$
^{16}O	$9,2 \times 10^{-19}$
^{16}Ne	0
^{16}N	$3,6 \times 10^{-32}$
^{17}C	$7,1 \times 10^{-53}$
^{17}Ne	0
^{17}F	$5,8 \times 10^{-31}$
^{17}O	$3,1 \times 10^{-23}$
^{17}N	$2,0 \times 10^{-45}$
^{18}N	$3,9 \times 10^{-77}$
^{18}Ne	$6,0 \times 10^{-54}$
^{18}O	$5,1 \times 10^{-24}$
^{18}F	$1,6 \times 10^{-24}$
^{18}C	0
^{19}O	$2,6 \times 10^{-36}$
^{19}F	$4,5 \times 10^{-27}$
^{19}N	$9,8 \times 10^{-53}$
^{19}Ne	$7,4 \times 10^{-38}$
^{14}N	$5,8 \times 10^{-16}$
^{14}C	$1,6 \times 10^{-16}$

La Figura 7.4 mostra les abundàncies finals dels isòtops que presenten una fracció en massa $X > 10^{-16}$. Tal i com es pot apreciar a la Taula 7.1, els únics isòtops de la xarxa que presenten una fracció en massa final $X > 10^{-16}$ són: H(ρ), n, D, T, ^3He , ^4He , ^6Li , ^7Li i ^7Be , l'evolució temporal dels quals, es mostra a la Figura 7.5.

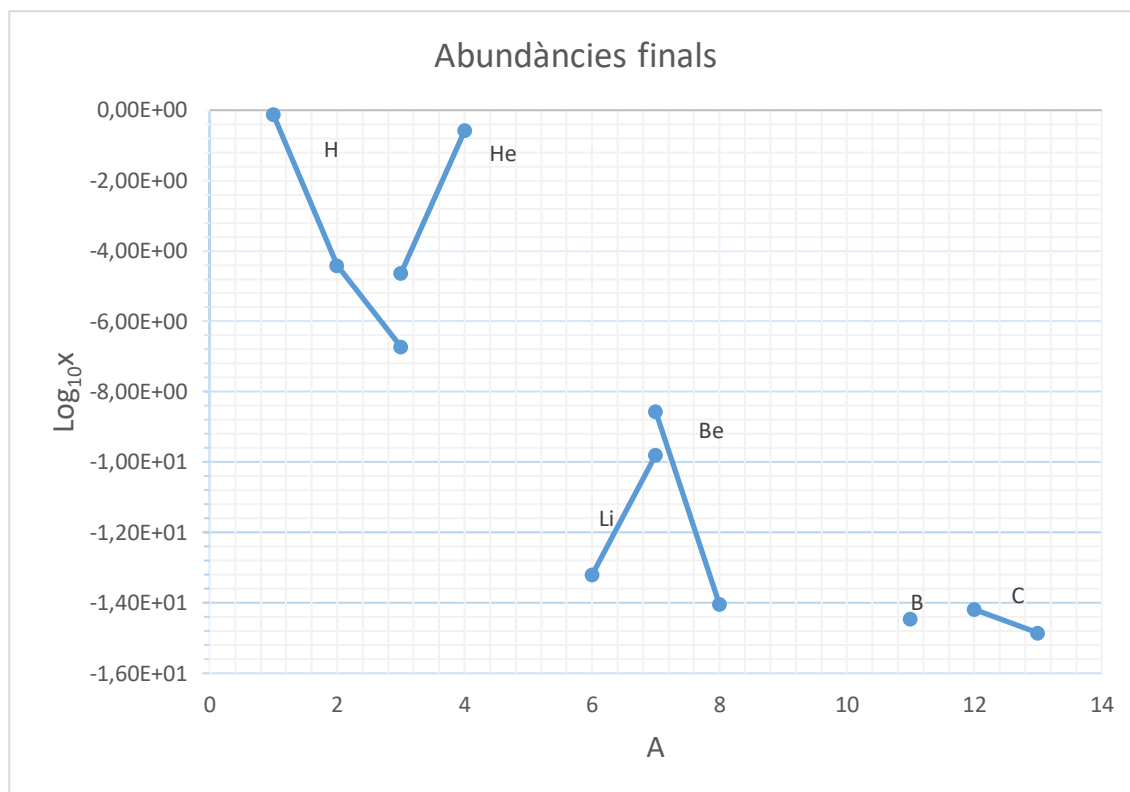


Figura 7.4 Abundàncies dels isòtops que presenten una fracció en massa $X > 10^{-16}$.

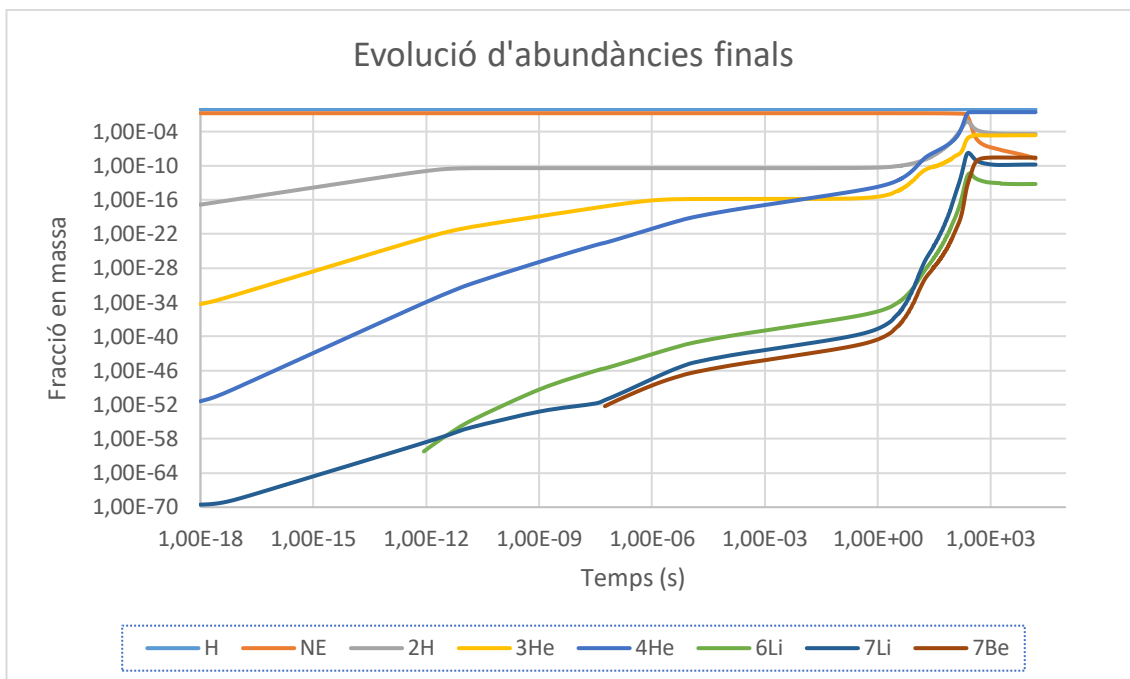


Figura 7.5 Evenció dels isòtops H(p), n, D, ^3He , ^4He , ^6Li , ^7Li i ^7Be .

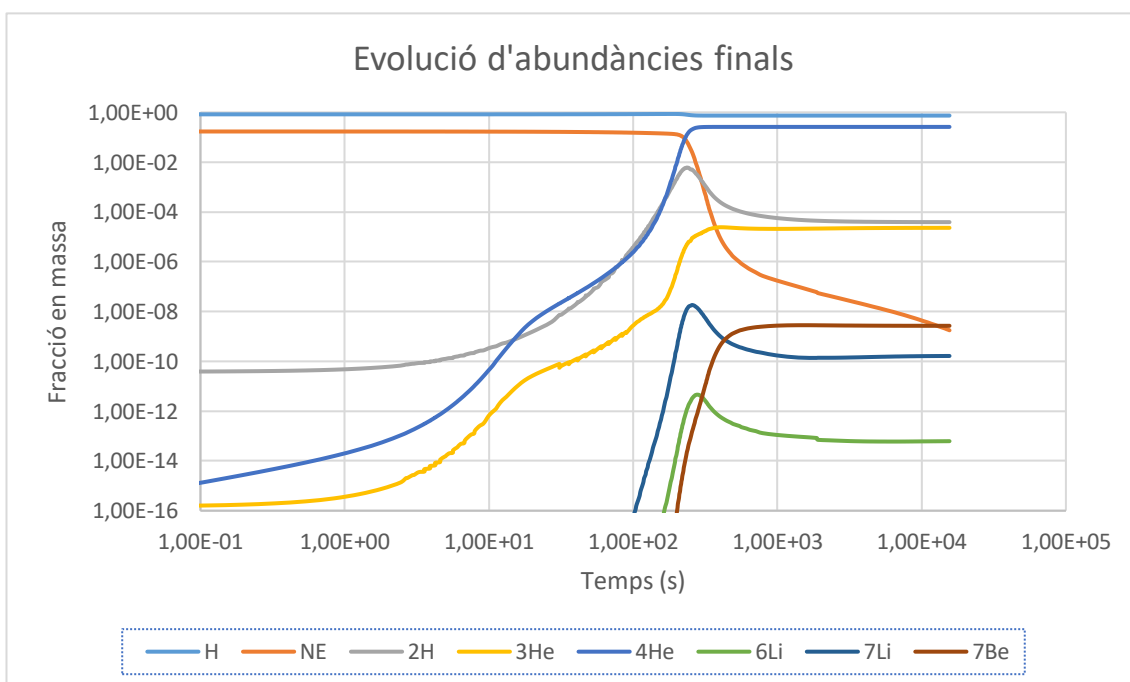


Figura 7.6 Ampliació de la representació gràfica de la Figura 7.5.

Des que es varen formar les primeres estrelles, l'Univers ha sofert un important canvi en composició química, per això, si es vol estudiar les prediccions de la nucleosíntesi del Big Bang, es necessari identificar objectes astronòmics en què els valors de les abundàncies primordials estiguin preservats el millor possible. Els millors indicadors de la nucleosíntesi primordial, que permetran una comparació entre els valors obtinguts mitjançant simulació i els valors inferits observacionalment són els isòtops ^4He , ^2H (D), ^3He , ^7Li (3).

La predicció més directa de la nucleosíntesi del Big Bang fa referència a ^4He . De cara a determinar el seu valor primordial, es fa una selecció entre les galàxies nanes que siguin més pobres en oxigen i nitrogen amb la finalitat d'estudiar les regions on hi apareixen núvols de gas. El que s'espera obtenir són emissions electromagnètiques a freqüències definides amb precisió com a conseqüència d'algunes reaccions, en concret la de l'heli quan recupera un electró (recombinació). Per tant, si es compara les intensitats d'aquestes 'línies d'emissió' amb les línies corresponents pels àtoms d'hidrogen, es dedueix l'abundància d'heli en el núvol de gas respectiu. Mesures preses en la nostra galàxia mostren que ^3He representa només una mil·lèsima part del total d'heli, per això, es considera que l'abundància mesurada d'heli en aquestes galàxies correspon a ^4He . El valor observacional deduït d'aquestes mesures correspon a una fracció en massa de $0,25 \pm 0,01$, valor que coincideix perfectament amb l'abundància final d'aquest isòtop obtinguda en aquest TFG, 0,26.

Per altra banda, el deuteri que els astrònoms puguin detectar haurà d'haver-se format a l'Univers primitiu, ja que, aquest isòtop és molt fràgil i es destrueix fàcilment en els processos de fusió que tenen lloc a les estrelles. La metodologia que es segueix per a determinar la seva abundància primordial consisteix en fer una anàlisi de l'espectre de la radiació dels quàsars, en particular de les línies d'absorció, degudes al deuteri, D, i a l'hidrogen ordinari, H. Les estimacions més precises d'aquests estudis han donat un valor del quocient D/H (en fraccions de massa) de $(5,06 \pm 0,08) \times 10^{-5}$. Novament, el valor del quocient obtingut en les simulacions realitzades en aquest TFG, $5,27 \times 10^{-5}$, és força semblant al valor inferit observacionalment.

En el cas de ^3He , es troba en què és pràcticament impossible detectar-lo en sistemes extragalàctics degut a la similitud d'aquest núclid amb l' ^4He . En estrelles amb poca massa, l' ^3He es produeix en quantitats substancials, mentre que en estrelles massives, l' ^3He es transforma en nuclis més pesats. A l'hora de determinar l'abundància primordial d'aquest isòtop els astrònoms recorren als núvols de gas de l'halo de la nostra galàxia ja que, com més a prop estigui una regió del centre galàctic, més gran és la influència de la nucleosíntesi estel·lar en l'abundància dels elements. El valor obtingut en les nostres simulacions pel quocient $^3\text{He}/\text{H}$ en fraccions de massa, $3,108 \times 10^{-5}$, és força similar als resultats que s'infereixen de l'estudi observacional, $(3,3 \pm 0,6) \times 10^{-5}$.

Finalment, els nuclis de ${}^7\text{Li}$ es poden formar per fusió nuclear en algunes estrelles, tot i que es tracta d'una espècie fràgil que es destrueix fàcilment. També s'han suggerit formes addicionals de produir aquest isòtop, com és el cas de la col·lisió entre els anomenats raigs còsmics (principalment protons) amb el gas interestel·lar. Els astrònoms, a l'hora de mesurar l'abundància primordial de ${}^7\text{Li}$, es centren en analitzar les diferents línies d'emissió i absorció de les capes més externes de les estrelles. Per tant, si es tracta d'estrelles molt velles, l'abundància serà més propera als valors primordials. Per a estrelles més joves, reconegudes pel seu alt contingut de ferro -indicador de l'evolució química-, les abundàncies per aquest isòtop són molt diferents. Això, és degut a què la quantitat produïda en la fusió estel·lar varia en funció de la massa, la temperatura i la composició inicial de l'estrella. En canvi, per a estrelles més antigues es mostra una variació molt petita en les abundàncies, fet que evidència la poca contaminació de ${}^7\text{Li}$ per fusió nuclear estel·lar en les capes més externes. Quan es compara el quocient ${}^7\text{Li}/\text{H}$ en fraccions de massa, s'aprecia una notable discrepància entre el valor inferit observacionalment, $(1,1 \pm 0,2) \times 10^{-9}$, i el resultat de les simulacions, $3,66 \times 10^{-9}$ (on, de fet, l'abundància final de ${}^7\text{Li}$ és la suma d'abundàncies de ${}^7\text{Li}$ i ${}^7\text{Be}$; el ${}^7\text{Be}$ es transforma en ${}^7\text{Li}$ mitjançant captures d'electrons en un temps característic d'uns 50 dies). Aquesta discrepància es coneix com el "problema del liti primordial".

Per completesa, les abundàncies d'alguns elements creats en aquest període s'han comparat gràficament amb les que hi ha actualment en el Sistema Solar.

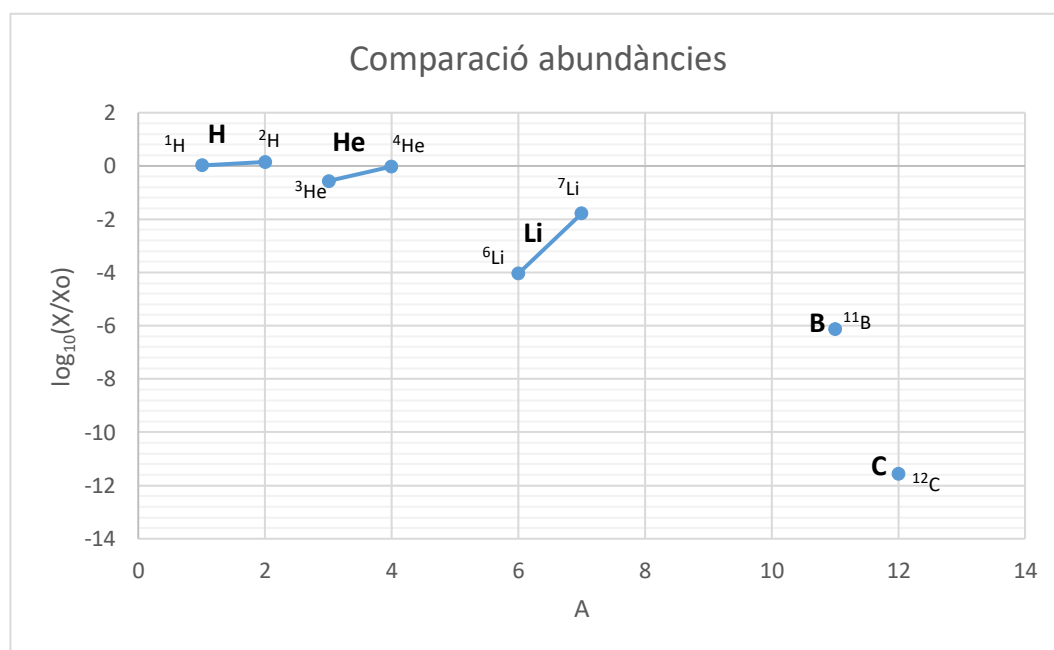


Figura 7.7 Representació de la relació entre les abundàncies d'alguns elements creats en la nucleosíntesi primordial i les que hi ha actualment en el Sistema Solar.

7.1.1. Fluxos de les reaccions nuclears en diferents instants

Per tal de fer un estudi més complet de l'evolució química de l'Univers primitiu, s'ha analitzat la informació que es pot extreure dels fluxos de les reaccions nuclears, proporcionada pel programa 'nucleo', en diferents instants. Aquesta investigació ha estat centrada bàsicament en tres elements; ^2H , ^3He , ^7Li (^7Be). La metodologia seguida ha estat basada en comparar els fluxos de les reaccions de creació i destrucció d'aquests isòtops en quatre instants de temps: $t \approx 10^{-3}$ s, $t \approx 1$ s, $1 < t < 1000$ s i en el darrer instant. Pel que fa a les unitats del flux d'una reacció, estan donades en 'nombre de reaccions d'un determinat tipus per unitat de temps i de volum', és a dir, reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$, en unitats cgs.

Els valors dels fluxos de totes les reaccions nuclears, per als quatre instants, es troben en l'Annex E. Així doncs, en primer lloc, s'ha procedit a extreure les reaccions més importants quan $t=1,289 \times 10^{-3}$ s.

Taula 7.2. Les deu reaccions més importants per a $t=1,289 \times 10^{-3}$ s.

34	7,3118788	D --> p + n
130	7,3118788	p + n --> D
1	1,92E-04	n --> p
360	1,9486E-10	D + p --> n + 2 H
373	1,9478E-10	2 H + n --> p + D
36	4,3993E-11	$3\text{He} \rightarrow \text{p} + \text{D}$
134	4,3919E-11	D + p --> 3He
133	1,5865E-11	D + n --> T
35	1,5788E-11	T --> n + D
208	8,6054E-12	T + p --> n + 3He

Seguidament, s'ha determinat quines són les reaccions de creació i destrucció per als tres elements estudiats².

²En el tercer cas es treballa amb dos elements, ja que, tal i com s'explica al final de l'apartat 7.1, el ^7Be es transforma en ^7Li mitjançant captures d'electrons en un temps característic d'uns 50 dies. Així doncs, a l'hora de treballar amb les reaccions de creació i destrucció, la reacció 6 ($^7\text{Be} \rightarrow ^7\text{Li}$) i 227 ($^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow ^7\text{Be}$) s'han considerat tan de creació com de destrucció.

Taula 7.3. Les reaccions de destrucció i creació del deuteri.

Reaccions de destrucció	3, 133, 134, 135, 139, 206, 207, 213, 217, 224, 225, 230, 235, 281, 287, 360, 363, 365, 382
Reaccions de creació	35, 36, 39, 40, 130, 131, 132, 209, 212, 214, 215, 216, 228, 234, 240, 244, 297, 304, 366, 373, 379, 380

Taula 7.4. Les reaccions de destrucció i creació de ^3He .

Reaccions de destrucció	3, 36, 137, 138, 141, 211, 213, 214, 219, 362, 372
Reaccions de creació	2, 37, 47, 134, 206, 208, 216, 217, 223, 376

Taula 7.5. Les reaccions de destrucció i creació de ^7Li (^7Be).

Reaccions de destrucció	6, 41, 42, 46, 47, 145, 146, 150, 151, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 239, 240, 241, 242, 365, 372
Reaccions de creació	6, 43, 50, 53, 59, 69, 140, 141, 142, 143, 220, 221, 224, 225, 227, 256, 380

Per una banda, es compara tots els fluxos de les reaccions de destrucció i s'extreu el valor principal, és a dir, el més gran i, per altra banda, es realitza el mateix procediment, aquesta vegada, amb les reaccions de creació.

Taula 7.6. Fluxos de totes les reaccions de destrucció del deuteri quan $t=1,289 \times 10^{-3}$ s. En verd es mostra el valor de flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

34	7,3118788
133	1,5865E-11
134	4,3919E-11
135	2,1623E-24
139	3,5553E-31
206	1,3438E-17
207	1,1701E-17
210	1,3971E-21
213	2,684E-22
217	4,0664E-46
224	5,4651E-45
225	5,4651E-45
230	4,6327E-50
235	5,2321E-50
281	1,7456E-50
287	3,1963E-50
360	1,9486E-10
363	3,8051E-49
365	4,974E-50
382	8,6786E-56

Taula 7.7. Fluxos de totes les reaccions de creació del deuteri quan $t=1,289 \times 10^{-3}$ s. En verd es mostra el valor de flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

35	1,5788E-11
36	4,3993E-11
39	1,3121E-41
40	3,5553E-31
130	7,3118788
131	7,128E-27
132	4,2698E-18
209	1,1815E-17
212	1,3451E-17
214	6,7588E-29
215	8,3907E-39
216	1,6259E-39
228	6,1043E-45
234	1,4926E-39
240	5,5413E-44
244	2,1604E-61
297	3,2977E-47
304	3,5624E-52
366	2,0288E-39
373	1,9478E-10
379	2,1729E-66
380	3,1373E-68

Taula 7.8. Fluxos de totes les reaccions de destrucció de ${}^3\text{He}$ quan $t=1,289 \times 10^{-3}$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

3	7,1635E-28
36	4,3993E-11
137	1,9204E-17
138	4,7859E-34
141	1,1357E-34
211	8,5317E-12
212	1,3451E-17
213	2,684E-22
214	6,7588E-29
219	1,5755E-35
362	1,1925E-29
372	1,411E-56

Taula 7.9. Fluxos de totes les reaccions de creació de ${}^3\text{He}$ quan $t=1,289 \times 10^{-3}$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

2	2,5205E-25
37	1,1412E-34
47	1,1356E-34
134	4,3919E-11
206	1,3438E-17
208	8,6054E-12
216	1,6259E-39
217	4,0664E-46
223	1,506E-35
376	7,2137E-47

Taula 7.10. Fluxos de totes les reaccions de destrucció de ${}^7\text{Li}$ (${}^7\text{Be}$) quan $t=1,289 \times 10^{-3}$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

6	2,8377E-55
41	3,7494E-40
42	1,2021E-33
46	4,8428E-40
47	1,1356E-34
145	1,6822E-43
146	1,409E-60
150	3,2366E-45
151	9,8636E-62
227	4,8958E-40
228	6,1043E-45
229	2,8699E-40
230	4,6327E-50
231	1,4053E-55
232	1,4746E-59
233	9,5E-61
239	4,4361E-39
240	5,5413E-44
241	9,6843E-40
242	4,7913E-59
365	4,974E-50
372	1,411E-56

Taula 7.11. Fluxos de totes les reaccions de creació de ${}^7\text{Li}$ (${}^7\text{Be}$) quan $t=1,289 \times 10^{-3}$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

6	2,8377E-55
43	0
50	0
53	0
59	0
69	0
140	1,2021E-33
141	1,1357E-34
142	3,6059E-40
143	4,6308E-40
220	2,9949E-58
221	1,6273E-57
224	5,4651E-45
225	5,4651E-45
227	4,8958E-40
256	6,142E-40
380	3,1373E-68

Seguint amb la mateixa metodologia, a la Taula 7.12 es mostren les reaccions més importants quan $t=1,27$ s.

Taula 7.12. Les deu reaccions més importants per a $t=1,27$ s.

34	6,12147207	D --> p + n
130	6,12147207	p + n --> D
1	0,00019166	n --> p
360	1,4089E-10	D + p --> n + 2 H
373	1,4082E-10	2 H + n --> p + D
36	4,7367E-11	3He --> p + D
134	4,7205E-11	D + p --> 3He
208	2,2485E-11	T + p --> n + 3He
211	2,2322E-11	3He + n --> p + T
133	1,7218E-11	D + n --> T

Tenint en compte les reaccions de creació i destrucció per als tres elements estudiats (Taula 7.3, Taula 7.4, Taula 7.5), es fa la comparativa de tots els fluxos, tan de les reaccions de destrucció com les de creació.

Taula 7.13. Fluxos de totes les reaccions de destrucció de deuteri quan $t=1,27s$. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

34	6,12147207
133	1,7218E-11
134	4,7205E-11
135	3,043E-24
139	6,7325E-28
206	1,9715E-17
207	1,714E-17
210	5,7997E-21
213	9,5309E-22
217	6,8992E-44
224	1,6009E-41
225	1,6009E-41
230	3,9357E-46
235	3,8476E-47
281	1,3155E-47
287	1,2126E-46
360	1,4089E-10
363	3,0783E-45
365	6,2322E-47
382	2,5141E-49

Taula 7.14. Fluxos de totes les reaccions de creació de deuteri quan $t=1,27s$. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

35	1,7046E-11
36	4,7367E-11
39	3,3627E-40
40	6,7326E-28
130	6,12147207
131	5,0863E-27
132	3,3446E-18
209	1,7141E-17
212	1,9567E-17
214	6,2246E-28
215	6,3616E-37
216	1,0532E-37
228	1,5537E-41
234	8,9011E-37
240	2,9634E-41
244	9,5037E-60
297	2,6251E-44
304	4,3139E-50
366	1,1752E-36
373	1,4082E-10
379	3,6927E-61
380	3,9313E-63

Taula 7.15. Fluxos de totes les reaccions de destrucció de ${}^3\text{He}$ quan $t=1,27\text{s}$. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

3	1,5842E-27
36	4,7367E-11
137	5,0866E-17
138	1,2267E-33
141	4,8827E-31
211	2,2322E-11
212	1,9567E-17
213	9,5309E-22
214	6,2246E-28
219	3,541E-32
362	8,9359E-29
372	3,7404E-53

Taula 7.16. Fluxos de totes les reaccions de creació de ${}^3\text{He}$ quan $t=1,27\text{s}$. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

2	8,9889E-25
37	5,5506E-33
47	4,8827E-31
134	4,7205E-11
206	1,9715E-17
208	2,2485E-11
216	1,0532E-37
217	6,8992E-44
223	3,3673E-32
376	9,9197E-45

Taula 7.17. Fluxos de totes les reaccions de destrucció de ${}^7\text{Li}$ (${}^7\text{Be}$) quan $t=1,27\text{s}$. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

6	1,6218E-51
41	8,9052E-37
42	6,1053E-30
46	1,0878E-36
47	4,8827E-31
145	1,1012E-39
146	1,526E-53
150	3,1104E-42
151	1,721E-55
227	2,4545E-36
228	1,5537E-41
229	1,7116E-36
230	3,9357E-46
231	3,0595E-51
232	1,0706E-52
233	6,6128E-54
239	4,6715E-36
240	2,9634E-41
241	9,5592E-37
242	6,6032E-53
365	6,2322E-47
372	3,7404E-53

Taula 7.18. Fluxos de totes les reaccions de creació de ${}^7\text{Li}$ (${}^7\text{Be}$) quan $t=1,27\text{s}$. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

6	1,6218E-51
43	0
50	0
53	0
59	0
69	0
140	6,1053E-30
141	4,8827E-31
142	8,5325E-37
143	1,0348E-36
220	2,9696E-53
221	2,0474E-52
224	1,6009E-41
225	1,6009E-41
227	2,4545E-36
256	3,2858E-37
380	3,9313E-63

Quan $t=5,335 \times 10^1\text{s}$, les reaccions més importants es mostren a la Taula 7.19.

Taula 7.19. Les deu reaccions més importants per a $t=5,335 \times 10^1\text{s}$.

130	0,36467433	$p + n \rightarrow D$
34	0,34046261	$D \rightarrow p + n$
1	0,00018072	$n \rightarrow p$
211	7,6641E-07	$3\text{He} + n \rightarrow p + T$
208	6,0137E-07	$T + p \rightarrow n + 3\text{He}$
136	2,0405E-09	$T + p \rightarrow 4\text{He}$
181	2,0057E-09	$14\text{N} + n \rightarrow 15\text{N}$
133	8,8582E-10	$D + n \rightarrow T$
210	8,532E-12	$T + D \rightarrow n + 4\text{He}$
137	1,9833E-12	$3\text{He} + n \rightarrow 4\text{He}$

Segons les reaccions de creació i destrucció per als tres elements estudiats (Taula 7.3, Taula 7.4, Taula 7.5), la comparativa entre tots els fluxos, tan de les reaccions de destrucció com les de creació es mostra a continuació.

Taula 7.20. Fluxos de totes les reaccions de destrucció de deuteri quan $t=5,335 \times 10^1$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

34	0,34046261
133	8,8582E-10
134	2,0057E-09
135	1,5261E-19
139	6,4E-20
206	1,6595E-12
207	1,4245E-12
210	8,532E-12
213	4,828E-14
217	1,3238E-60
224	1,6486E-28
225	1,6486E-28
230	1,8514E-27
235	4,9813E-35
281	3,1261E-41
287	1,2251E-40
360	6,0518E-13
363	1,2324E-26
365	1,8392E-31
382	4,647E-36

Taula 7.21. Fluxos de totes les reaccions de creació de deuteri quan $t=5,335 \times 10^1$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

35	2,7972E-16
36	8,1842E-16
39	2,2244E-76
40	4,3211E-20
130	0,36467433
131	1,9372E-29
132	6,7721E-20
209	4,8855E-19
212	7,253E-19
214	1,3159E-16
215	3,7256E-62
216	1,673E-64
228	6,1501E-35
234	1,9429E-27
240	9,4432E-35
244	1,0131E-82
297	5,6687E-52
304	8,1265E-64
366	1,6515E-33
373	6,4776E-13
379	7,4187E-77
380	7,3526E-82

Taula 7.22. Fluxos de totes les reaccions de destrucció de ${}^3\text{He}$ quan $t=5,335 \times 10^1$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

3	3,8745E-24
36	8,1842E-16
137	1,9833E-12
138	2,5926E-29
141	1,5091E-20
211	7,6641E-07
212	7,253E-19
213	4,828E-14
214	1,3159E-16
219	2,1594E-28
362	3,6451E-19
372	7,1011E-36

Taula 7.23. Fluxos de totes les reaccions de creació de ${}^3\text{He}$ quan $t=5,335 \times 10^1$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

2	8,5384E-18
37	6,2208E-63
47	1,3329E-20
134	2,0057E-09
206	1,6595E-12
208	6,0137E-07
216	1,673E-64
217	1,3238E-60
223	3,5637E-22
376	3,0665E-63

Taula 7.24. Fluxos de totes les reaccions de destrucció de ${}^7\text{Li}$ (${}^7\text{Be}$) quan $t=5,335 \times 10^1$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

6	3,704E-38
41	8,1616E-33
42	4,9192E-18
46	5,7581E-33
47	1,3329E-20
145	1,2063E-23
146	1,8374E-31
150	8,6308E-30
151	1,7948E-36
227	4,499E-23
228	6,1501E-35
229	4,9691E-21
230	1,8514E-27
231	9,9783E-29
232	7,3672E-35
233	2,5332E-36
239	6,8929E-23
240	9,4432E-35
241	5,4645E-24
242	3,9189E-36
365	1,8392E-31
372	7,1011E-36

Taula 7.25. Fluxos de totes les reaccions de creació de ${}^7\text{Li}$ (${}^7\text{Be}$) quan $t=5,335 \times 10^4$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

6	3,704E-38
43	1,1678E-23
50	1,4726E-55
53	8,6308E-30
59	1,8953E-50
69	5,5902E-55
140	6,6958E-18
141	1,5091E-20
142	2,374E-26
143	1,0756E-26
220	1,003E-74
221	2,7685E-71
224	1,6486E-28
225	1,6486E-28
227	4,499E-23
256	1,0595E-35
380	7,3526E-82

Per acabar, s'ha realitzat el mateix procediment pel darrer instant ($t=1,562 \times 10^4$ s). Les reaccions més importants en aquest instant es mostren a continuació.

Taula 7.26. Les deu reaccions més importants per a $t=1,562 \times 10^4$ s.

134	2,4028E-12	D + p --> 3He
1	1,9841E-12	n --> p
210	1,7031E-12	T + D --> n + 4He
206	1,4537E-12	2 D --> n + 3He
207	1,3987E-12	2 D --> p + T
130	1,2731E-12	p + n --> D
213	3,4432E-13	3He + D --> p + 4He
211	2,0358E-13	3He + n --> p + T
136	5,4519E-14	T + p --> 4He
2	1,1237E-16	T --> 3He

A partir de les reaccions de creació i destrucció per als tres elements estudiats (Taula 7.3, Taula 7.4, Taula 7.5), la comparativa entre tots els fluxos, tan de les reaccions de destrucció com les de creació es mostra a continuació.

Taula 7.27. Fluxos de totes les reaccions de destrucció de deuteri quan $t=1,562 \times 10^4$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

34	6,7857E-98
133	2,2674E-19
134	2,4028E-12
135	1,2112E-19
139	6,3364E-19
206	1,4537E-12
207	1,3987E-12
210	1,7031E-12
213	3,4432E-13
217	3,247E-113
224	1,3739E-23
225	1,3739E-23
230	1,0633E-41
235	2,2201E-33
281	9,1164E-31
287	1,0308E-31
360	6,247E-112
363	6,2249E-21
365	3,845E-21
382	5,3029E-60

Taula 7.28. Fluxos de totes les reaccions de creació de deuteri quan $t=1,562 \times 10^4$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

35	6,30E-107
36	7,67E-105
39	6,51E-101
40	3,7611E-80
130	1,2731E-12
131	6,7023E-38
132	1,5048E-25
209	1,196E-114
212	3,45E-121
214	2,3199E-17
215	2,934E-117
216	1,235E-108
228	4,447E-118
234	4,028E-40
240	1,721E-125
244	7,781E-135
297	1,877E-132
304	7,638E-136
366	1,3297E-24
373	7,735E-29
379	2,449E-126
380	1,031E-117

Taula 7.29. Fluxos de totes les reaccions de destrucció de ${}^3\text{He}$ quan $t=1,562 \times 10^4$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

3	1,0937E-26
36	7,67E-105
137	4,3945E-19
138	1,3644E-30
141	5,8651E-19
211	2,0358E-13
212	3,45E-121
213	3,4432E-13
214	2,3199E-17
219	1,28E-113
362	1,0765E-18
372	2,3386E-28

Taula 7.30. Fluxos de totes les reaccions de creació de ${}^3\text{He}$ quan $t=1,562 \times 10^4$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

2	1,1237E-16
37	6,51E-101
47	1,1552E-80
134	2,4028E-12
206	1,4537E-12
208	7,1858E-43
216	1,235E-108
217	3,247E-113
223	6,0587E-19
376	1,172E-116

Taula 7.31. Fluxos de totes les reaccions de destrucció de ${}^7\text{Li}$ (${}^7\text{Be}$) quan $t=1,562 \times 10^4$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de destrucció, més gran.

6	1,2819E-24
41	2,34E-110
42	2,34E-110
46	3,81E-109
47	1,1552E-80
145	6,8689E-24
146	4,1112E-28
150	3,2957E-21
151	9,8991E-30
227	4,1618E-87
228	4,447E-118
229	3,0559E-17
230	1,0633E-41
231	3,1174E-24
232	3,399E-119
233	3,896E-119
239	5,0998E-17
240	1,721E-125
241	1,42E-19
242	2,3759E-71
365	3,845E-21
372	2,3386E-28

Taula 7.32. Fluxos de totes les reaccions de creació de ${}^7\text{Li}$ (${}^7\text{Be}$) quan $t=1,562 \times 10^4$ s. En verd es mostra el valor del flux, entre totes les reaccions de creació, més gran.

6	1,2819E-24
43	3,69E-107
50	3,249E-43
53	2,3467E-22
59	3,09E-115
69	1,29E-117
140	1,4076E-17
141	5,8651E-19
142	2,3776E-27
143	2,0642E-23
220	5,431E-110
221	5,431E-110
224	1,3739E-23
225	1,3739E-23
227	4,1618E-87
256	3,0819E-27
380	1,031E-117

Per tant, el deuteri es potencialment destruït per les reaccions: **34, 133, 134, 135, 139, 206, 207, 210, 213, 217, 224, 225, 230, 235, 281, 287, 360, 363, 365, 382**, mentre que es creat per les reaccions: **35, 36, 39, 40, 130, 131, 132, 209, 212, 214, 215, 216, 228, 234, 240, 244, 297, 304, 366, 373, 379, 380**. Quan $t=1,289 \times 10^{-3}$ s, l'abundància química d'aquest isòtop (Figura 7.5) augmenta amb el temps i està dominada per la reacció de destrucció **34** ($D \rightarrow n + p$; flux: $7,3118788 \text{ reaccions s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) i la reacció de creació **130** ($p + n \rightarrow D$; flux: $7,3118788 \text{ reaccions s}^{-1}\text{cm}^{-3}$). Per a $t=1,27$ s, l'abundància química segueix augmentant i continuen predominant les mateixes reaccions de destrucció i creació; **34** ($D \rightarrow n + p$; flux: $6,12147207 \text{ reaccions s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) i **130** ($p + n \rightarrow D$; flux: $6,12147207 \text{ reaccions s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) respectivament. Per altra banda, quan $t=5,335 \times 10^1$ s, l'abundància química d'aquest isòtop mostra un augment més pronunciat i les reaccions predominants segueixen sent la **34** ($D \rightarrow n + p$; flux: $0,34046261 \text{ reaccions s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) en el cas de destrucció i **130** ($p + n \rightarrow D$; flux: $0,36467433 \text{ reaccions s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) en el cas de creació. En el darrer instant, $t=1,562 \times 10^4$ s, l'abundància química d'aquest isòtop s'estabilitza, com mostra el pendent de la Figura 7.5, i la reacció de creació **130** ($p + n \rightarrow D$; flux: $1,2731 \times 10^{-12} \text{ reaccions s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) segueix dominant però, en el cas de la reacció de destrucció, la **134** ($D + p \rightarrow 3\text{He}$; flux: $2,4028 \times 10^{-12} \text{ reaccions s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) és la dominant.

Pel que fa referència a l'isòtop ${}^3\text{He}$, destruït per les reaccions: **3, 36, 137, 138, 141, 211, 212, 213, 214, 219, 362, 367** i creat per les reaccions: **2, 37, 47, 134, 206, 208, 216, 217, 223, 376**, quan $t=1,289 \times 10^{-3}$ s, l'abundància química d'aquest isòtop (Figura 7.5) augmenta amb el temps i està dominada per la

reacció de destrucció **36** ($3\text{He} \rightarrow p + \text{D}$; flux: $4,3993 \times 10^{-11}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) i la reacció de creació **134** ($\text{D} + p \rightarrow 3\text{He}$; flux: $4,3919 \times 10^{-11}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$). Per a $t=1,27\text{s}$, l'abundància química segueix augmentant i continuen predominant les mateixes reaccions de destrucció i creació; **36** ($3\text{He} \rightarrow p + \text{D}$; flux: $4,7205 \times 10^{-11}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) i **134** ($\text{D} + p \rightarrow 3\text{He}$; flux: $4,3919 \times 10^{-11}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$). Per altra banda, quan $t=5,335 \times 10^1\text{s}$, l'abundància química d'aquest isòtop mostra un augment més pronunciat però, en aquest cas, la reacció de destrucció principal són la **211** ($3\text{He} + n \rightarrow p + \text{T}$; flux: $7,6641 \times 10^{-7}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) i la **208** ($\text{T} + p \rightarrow n + 3\text{He}$; flux: $6,0137 \times 10^{-7}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) respectivament. En el darrer instant, $t=1,562 \times 10^4\text{s}$, l'abundància química d'aquest isòtop s'estabilitza, com mostra el pendent de la Figura 7.5, i la reacció de destrucció predominant és la **213** ($3\text{He} + \text{D} \rightarrow p + 4\text{He}$; flux: $3,4432 \times 10^{13}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) i de creació la **134** ($\text{D} + p \rightarrow 3\text{He}$; flux: $2,4028 \times 10^{-12}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$).

En el cas de ${}^7\text{Li}$ (${}^7\text{Be}$), es destrueix per les reaccions: **6, 41, 42, 46, 47, 145, 146, 150, 151, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 239, 240, 241, 242, 365, 372** i creat per les reaccions: **6, 43, 50, 53, 59, 69, 140, 141, 142, 143, 220, 221, 224, 225, 227, 256, 380**, quan $t=1,289 \times 10^{-3}\text{s}$, la seva abundància química (Figura 7.5) augmenta amb el temps i està dominada per la reacció de destrucció **42** (${}^7\text{Li} \rightarrow \text{T} + 4\text{He}$; flux: $1,2021 \times 10^{-33}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) i la reacció de creació **140** ($4\text{He} + \text{T} \rightarrow {}^7\text{Li}$; flux: $1,2021 \times 10^{-33}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$). Per a $t=1,27\text{s}$, l'abundància química segueix augmentant i continuen predominant les mateixes reaccions de destrucció i creació; **42** (${}^7\text{Li} \rightarrow \text{T} + 4\text{He}$; flux: $6,1053 \times 10^{-30}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) i la reacció de creació **140** ($4\text{He} + \text{T} \rightarrow {}^7\text{Li}$; flux: $6,1053 \times 10^{-30}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$). Per altra banda, quan $t=5,335 \times 10^1\text{s}$, l'abundància química mostra un augment més pronunciat i les reaccions predominants segueixen sent la **42** (${}^7\text{Li} \rightarrow \text{T} + 4\text{He}$; flux: $4,9192 \times 10^{-18}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) en el cas de destrucció i **140** ($4\text{He} + \text{T} \rightarrow {}^7\text{Li}$; flux: $6,6958 \times 10^{-18}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) en el cas de creació. En el darrer instant, $t=1,562 \times 10^4\text{s}$, la seva abundància química s'estabilitza, com mostra el pendent de la Figura 7.5, i la reacció de destrucció predominant és **239** (${}^7\text{Be} + n \rightarrow p + {}^7\text{Li}$; flux: $5,0998 \times 10^{-17}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$) i, en el cas de creació, la **140** ($4\text{He} + \text{T} \rightarrow {}^7\text{Li}$; flux: $1,4076 \times 10^{-17}$ reaccions $\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$).

8. Anàlisi de l'impacte ambiental

Aquest projecte no requereix de grans recursos, pel que el seu impacte ambiental és baix. Bàsicament, s'ha de tenir en compte el consum electrònic de l'ordinador que ha calgut durant la realització d'aquesta investigació i, si s'escau, el material necessari en cas d'avaría.

No obstant, les imatges de les galàxies emprades a la primera part experimental han estat realitzades mitjançant un telescopi (73), tot i que, de la mateixa manera que més endavant (Pressupost i/o Anàlisi Econòmica) no es tenen en compte els costos d'aquest, tampoc a l'impacte ambiental.

Conclusions

Aquest projecte es va iniciar amb la finalitat d'assolir dos objectius principals; per una banda, obtenir el valor de l'edat de l'Univers mitjançant la llei de Hubble i, per una altra, dur a terme un estudi de l'etapa de la nucleosíntesi de l'Univers primitiu per tal d'obtenir informació sobre l'evolució dels elements que es van originar durant aquest període. En aquest sentit, s'han assolit les propostes establertes inicialment.

En el cas del primer objectiu, el procediment per obtenir el valor de l'edat de l'Univers ha passat pel càlcul de la constant de Hubble. Inicialment, la idea era obtenir aquesta constant a través de la realització d'un únic estudi; no obstant això, ha estat possible realitzar-lo dues vegades més. Així doncs, el resultat obtingut ha estat més precís del que s'esperava en un primer moment.

Pel que fa a la investigació de la nucleosíntesi primordial, se n'han extret diverses conclusions. Inicialment, s'ha realitzat una comparació de les abundàncies finals, en fracció de massa, extretes a través del programa computacional i les observacionals d'objectes astronòmics en què el valor d'aquestes abundàncies estiguin preservats el millor possible. En aquest cas, quan s'ha comparat el quocient ${}^7\text{Li}/\text{H}$, s'ha apreciat una notable discrepància, d'un factor 3-4, entre el valor inferit observacionalment i el resultat de les simulacions. Aquesta discrepància es coneix com el 'problema del liti primordial', actualment, encara es troba en fase d'investigació.

Encara en relació amb l'estudi de la nucleosíntesi primordial, s'ha dut a terme un estudi acurat de l'evolució química de l'Univers primitiu analitzant la informació que es pot extreure dels fluxos de les reaccions nuclears en diferents instants. Com es detalla en l'apartat 7.1.1, s'ha observat que en el cas del deuteri i el ${}^7\text{Li}$ (${}^7\text{Be}$), les reaccions de creació i destrucció predominants són bastant constants pels diferents instants estudiats en aquest període. En canvi, pel que fa a l' ${}^3\text{He}$, tot i que al principi les reaccions predominants aparentment també semblen constants, a mesura que transcorre el temps s'observen variacions força notables. En darrer lloc, s'ha realitzat dues representacions gràfiques; en la primera es demostra, tal i com s'ha conclòs en l'anterior part experimental, que l'Univers es troba en expansió mentre que, en la segona, es fa una comparativa entre les abundàncies primitives i les del Sistema Solar.

D'aquesta manera, una possible línia futura per a seguir amb el projecte pot ser la d'augmentar el nombre d'instants en què es fa l'estudi de l'evolució química de l'Univers primitiu i, identificar i descriure de manera més precisa les reaccions predominants al llarg de la nucleosíntesi. Seguint amb el mateix exemple, també seria interessant ampliar l'estudi mitjançant la variació d'altres paràmetres,

com podria ser la vida mitjana d'un neutró. D'aquesta manera podria ser possible arribar a la comprensió, des d'una perspectiva diferent, del comportament i la importància d'aquestes partícules.

Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

L'anàlisi econòmica del projecte s'ha centrat en l'estudi dels costos associats a la seva realització.

En primer lloc, s'ha analitzat els costos relatius a les eines informàtiques (hardware i software), així com a la mà d'obra, que han estat considerats com a despesa directa. Posteriorment, s'han analitzat les despeses indirectes, referents al desenvolupament extern del projecte. Per últim, s'ha tingut en compte un percentatge de contingència que inclou tots aquells costos de difícil acotació, per a poder millorar l'aproximació del valor final al cost total del projecte.

Cal destacar que no s'han considerat costos associats a l'obtenció de les imatges de les galàxies utilitzades en la primera part experimental. Aquestes fotografies, realitzades mitjançant un telescopi (73), es trobaven a lliure disposició a l'hora d'accedir-hi.

En el cas del cost referent al hardware, s'ha suposat un període d'amortització de valor de compra de l'ordinador utilitzat de 5 anys. Si aquest valor de compra és de 1.142,84€, tenint en compte que el projecte s'ha realitzat en 5 mesos i mig, el cost és el següent.

Taula 1. Cost hardware (pressupost directe).

Hardware	
HP Pavilion Laptop 15-cs2xxx	104,76 €

Taula 2. Cost software (pressupost directe).

Software	
Microsoft Office	353,36 €

Tot seguit, es mostra el desglossament de les hores implementades per a realitzar aquest projecte.

Taula 3. Cost de la mà d'obra de l'autora (pressupost directe).

Mà d'obra de l'autora	
Establir objectius	20 h
Estudi de la documentació	200 h
Primer bloc: part teòrica	100 h
Segon bloc: part experimental	150 h
Anàlisi dels resultats	50 h
Document final	80 h
Total	600 h

Taula 4. Cost de la mà d'obra del director (pressupost directe).

Mà d'obra del director	
Establir objectius	2 h
Resolució de dubtes	10 h
Correcció	15 h
Total	27 h

Tenint en compte que per part de l'autora aquestes hores comporten un pressupost de 25€/h (estudiant en pràctiques), el pressupost total de mà d'obra és de **15.000€**. El cost del director és de 55€/h, per tant, el total és de **1.485€**.

Pel que fa al pressupost indirecte, s'ha de tenir en compte el consum elèctric de l'ordinador. Al tractar-se de 600 hores, sabent que es gasta aproximadament 0,4 kW/h amb un cost de 0,15 €/kWh (76), el pressupost total estimat és de **45€**.

Així doncs, tenint en compte un percentatge de contingència del 5%, el pressupost total d'aquest projecte és el següent.

Taula 5. Pressupost total del projecte.

Tipus de pressupost	Cost
Hardware	104,76 €
Software	353,36 €
Mà d'obra	16.485 €
Indirecte	45 €
Contingència	849,41 €
Total	17.837,53 €

Bibliografia

1. Los sistemas de unidades geométrico, natural y de Planck. – Estudiar Física. A: [en línia]. [Consulta: 27 febrer 2020]. Disponible a: <https://estudiarfísica.com/2013/08/25/los-sistemas-de-unidades-geométrico-natural-y-de-planck/>.
2. Orígenes: catorce mil millones de años de evolución cósmica - Neil deGrasse Tyson, Donald W. Goldsmith, Joan Soler Chic - Google Libros. A: [en línia]. [Consulta: 27 febrer 2020]. Disponible a: <https://books.google.es/books?id=sjmWBQAAQBAJ&pg=PA27&dq=Zur+Elektrodynamik+bewegter+Körper+español&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEWjUvuuY5rfZAhUCtRQKHcgVC8wQ6AEIOTAD#v=onepage&q=Zur+Elektrodynamik+bewegter+Körper+español&f=false>.
3. CODATA Value: Planck length. A: [en línia]. [Consulta: 27 febrer 2020]. Disponible a: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?plkl>.
4. Maeder, A. et al. Research, Keele University. A: *Keele University*. 2008, Vol. 3, núm. S250, p. 3-16. ISSN 1743-9221.
5. Thomas Digges (1546 - 1595) - Biography - MacTutor History of Mathematics. A: [en línia]. [Consulta: 3 març 2020]. Disponible a: <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Digges/#references>.
6. Albert Einstein: el perseguidor de la luz - Bram de Swaan - Google Libros. A: [en línia]. [Consulta: 3 març 2020]. Disponible a: https://books.google.co.uk/books?id=LZDntf2mgccC&pg=PA68&lpg=PA68&dq=geometria+euclidian+a+albert+einstein&source=bl&ots=_tNMP_Arph&sig=ACfU3U03FzMwu7en7qyETyKlw-zmDGGexw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEWjU1L27k-HpAhUltnEKHevJAzlQ6AEwBXoECAoQAQ#v=onepage&q=geometria.
7. Mózo, B.S. *Modern Cosmology* [en línia]. 2017. ISBN 9788578110796. DOI 10.1017/CBO9781107415324.004. Disponible a: <file:///C:/Users/User/Downloads/fvm939e.pdf>.
8. Serway, R.A., Jewett, J.W. i Campos Olguín, V. *Física para ciencias e ingeniería*. Cengage Learning, 2008. ISBN 9706868372.
9. Schwarzschild Geometry. A: [en línia]. [Consulta: 10 març 2020]. Disponible a: <https://jila.colorado.edu/~ajsh/bh/schwp.html>.
10. Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the ... - Helge Kragh - Google Libros. A: [en línia]. [Consulta: 10 març 2020]. Disponible a: https://books.google.co.uk/books?vid=ISBN069100546X&id=f6p0AFgzeMsC&pg=PA132&lpg=PA132&vq=cosmic+microwave&sig=YvmlZ13jwKPS0ucC5ogFsPqwfnY&redir_esc=y#v=onepage&q=cosmic+microwave&f=false.
11. Penzias, A., Wilson, R. Find Evidence in Support of the Big Bang | Everyday Cosmology. A: [en línia]. 1964. [Consulta: 10 març 2020]. Disponible a: <https://cosmology.carnegiescience.edu/timeline/1964>.
12. WMAP CMB Fluctuations. A: [en línia]. [Consulta: 11 març 2020]. Disponible a: https://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/bb_cosmo_fluct.html.

13. Leverington, D. *New Cosmic Horizons: Space Astronomy from the V2 to the Hubble Space Telescope*. Cambridge University Press, 2000. ISBN 0-521-65833-0.
14. Fixsen, E.L. The American Astronomical Society. All rights reserved. A: *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*. 1996.
15. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP). A: [en línia]. [Consulta: 11 març 2020]. Disponible a: <https://map.gsfc.nasa.gov/>.
16. Planck Surveyor Satellite — Department of Physics. A: [en línia]. [Consulta: 20 març 2020]. Disponible a: <https://www.phy.cam.ac.uk/research/research-groups/ap/plank>.
17. Lazarides, G. Introduction to cosmology. A: *Proceedings of Science*. 1998, Vol. 1. ISSN 18248039. DOI 10.1088/0031-9112/35/7/021.
18. Lorente, F.C. La distribución de Maxwell-Boltzmann y más. A: .
19. Alfonseca, M. *Diccionario Espasa, 1,000 grandes científicos*. Espasa Calpe, 1996. ISBN 8423992365.
20. Albert Einstein. A: [en línia]. [Consulta: 20 març 2020]. Disponible a: https://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild_Spanish/docs/StarChild/whos_who_level2/einstein.html.
21. Cánovas Picón, F. James Clerk Maxwell. A: .
22. Huygens Institute-Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW). A: . 1934.
23. Aleksandr Aleksandrovich Friedmann | Russian mathematician and scientist | Britannica. A: [en línia]. [Consulta: 27 març 2020]. Disponible a: <https://www.britannica.com/biography/Aleksandr-Aleksandrovich-Friedmann>.
24. Lemaître, G. 1931. *The beginning of the world from the point of view of quantum theory [10]*. DOI 10.1038/127706b0.
25. Tipler, P.A. i Mosca, G. *Física para la ciencia y la tecnología*. Reverté, 2005. ISBN 8429144064.
26. Michelson, A.A. i Morley, E.W. On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. A: *American Journal of Science*. American Journal of Science (AJS), 1887, Vol. s3-34, núm. 203, p. 333-345. ISSN 0002-9599. DOI 10.2475/ajs.s3-34.203.333.
27. Aupingh, J. Una revisió de las teorías sobre el origen y la evolución del Universo. A: [en línia]. [Consulta: 27 març 2020]. Disponible a: https://books.google.co.uk/books?id=kvhEIXYY1SYC&pg=PA144&lpg=PA144&dq=Ernst+Mach+eter&source=bl&ots=Mg3BBD7NMR&sig=ACfU3U0G-qgUbwSbNm53_AwWr4f0reay5w&hl=es&sa=X&ved=2ahUKewiqje3KvePpAhWhTBUIHamJBIAQ6AEwA3oECAgQAQ#v=onepage&q=Ernst Mach eter&f=false.
28. Janssen, B. Breve repaso de la Relatividad Especial. A: .
29. Janssen, B. Teoría de la Relatividad General. A: [en línia]. 2013. [Consulta: 28 març 2020]. Disponible

a: <http://www.ugr.es/>.

30. Einstein, E., Holes, B. i Galaxies, D. Elements of the past: Big Bang Nucleosynthesis and observation. A: *AT Arquitectes de Tarragona*. 2016, Vol. 0, núm. 18, p. 2-3. ISSN 2385-507X.

31. Press release: The 1993 Nobel Prize in Physics - NobelPrize.org. A: [en línia]. [Consulta: 28 març 2020]. Disponible a: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1993/press-release/>.

32. Schneider, P. *Extragalactic Astronomy and Cosmology (200.Peter Schneider.pdf)*. 2015. ISBN 978-3-642-54082-0 978-3-642-54083-7. DOI 10.1007/978-3-642-54083-7.

33. Thompson, L.A. Vesto Slipher and the First Galaxy Redshifts. A: .

34. Telescopio Hooker. A: [en línia]. [Consulta: 28 març 2020]. Disponible a: http://kiwix.demo.ideascube.org/wikipedia.es/A/Telescopio_Hooker.html.

35. Humason, M.L., Mayall, N.U. i Sandage, A.R. Redshifts and magnitudes of extragalactic nebulae. A: *The Astronomical Journal*. IOP Publishing, 1956, Vol. 61, p. 97. ISSN 00046256. DOI 10.1086/107297.

36. Oster, L. *Astronomía moderna*. Reverté, 2011. ISBN 9788429141412.

37. Suzuki, N. et al. AN EARLY-TYPE-HOSTED SUPERNOVA SAMPLE *. A: [en línia]. 2011. [Consulta: 28 març 2020]. Disponible a: <http://supernova.lbl.gov/Union>.

38. Kuhn, K.F. *In quest of the universe*. West Pub. Co, 1994. ISBN 0314023933.

39. Freedman, W.L. et al. Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant . A: *The Astrophysical Journal*. IOP Publishing, 2001, Vol. 553, núm. 1, p. 47-72. ISSN 0004-637X. DOI 10.1086/320638.

40. Messier, C. Catalogue des Nébuleuses & des amas d'Étoiles. A: . 1781, p. 227-267.

41. Dreyer, J.L.E. *New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars*. Reprinted 1953, London, Royal Astronomical Society: 1888.

42. Hodge, P. *The Andromeda Galaxy*.

43. Nishiyama, S. et al. A Distinct Structure Inside the Galactic Bar. A: *The Astrophysical Journal* [en línia]. IOP Publishing, 2005, Vol. 621, núm. 2, p. L105-L108. DOI 10.1086/429291. [Consulta: 1 abril 2020]. Disponible a: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0502058>.

44. Daintith, J. *Dictionary Of Scientists*. Oxford University Press, 1999.

45. Lemaître, G. *The expanding universe*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1931.

46. Cosmology - Superunification and the Planck era | Britannica. A: [en línia]. [Consulta: 1 abril 2020]. Disponible a: <https://www.britannica.com/science/cosmology-astronomy/Superunification-and-the-Planck-era#ref1070087>.

47. Planck Time | COSMOS. A: [en línia]. [Consulta: 7 abril 2020]. Disponible a:

- <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/P/Planck+Time>.
48. CODATA Value: Planck temperature. A: [en línia]. [Consulta: 7 abril 2020]. Disponible a: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?plktmp>.
49. Guth, A.H. *El universo inflacionario : la búsqueda de una nueva teoría sobre los orígenes del cosmos*. Debate, 1999. ISBN 9788483061787.
50. History of the Universe. A: [en línia]. [Consulta: 13 abril 2020]. Disponible a: https://web.archive.org/web/20100828112151/http://burro.astr.cwru.edu/stu/advanced/cosmos_history.html.
51. Oakley, W.S. Resolving the electron-positron mass annihilation mystery. A: *International Journal of Scientific Reports*. 2015, Vol. 1, núm. 6, p. 250. ISSN 2454-2156. DOI 10.18203/issn.2454-2156.intjsci20150954.
52. Weiss, A. Big Bang Nucleosynthesis: Cooking up the first light elements. A: *Max Planck Institute for Astrophysics*.
53. *Instrumentation Reference*. 3a. 2003. ISBN 0-7506-7123-8.
54. Volume 6: The Berlin Years: Writings, 1914-1917 (English translation supplement) Page 421 (433 of 462). A: [en línia]. [Consulta: 20 abril 2020]. Disponible a: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol6-trans/433>.
55. Hubble time - Oxford Reference. A: [en línia]. [Consulta: 23 abril 2020]. Disponible a: <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095948568>.
56. Ade, P.A.R. et al. Planck 2015 results: XIII. Cosmological parameters. A: *Astronomy and Astrophysics*. EDP Sciences, 2016, Vol. 594. ISSN 14320746. DOI 10.1051/0004-6361/201525830.
57. Critical Density | COSMOS. A: [en línia]. [Consulta: 27 abril 2020]. Disponible a: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/C/Critical+Density>.
58. Carmeli, M. i Kuzmenko, T. Value of the Cosmological Constant: Theory versus Experiment. A: .
59. Brian Greene: Making sense of string theory | TED Talk. A: [en línia]. [Consulta: 1 maig 2020]. Disponible a: https://www.ted.com/talks/brian_greene_making_sense_of_string_theory.
60. Breakthrough Prize – Fundamental Physics Breakthrough Prize Laureates – John H. Schwarz. A: [en línia]. [Consulta: 1 juny 2020]. Disponible a: <https://breakthroughprize.org/Laureates/1/L43>.
61. Rodríguez, J., Proveda, F., Proveda, N. The Standard Model of Elementary Particles. A: .
62. Mukhanov, V. Cosmology and the many worlds interpretation of quantum mechanics. A: *Universe or Multiverse?* 2013, p. 267-274. DOI 10.1017/CBO9781107050990.019.
63. Hawking, S.W. Breakdown of predictability in gravitational collapse. A: *Physical Review D*. 1976, Vol. 14, núm. 10, p. 2460-2473.

64. WMAP 9 Year Mission Results. A: [en línia]. [Consulta: 1 abril 2020]. Disponible a: <https://map.gsfc.nasa.gov/news/index.html>.
65. Bonamente. The astrophysical journal. A: *Nature*. 1896, Vol. 55, núm. 1414, p. 110-111. ISSN 00280836.
66. A new way to measure the expansion of the Universe: International Centre for Radio Astronomy Research. A: [en línia]. [Consulta: 5 maig 2020]. Disponible a: https://web.archive.org/web/20110919000817/http://www.icrar.org/news/news_items/media-releases/a-new-way-to-measure-the-expansion-of-the-universe.
67. Beutler, F. et al. The 6dF Galaxy Survey: Baryon acoustic oscillations and the local Hubble constant. A: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2011, Vol. 416, núm. 4, p. 3017-3032. ISSN 00358711. DOI 10.1111/j.1365-2966.2011.19250.x.
68. Aghanim, N., Armitage-Caplan, C., Arnaud, M. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. A: *Astronomy and Astrophysics*. 2014,
69. El nacimiento de la cosmología basada en ondas gravitacionales - La Ciencia de la Mula Francis. A: [en línia]. [Consulta: 5 maig 2020]. Disponible a: <https://francis.naukas.com/2017/10/16/des-mide-la-constante-de-hubble-usando-gw170817/>.
70. Sakstein, J. i Jain, B. Implications of the Neutron Star Merger GW170817 for Cosmological Scalar-Tensor Theories. A: *Physical Review Letters*. American Physical Society, 2017, Vol. 119, núm. 25. ISSN 10797114. DOI 10.1103/PhysRevLett.119.251303.
71. Vega-Ferrero, J. et al. The Hubble Constant from SN Refsdal. A: *The Astrophysical Journal Letters* [en línia]. 2018, Vol. 853, p. L31. DOI 10.3847/2041-8213/aaa95f. [Consulta: 24 febrer 2020]. Disponible a: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaa95f>.
72. Freedman, W.L. et al. Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant. A: *The Astrophysical Journal*. IOP Publishing, 2001, Vol. 553, núm. 1, p. 47-72. ISSN 0004-637X. DOI 10.1086/320638.
73. Robert C. Kennicutt Jr. The Hubble Law. A: *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 1992, Vol. 79, p. 255-284.
74. Longland, R. et al. Lithium production in the merging of white dwarf stars; Lithium production in the merging of white dwarf stars. A: *A&A*. 2012, Vol. 542, p. 117. DOI 10.1051/0004-6361/201219289.
75. Wagoner, R. V. Synthesis of the Elements Within Objects Exploding from Very High Temperatures. A: *The Astrophysical Journal Supplement Series*. IOP Publishing, 1969, Vol. 18, p. 247. ISSN 0067-0049. DOI 10.1086/190191.
76. Precio del kwh en España: Comparativa de Endesa, Iberdrola y otras. A: [en línia]. [Consulta: 1 juny 2020]. Disponible a: <https://tarifaluzhora.es/info/precio-kwh>.



Annex A: Imatges de les galàxies

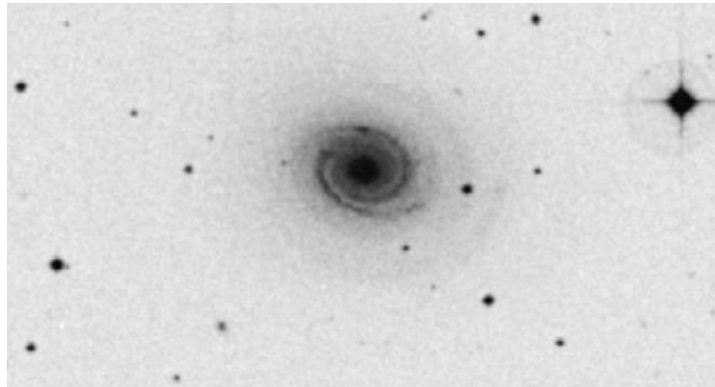


Figura A.1. Galàxia NGC 1357. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

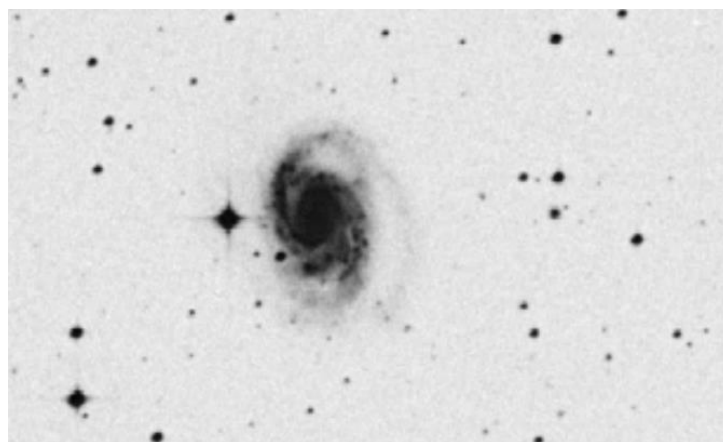


Figura A.2. Galàxia NGC 1832. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

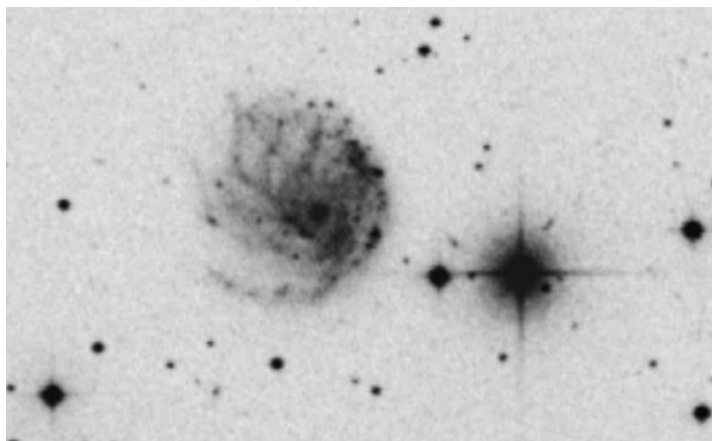


Figura A.3. Galàxia NGC 2276. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

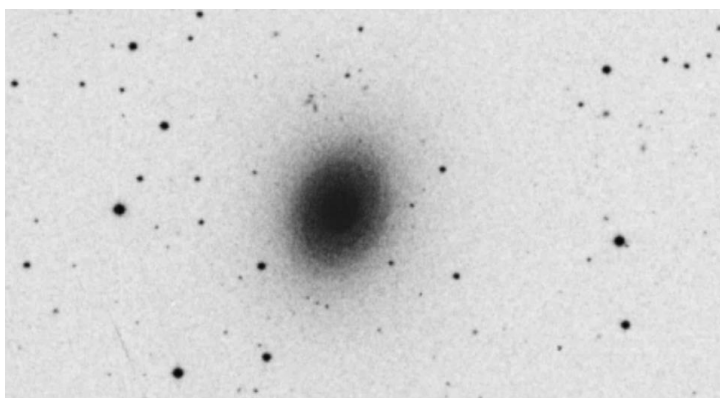


Figura A.4. Galàxia NGC 2775. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

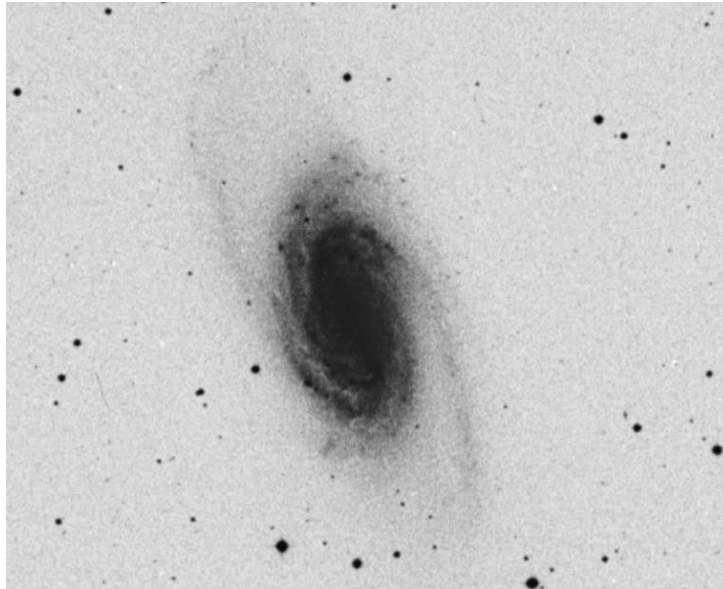


Figura A.5. Galàxia NGC 2903. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

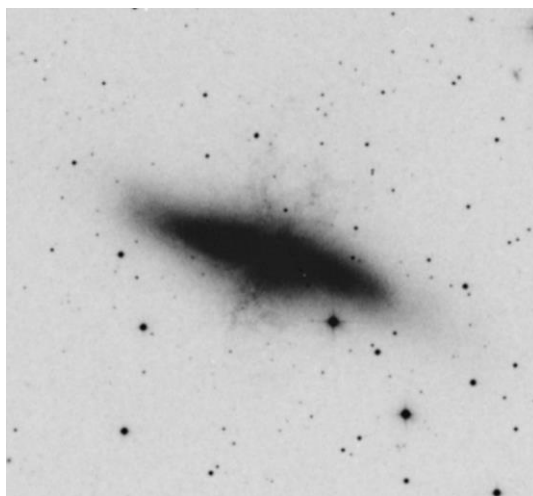


Figura A.6. Galàxia NGC 3034. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

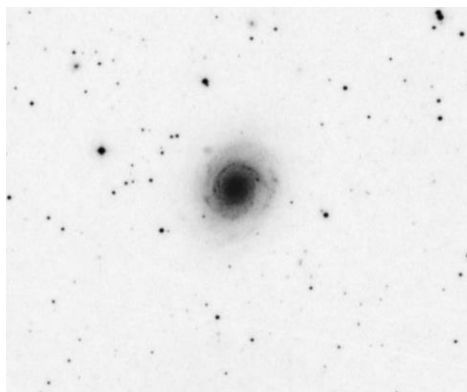


Figura A.7. Galàxia NGC 3147. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

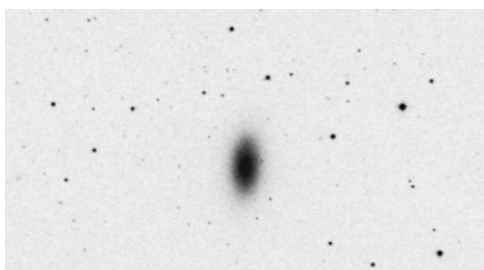


Figura A.8. Galàxia NGC 3245. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

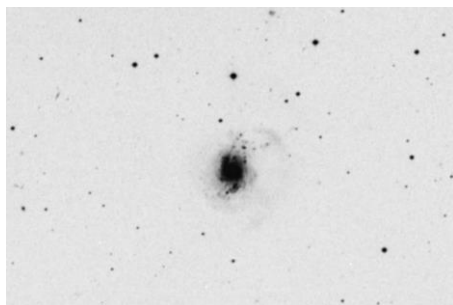


Figura A.9. Galàxia NGC 3310. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

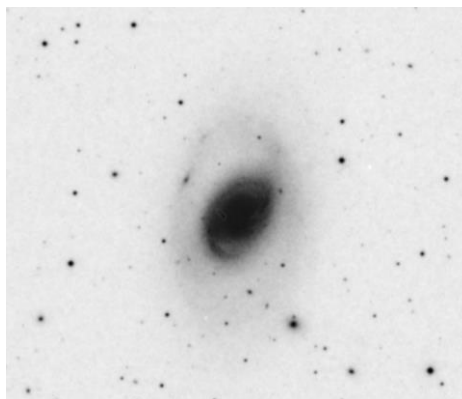


Figura A.10. Galàxia NGC 3368. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

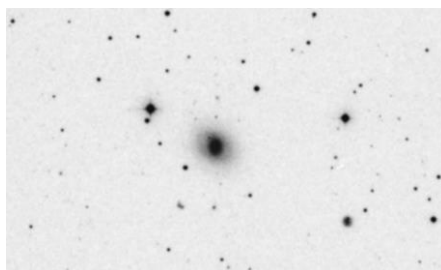


Figura A.11. Galàxia NGC 3516. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

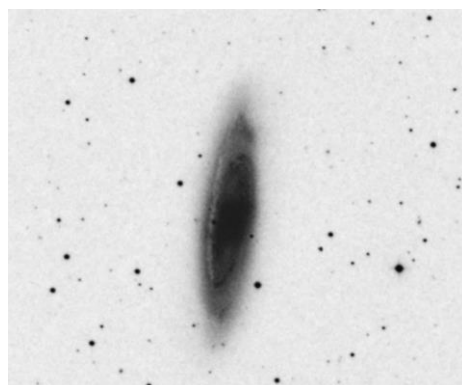


Figura A.12. Galàxia NGC 3623. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

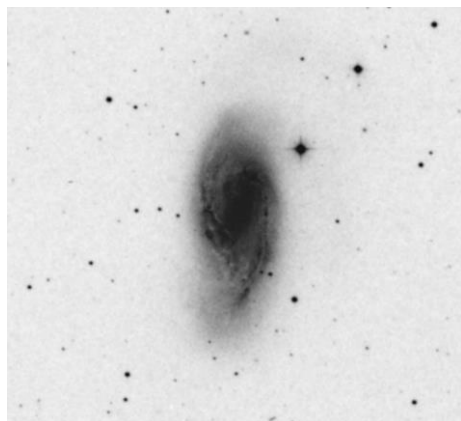


Figura A.13. Galàxia NGC 3627. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

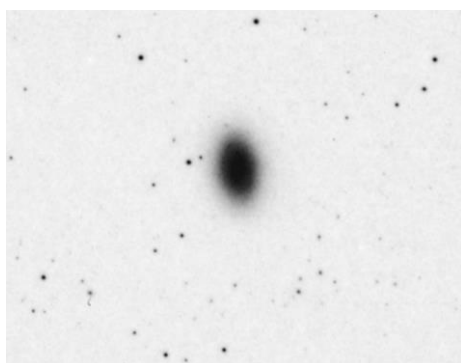


Figura A.14. Galàxia NGC 3941. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

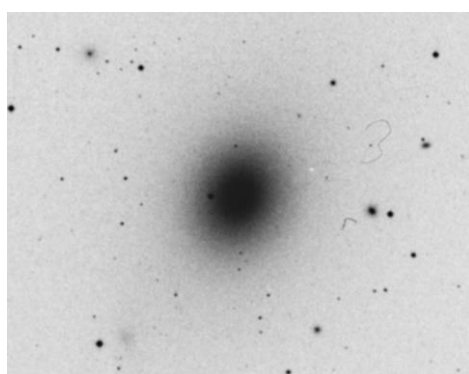


Figura A.15. Galàxia NGC 4472. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

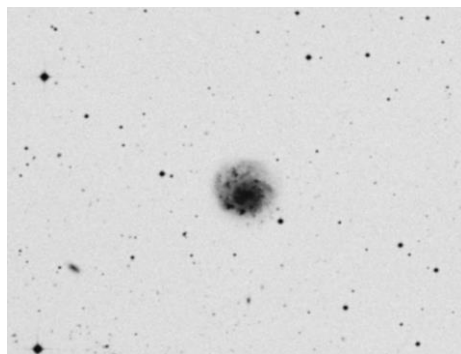


Figura A.16. Galàxia NGC 4775. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

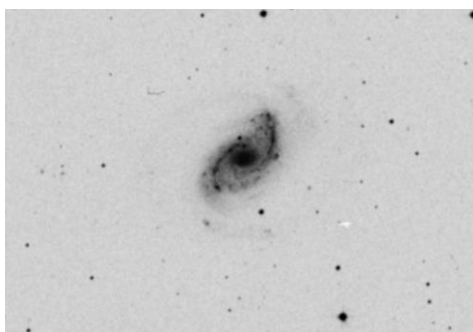


Figura A.17. Galàxia NGC 5248. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

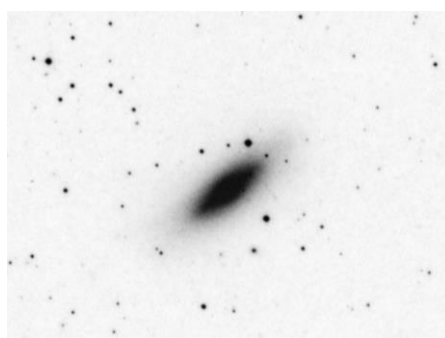


Figura A.18. Galàxia NGC 5866. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

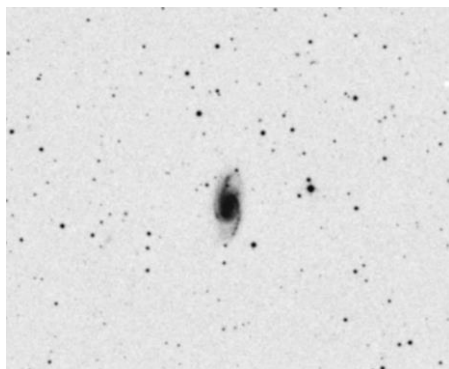


Figura A.19. Galàxia NGC 6181. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

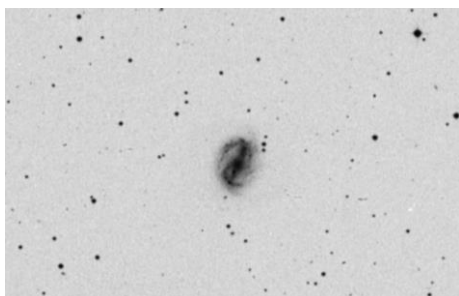


Figura A.20. Galàxia NGC 6217. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

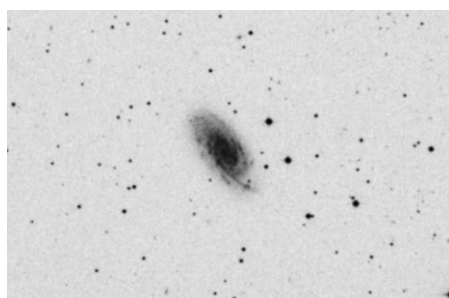


Figura A.21. Galàxia NGC 6643. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

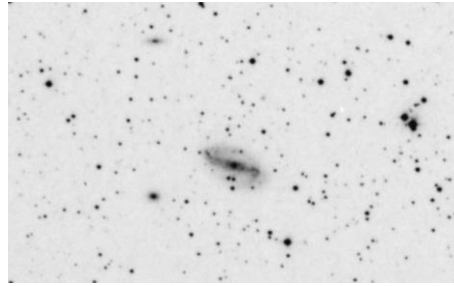


Figura A.22. Galàxia NGC 6764. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Annex B: Espectres electromagnètics de les galàxies

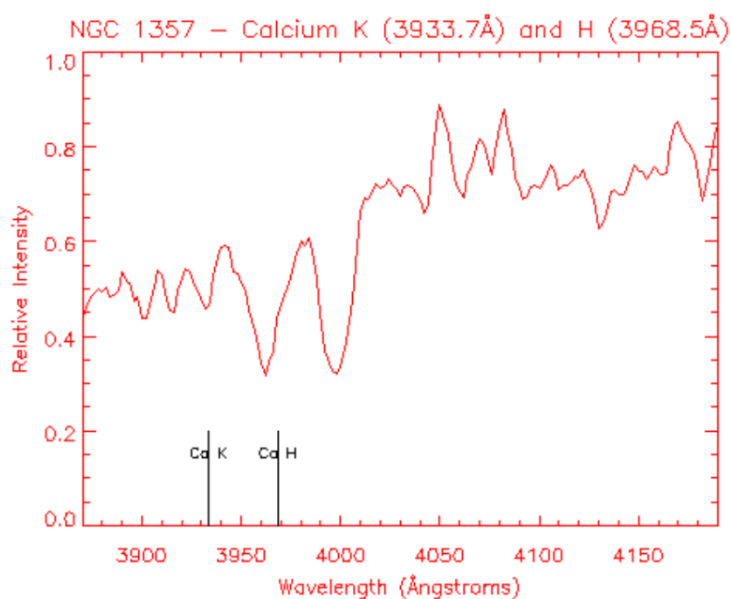


Figura B.1. Espectre NGC 1357 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

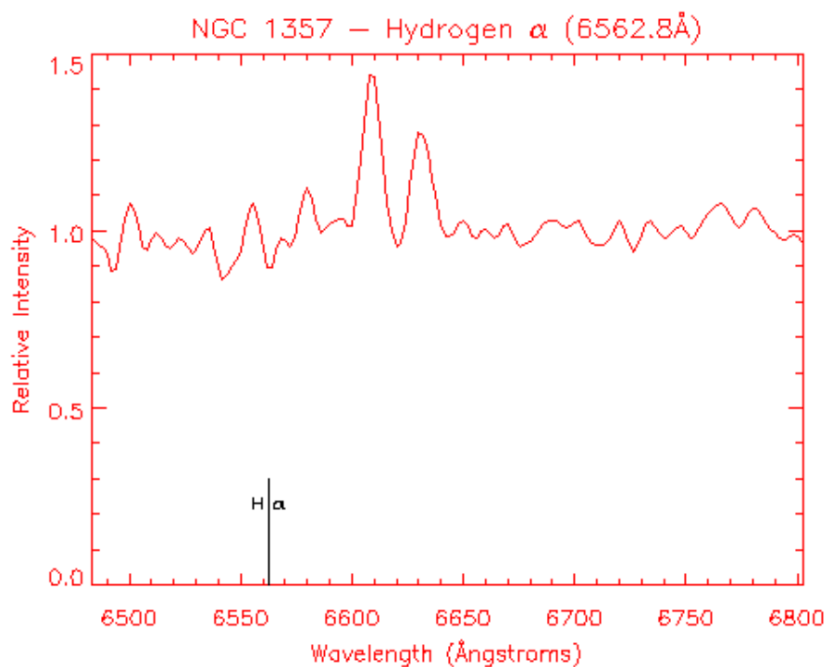


Figura B.2. Espectre NGC 1357 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

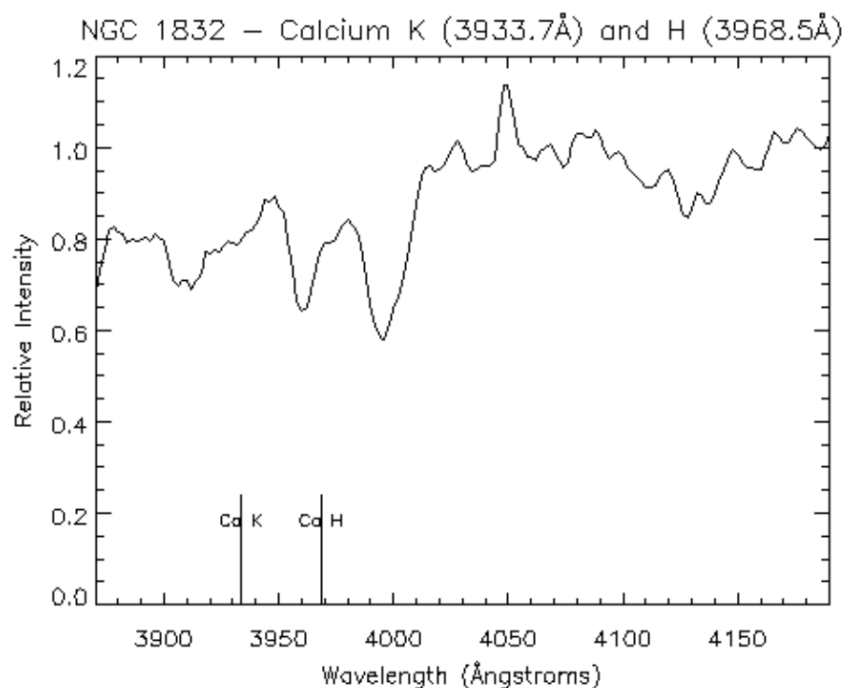


Figura B.3. Espectre NGC 1832 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

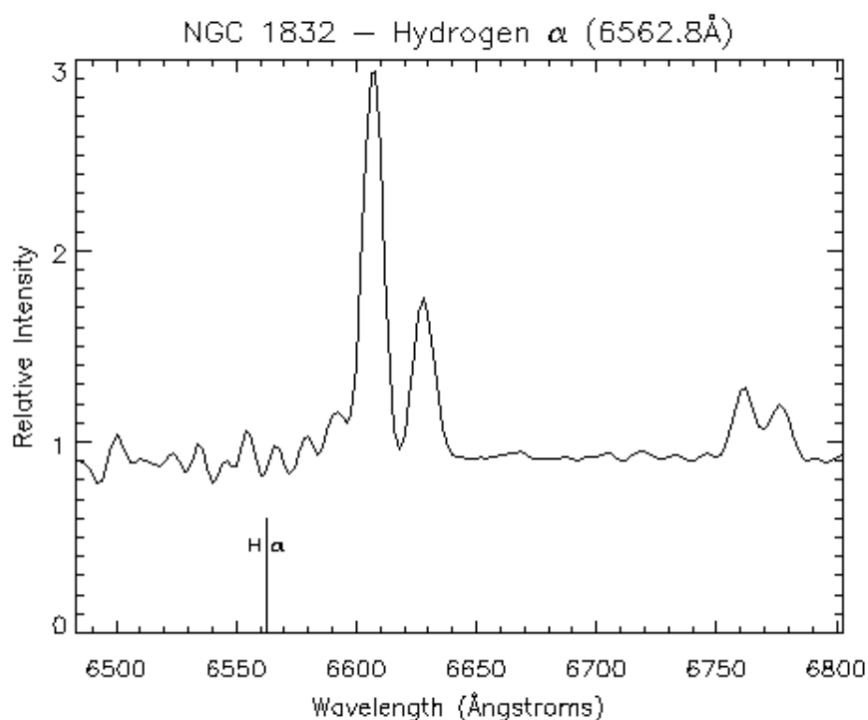


Figura B.4. Espectre NGC 1832 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

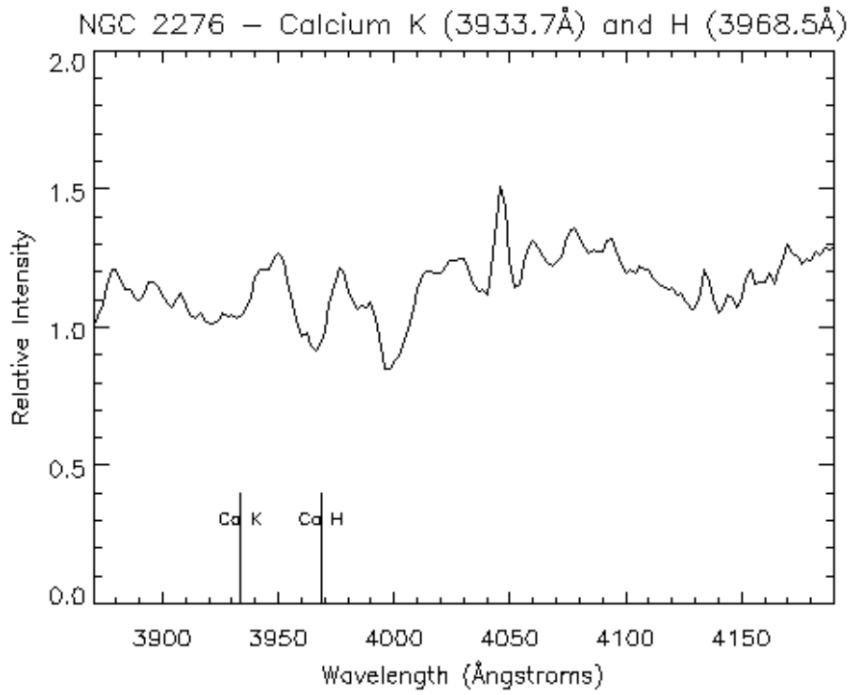


Figura B.5. Espectre NGC 2276 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

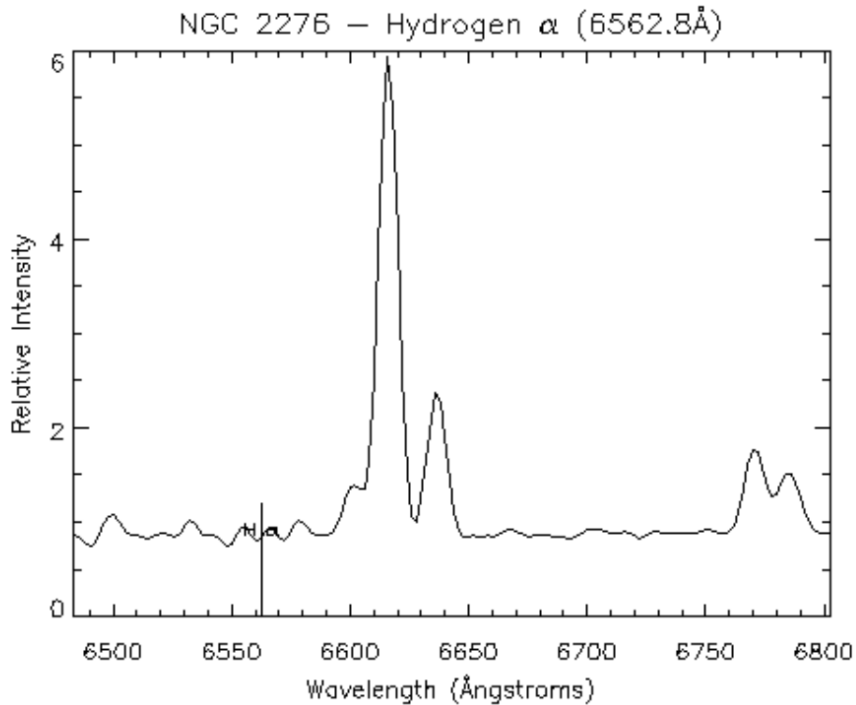


Figura B.6. Espectre NGC 2276 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

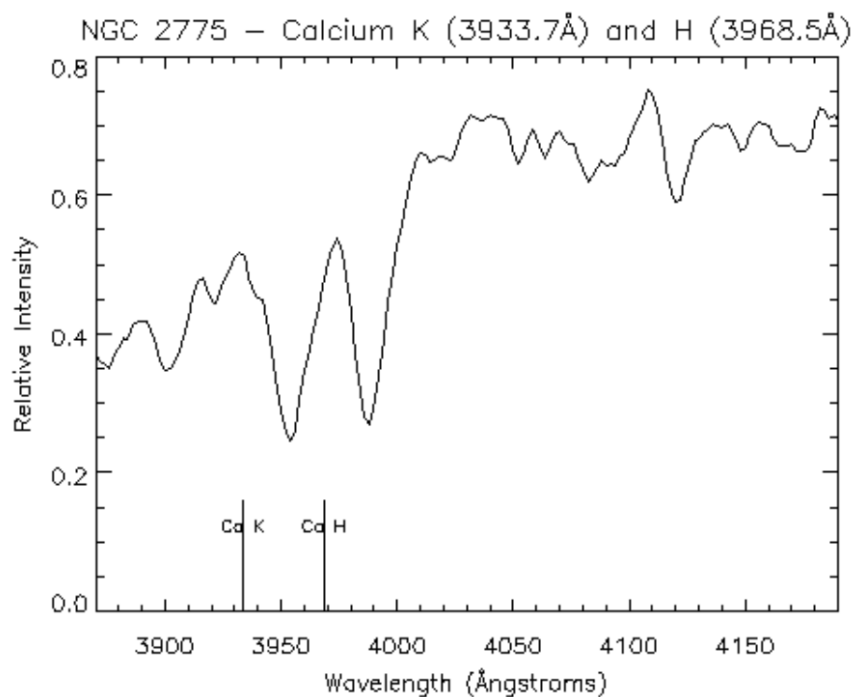


Figura B.7. Espectre NGC 2775 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

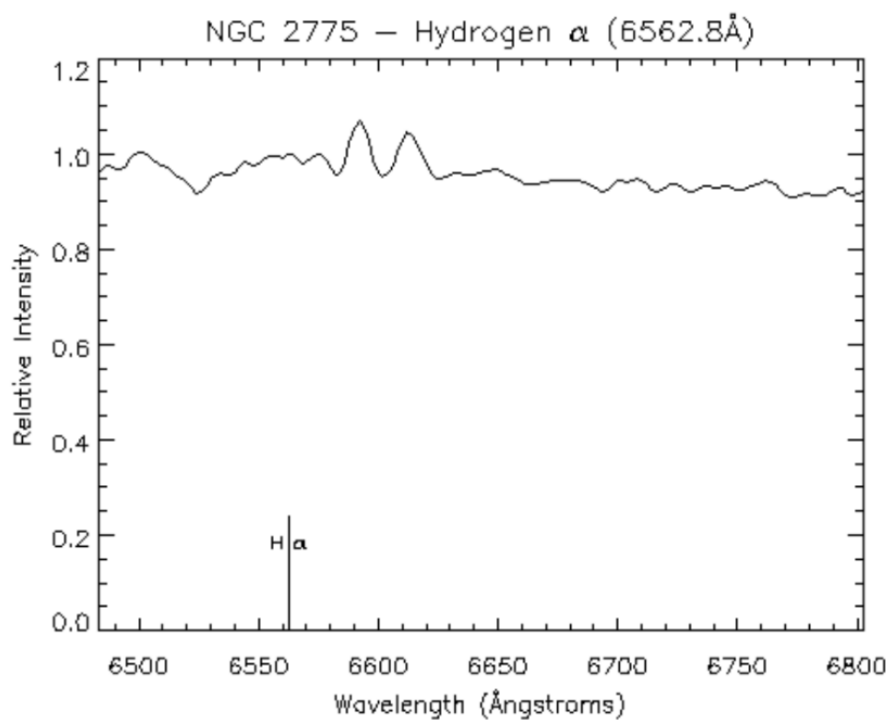


Figura B.8. Espectre NGC 2775 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

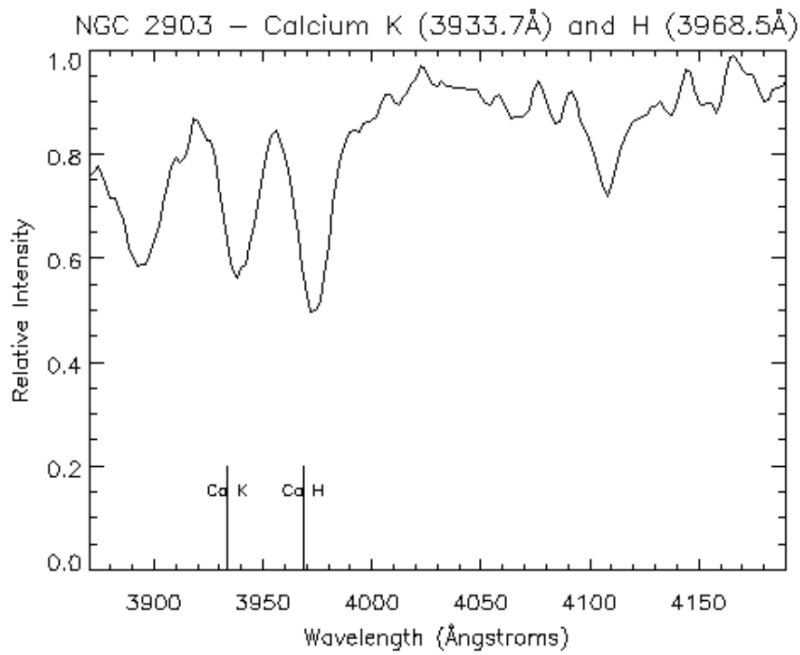


Figura B.9. Espectre NGC 2903 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

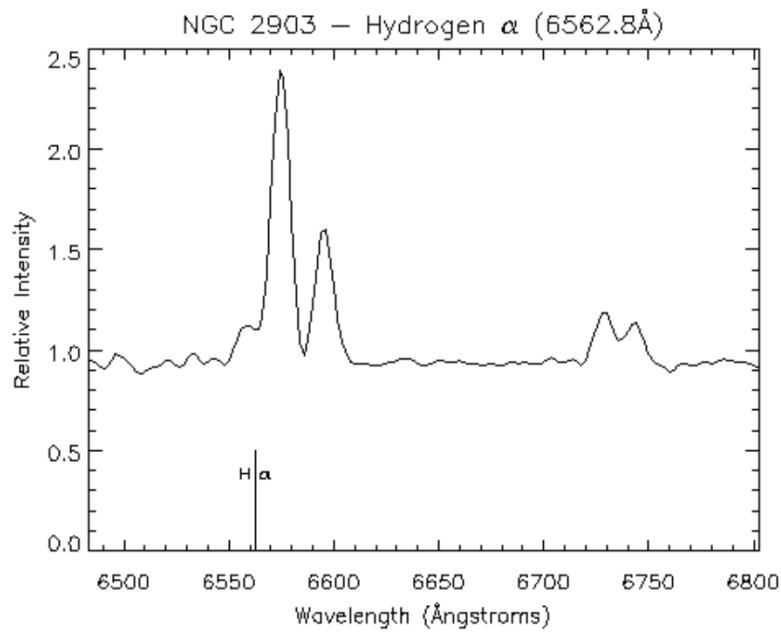


Figura B.10. Espectre NGC 2903 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

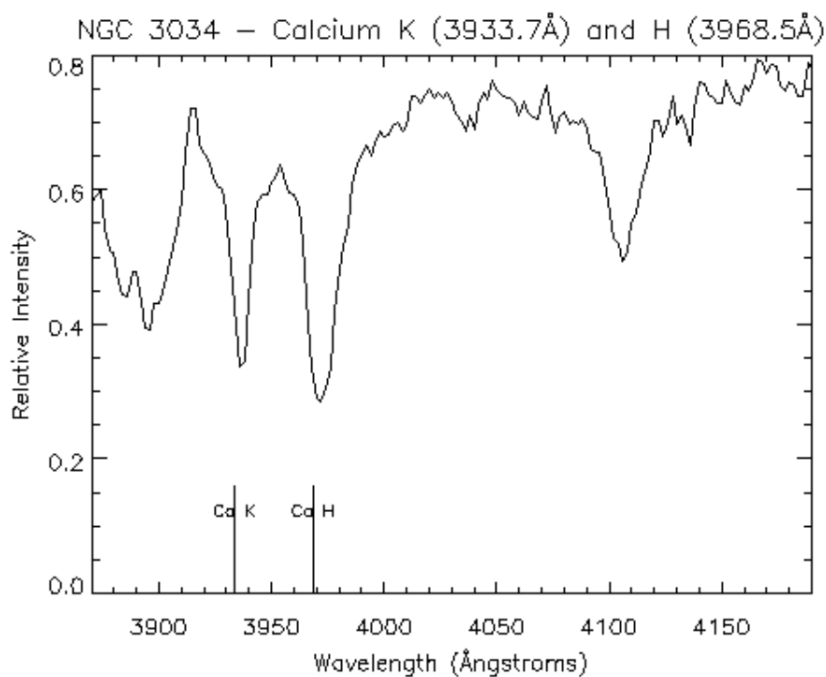


Figura B.11. Espectre NGC 3034 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

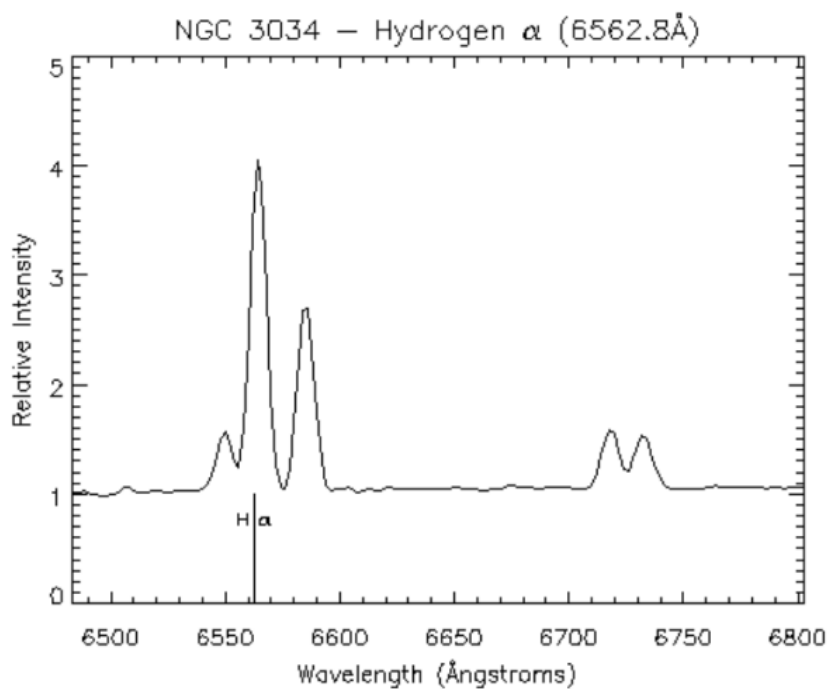


Figura B.12. Espectre NGC 3034 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

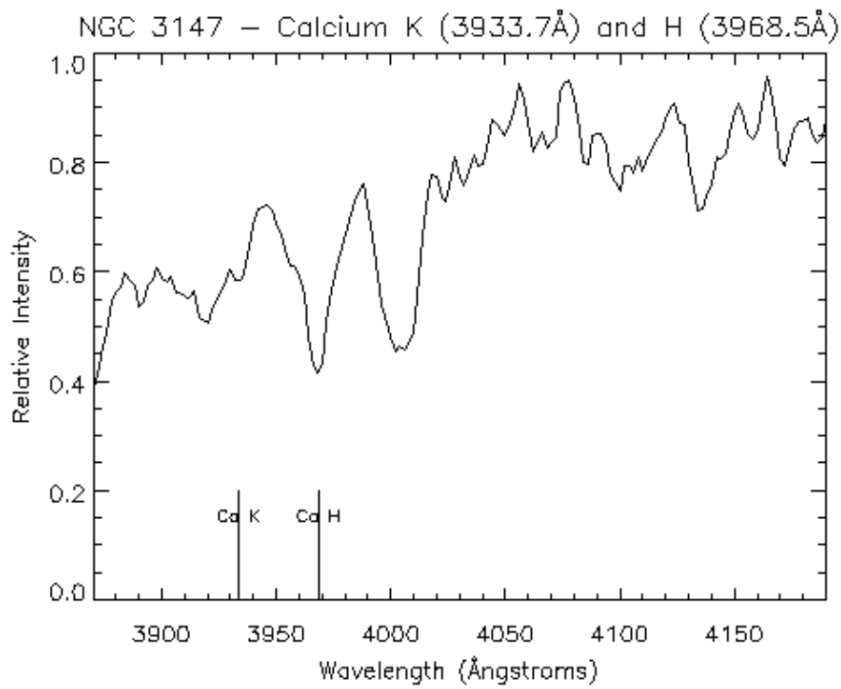


Figura B.13. Espectre NGC 3147 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

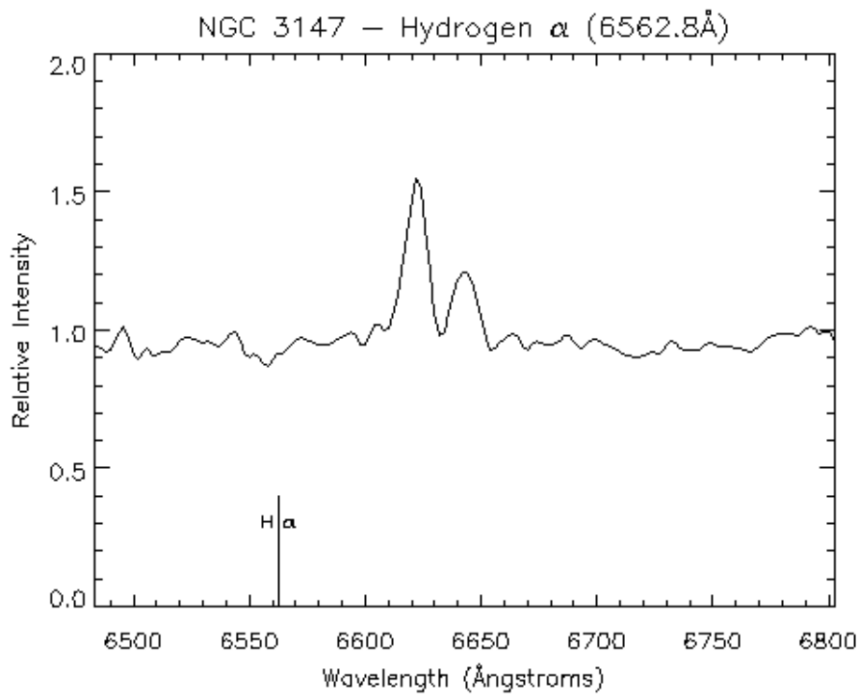


Figura B.14. Espectre NGC 3147 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

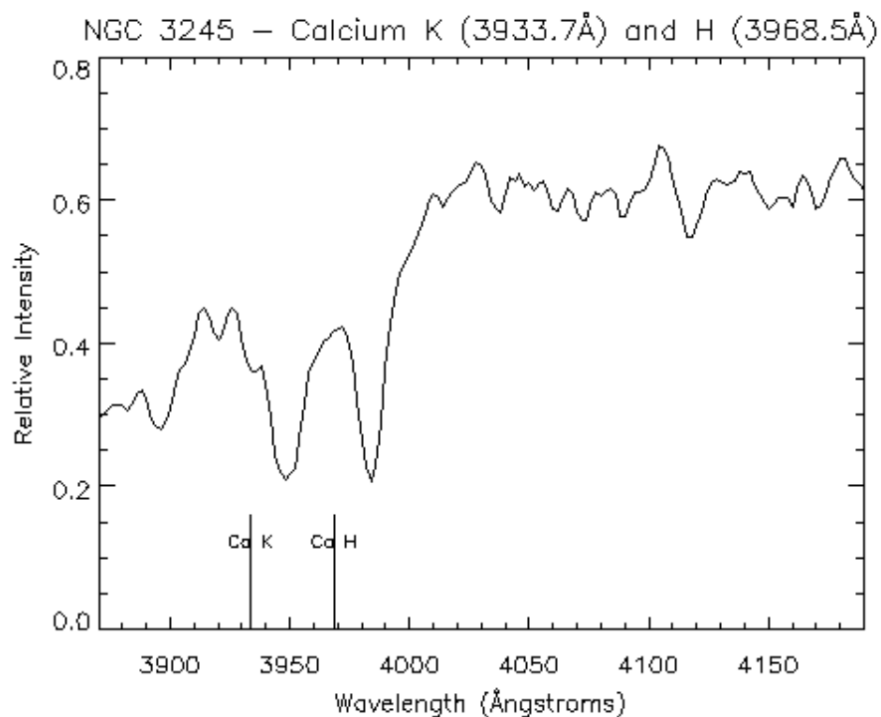


Figura B.15. Espectre NGC 3245 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

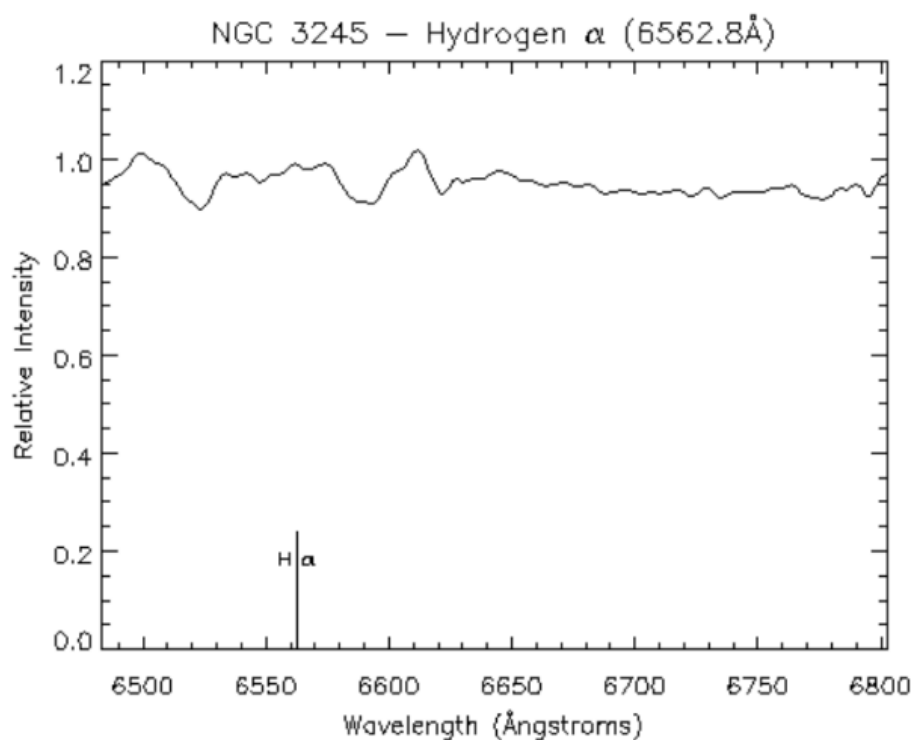


Figura B.16. Espectre NGC 3245 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

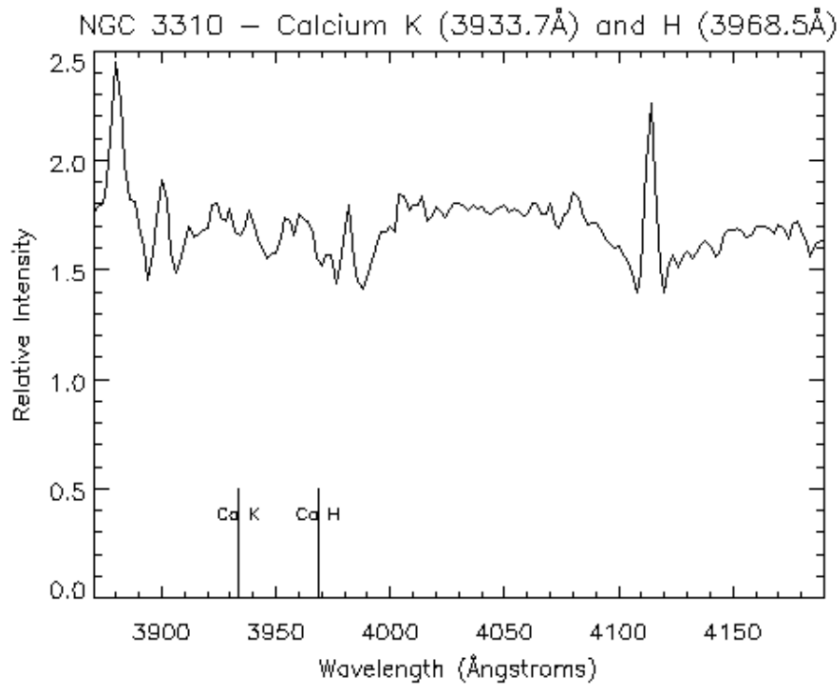


Figura B.17. Espectre NGC 3310 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

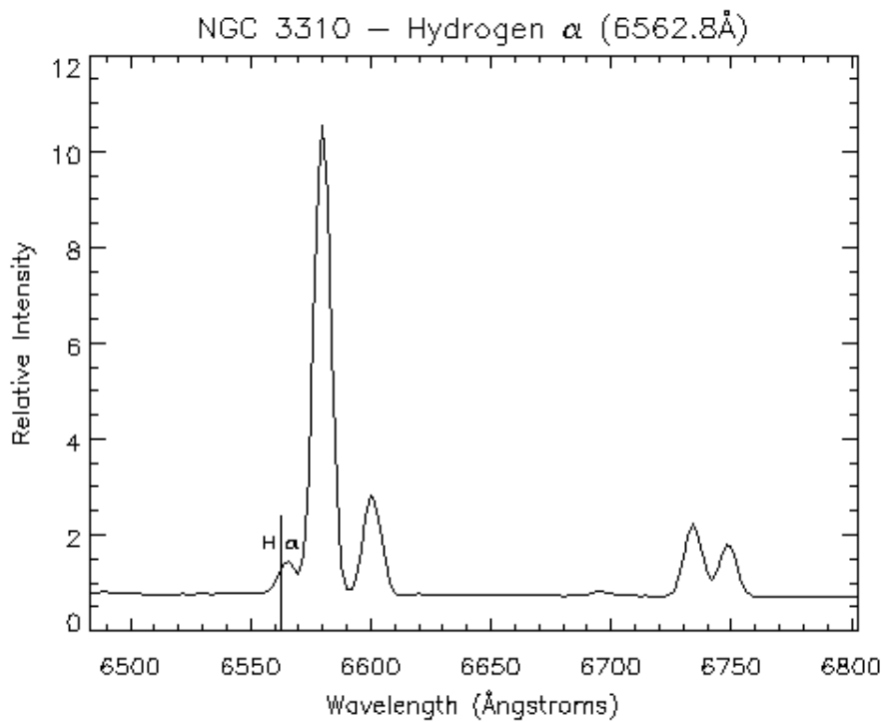


Figura B.18. Espectre NGC 3310 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

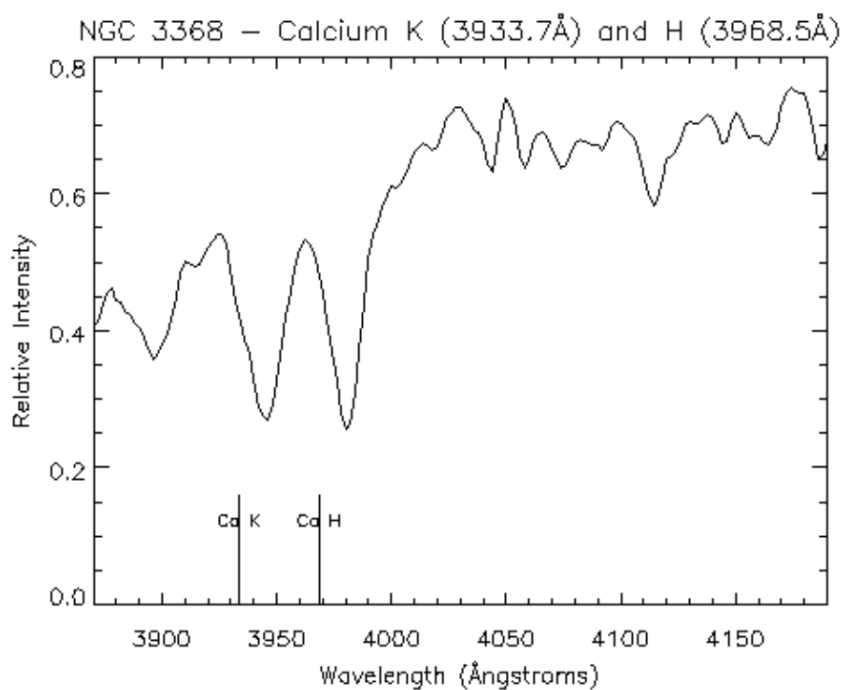


Figura B.19. Espectre NGC 3368 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

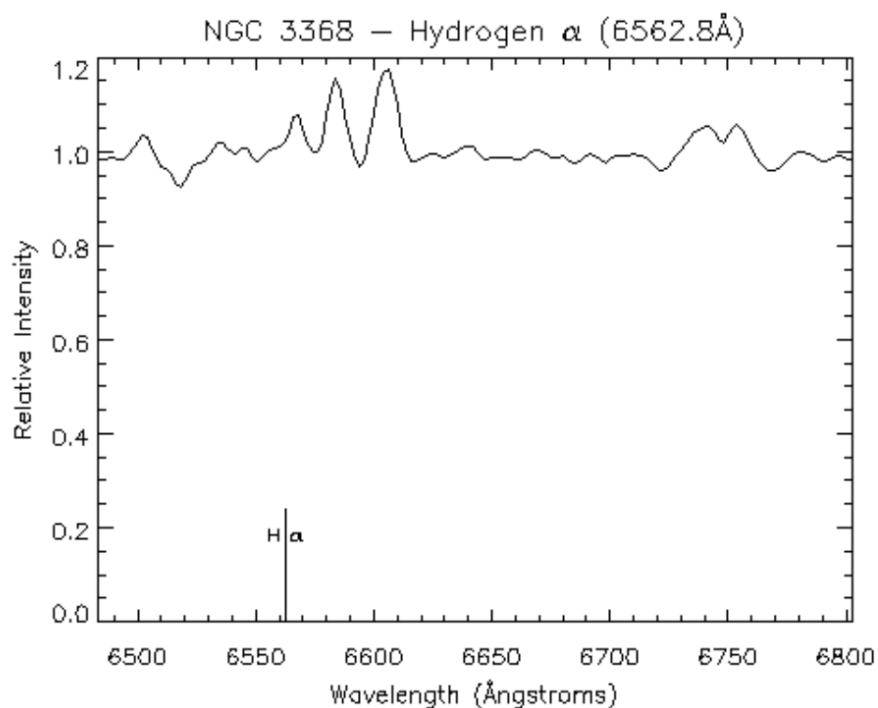


Figura B.20. Espectre NGC 3368 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

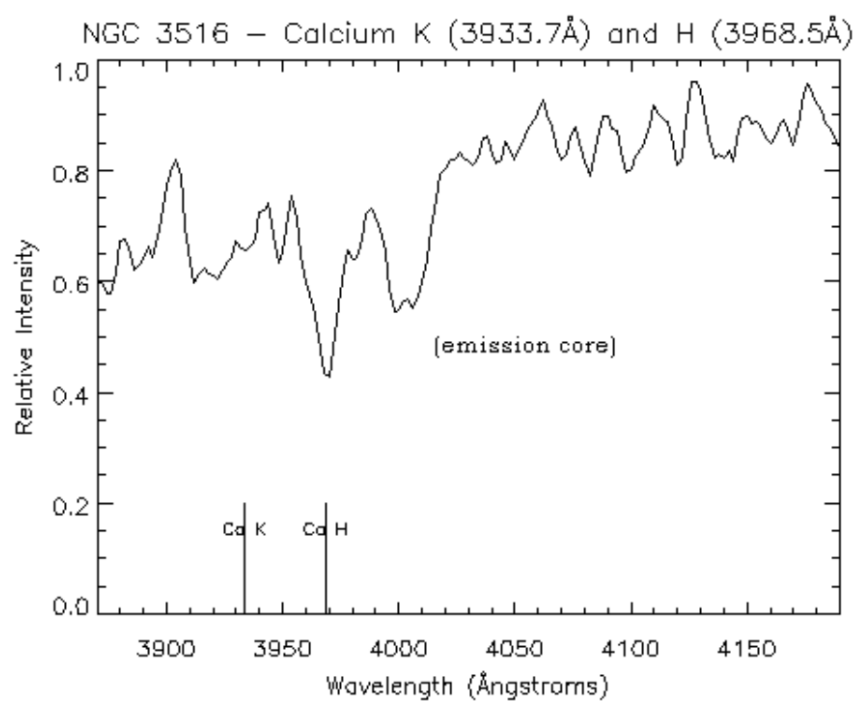


Figura B.21. Espectre NGC 3516 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

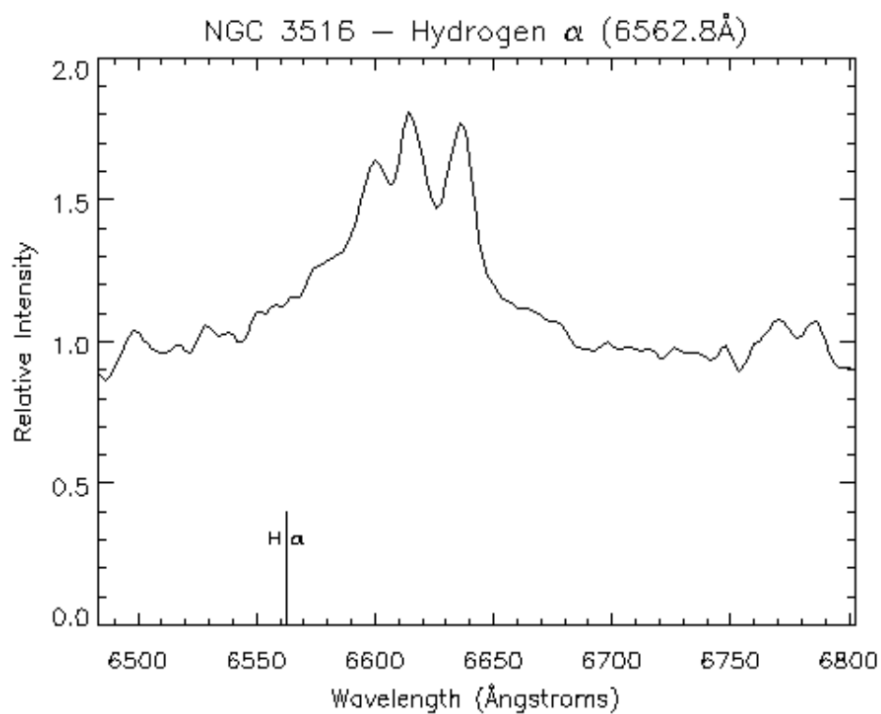


Figura B.22. Espectre NGC 3516 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

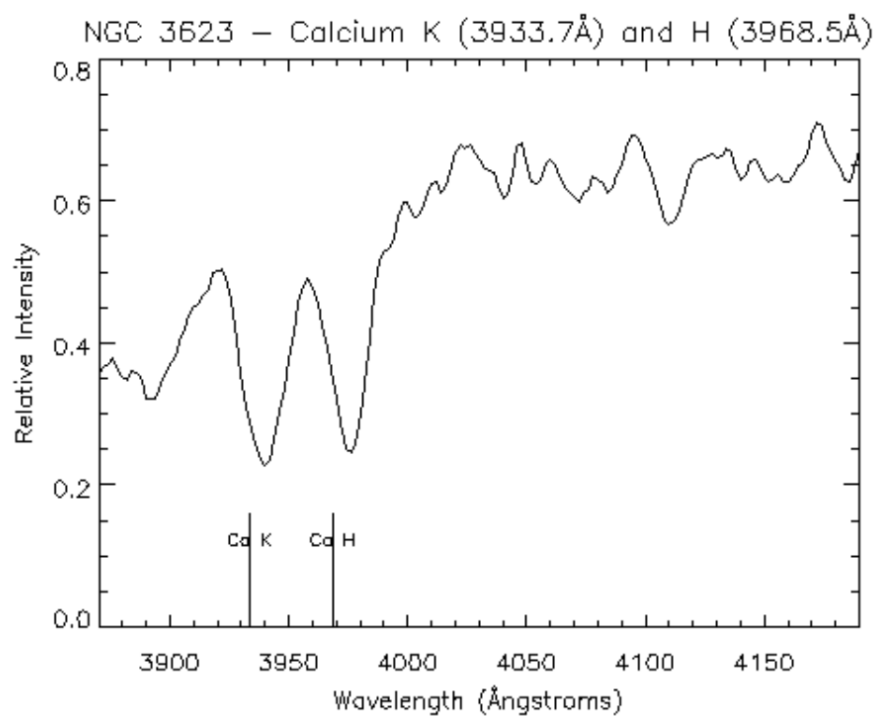


Figura B.23. Espectre NGC 3623 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

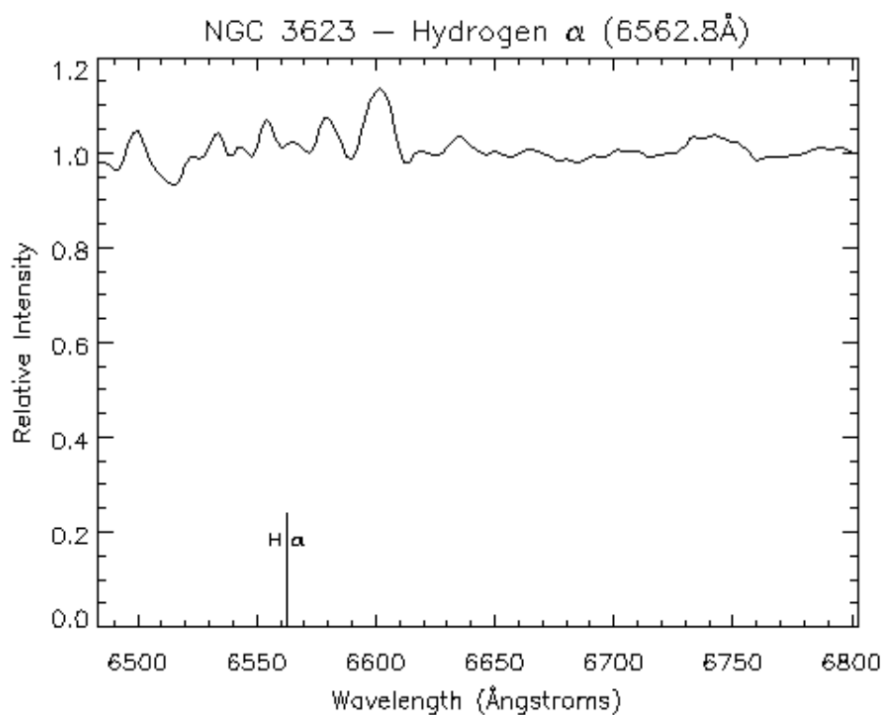


Figura B.24. Espectre NGC 3623 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

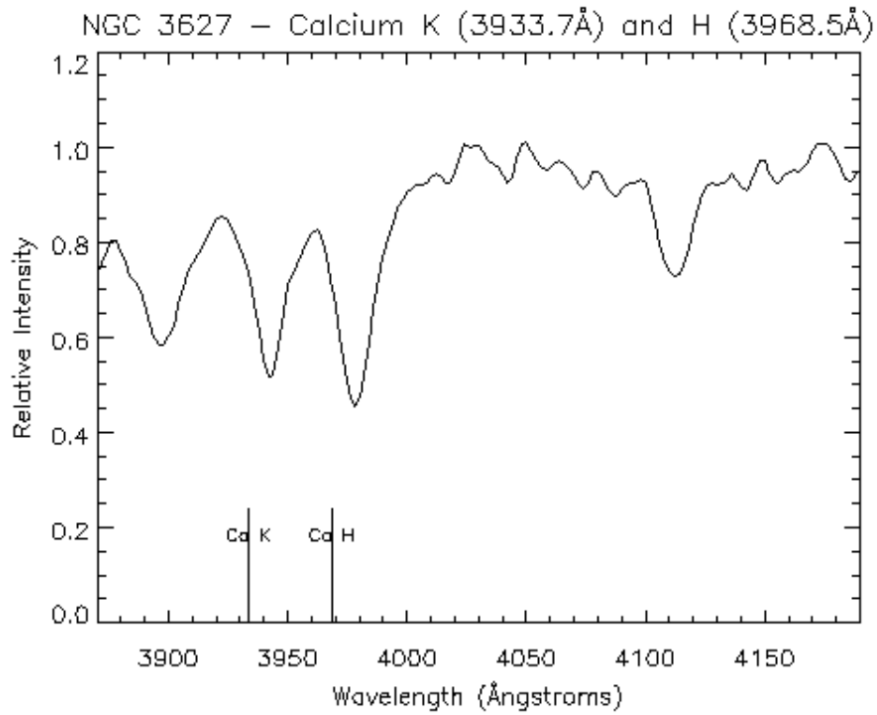


Figura B.25. Espectre NGC 3627 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

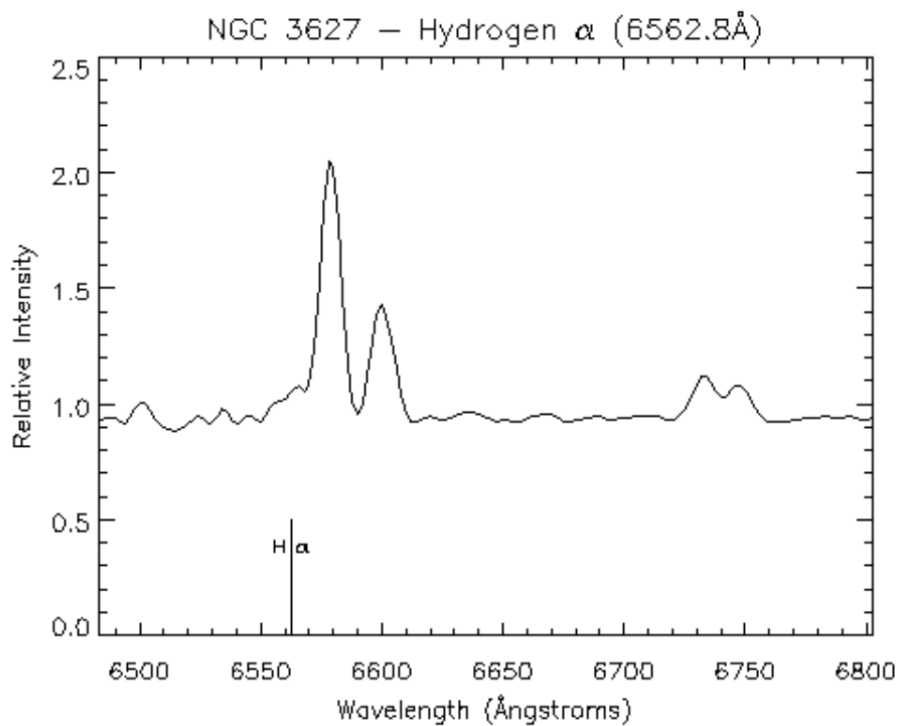


Figura B.26. Espectre NGC 3627 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

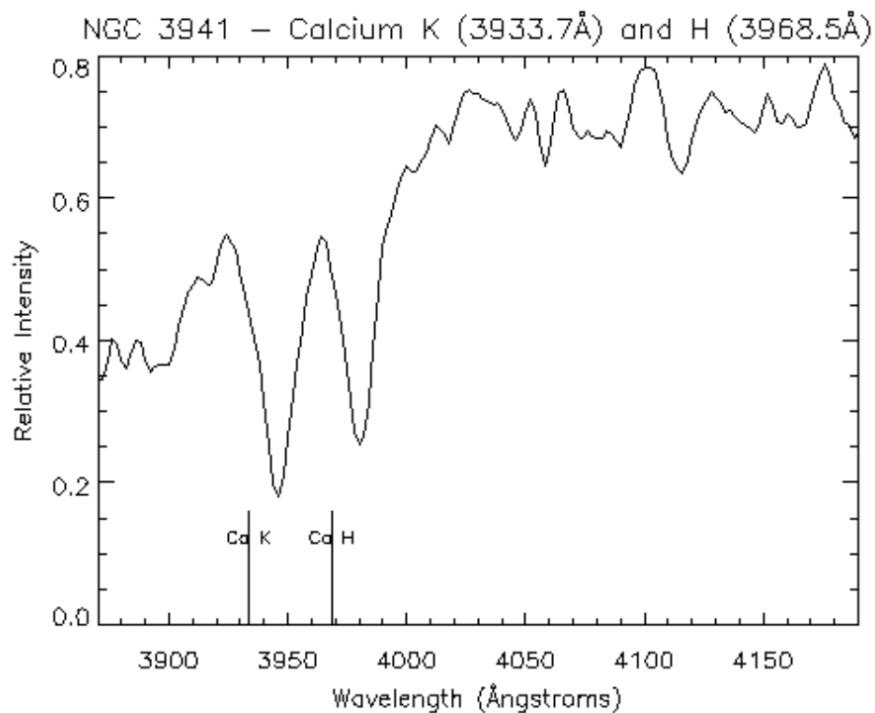


Figura B.27. Espectre NGC 3941 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

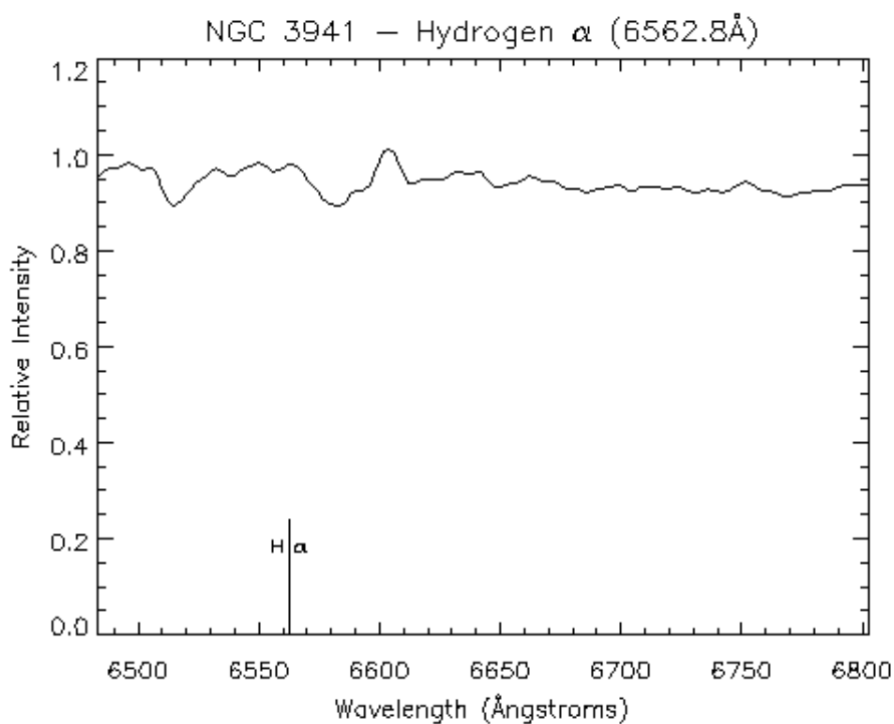


Figura B.28. Espectre NGC 3941 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

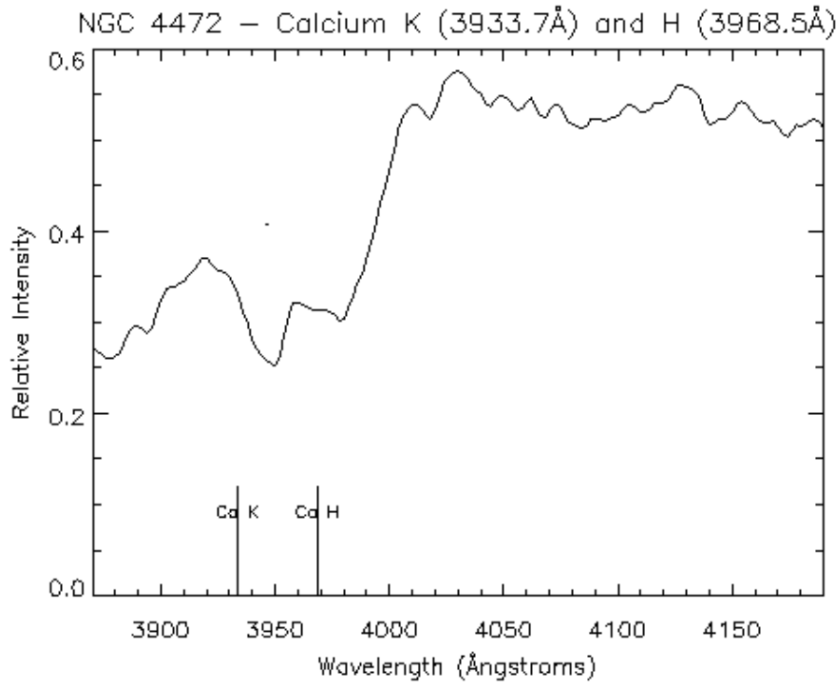


Figura B.29. Espectre NGC 4472 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

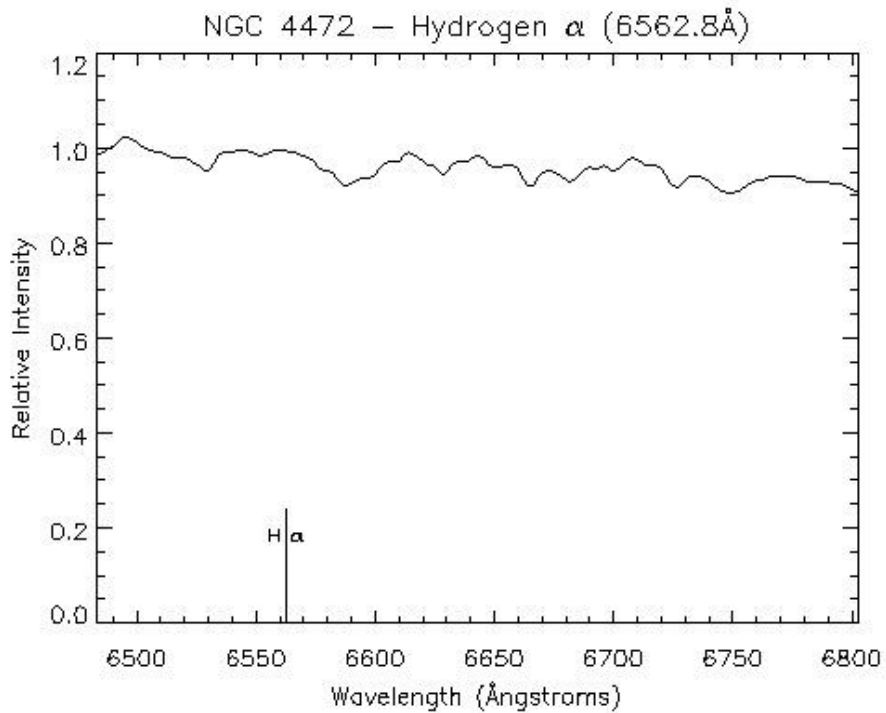


Figura B.30. Espectre NGC 4472 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

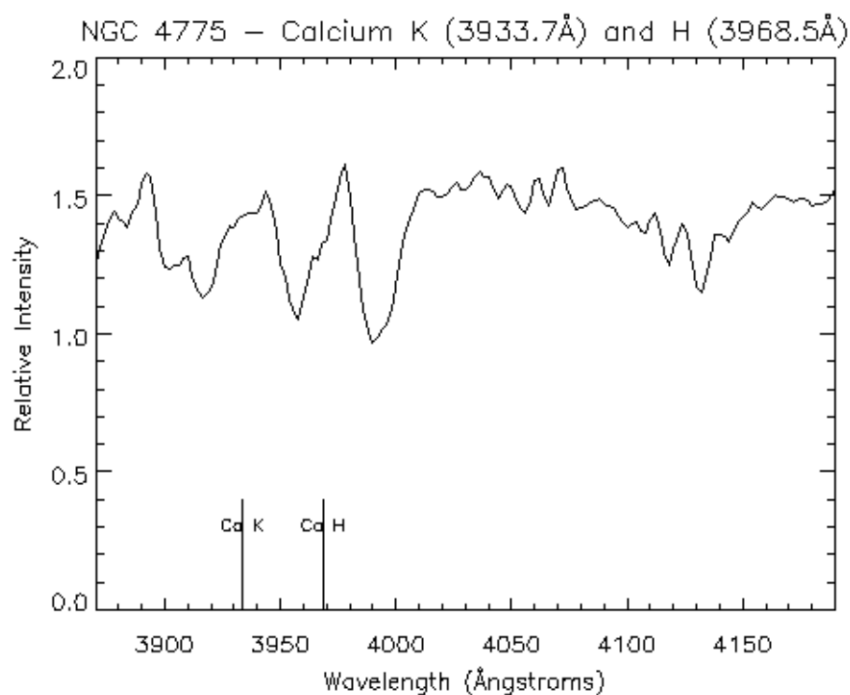


Figura B.31. Espectre NGC 4775 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

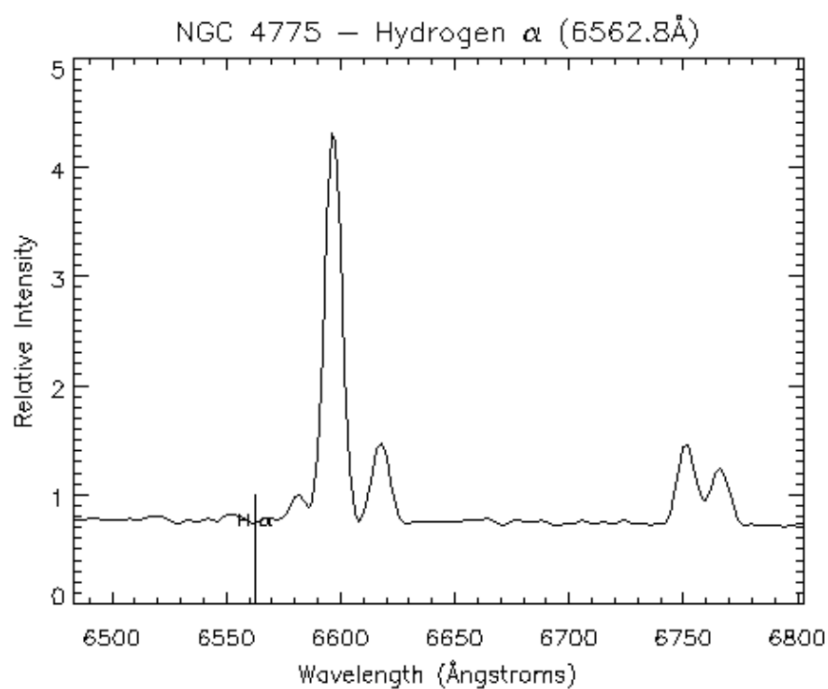


Figura B.32. Espectre NGC 4775 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

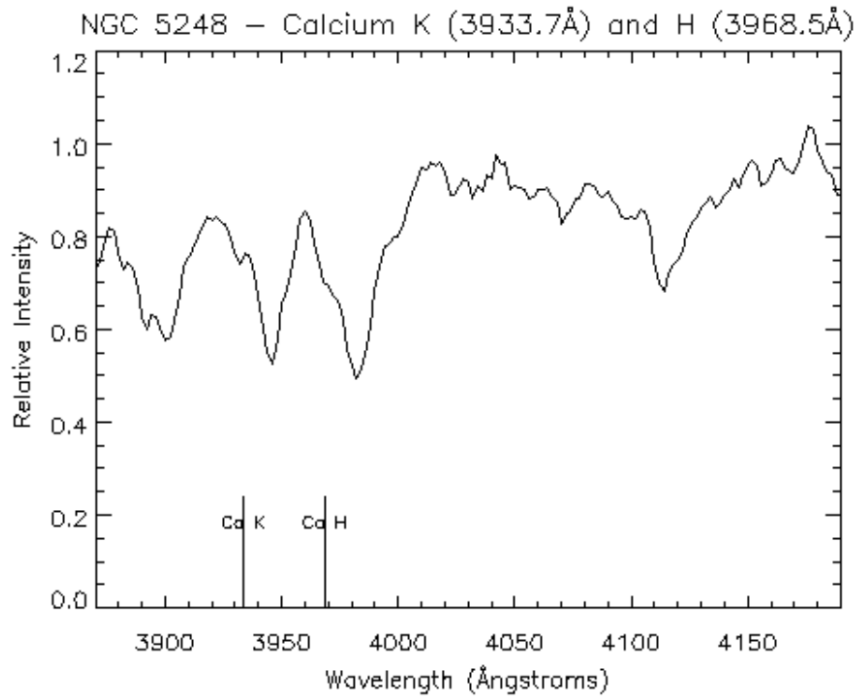


Figura B.33. Espectre NGC 5248 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

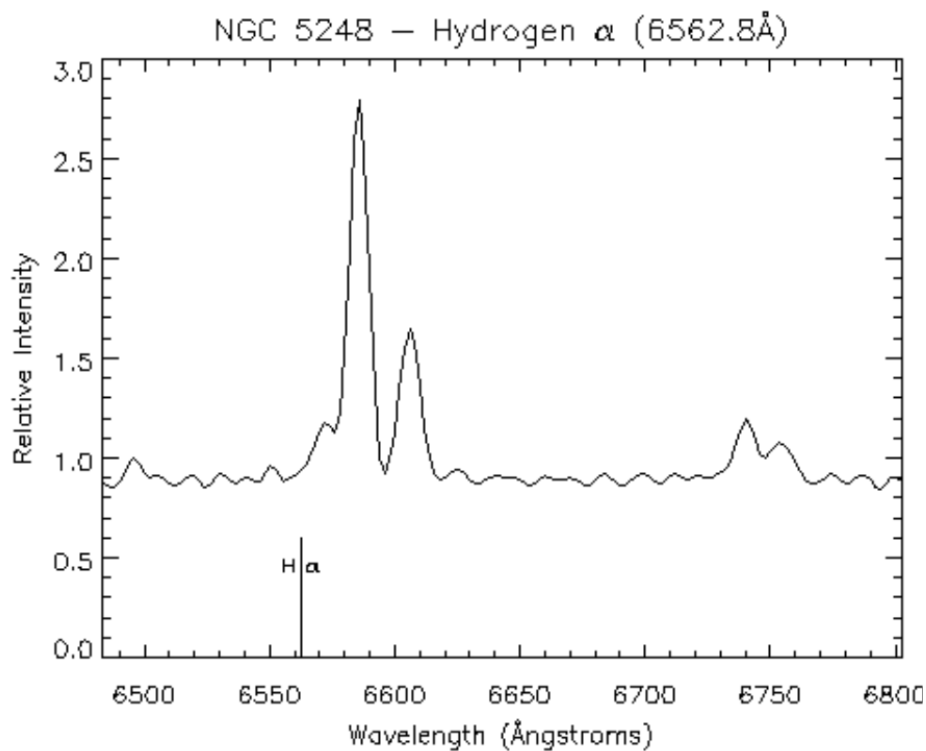


Figura B.34. Espectre NGC 5248 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

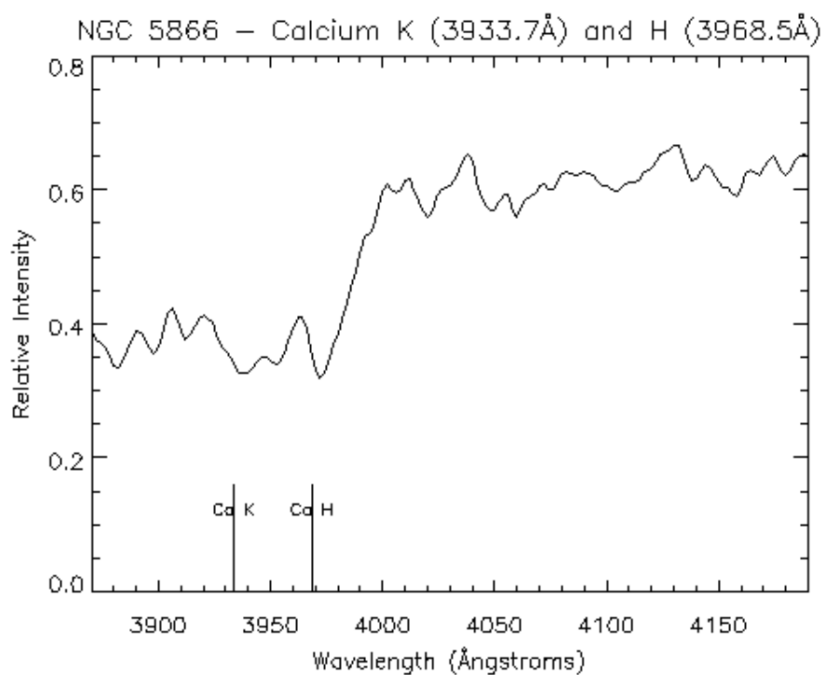


Figura B.35. Espectre NGC 5866 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

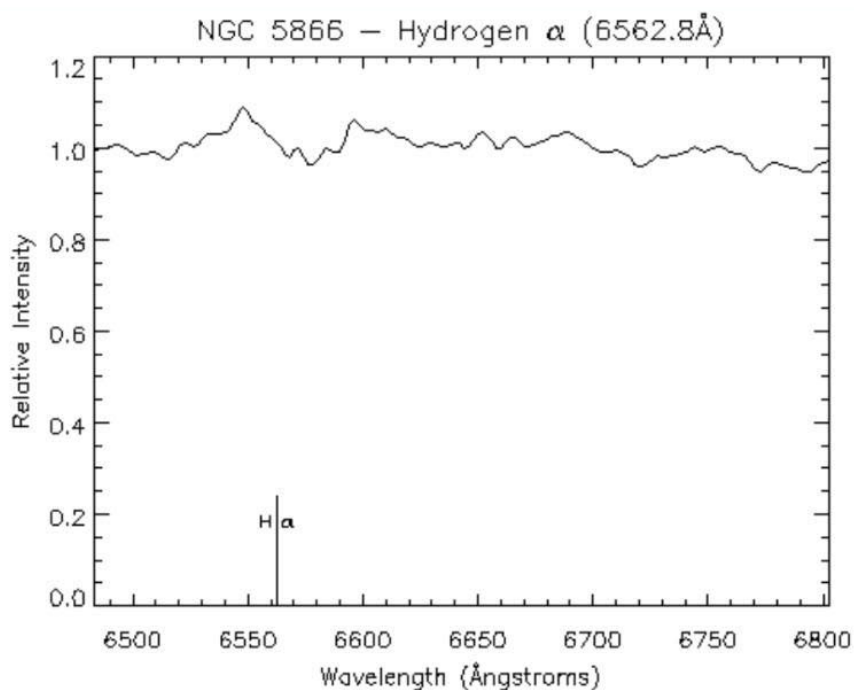


Figura B.36. Espectre NGC 5866 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

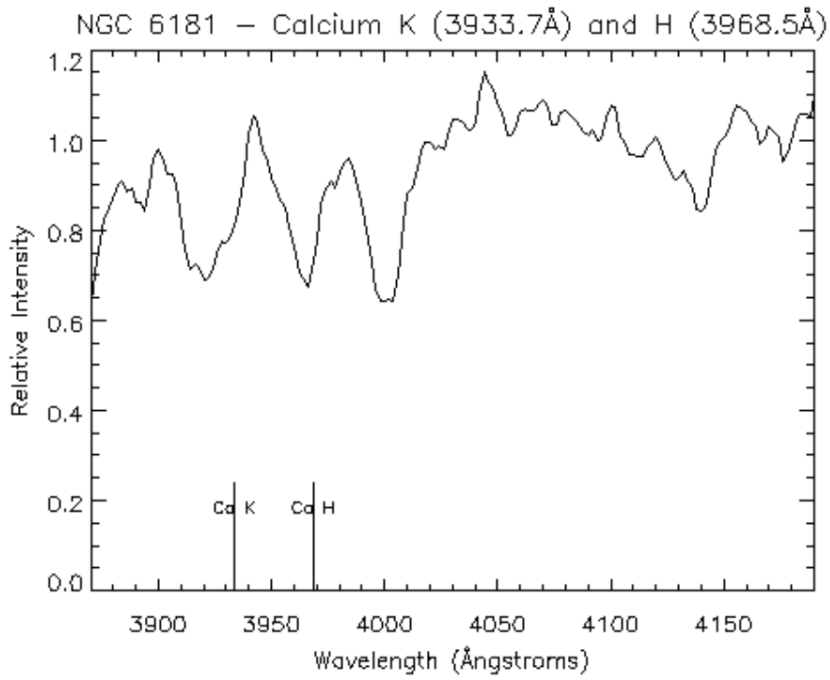


Figura B.37. Espectre NGC 6181 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

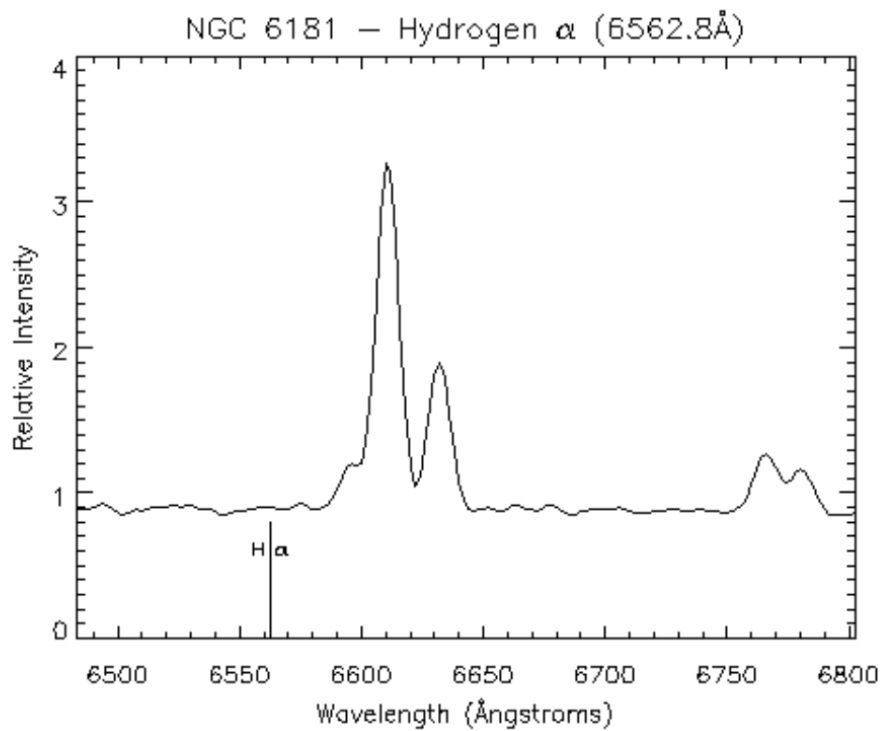


Figura B.38. Espectre NGC 6181 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

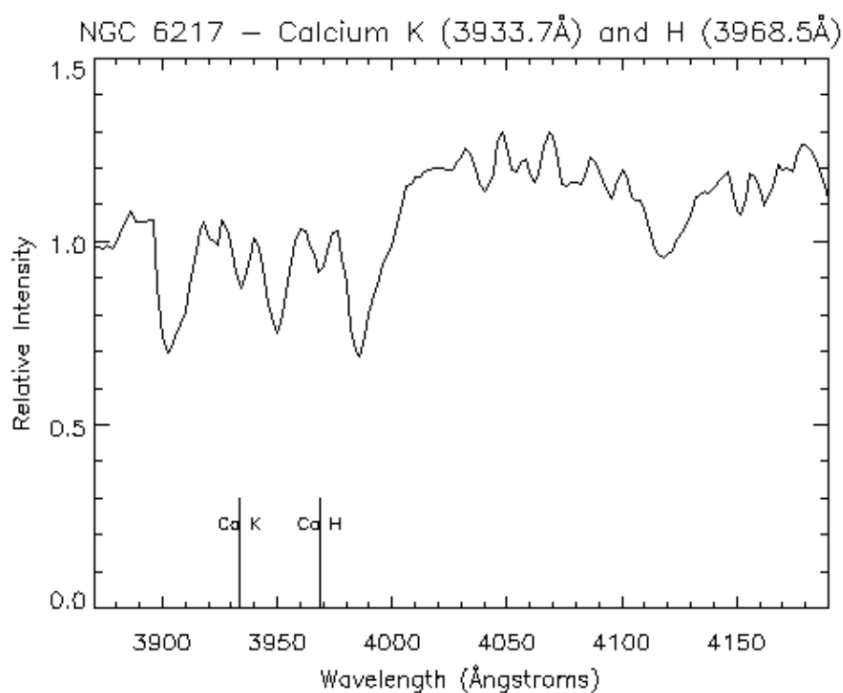


Figura B.39. Espectre NGC 6217 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

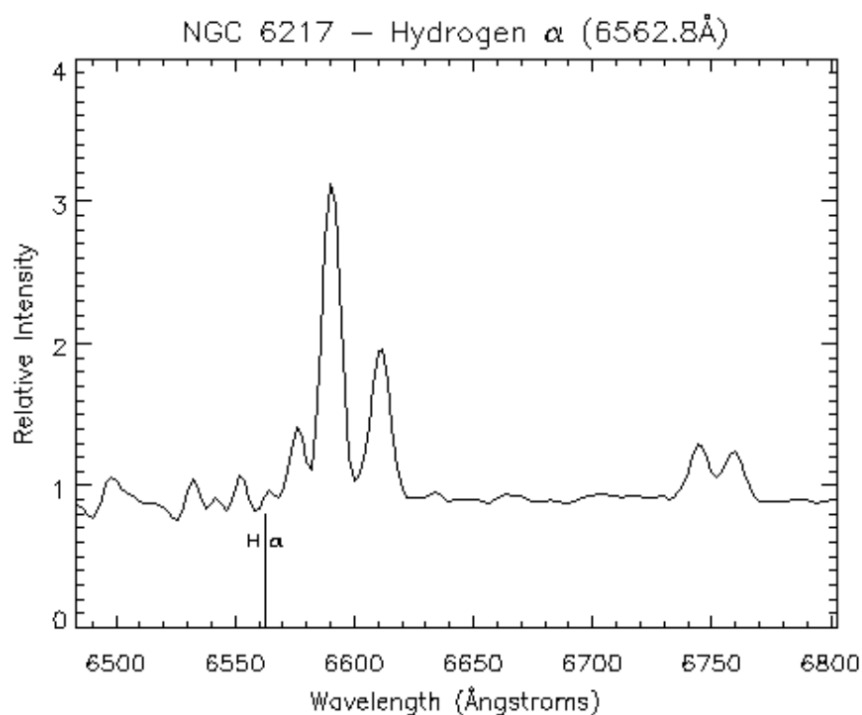


Figura B.40. Espectre NGC 6217 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

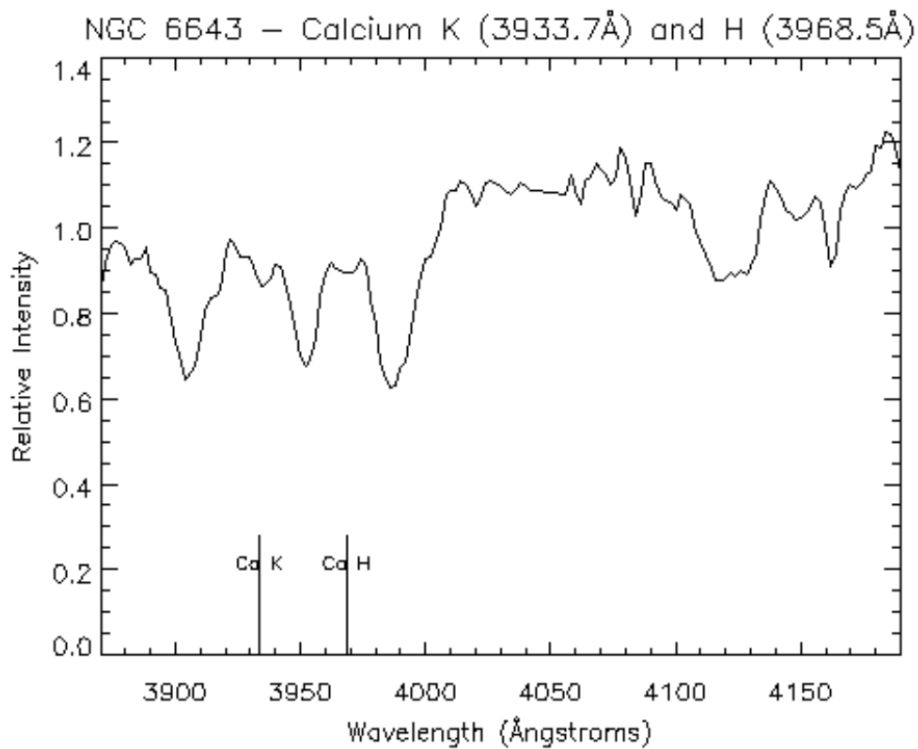


Figura B.41. Espectre NGC 6643 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

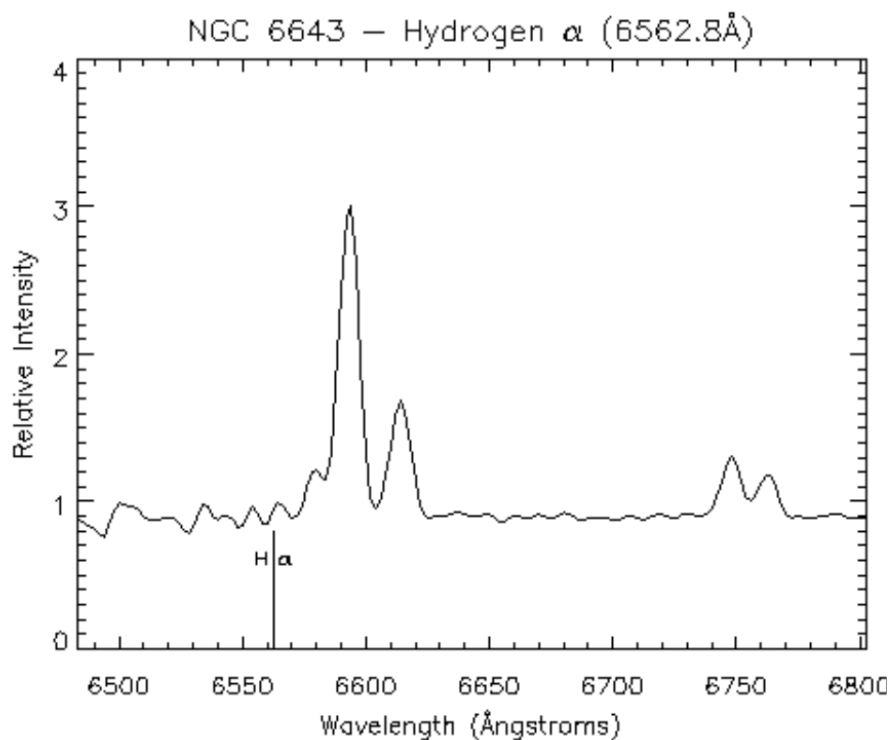


Figura B.42. Espectre NGC 6643 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

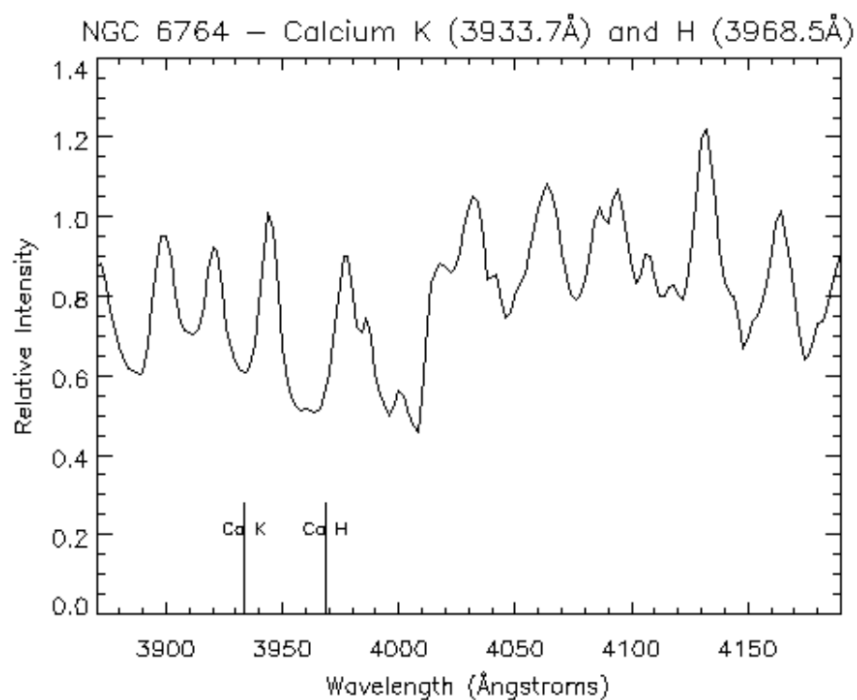


Figura B.43. Espectre NGC 6764 per les línies d'absorció Ca K i Ca H. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

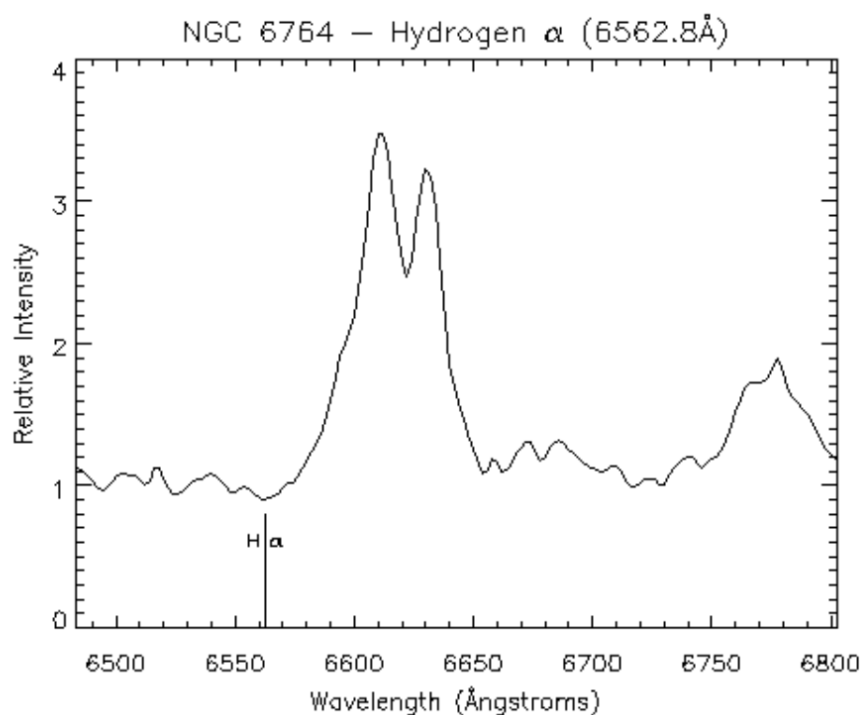


Figura B.44. Espectre NGC 6764 per la línia d'emissió H- α . (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).



Annex C: Determinació de la velocitat i el desplaçament de cada galàxia en els tres estudis realitzats

Taula C.1. Estudi 1 de la galàxia NGC 1357. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 1357	Galaxy spct	NGC 1357
X1	241	Ca K rest	3933,7
Y1	230	Ca H rest	3968,5
X2	309	H α	6562,8
Y2	299	Ca K meas.	3962
Angular size	0,9	Ca H meas.	3997,2
		H α meas.	6607,6
a	68	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	28,3
b	69	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	28,7
c en píxels	96,8762097	$\Delta\lambda$ H α angs.	44,8
c en μ rad	900,94875	z (Ca K)	0,00719424
		z (Ca H)	0,00723195
s (kpc)	22	z (H α)	0,00682635
		v (Ca K) km.s-1	2156,78027
a (mrad)	0,9	v (Ca H) km.s-1	2168,08455
		v (H α) km.s-1	2046,48963
d	24,4444444		

Taula C.2. Estudi 1 de la galàxia NGC 1832. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 1832	Galaxy spct	NGC 1832
X1	258	Ca K rest	3933,7
Y1	228	Ca H rest	3968,5
X2	298	H α	6562,8
Y2	308	Ca K meas.	3959,8
Angular size	0,831	Ca H meas.	3995,5
		H α meas.	6605,9
a	40	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	26,1
b	80	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	27
c en píxels	89,4427191	$\Delta\lambda$ H α angs.	43,1
c en μ rad	831,817288	z (Ca K)	0,00663497
		z (Ca H)	0,00680358
s (kpc)	22	z (H α)	0,00656732
a (mrad)	0,831	v (Ca K) km.s-1	1989,11538
d	26,4741276	v (Ca H) km.s-1	2039,66143
		v (H α) km.s-1	1968,83265

Taula C.3. Estudi 1 de la galàxia NGC 2276. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 2276	Galaxy spct	NGC 2276
X1	233	Ca K rest	3933,7
Y1	223	Ca H rest	3968,5
X2	279	H α	6562,8
Y2	289	Ca K meas.	3964
Angular size	0,748	Ca H meas.	3997
		H α meas.	6615,2
a	46	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	30,3
b	66	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	28,5
c en píxels	80,4487414	$\Delta\lambda$ H α angs.	52,4
c en μ rad	748,173295	z (Ca K)	0,00770267
		z (Ca H)	0,00718155
s (kpc)	22	z (H α)	0,0079844
a (mrad)	0,748	v (Ca K) km.s ⁻¹	2309,20291
d	29,4117647	v (Ca H) km.s ⁻¹	2152,97595
		v (H α) km.s ⁻¹	2393,66197

Taula C.4. Estudi 1 de la galàxia NGC 2775. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>)

Galaxy img	NGC 2775	Galaxy spct	NGC 2775
X1	248	Ca K rest	3933,7
Y1	214	Ca H rest	3968,5
X2	292	H α	6562,8
Y2	312	Ca K meas.	3954,4
Angular size	0,999	Ca H meas.	3988,5
		H α meas.	6594
a	44	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	20,7
b	98	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	20
c en píxels	107,424392	$\Delta\lambda$ H α angs.	31,2
c en μ rad	999,046846	z (Ca K)	0,00526222
		z (Ca H)	0,00503969
s (kpc)	22	z (H α)	0,00475407
a (mrad)	0,999	v (Ca K) km.s ⁻¹	1577,57426
d	22,022022	v (Ca H) km.s ⁻¹	1510,86031
		v (H α) km.s ⁻¹	1425,23385

Taula C.5. Estudi 1 de la galàxia NGC 2903. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 2903	Galaxy spct	NGC 2903
X1	177	Ca K rest	3933,7
Y1	94	Ca H rest	3968,5
X2	345	H α	6562,8
Y2	386	Ca K meas.	3938,1
Angular size	3,132	Ca H meas.	3971,5
		H α meas.	6573,2
a	168	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	4,4
b	292	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	3
c en píxels	336,879801	$\Delta\lambda$ H α angs.	10,4
c en μ rad	3132,98214	z (Ca K)	0,00111854
		z (Ca H)	0,00075595
s (kpc)	22	z (H α)	0,00158469
a (mrad)	3,132	v (Ca K) km.s ⁻¹	335,329795
d	7,02426564	v (Ca H) km.s ⁻¹	226,629047
		v (H α) km.s ⁻¹	475,077949

Taula C.6. Estudi 1 de la galàxia NGC 3034. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3034	Galaxy spct	NGC 3034
X1	126	Ca K rest	3933,7
Y1	192	Ca H rest	3968,5
X2	390	H α	6562,8
Y2	316	Ca K meas.	3936,6
Angular size	2,712	Ca H meas.	3971,5
		H α meas.	6564,1
a	264	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	2,9
b	124	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	3
c en píxels	291,671048	$\Delta\lambda$ H α angs.	1,3
c en μ rad	2712,54074	z (Ca K)	0,00073722
		z (Ca H)	0,00075595
s (kpc)	22	z (H α)	0,00019809
a (mrad)	2,712	v (Ca K) km.s-1	221,01282
d	8,1120944	v (Ca H) km.s-1	226,629047
		v (H α) km.s-1	59,3847436

Taula C.7. Estudi 1 de la galàxia NGC 3147. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3147	Galaxy spct	NGC 3147
X1	232	Ca K rest	3933,7
Y1	220	Ca H rest	3968,5
X2	301	H α	6562,8
Y2	300	Ca K meas.	3967,6
Angular size	0,982	Ca H meas.	4001,7
		H α meas.	6620,6
a	69	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	33,9
b	80	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	33,2
c en píxels	105,645634	$\Delta\lambda$ H α angs.	57,8
c en μ rad	982,504397	z (Ca K)	0,00861784
		z (Ca H)	0,00836588
		z (H α)	0,00880722
s (kpc)	22	v (Ca K) km.s-1	2583,56365
a (mrad)	0,982	v (Ca H) km.s-1	2508,02812
d	22,4032587	v (H α) km.s-1	2640,33706

Taula C.8. Estudi 1 de la galàxia NGC 3245. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3245	Galaxy spct	NGC 3245
X1	264	Ca K rest	3933,7
Y1	224	Ca H rest	3968,5
X2	263	H α	6562,8
Y2	300	Ca K meas.	3949
Angular size	0,706	Ca H meas.	3984,6
		H α meas.	6575,7
a	-1	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	15,3
b	76	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	16,1
c en píxels	76,0065787	$\Delta\lambda$ H α angs.	12,9
c en μ rad	706,861182	z (Ca K)	0,00388947
		z (Ca H)	0,00405695
s (kpc)	22	z (H α)	0,00196562
a (mrad)	0,706	v (Ca K) km.s-1	1166,03315
d	31,1614731	v (Ca H) km.s-1	1216,24255
		v (H α) km.s-1	589,279379

Taula C.9. Estudi 1 de la galàxia NGC 3310. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3310	Galaxy spct	NGC 3310
X1	265	Ca K rest	3933,7
Y1	221	Ca H rest	3968,5
X2	294	H α	6562,8
Y2	317	Ca K meas.	3938,1
Angular size	0,932	Ca H meas.	3987,7
		H α meas.	6579,6
a	29	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	4,4
b	96	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	19,2
c en píxels	100,284595	$\Delta\lambda$ H α angs.	16,8
c en μ rad	932,646734	z (Ca K)	0,00111854
		z (Ca H)	0,0048381
s (kpc)	22	z (H α)	0,00255988
a (mrad)	0,932	v (Ca K) km.s-1	3231,35984
d	23,6051502	v (Ca H) km.s-1	1450,4259
		v (H α) km.s-1	767,43361

Taula C.10. Estudi 1 de la galàxia NGC 3368. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3368	Galaxy spct	NGC 3368
X1	221	Ca K rest	3933,7
Y1	162	Ca H rest	3968,5
X2	307	H α	6562,8
Y2	352	Ca K meas.	3946,7
Angular size	1,939	Ca H meas.	3980
		H α meas.	6568
a	86	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	13
b	190	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	11,5
c en píxels	208,556947	$\Delta\lambda$ H α angs.	5,2
c en μ rad	1939,5796	z (Ca K)	0,00330478
		z (Ca H)	0,00289782
s (kpc)	22	z (H α)	0,00079234
a (mrad)	1,939	v (Ca K) km.s-1	990,747122
d	11,3460547	v (Ca H) km.s-1	868,744681
		v (H α) km.s-1	237,538974

Taula C.11. Estudi 1 de la galàxia NGC 3516. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3516	Galaxy spct	NGC 3516
X1	247	Ca K rest	3933,7
Y1	233	Ca H rest	3968,5
X2	285	H α	6562,8
Y2	286	Ca K meas.	3970,7
Angular size	0,606	Ca H meas.	3997,8
		H α meas.	6598,9
a	38	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	37
b	53	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	29,3
c en píxels	65,2150289	$\Delta\lambda$ H α angs.	36,1
c en μ rad	606,499769	z (Ca K)	0,0094059
		z (Ca H)	0,00738314
s (kpc)	22	z (H α)	0,0055007
a (mrad)	0,606	v (Ca K) km.s-1	2819,81873
d	36,3036304	v (Ca H) km.s-1	2213,41036
		v (H α) km.s-1	1649,06865

Taula C.12. Estudi 1 de la galàxia NGC 3623. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3623	Galaxy spct	NGC 3623
X1	264	Ca K rest	3933,7
Y1	113	Ca H rest	3968,5
X2	240	H α	6562,8
Y2	409	Ca K meas.	3939,7
Angular size	2,761	Ca H meas.	3976,1
		H α meas.	6578,8
a	-24	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	6
b	296	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	7,6
c en píxels	296,971379	$\Delta\lambda$ H α angs.	16
c en μ rad	2761,83383	z (Ca K)	0,00152528
		z (Ca H)	0,00191508
s (kpc)	22	z (H α)	0,00243798
a (mrad)	2,761	v (Ca K) km.s-1	457,267902
d	7,96812749	v (Ca H) km.s-1	574,12692
		v (H α) km.s-1	730,889152

Taula C.13. Estudi 1 de la galàxia NGC 3627. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3627	Galaxy spct	NGC 3627
X1	304	Ca K rest	3933,7
Y1	148	Ca H rest	3968,5
X2	219	H α	6562,8
Y2	386	Ca K meas.	3942,8
Angular size	2,35	Ca H meas.	3977,6
		H α meas.	6578
a	-85	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	9,1
b	238	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	9,1
c en píxels	252,723169	$\Delta\lambda$ H α angs.	15,2
c en μ rad	2350,32547	z (Ca K)	0,00231334
		z (Ca H)	0,00229306
s (kpc)	22	z (H α)	0,00231608
a (mrad)	2,35	v (Ca K) km.s ⁻¹	693,522985
d	9,36170213	v (Ca H) km.s ⁻¹	687,441443
		v (H α) km.s ⁻¹	694,344695

Taula C.14. Estudi 1 de la galàxia NGC 3941. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3941	Galaxy spct	NGC 3941
X1	243	Ca K rest	3933,7
Y1	214	Ca H rest	3968,5
X2	283	H α	6562,8
Y2	307	Ca K meas.	3945,9
Angular size	0,941	Ca H meas.	3980
		H α meas.	6584,1
a	40	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	12,2
b	93	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	11,5
c en píxels	101,237345	$\Delta\lambda$ H α angs.	21,3
c en μ rad	941,507307	z (Ca K)	0,00310141
		z (Ca H)	0,00289782
s (kpc)	22	z (H α)	0,00324557
a (mrad)	0,941	v (Ca K) km.s-1	929,778068
d	23,3793836	v (Ca H) km.s-1	868,744681
		v (H α) km.s-1	972,996184

Taula C.15. Estudi 1 de la galàxia NGC 4472. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 4472	Galaxy spct	NGC 4472
X1	234	Ca K rest	3933,7
Y1	180	Ca H rest	3968,5
X2	294	H α	6562,8
Y2	324	Ca K meas.	3949,8
Angular size	1,45	Ca H meas.	3978,4
		H α meas.	6581,9
a	60	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	16,1
b	144	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	9,9
c en píxels	156	$\Delta\lambda$ H α angs.	19,1
c en μ rad	1450,8	z (Ca K)	0,00409284
		z (Ca H)	0,00249465
s (kpc)	22	z (H α)	0,00291034
a (mrad)	1,45	v (Ca K) km.s ⁻¹	1227,0022
d	15,1724138	v (Ca H) km.s ⁻¹	747,875856
		v (H α) km.s ⁻¹	872,498925

Taula C.16. Estudi 1 de la galàxia NGC 4475. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 4775	Galaxy spct	NGC 4775
X1	245	Ca K rest	3933,7
Y1	275	Ca H rest	3968,5
X2	298	H α	6562,8
Y2	229	Ca K meas.	3957,5
Angular size	0,652	Ca H meas.	3989,3
		H α meas.	6595,8
a	53	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	23,8
b	-46	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	20,8
c en píxels	70,1783442	$\Delta\lambda$ H α angs.	33
c en μ rad	652,658601	z (Ca K)	0,00605028
		z (Ca H)	0,00524128
s (kpc)	22	z (H α)	0,00502834
a (mrad)	0,652	v (Ca K) km.s-1	1813,82935
d	33,7423313	v (Ca H) km.s-1	1571,29473
		v (H α) km.s-1	1507,45888

Taula C.17. Estudi 1 de la galàxia NGC 5248. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 5248	Galaxy spct	NGC 5248
X1	217	Ca K rest	3933,7
Y1	336	Ca H rest	3968,5
X2	319	H α	6562,8
Y2	189	Ca K meas.	3945,9
Angular size	1,663	Ca H meas.	3981,5
		H α meas.	6585
a	102	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	12,2
b	-147	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	13
c en píxels	178,921771	$\Delta\lambda$ H α angs.	22,2
c en μ rad	1663,97247	z (Ca K)	0,00310141
		z (Ca H)	0,0032758
s (kpc)	22	z (H α)	0,0033827
a (mrad)	1,663	v (Ca K) km.s-1	929,778068
d	13,229104	v (Ca H) km.s-1	982,059205
		v (H α) km.s-1	1014,1087

Taula C.18. Estudi 1 de la galàxia NGC 5866. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 5866	Galaxy spct	NGC 5866
X1	203	Ca K rest	3933,7
Y1	314	Ca H rest	3968,5
X2	333	H α	6562,8
Y2	203	Ca K meas.	3938,1
Angular size	1,589	Ca H meas.	3972,2
		H α meas.	6571,1
a	130	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	4,4
b	-111	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	3,7
c en píxels	170,94151	$\Delta\lambda$ H α angs.	8,3
c en μ rad	1589,75605	z (Ca K)	0,00111854
		z (Ca H)	0,00093234
s (kpc)	22	z (H α)	0,0012647
a (mrad)	1,589	v (Ca K) km.s-1	335,329795
d	13,8451857	v (Ca H) km.s-1	279,509158
		v (H α) km.s-1	379,148748

Taula C.19. Estudi 1 de la galàxia NGC 6181. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6181	Galaxy spct	NGC 6181
X1	270	Ca K rest	3933,7
Y1	295	Ca H rest	3968,5
X2	260	H α	6562,8
Y2	226	Ca K meas.	3941,2
Angular size	0,648	Ca H meas.	3983,8
		H α meas.	6609
a	-10	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	7,5
b	-69	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	15,3
c en píxels	69,7208721	$\Delta\lambda$ H α angs.	46,2
c en μ rad	648,40411	z (Ca K)	0,0019066
		z (Ca H)	0,00385536
s (kpc)	22	z (H α)	0,00703968
a (mrad)	0,648	v (Ca K) km.s-1	2461,62554
d	33,9506173	v (Ca H) km.s-1	2326,72489
		v (H α) km.s-1	2110,44243

Taula C.20. Estudi 1 de la galàxia NGC 6217. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6217	Galaxy spct	NGC 6217
X1	287	Ca K rest	3933,7
Y1	231	Ca H rest	3968,5
X2	250	H α	6562,8
Y2	286	Ca K meas.	3949,8
Angular size	0,616	Ca H meas.	3985,4
		H α meas.	6575,7
a	-37	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	16,1
b	55	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	16,9
c en píxels	66,2872537	$\Delta\lambda$ H α angs.	12,9
c en μ rad	616,471459	z (Ca K)	0,00409284
		z (Ca H)	0,00425854
s (kpc)	22	z (H α)	0,00196562
a (mrad)	0,616	v (Ca K) km.s-1	1227,0022
d	35,7142857	v (Ca H) km.s-1	1276,67697
		v (H α) km.s-1	589,279379

Taula C.21. Estudi 1 de la galàxia NGC 6643. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6643	Galaxy spct	NGC 6643
X1	231	Ca K rest	3933,7
Y1	222	Ca H rest	3968,5
X2	298	H α	6562,8
Y2	311	Ca K meas.	3952,1
Angular size	1,036	Ca H meas.	3986,2
		H α meas.	6593,5
a	67	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	18,4
b	89	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	17,7
c en píxels	111,40018	$\Delta\lambda$ H α angs.	30,7
c en μ rad	1036,02167	z (Ca K)	0,00467753
		z (Ca H)	0,00446012
s (kpc)	22	z (H α)	0,00467788
a (mrad)	1,036	v (Ca K) km.s-1	1402,28823
d	21,2355212	v (Ca H) km.s-1	1337,11138
		v (H α) km.s-1	1402,39356

Taula C.22. Estudi 1 de la galàxia NGC 6764. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6764	Galaxy spct	NGC 6764
X1	231	Ca K rest	3933,7
Y1	250	Ca H rest	3968,5
X2	297	H α	6562,8
Y2	274	Ca K meas.	3943,6
Angular size	0,653	Ca H meas.	3976,9
		H α meas.	6609
a	66	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	9,9
b	24	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	8,4
c en píxels	70,2281995	$\Delta\lambda$ H α angs.	46,2
c en μ rad	653,122255	z (Ca K)	0,00251671
		z (Ca H)	0,00211667
s (kpc)	22	z (H α)	0,00703968
a (mrad)	0,653	v (Ca K) km.s-1	2518256,65
d	33,6906585	v (Ca H) km.s-1	13850411,6
		v (H α) km.s-1	2110,44243

Taula C.23. Estudi 2 de la galàxia NGC 1357. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 1357	Galaxy spct	NGC 1357
X1	326	Ca K rest	3933,7
Y1	273	Ca H rest	3968,5
X2	231	H α	6562,8
Y2	245	Ca K meas.	3962,2
Angular size	0,921	Ca H meas.	3997,8
		H α meas.	6608,2
a	-95	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	28,5
b	-28	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	29,3
c en píxels	99,0403958	$\Delta\lambda$ H α angs.	45,4
c en μ rad	921,075681	z (Ca K)	0,00724509
		z (Ca H)	0,00738314
s (kpc)	22	z (H α)	0,00691778
a (mrad)	0,921	v (Ca K) km.s ⁻¹	2172,02254
d	23,8870793	v (Ca H) km.s ⁻¹	2213,41036
		v (H α) km.s ⁻¹	2073,89797

Taula C.24. Estudi 2 de la galàxia NGC 1832. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 1832	Galaxy spct	NGC 1832
X1	295	Ca K rest	3933,7
Y1	310	Ca H rest	3968,5
X2	256	H α	6562,8
Y2	227	Ca K meas.	3960,6
Angular size	0,852	Ca H meas.	3995,5
		H α meas.	6606,7
a	-39	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	26,9
b	-83	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	27
c en píxels	91,7060521	$\Delta\lambda$ H α angs.	43,9
c en μ rad	852,866285	z (Ca K)	0,00683835
		z (Ca H)	0,00680358
s (kpc)	22	z (H α)	0,00668922
a (mrad)	0,852	v (Ca K) km.s-1	2050,08443
d	25,8215962	v (Ca H) km.s-1	2039,66143
		v (H α) km.s-1	2005,37711

Taula C.25. Estudi 2 de la galàxia NGC 2276. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 2276	Galaxy spct	NGC 2276
X1	218	Ca K rest	3933,7
Y1	291	Ca H rest	3968,5
X2	277	H α	6562,8
Y2	231	Ca K meas.	3966,8
Angular size	0,782	Ca H meas.	3997
		H α meas.	6615,2
a	59	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	33,1
b	-60	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	28,5
c en píxels	84,1486779	$\Delta\lambda$ H α angs.	52,4
c en μ rad	782,582705	z (Ca K)	0,00841447
		z (Ca H)	0,00718155
s (kpc)	22	z (H α)	0,0079844
a (mrad)	0,782	v (Ca K) km.s ⁻¹	2522,5946
d	28,1329923	v (Ca H) km.s ⁻¹	2152,97595
		v (H α) km.s ⁻¹	2393,66197

Taula C.26. Estudi 2 de la galàxia NGC 2775. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 2775	Galaxy spct	NGC 2775
X1	233	Ca K rest	3933,7
Y1	231	Ca H rest	3968,5
X2	305	H α	6562,8
Y2	308	Ca K meas.	3954,4
Angular size	0,98	Ca H meas.	3987,7
		H α meas.	6591,2
a	72	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	20,7
b	77	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	19,2
c en píxels	105,418215	$\Delta\lambda$ H α angs.	28,4
c en μ rad	980,389397	z (Ca K)	0,00526222
		z (Ca H)	0,0048381
s (kpc)	22	z (H α)	0,00432742
a (mrad)	0,98	v (Ca K) km.s-1	1577,57426
d	22,4489796	v (Ca H) km.s-1	1450,4259
		v (H α) km.s-1	1297,32825

Taula C.27. Estudi 2 de la galàxia NGC 2903. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 2903	Galaxy spct	NGC 2903
X1	352	Ca K rest	3933,7
Y1	402	Ca H rest	3968,5
X2	180	H α	6562,8
Y2	87	Ca K meas.	3938,1
Angular size	3,337	Ca H meas.	3972,2
		H α meas.	6574,2
a	-172	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	4,4
b	-315	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	3,7
c en píxels	358,899707	$\Delta\lambda$ H α angs.	11,4
c en μ rad	3337,76728	z (Ca K)	0,00111854
		z (Ca H)	0,00093234
		z (H α)	0,00173706
s (kpc)	22	v (Ca K) km.s ⁻¹	
a (mrad)	3,337	1	335,329795
		v (Ca H) km.s ⁻¹	
d	6,59274798	1	279,509158
		v (H α) km.s ⁻¹	
		1	520,758521

Taula C.28. Estudi 2 de la galàxia NGC 3034. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3034	Galaxy spct	NGC 3034
X1	128	Ca K rest	3933,7
Y1	212	Ca H rest	3968,5
X2	403	H α	6562,8
Y2	313	Ca K meas.	3935,8
Angular size	2,724	Ca H meas.	3971,5
		H α meas.	6563,3
a	275	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	2,1
b	101	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	3
c en píxels	292,960748	$\Delta\lambda$ H α angs.	0,5
c en μ rad	2724,53496	z (Ca K)	0,00053385
		z (Ca H)	0,00075595
s (kpc)	22	z (H α)	7,6187E-05
a (mrad)	2,724	v (Ca K) km.s-1	160,043766
d	8,0763583	v (Ca H) km.s-1	226,629047
		v (H α) km.s-1	22,840286

Taula C.29. Estudi 2 de la galàxia NGC 3147. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3147	Galaxy spct	NGC 3147
X1	246	Ca K rest	3933,7
Y1	329	Ca H rest	3968,5
X2	283	H α	6562,8
Y2	215	Ca K meas.	3967,6
Angular size	1,114	Ca H meas.	4002,4
		H α meas.	6621,4
a	37	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	33,9
b	-114	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	33,9
c en píxels	119,854078	$\Delta\lambda$ H α angs.	58,6
c en μ rad	1114,64292	z (Ca K)	0,00861784
		z (Ca H)	0,00854227
		z (H α)	0,00892912
s (kpc)	22	v (Ca K) km.s ⁻¹	
a (mrad)	1,114	1	2583,56365
		v (Ca H) km.s ⁻¹	
d	19,7486535	1	2560,90823
		v (H α) km.s ⁻¹	
		1	2676,88152

Taula C.30. Estudi 2 de la galàxia NGC 3245. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3245	Galaxy spct	NGC 3245
X1	264	Ca K rest	3933,7
Y1	227	Ca H rest	3968,5
X2	262	H α	6562,8
Y2	311	Ca K meas.	3948,2
Angular size	0,781	Ca H meas.	3984,6
		H α meas.	6611,3
a	-2	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	14,5
b	84	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	16,1
c en píxels	84,0238062	$\Delta\lambda$ H α angs.	48,5
c en μ rad	781,421397	z (Ca K)	0,0036861
		z (Ca H)	0,00405695
s (kpc)	22	z (H α)	0,00739014
a (mrad)	0,781	v (Ca K) km.s-1	1105,0641
d	28,1690141	v (Ca H) km.s-1	1216,24255
		v (H α) km.s-1	2215,50774

Taula C.31. Estudi 2 de la galàxia NGC 3310. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3310	Galaxy spct	NGC 3310
X1	256	Ca K rest	3933,7
Y1	297	Ca H rest	3968,5
X2	278	H α	6562,8
Y2	220	Ca K meas.	3976,9
Angular size	0,744	Ca H meas.	3987,7
		H α meas.	6578,8
a	22	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	43,2
b	-77	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	19,2
c en píxels	80,0812088	$\Delta\lambda$ H α angs.	16
c en μ rad	744,755242	z (Ca K)	0,01098203
		z (Ca H)	0,0048381
s (kpc)	22	z (H α)	0,00243798
a (mrad)	0,744	v (Ca K) km.s-1	3292,3289
d	29,5698925	v (Ca H) km.s-1	1450,4259
		v (H α) km.s-1	730,889152

Taula C.32. Estudi 2 de la galàxia NGC 3368. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3368	Galaxy spct	NGC 3368
X1	228	Ca K rest	3933,7
Y1	378	Ca H rest	3968,5
X2	294	H α	6562,8
Y2	160	Ca K meas.	3945,9
Angular size	1,939	Ca H meas.	3980,7
		H α meas.	6643,6
a	66	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	12,2
b	-218	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	12,2
c en píxels	227,771816	$\Delta\lambda$ H α angs.	80,8
c en μ rad	2118,27789	z (Ca K)	0,00310141
		z (Ca H)	0,00307421
s (kpc)	22	z (H α)	0,01231182
a (mrad)	1,939	v (Ca K) km.s-1	929,778068
d	11,3460547	v (Ca H) km.s-1	921,624792
		v (H α) km.s-1	3690,99022

Taula C.33. Estudi 2 de la galàxia NGC 3516. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3516	Galaxy spct	NGC 3516
X1	289	Ca K rest	3933,7
Y1	279	Ca H rest	3968,5
X2	241	H α	6562,8
Y2	244	Ca K meas.	3969,9
Angular size	0,552	Ca H meas.	3998,6
		H α meas.	6613,7
a	-48	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	36,2
b	-35	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	30,1
c en píxels	59,405387	$\Delta\lambda$ H α angs.	50,9
c en μ rad	552,470099	z (Ca K)	0,00920253
		z (Ca H)	0,00758473
s (kpc)	22	z (H α)	0,00775584
a (mrad)	0,552	v (Ca K) km.s-1	2758,84968
d	39,8550725	v (Ca H) km.s-1	2273,84477
		v (H α) km.s-1	2325,14112

Taula C.34. Estudi 2 de la galàxia NGC 3623. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3623	Galaxy spct	NGC 3623
X1	244	Ca K rest	3933,7
Y1	405	Ca H rest	3968,5
X2	273	H α	6562,8
Y2	117	Ca K meas.	3939,7
Angular size	2,691	Ca H meas.	3976,1
		H α meas.	6601,3
a	29	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	6
b	-288	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	7,6
c en píxels	289,456387	$\Delta\lambda$ H α angs.	38,5
c en μ rad	2691,9444	z (Ca K)	0,00152528
		z (Ca H)	0,00191508
s (kpc)	22	z (H α)	0,0058664
a (mrad)	2,691	v (Ca K) km.s-1	457,267902
d	8,17539948	v (Ca H) km.s-1	574,12692
		v (H α) km.s-1	1758,70202

Taula C.35. Estudi 2 de la galàxia NGC 3627. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3627	Galaxy spct	NGC 3627
X1	257	Ca K rest	3933,7
Y1	413	Ca H rest	3968,5
X2	271	H α	6562,8
Y2	144	Ca K meas.	3942,8
Angular size	2,505	Ca H meas.	3977,6
		H α meas.	6578
a	14	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	9,1
b	-269	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	9,1
c en píxels	269,364066	$\Delta\lambda$ H α angs.	15,2
c en μ rad	2505,08581	z (Ca K)	0,00231334
		z (Ca H)	0,00229306
s (kpc)	22	z (H α)	0,00231608
a (mrad)	2,505	v (Ca K) km.s-1	693,522985
d	8,78243513	v (Ca H) km.s-1	687,441443
		v (H α) km.s-1	694,344695

Taula C.36. Estudi 2 de la galàxia NGC 3941. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3941	Galaxy spct	NGC 3941
X1	272	Ca K rest	3933,7
Y1	314	Ca H rest	3968,5
X2	263	H α	6562,8
Y2	220	Ca K meas.	3945,9
Angular size	0,941	Ca H meas.	3980,7
		H α meas.	6602,8
a	-9	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	12,2
b	-94	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	12,2
c en píxels	94,4298682	$\Delta\lambda$ H α angs.	40
c en μ rad	878,197774	z (Ca K)	0,00310141
		z (Ca H)	0,00307421
s (kpc)	22	z (H α)	0,00609496
a (mrad)	0,941	v (Ca K) km.s-1	929,778068
d	23,3793836	v (Ca H) km.s-1	921,624792
		v (H α) km.s-1	1827,22288

Taula C.37. Estudi 2 de la galàxia NGC 4472. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 4472	Galaxy spct	NGC 4472
X1	238	Ca K rest	3933,7
Y1	324	Ca H rest	3968,5
X2	307	H α	6562,8
Y2	191	Ca K meas.	3949,8
Angular size	1,393	Ca H meas.	3978,4
		H α meas.	6645,7
a	69	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	16,1
b	-133	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	9,9
c en píxels	149,833241	$\Delta\lambda$ H α angs.	82,9
c en μ rad	1393,44914	z (Ca K)	0,00409284
		z (Ca H)	0,00249465
s (kpc)	22	z (H α)	0,0126318
a (mrad)	1,393	v (Ca K) km.s-1	1227,0022
d	15,793252	v (Ca H) km.s-1	747,875856
		v (H α) km.s-1	3786,91942

Taula C.38. Estudi 2 de la galàxia NGC 4775. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 4775	Galaxy spct	NGC 4775
X1	286	Ca K rest	3933,7
Y1	223	Ca H rest	3968,5
X2	259	H α	6562,8
Y2	286	Ca K meas.	3957,5
Angular size	0,637	Ca H meas.	3989,3
		H α meas.	6595,8
a	-27	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	23,8
b	63	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	20,8
c en píxels	68,541958	$\Delta\lambda$ H α angs.	33
c en μ rad	637,440209	z (Ca K)	0,00605028
		z (Ca H)	0,00524128
s (kpc)	22	z (H α)	0,00502834
a (mrad)	0,637	v (Ca K) km.s-1	1813,82935
d	34,5368917	v (Ca H) km.s-1	1571,29473
		v (H α) km.s-1	1507,45888

Taula C.39. Estudi 2 de la galàxia NGC 5248. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 5248	Galaxy spct	NGC 5248
X1	219	Ca K rest	3933,7
Y1	314	Ca H rest	3968,5
X2	293	H α	6562,8
Y2	213	Ca K meas.	3945,9
Angular size	1,164	Ca H meas.	3981,5
		H α meas.	6585,8
a	74	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	12,2
b	-101	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	13
c en píxels	125,207827	$\Delta\lambda$ H α angs.	23
c en μ rad	1164,43279	z (Ca K)	0,00310141
		z (Ca H)	0,0032758
		z (H α)	0,0035046
s (kpc)	22	v (Ca K) km.s ⁻¹	
a (mrad)	1,164	1	929,778068
		v (Ca H) km.s ⁻¹	
d	18,9003436	1	982,059205
		v (H α) km.s ⁻¹	
		1	1050,65316

Taula C.40. Estudi 2 de la galàxia NGC 5866. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 5866	Galaxy spct	NGC 5866
X1	335	Ca K rest	3933,7
Y1	209	Ca H rest	3968,5
X2	206	H α	6562,8
Y2	311	Ca K meas.	3938,1
Angular size	1,529	Ca H meas.	3972,2
		H α meas.	6789,7
a	-129	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	4,4
b	102	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	3,7
c en píxels	164,453641	$\Delta\lambda$ H α angs.	226,9
c en μ rad	1529,41886	z (Ca K)	0,00111854
		z (Ca H)	0,00093234
s (kpc)	22	z (H α)	0,03457366
a (mrad)	1,529	v (Ca K) km.s-1	335,329795
d	14,3884892	v (Ca H) km.s-1	279,509158
		v (H α) km.s-1	10364,9218

Taula C.41. Estudi 2 de la galàxia NGC 6181. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6181	Galaxy spct	NGC 6181
X1	262	Ca K rest	3933,7
Y1	300	Ca H rest	3968,5
X2	272	H α	6562,8
Y2	224	Ca K meas.	3966
Angular size	0,712	Ca H meas.	4003,2
		H α meas.	6609
a	10	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	32,3
b	-76	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	34,7
c en píxels	76,6550716	$\Delta\lambda$ H α angs.	46,2
c en μ rad	712,892166	z (Ca K)	0,0082111
		z (Ca H)	0,00874386
s (kpc)	22	z (H α)	0,00703968
a (mrad)	0,712	v (Ca K) km.s-1	2461,62554
d	30,8988764	v (Ca H) km.s-1	2621,34265
		v (H α) km.s-1	2110,44243

Taula C.42. Estudi 2 de la galàxia NGC 6217. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6217	Galaxy spct	NGC 6217
X1	266	Ca K rest	3933,7
Y1	301	Ca H rest	3968,5
X2	269	H α	6562,8
Y2	233	Ca K meas.	3949,8
Angular size	0,633	Ca H meas.	3984,6
		H α meas.	6589,6
a	3	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	16,1
b	-68	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	16,1
c en píxels	68,0661443	$\Delta\lambda$ H α angs.	26,8
c en μ rad	633,015142	z (Ca K)	0,00409284
		z (Ca H)	0,00405695
s (kpc)	22	z (H α)	0,00408362
a (mrad)	0,633	v (Ca K) km.s ⁻¹	1227,0022
d	34,7551343	v (Ca H) km.s ⁻¹	1216,24255
		v (H α) km.s ⁻¹	1224,23933

Taula C.43. Estudi 2 de la galàxia NGC 6643. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6643	Galaxy spct	NGC 6643
X1	302	Ca K rest	3933,7
Y1	313	Ca H rest	3968,5
X2	232	H α	6562,8
Y2	226	Ca K meas.	3952,1
Angular size	1,038	Ca H meas.	3986,2
		H α meas.	6593,5
a	-70	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	18,4
b	-87	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	17,7
c en píxels	111,664677	$\Delta\lambda$ H α angs.	30,7
c en μ rad	1038,48149	z (Ca K)	0,00467753
		z (Ca H)	0,00446012
s (kpc)	22	z (H α)	0,00467788
		v (Ca K) km.s ⁻¹	1402,28823
a (mrad)	1,038	v (Ca H) km.s ⁻¹	1337,11138
d	21,194605	v (H α) km.s ⁻¹	1402,39356

Taula C.44. Estudi 2 de la galàxia NGC 6764. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6764	Galaxy spct	NGC 6764
X1	302	Ca K rest	3933,7
Y1	282	Ca H rest	3968,5
X2	233	H α	6562,8
Y2	250	Ca K meas.	3964,5
Angular size	0,707	Ca H meas.	4008,6
		H α meas.	6610,6
a	-69	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	30,8
b	-32	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	40,1
c en píxels	76,0591875	$\Delta\lambda$ H α angs.	47,8
c en μ rad	707,350444	z (Ca K)	0,00782978
		z (Ca H)	0,01010457
s (kpc)	22	z (H α)	0,00728348
a (mrad)	0,707	v (Ca K) km.s ⁻¹	2347,30857
d	31,1173975	v (Ca H) km.s ⁻¹	3029,27493
		v (H α) km.s ⁻¹	2183,53134

Taula C.45. Estudi 3 de la galàxia NGC 1357. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 1357	Galaxy spct	NGC 1357
X1	219	Ca K rest	3933,7
Y1	242	Ca H rest	3968,5
X2	322	H α	6562,8
Y2	291	Ca K meas.	3962,2
Angular size	1,06	Ca H meas.	3998,6
		H α meas.	6608,2
a	103	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	28,5
b	49	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	30,1
c en píxels	114,061387	$\Delta\lambda$ H α angs.	45,4
c en μ rad	1060,7709	z (Ca K)	0,00724509
		z (Ca H)	0,00758473
s (kpc)	22	z (H α)	0,00691778
a (mrad)	1,06	v (Ca K) km.s-1	2172,02254
d	20,754717	v (Ca H) km.s-1	2273,84477
		v (H α) km.s-1	2073,89797

Taula C.46. Estudi 3 de la galàxia NGC 1832. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 1832	Galaxy spct	NGC 1832
X1	297	Ca K rest	3933,7
Y1	308	Ca H rest	3968,5
X2	256	H α	6562,8
Y2	228	Ca K meas.	3959,8
Angular size	0,836	Ca H meas.	3995,5
		H α meas.	6607,5
a	-41	$\Delta\lambda$ Ca K ang.	26,1
b	-80	$\Delta\lambda$ Ca H ang.	27
c en píxels	89,8943825	$\Delta\lambda$ H α ang.	44,7
c en μ rad	836,017757	z (Ca K)	0,00663497
		z (Ca H)	0,00680358
s (kpc)	22	z (H α)	0,00681112
a (mrad)	0,836	v (Ca K) km.s-1	1989,11538
d	26,3157895	v (Ca H) km.s-1	2039,66143
		v (H α) km.s-1	2041,92157

Taula C.47. Estudi 3 de la galàxia NGC 2276. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 2276	Galaxy spct	NGC 2276
X1	223	Ca K rest	3933,7
Y1	291	Ca H rest	3968,5
X2	278	H α	6562,8
Y2	232	Ca K meas.	3966
Angular size	0,75	Ca H meas.	3996,2
		H α meas.	6615,2
a	55	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	32,3
b	-59	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	27,7
c en píxels	80,6597793	$\Delta\lambda$ H α angs.	52,4
c en μ rad	750,135948	z (Ca K)	0,0082111
		z (Ca H)	0,00697997
		z (H α)	0,0079844
s (kpc)	22	v (Ca K) km.s-1	2461,62554
a (mrad)	0,75	v (Ca H) km.s-1	2092,54154
d	29,33333333	v (H α) km.s-1	2393,66197

Taula C.48. Estudi 3 de la galàxia NGC 2775. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 2775	Galaxy spct	NGC 2775
X1	255	Ca K rest	3933,7
Y1	212	Ca H rest	3968,5
X2	287	H α	6562,8
Y2	306	Ca K meas.	3953,6
Angular size	0,923	Ca H meas.	3987,7
		H α meas.	6592
a	32	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	19,9
b	94	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	19,2
c en píxels	99,2975327	$\Delta\lambda$ H α angs.	29,2
c en μ rad	923,467054	z (Ca K)	0,00505885
		z (Ca H)	0,0048381
s (kpc)	22	z (H α)	0,00444932
a (mrad)	0,923	v (Ca K) km.s-1	1516,60521
d	23,8353196	v (Ca H) km.s-1	1450,4259
		v (H α) km.s-1	1333,8727

Taula C.49. Estudi 3 de la galàxia NGC 2903. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 2903	Galaxy spct	NGC 2903
X1	347	Ca K rest	3933,7
Y1	410	Ca H rest	3968,5
X2	184	H α	6562,8
Y2	78	Ca K meas.	3938,1
Angular size	3,439	Ca H meas.	3973
		H α meas.	6574,2
a	-163	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	4,4
b	-332	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	4,5
c en píxels	369,855377	$\Delta\lambda$ H α angs.	11,4
c en μ rad	3439,65501	z (Ca K)	0,00111854
		z (Ca H)	0,00113393
s (kpc)	22	z (H α)	0,00173706
a (mrad)	3,439	v (Ca K) km.s ⁻¹	335,329795
d	6,39720849	v (Ca H) km.s ⁻¹	339,943571
		v (H α) km.s ⁻¹	520,758521

Taula C.50. Estudi 3 de la galàxia NGC 3034. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3034	Galaxy spct	NGC 3034
X1	123	Ca K rest	3933,7
Y1	194	Ca H rest	3968,5
X2	397	H α	6562,8
Y2	317	Ca K meas.	3935,8
Angular size	2,793	Ca H meas.	3971,5
		H α meas.	6564,1
a	274	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	2,1
b	123	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	3
c en píxels	300,341472	$\Delta\lambda$ H α angs.	1,3
c en μ rad	2793,17569	z (Ca K)	0,00053385
		z (Ca H)	0,00075595
s (kpc)	22	z (H α)	0,00019809
a (mrad)	2,793	v (Ca K) km.s-1	160,043766
d	7,87683494	v (Ca H) km.s-1	226,629047
		v (H α) km.s-1	59,3847436

Taula C.51. Estudi 3 de la galàxia NGC 3147. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3147	Galaxy spct	NGC 3147
X1	249	Ca K rest	3933,7
Y1	327	Ca H rest	3968,5
X2	276	H α	6562,8
Y2	210	Ca K meas.	3967,6
Angular size	1,116	Ca H meas.	4001,7
		H α meas.	6621,4
a	27	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	33,9
b	-117	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	33,2
c en píxels	120,074977	$\Delta\lambda$ H α angs.	58,6
c en μ rad	1116,69728	z (Ca K)	0,00861784
		z (Ca H)	0,00836588
		z (H α)	0,00892912
s (kpc)	22	v (Ca K) km.s ⁻¹	
a (mrad)	1,116	1	2583,56365
		v (Ca H) km.s ⁻¹	
d	19,7132616	1	2508,02812
		v (H α) km.s ⁻¹	
		1	2676,88152

Taula C.52. Estudi 3 de la galàxia NGC 3245. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3245	Galaxy spct	NGC 3245
X1	263	Ca K rest	3933,7
Y1	316	Ca H rest	3968,5
X2	266	H α	6562,8
Y2	222	Ca K meas.	3948,2
Angular size	0,874	Ca H meas.	3984,6
		H α meas.	6611,3
a	3	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	14,5
b	-94	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	16,1
c en píxels	94,0478602	$\Delta\lambda$ H α angs.	48,5
c en μ rad	874,645099	z (Ca K)	0,0036861
		z (Ca H)	0,00405695
s (kpc)	22	z (H α)	0,00739014
a (mrad)	0,874	v (Ca K) km.s-1	1105,0641
d	25,1716247	v (Ca H) km.s-1	1216,24255
		v (H α) km.s-1	2215,50774

Taula C.53. Estudi 3 de la galàxia NGC 3310. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3310	Galaxy spct	NGC 3310
X1	260	Ca K rest	3933,7
Y1	306	Ca H rest	3968,5
X2	272	H α	6562,8
Y2	216	Ca K meas.	3976,9
Angular size	0,844	Ca H meas.	3988,5
		H α meas.	6579,6
a	12	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	43,2
b	-90	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	20
c en píxels	90,7964757	$\Delta\lambda$ H α angs.	16,8
c en μ rad	844,407224	z (Ca K)	0,01098203
		z (Ca H)	0,00503969
s (kpc)	22	z (H α)	0,00255988
a (mrad)	0,844	v (Ca K) km.s-1	3292,3289
d	26,0663507	v (Ca H) km.s-1	1510,86031
		v (H α) km.s-1	767,43361

Taula C.54. Estudi 3 de la galàxia NGC 3368. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3368	Galaxy spct	NGC 3368
X1	281	Ca K rest	3933,7
Y1	147	Ca H rest	3968,5
X2	233	H α	6562,8
Y2	364	Ca K meas.	3945,9
Angular size	2,066	Ca H meas.	3980
		H α meas.	6785,3
a	-48	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	12,2
b	217	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	11,5
c en píxels	222,24536	$\Delta\lambda$ H α angs.	222,5
c en μ rad	2066,88185	z (Ca K)	0,00310141
		z (Ca H)	0,00289782
s (kpc)	22	z (H α)	0,03390321
a (mrad)	2,066	v (Ca K) km.s-1	929,778068
d	10,6485963	v (Ca H) km.s-1	868,744681
		v (H α) km.s-1	10163,9273

Taula C.55. Estudi 3 de la galàxia NGC 3516. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3516	Galaxy spct	NGC 3516
X1	243	Ca K rest	3933,7
Y1	243	Ca H rest	3968,5
X2	285	H α	6562,8
Y2	281	Ca K meas.	3969,9
Angular size	0,526	Ca H meas.	3998,6
		H α meas.	6613,7
a	42	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	36,2
b	38	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	30,1
c en píxels	56,639209	$\Delta\lambda$ H α angs.	50,9
c en μ rad	526,744644	z (Ca K)	0,00920253
		z (Ca H)	0,00758473
s (kpc)	22	z (H α)	0,00775584
a (mrad)	0,526	v (Ca K) km.s-1	2758,84968
d	41,8250951	v (Ca H) km.s-1	2273,84477
		v (H α) km.s-1	2325,14112

Taula C.56. Estudi 3 de la galàxia NGC 3623. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3623	Galaxy spct	NGC 3623
X1	280	Ca K rest	3933,7
Y1	110	Ca H rest	3968,5
X2	236	H α	6562,8
Y2	408	Ca K meas.	3939,7
Angular size	2,801	Ca H meas.	3976,9
		H α meas.	6600,5
a	-44	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	6
b	298	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	8,4
c en píxels	301,230809	$\Delta\lambda$ H α angs.	37,7
c en μ rad	2801,44652	z (Ca K)	0,00152528
		z (Ca H)	0,00211667
s (kpc)	22	z (H α)	0,0057445
a (mrad)	2,801	v (Ca K) km.s-1	457,267902
d	7,85433774	v (Ca H) km.s-1	634,561332
		v (H α) km.s-1	1722,15756

Taula C.57. Estudi 3 de la galàxia NGC 3627. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3627	Galaxy spct	NGC 3627
X1	241	Ca K rest	3933,7
Y1	408	Ca H rest	3968,5
X2	300	H α	6562,8
Y2	145	Ca K meas.	3942,8
Angular size	2,506	Ca H meas.	3978,4
		H α meas.	6577,3
a	59	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	9,1
b	-263	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	9,9
c en píxels	269,536639	$\Delta\lambda$ H α angs.	14,5
c en μ rad	2506,69075	z (Ca K)	0,00231334
		z (Ca H)	0,00249465
s (kpc)	22	z (H α)	0,00220942
a (mrad)	2,506	v (Ca K) km.s-1	693,522985
d	8,77893057	v (Ca H) km.s-1	747,875856
		v (H α) km.s-1	662,368294

Taula C.58. Estudi 3 de la galàxia NGC 3941. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 3941	Galaxy spct	NGC 3941
X1	251	Ca K rest	3933,7
Y1	217	Ca H rest	3968,5
X2	285	H α	6562,8
Y2	310	Ca K meas.	3946,7
Angular size	0,92	Ca H meas.	3980
		H α meas.	6602,8
a	34	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	13
b	93	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	11,5
c en píxels	99,0202	$\Delta\lambda$ H α angs.	40
c en μ rad	920,88786	z (Ca K)	0,00330478
		z (Ca H)	0,00289782
s (kpc)	22	z (H α)	0,00609496
a (mrad)	0,92	v (Ca K) km.s-1	990,747122
d	23,9130435	v (Ca H) km.s-1	868,744681
		v (H α) km.s-1	1827,22288

Taula C.59. Estudi 3 de la galàxia NGC 4472. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 4472	Galaxy spct	NGC 4472
X1	303	Ca K rest	3933,7
Y1	187	Ca H rest	3968,5
X2	211	H α	6562,8
Y2	305	Ca K meas.	3950,5
Angular size	1,391	Ca H meas.	3978,4
		H α meas.	6589,3
a	-92	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	16,8
b	118	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	9,9
c en píxels	149,626201	$\Delta\lambda$ H α angs.	26,5
c en μ rad	1391,52367	z (Ca K)	0,00427079
		z (Ca H)	0,00249465
s (kpc)	22	z (H α)	0,00403791
a (mrad)	1,391	v (Ca K) km.s-1	1280,35013
d	15,8159597	v (Ca H) km.s-1	747,875856
		v (H α) km.s-1	1210,53516

Taula C.60. Estudi 3 de la galàxia NGC 4775. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 4775	Galaxy spct	NGC 4775
X1	241	Ca K rest	3933,7
Y1	234	Ca H rest	3968,5
X2	296	H α	6562,8
Y2	272	Ca K meas.	3958,3
Angular size	0,621	Ca H meas.	3989,3
		H α meas.	6595,8
a	55	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	24,6
b	38	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	20,8
c en píxels	66,8505797	$\Delta\lambda$ H α angs.	33
c en μ rad	621,710391	z (Ca K)	0,00625365
		z (Ca H)	0,00524128
s (kpc)	22	z (H α)	0,00502834
a (mrad)	0,621	v (Ca K) km.s-1	1874,7984
d	35,4267311	v (Ca H) km.s-1	1571,29473
		v (H α) km.s-1	1507,45888

Taula C.61. Estudi 3 de la galàxia NGC 5248. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 5248	Galaxy spct	NGC 5248
X1	290	Ca K rest	3933,7
Y1	184	Ca H rest	3968,5
X2	218	H α	6562,8
Y2	335	Ca K meas.	3946,7
Angular size	1,555	Ca H meas.	3981,5
		H α meas.	6585,8
a	-72	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	13
b	151	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	13
c en píxels	167,287178	$\Delta\lambda$ H α angs.	23
c en μ rad	1555,77076	z (Ca K)	0,00330478
		z (Ca H)	0,0032758
		z (H α)	0,0035046
s (kpc)	22	v (Ca K) km.s ⁻¹	
a (mrad)	1,555	1	990,747122
		v (Ca H) km.s ⁻¹	
d	14,14791	1	982,059205
		v (H α) km.s ⁻¹	
		1	1050,65316

Taula C.62. Estudi 3 de la galàxia NGC 5866. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 5866	Galaxy spct	NGC 5866
X1	335	Ca K rest	3933,7
Y1	202	Ca H rest	3968,5
X2	213	H α	6562,8
Y2	307	Ca K meas.	3938,1
Angular size	1,496	Ca H meas.	3971,5
		H α meas.	6678,2
a	-122	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	4,4
b	105	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	3
c en píxels	160,962729	$\Delta\lambda$ H α angs.	115,4
c en μ rad	1496,95338	z (Ca K)	0,00111854
		z (Ca H)	0,00075595
s (kpc)	22	z (H α)	0,01758396
a (mrad)	1,496	v (Ca K) km.s-1	335,329795
d	14,7058824	v (Ca H) km.s-1	226,629047
		v (H α) km.s-1	5271,53801

Taula C.63. Estudi 3 de la galàxia NGC 6181. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6181	Galaxy spct	NGC 6181
X1	266	Ca K rest	3933,7
Y1	221	Ca H rest	3968,5
X2	264	H α	6562,8
Y2	301	Ca K meas.	3966
Angular size	0,744	Ca H meas.	4000,1
		H α meas.	6609
a	-2	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	32,3
b	80	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	31,6
c en píxels	80,0249961	$\Delta\lambda$ H α angs.	46,2
c en μ rad	744,232464	z (Ca K)	0,0082111
		z (Ca H)	0,00796271
s (kpc)	22	z (H α)	0,00703968
a (mrad)	0,744	v (Ca K) km.s-1	2461,62554
		v (Ca H) km.s-1	
d	29,5698925	v (H α) km.s-1	2387,1593
			2110,44243

Taula C.64. Estudi 3 de la galàxia NGC 6217. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6217	Galaxy spct	NGC 6217
X1	263	Ca K rest	3933,7
Y1	235	Ca H rest	3968,5
X2	271	H α	6562,8
Y2	298	Ca K meas.	3950,5
Angular size	0,59	Ca H meas.	3985,4
		H α meas.	6588,9
a	8	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	16,8
b	63	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	16,9
c en píxels	63,5059052	$\Delta\lambda$ H α angs.	26,1
c en μ rad	590,604919	z (Ca K)	0,00427079
		z (Ca H)	0,00425854
s (kpc)	22	z (H α)	0,00397696
a (mrad)	0,59	v (Ca K) km.s ⁻¹	1280,35013
d	37,2881356	v (Ca H) km.s ⁻¹	1276,67697
		v (H α) km.s ⁻¹	1192,26293

Taula C.65. Estudi 3 de la galàxia NGC 6643. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6643	Galaxy spct	NGC 6643
X1	233	Ca K rest	3933,7
Y1	219	Ca H rest	3968,5
X2	298	H α	6562,8
Y2	305	Ca K meas.	3952,1
Angular size	1,002	Ca H meas.	3986,2
		H α meas.	6593,5
a	65	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	18,4
b	86	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	17,7
c en píxels	107,800742	$\Delta\lambda$ H α angs.	30,7
c en μ rad	1002,5469	z (Ca K)	0,00467753
		z (Ca H)	0,00446012
s (kpc)	22	z (H α)	0,00467788
a (mrad)	1,002	v (Ca K) km.s-1	1402,28823
d	21,9560878	v (Ca H) km.s-1	1337,11138
		v (H α) km.s-1	1402,39356

Taula C.66. Estudi 3 de la galàxia NGC 6764. (Font: <http://depts.washington.edu/astroed/HubbleLaw/galaxies.html>).

Galaxy img	NGC 6764	Galaxy spct	NGC 6764
X1	232	Ca K rest	3933,7
Y1	249	Ca H rest	3968,5
X2	298	H α	6562,8
Y2	281	Ca K meas.	3963,7
Angular size	0,682	Ca H meas.	4007,9
		H α meas.	6610,6
a	66	$\Delta\lambda$ Ca K angs.	30
b	32	$\Delta\lambda$ Ca H angs.	39,4
c en píxels	73,3484833	$\Delta\lambda$ H α angs.	47,8
c en μ rad	682,140895	z (Ca K)	0,00762641
		z (Ca H)	0,00992818
		z (H α)	0,00728348
s (kpc)	22	v (Ca K) km.s-1	
a (mrad)	0,682		2286,33951
		v (Ca H) km.s-1	
d	32,2580645		2976,39482
		v (H α) km.s-1	2183,53134

Annex D: Estudi d'errors per mínims quadrats

Taula D.1. Taula corresponent a l'estudi d'errors per mínims quadrats de línia d'absorció Ca K de l'estudi 1, per a una mostra de vint-i-dues galàxies. En vermell es mostren els valors que han estat eliminats mitjançant el mètode de mínims quadrats.

Posicions x	Velocitat y	$y'=64,008x+106,47$	$y-y'$	$(y-y')^2$
24,4444444	2156,78027	1671,11	485,670273	235875,614
26,4741276	1989,11538	1801,02596	188,089419	35377,6296
29,4117647	2461,62554	1989,05824	472,567306	223319,859
22,022022	1577,57426	1516,05559	61,518678	3784,54774
7,02426564	335,329795	556,079195	-220,7494	48730,2977
8,1120944	221,01282	625,708938	-404,696119	163778,948
22,4032587	2583,56365	1540,45778	1043,10587	1088069,85
31,1614731	1166,03315	2101,05357	-935,020418	874263,182
23,6051502	3231,35984	1617,38845	1613,97139	2604903,65
11,3460547	990,747122	832,708267	158,038855	24976,2797
36,3036304	2819,81873	2430,19277	389,62596	151808,388
7,96812749	457,267902	616,493904	-159,226002	25352,9197
9,36170213	693,522985	705,69383	-12,1708444	148,129452
23,3793836	929,778068	1602,93759	-673,159519	453143,738
15,1724138	1227,0022	1077,62586	149,376343	22313,2918
33,7423313	1813,82935	2266,24914	-452,419795	204683,671
13,229104	929,778068	953,238491	-23,4604223	550,391414
13,8451857	335,329795	992,672643	-657,342848	432099,62
33,9506173	2461,62554	2279,58111	182,044431	33140,1747
35,7142857	1227,0022	2392,47	-1165,4678	1358315,18
21,2355212	1402,28823	1465,71324	-63,425009	4022,73176
33,6906585	2286,33951	2262,94167	23,3978432	547,459066
suma				7989205,55

Taula D.2. Taula corresponent a l'estudi d'errors per mínims quadrats de línia d'absorció Ca H de l'estudi 1, per a una mostra de vint-i-dues galàxies. En vermell es mostren els valors que han estat eliminats mitjançant el mètode de mínims quadrats.

Posicions x	Velocitat y	$y'=61,877x+13,012$	$y-y'$	$(y-y')^2$
24,444444	2168,08455	1525,56089	642,523663	412836,658
26,4741276	2039,66143	1651,15159	388,509834	150939,891
29,4117647	2152,97595	1832,92376	320,052184	102433,401
22,022022	1510,86031	1375,66866	135,191658	18276,7845
7,02426564	226,629047	447,652485	-221,023438	48851,3602
8,1120944	226,629047	514,964065	-288,335018	83137,0824
22,4032587	2508,02812	1399,25844	1108,76969	1229370,22
31,1614731	1216,24255	1941,19047	-724,947917	525549,482
23,6051502	1450,4259	1473,62788	-23,2019774	538,331757
11,3460547	868,744681	715,071825	153,672856	23615,3468
36,3036304	2213,41036	2259,37174	-45,9613745	2112,44795
7,96812749	574,12692	506,055825	68,071095	4633,67397
9,36170213	687,441443	592,286043	95,1554008	9054,55029
23,3793836	868,744681	1459,65812	-590,91344	349178,694
15,1724138	747,875856	951,835448	-203,959592	41599,5153
33,7423313	1571,29473	2100,88623	-529,591506	280467,163
13,229104	982,059205	831,58927	150,469935	22641,2013
13,8451857	279,509158	869,710553	-590,201394	348337,686
33,9506173	2326,72489	2113,77435	212,950539	45347,9322
35,7142857	1276,67697	2222,90486	-946,227891	895347,222
21,2355212	1337,11138	1327,00235	10,1090313	102,192513
33,6906585	2976,39482	2097,68888	878,705945	772124,137
suma				5366494,97

Taula D.3. Taula corresponent a l'estudi d'errors per mínims quadrats de línia d'emissió H- α de l'estudi 1, per a una mostra de vint-i-dues galàxies. En vermell es mostren els valors que han estat eliminats mitjançant el mètode de mínims quadrats.

Posicions x	Velocitat y	$y'=44,645x+1391,89,36$	$y-y'$	$(y-y')^2$
24,4444444	2073,89797	1113,68222	960,215747	922014,281
26,4741276	1968,83265	1204,29742	764,535229	584514,116
29,4117647	2393,66197	1335,44824	1058,21374	1119816,32
22,022022	1333,8727	1005,53317	328,33953	107806,847
7,02426564	520,758521	335,95834	184,800181	34151,107
8,1120944	59,3847436	384,524454	-325,139711	105715,831
22,4032587	2676,88152	1022,55348	1654,32804	2736801,25
31,1614731	2183,53134	1413,56397	769,967376	592849,76
23,6051502	767,43361	1076,21193	-308,778322	95344,0518
11,3460547	1932,2882	528,904611	1403,38359	1969485,49
36,3036304	2288,59666	1643,13558	645,46108	416620,006
7,96812749	1722,15756	378,097052	1344,06051	1806498,66
9,36170213	694,344695	440,313191	254,031503	64532,0046
23,3793836	1827,22288	1066,13258	761,090298	579258,442
15,1724138	2325,14112	699,732414	1625,4087	2641953,45
33,7423313	1507,45888	1528,78638	-21,327504	454,862426
13,229104	5120,79212	612,973349	4507,81877	20320430,1
13,8451857	1507,45888	640,478313	866,980563	751655,297
33,9506173	2146,98688	1538,08531	608,901576	370761,129
35,7142857	1224,23933	1616,82429	-392,584956	154122,948
21,2355212	1402,39356	970,419846	431,973715	186601,291
33,6906585	2183,53134	1526,47945	657,051893	431717,191
suma				35993104,4

Taula D.4. Taula corresponent a l'estudi d'errors per mínims quadrats de línia d'absorció Ca K de l'estudi 2, per a una mostra de vint-i-dues galàxies. En vermell es mostren els valors que han estat eliminats mitjançant el mètode de mínims quadrats.

Posicions x	Velocitat y	$y'=69,279x-14,902$	$y-y'$	$(y-y')^2$
23,8870793	2172,02254	1639,97096	532,051573	283078,876
25,8215962	2050,08443	1773,99237	276,092063	76226,8274
28,1329923	2522,5946	1934,12358	588,47102	346298,141
22,4489796	1577,57426	1540,34086	37,2334064	1386,32655
6,59274798	335,329795	441,836987	-106,507192	11343,7819
8,0763583	160,043766	544,620026	-384,576261	147898,9
19,7486535	2583,56365	1353,26497	1230,29868	1513634,85
28,1690141	1105,0641	1936,61913	-831,555029	691483,766
29,5698925	3292,3289	2033,67058	1258,65832	1584220,76
11,3460547	929,778068	771,141321	158,636747	25165,6175
39,8550725	2758,84968	2746,21757	12,6321131	159,570281
8,17539948	457,267902	551,481501	-94,2135981	8876,20206
8,78243513	693,522985	593,536323	99,9866621	9997,33259
23,3793836	929,778068	1604,79832	-675,02025	455652,338
15,793252	1227,0022	1079,2387	147,763501	21834,0524
34,5368917	1813,82935	2377,77932	-563,949972	318039,571
18,9003436	929,778068	1294,49491	-364,716839	133018,373
14,3884892	335,329795	981,918144	-646,588349	418076,493
30,8988764	2461,62554	2125,74126	335,884283	112818,252
34,7551343	1227,0022	2392,89895	-1165,89674	1359315,22
21,194605	1402,28823	1453,43904	-51,1508062	2616,40497
31,1173975	2347,30857	2140,88018	206,428388	42612,6793
suma				7563754,33

Taula D.5. Taula corresponent a l'estudi d'errors per mínims quadrats de línia d'absorció Ca H de l'estudi 2, per a una mostra de vint-i-dues galàxies. En vermell es mostren els valors que han estat eliminats mitjançant el mètode de mínims quadrats.

Posicions x	Velocitat y	$y'=60,301x+66,968$	$y-y'$	$(y-y')^2$
23,8870793	2213,41036	1507,38277	706,027595	498474,965
25,8215962	2039,66143	1624,03608	415,62535	172744,432
28,1329923	2152,97595	1763,41557	389,560379	151757,289
22,4489796	1450,4259	1420,66392	29,761984	885,775692
6,59274798	279,509158	464,517296	-185,008138	34228,0109
8,0763583	226,629047	553,980482	-327,351434	107158,962
19,7486535	2560,90823	1257,83155	1303,07668	1698008,83
28,1690141	1216,24255	1765,58772	-549,345165	301780,11
29,5698925	1450,4259	1850,06209	-399,636184	159709,079
11,3460547	921,624792	751,146442	170,47835	29062,8677
39,8550725	2273,84477	2470,26872	-196,423951	38582,3684
8,17539948	574,12692	559,952764	14,1741557	200,906689
8,78243513	687,441443	596,557621	90,8838226	8259,8692
23,3793836	921,624792	1476,76821	-555,14342	308184,217
15,793252	747,875856	1019,31689	-271,441031	73680,2335
34,5368917	1571,29473	2149,57711	-578,282378	334410,508
18,9003436	982,059205	1206,67762	-224,618417	50453,4334
14,3884892	279,509158	934,608288	-655,099129	429154,869
30,8988764	2621,34265	1930,20115	691,1415	477676,574
34,7551343	1216,24255	2162,73735	-946,494799	895852,404
21,194605	1337,11138	1345,02388	-7,91249793	62,6076235
31,1173975	3029,27493	1943,37818	1085,89675	1179171,75
suma				6949500,06

Taula D.6. Taula corresponent a l'estudi d'errors per mínims quadrats de línia d'emissió H- α de l'estudi 2, per a una mostra de vint-i-dues galàxies. En vermell es mostren els valors que han estat eliminats mitjançant el mètode de mínims quadrats.

Posicions x	Velocitat y	$y'=40,374x+636,5$	$y-y'$	$(y-y')^2$
23,8870793	2073,89797	1600,91694	472,981031	223711,056
25,8215962	2005,37711	1679,02113	326,355985	106508,229
28,1329923	2393,66197	1772,34143	621,320541	386039,215
22,4489796	1297,32825	1542,8551	-245,526857	60283,4375
6,59274798	520,758521	902,675607	-381,917086	145860,66
8,0763583	22,840286	962,57489	-939,734604	883101,126
19,7486535	2676,88152	1433,83214	1243,04938	1545171,77
28,1690141	2215,50774	1773,79577	441,711968	195109,463
29,5698925	730,889152	1830,35484	-1099,46569	1208824,8
39,8550725	2325,14112	2245,6087	79,5324198	6325,40579
8,17539948	1758,70202	966,573579	792,128444	627467,472
8,78243513	694,344695	991,082036	-296,737341	88053,0497
23,3793836	1827,22288	1580,41923	246,803646	60912,0395
34,5368917	1507,45888	2030,89246	-523,433588	273982,721
18,9003436	1050,65316	1399,58247	-348,929318	121751,669
30,8988764	2110,44243	1884,01124	226,431191	51271,0843
34,7551343	1224,23933	2039,70379	-815,464462	664982,288
21,194605	1402,39356	1492,21098	-89,8174219	8067,16928
31,1173975	2183,53134	1892,8338	290,697537	84505,0582
suma				6741927,71

Taula D.7. Taula corresponent a l'estudi d'errors per mínims quadrats de línia d'absorció Ca K de l'estudi 3, per a una mostra de vint-i-dues galàxies. En vermell es mostren els valors que han estat eliminats mitjançant el mètode de mínims quadrats.

Posicions x	Velocitat y	$y'=62,269x+158,65$	$y-y'$	$(y-y')^2$
20,754717	2172,02254	1451,02547	720,997065	519836,768
26,3157895	1989,11538	1797,30789	191,807481	36790,1098
29,3333333	2461,62554	1985,20733	476,418208	226974,309
23,8353196	1516,60521	1642,85152	-126,246307	15938,13
6,39720849	335,329795	556,997776	-221,66798	49136,6935
7,87683494	160,043766	649,132635	-489,088869	239207,922
19,7132616	2583,56365	1386,17509	1197,38856	1433739,36
25,1716247	1105,0641	1726,0619	-620,997802	385638,27
26,0663507	3292,3289	1781,77559	1510,55331	2281771,29
10,6485963	929,778068	821,727444	108,050624	11674,9374
41,8250951	2758,84968	2763,05684	-4,20716579	17,700244
7,85433774	457,267902	647,731757	-190,463854	36276,4797
8,77893057	693,522985	705,305227	-11,782242	138,821227
23,9130435	990,747122	1647,6913	-656,944182	431575,659
15,8159597	1280,35013	1143,494	136,85613	18729,6003
35,4267311	1874,7984	2364,63712	-489,838717	239941,969
14,14791	990,747122	1039,62621	-48,8790837	2389,16483
14,7058824	335,329795	1074,37059	-739,040793	546181,294
29,5698925	2461,62554	1999,93763	461,687907	213155,724
37,2881356	1280,35013	2480,54492	-1200,19479	1440467,53
21,9560878	1402,28823	1525,83363	-123,545398	15263,4655
32,2580645	2286,33951	2167,32742	119,012093	14163,8783
suma				8159009,08

Taula D.8. Taula corresponent a l'estudi d'errors per mínims quadrats de línia d'absorció Ca H de l'estudi 3, per a una mostra de vint-i-dues galàxies. En vermell es mostren els valors que han estat eliminats mitjançant el mètode de mínims quadrats.

Posicions x	Velocitat y	$y'=54,538x+199,9$	$y-y'$	$(y-y')^2$
20,754717	2273,84477	1331,82075	942,024019	887409,253
26,3157895	2039,66143	1635,11053	404,550899	163661,43
29,3333333	2092,54154	1799,68133	292,860203	85767,0985
23,8353196	1450,4259	1499,83066	-49,4047585	2440,83016
6,39720849	339,943571	548,790957	-208,847386	43617,2306
7,87683494	226,629047	629,486824	-402,857777	162294,388
19,7132616	2508,02812	1275,02186	1233,00626	1520304,43
25,1716247	1216,24255	1572,71007	-356,467515	127069,089
26,0663507	1510,86031	1621,50664	-110,64632	12242,6081
10,6485963	868,744681	780,653146	88,0915349	7760,11853
41,8250951	2273,84477	2480,95703	-207,11226	42895,4883
7,85433774	634,561332	628,259871	6,30146082	39,7084084
8,77893057	747,875856	678,685315	69,1905407	4787,33092
23,9130435	868,744681	1504,06957	-635,324884	403637,708
15,8159597	747,875856	1062,47081	-314,594956	98969,9866
35,4267311	1571,29473	2132,00306	-560,708332	314393,834
14,14791	982,059205	971,498714	10,5604909	111,523968
14,7058824	226,629047	1001,92941	-775,300365	601090,655
29,5698925	2387,1593	1812,5828	574,576502	330138,157
37,2881356	1276,67697	2233,52034	-956,843373	915549,24
21,9560878	1337,11138	1397,34112	-60,229739	3627,62146
32,2580645	2976,39482	1959,19032	1017,2045	1034704,99
suma				6762512,73

Taula D.9. Taula corresponent a l'estudi d'errors per mínims quadrats de línia d'emissió H- α de l'estudi 3, per a una mostra de vint-i-dues galàxies. En vermell es mostren els valors que han estat eliminats mitjançant el mètode de mínims quadrats.

Posicions x	Velocitat y	$y'=38,09x+703,44$	$y-y'$	$(y-y')^2$
20,754717	2073,89797	1493,98717	579,9108	336296,535
26,3157895	2041,92157	1705,80842	336,113148	112972,048
29,3333333	2393,66197	1820,74667	572,915307	328231,949
23,8353196	1333,8727	1611,32732	-277,454621	76981,0668
6,39720849	520,758521	947,109671	-426,35115	181775,304
7,87683494	59,3847436	1003,46864	-944,083899	891294,409
19,7132616	2676,88152	1454,31814	1222,56338	1494661,23
25,1716247	2215,50774	1662,22719	553,280557	306119,375
26,0663507	767,43361	1696,3073	-928,873689	862806,33
41,8250951	2325,14112	2296,55787	28,5832447	817,001877
7,85433774	1722,15756	1002,61172	719,54584	517746,217
8,77893057	662,368294	1037,82947	-375,461171	140971,091
23,9130435	1827,22288	1614,28783	212,935054	45341,3374
35,4267311	1507,45888	2052,84419	-545,38531	297445,137
14,14791	1050,65316	1242,33389	-191,680734	36741,5039
29,5698925	2110,44243	1829,7572	280,685223	78784,1942
37,2881356	1192,26293	2123,74508	-931,482155	867659,006
21,9560878	1402,39356	1539,74739	-137,353824	18866,0731
32,2580645	2183,53134	1932,14968	251,381665	63192,7414
suma				6658702,55

Annex E: Estudi nucleosíntesi primordial

Taula E.1. Llista dels isòtops utilitzats en aquest estudi de nucleosíntesi primordial.

Nom	A	Z
H (protó, p)	1	1
Neutró (n)	1	0
H (deuteri, D)	2	1
H (triti, T)	3	1
He	3	2
He	4	2
He	6	2
Li	6	3
Li	7	3
Be	7	4
Li	8	3
Be	8	4
B	8	5
C	9	6
Be	9	4
Li	9	3
Be	10	4
B	10	5

C	10	6
N	11	7
C	11	6
Be	11	4
B	11	5
N	12	7
Be	12	4
B	12	5
C	12	6
N	13	7
O	13	8
C	13	6
B	13	5
B	14	5
N	14	7
C	14	6
F	14	9
O	14	8
Ne	15	10
O	15	8
C	15	6

N	15	7
C	16	6
F	16	9
O	16	8
Ne	16	10
N	16	7
C	17	6
Ne	17	10
F	17	9
O	17	8
N	17	7
N	18	7
Ne	18	10
O	18	8
F	18	9
C	18	6
O	19	8
F	19	9
N	19	7
Ne	19	10

Taula E.2. Llista de les reaccions (interaccions) nuclears utilitzades en aquest estudi de nucleosíntesi primordial.

- 1 ${}^1_0\text{n} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + 0,782 \text{ MEV}$
- 2 ${}^3_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H} + 0,019 \text{ MEV}$
- 3 ${}^3_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_1\text{H} - 0,019 \text{ MEV}$
- 4 ${}^6_2\text{He} + {}^6_2\text{He} \rightarrow {}^9_4\text{Be} + {}^3_2\text{He} + 3,508 \text{ MEV}$
- 5 ${}^9_3\text{Li} + {}^9_3\text{Li} \rightarrow {}^{12}_4\text{Be} + {}^3_2\text{He} + 13,607 \text{ MEV}$
- 6 ${}^7_4\text{Be} + {}^7_4\text{Be} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_1\text{H} + 0,862 \text{ MEV}$
- 7 ${}^{10}_5\text{Be} + {}^{10}_5\text{Be} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} + 0,556 \text{ MEV}$
- 8 ${}^{11}_5\text{Be} + {}^{11}_5\text{Be} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} + 11,506 \text{ MEV}$
- 9 ${}^{12}_5\text{Be} + {}^{12}_5\text{Be} \rightarrow {}^{15}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} + 11,708 \text{ MEV}$
- 10 ${}^{12}_5\text{B} + {}^{12}_5\text{B} \rightarrow {}^{15}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} + 13,369 \text{ MEV}$
- 11 ${}^{13}_5\text{B} + {}^{13}_5\text{B} \rightarrow {}^{16}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} + 13,437 \text{ MEV}$
- 12 ${}^{14}_5\text{B} + {}^{14}_5\text{B} \rightarrow {}^{17}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} + 20,644 \text{ MEV}$
- 13 ${}^{10}_6\text{C} + {}^{10}_6\text{C} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^3_2\text{He} + 3,648 \text{ MEV}$
- 14 ${}^{11}_6\text{C} + {}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} + 1,982 \text{ MEV}$
- 15 ${}^{14}_6\text{C} + {}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{17}_7\text{N} + 0,156 \text{ MEV}$
- 16 ${}^{15}_6\text{C} + {}^{15}_6\text{C} \rightarrow {}^{18}_7\text{N} + 9,772 \text{ MEV}$
- 17 ${}^{17}_6\text{C} + {}^{17}_6\text{C} \rightarrow {}^{20}_7\text{N} + 13,167 \text{ MEV}$
- 18 ${}^{18}_6\text{C} + {}^{18}_6\text{C} \rightarrow {}^{21}_7\text{N} + 11,10 \text{ MEV}$
- 19 ${}^{11}_7\text{N} + {}^{11}_7\text{N} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} + 14,260 \text{ MEV}$
- 20 ${}^{12}_7\text{N} + {}^{12}_7\text{N} \rightarrow {}^{15}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} + 17,338 \text{ MEV}$
- 21 ${}^{13}_7\text{N} + {}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{16}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} + 2,220 \text{ MEV}$
- 22 ${}^{16}_7\text{N} + {}^{16}_7\text{N} \rightarrow {}^{19}_8\text{O} + 10,421 \text{ MEV}$
- 23 ${}^{17}_7\text{N} + {}^{17}_7\text{N} \rightarrow {}^{20}_8\text{O} + 8,680 \text{ MEV}$
- 24 ${}^{18}_7\text{N} + {}^{18}_7\text{N} \rightarrow {}^{21}_8\text{O} + 13,896 \text{ MEV}$
- 25 ${}^{19}_7\text{N} + {}^{19}_7\text{N} \rightarrow {}^{22}_8\text{O} + 12,527 \text{ MEV}$

- 26 $1\text{O } 13(0,0) 1\text{N } 13 + 17,767 \text{ MEV}$
- 27 $1\text{O } 14(0,0) 1\text{N } 14 + 5,144 \text{ MEV}$
- 28 $1\text{O } 15(0,0) 1\text{N } 15 + 2,754 \text{ MEV}$
- 29 $1\text{O } 19(0,0) 1\text{F } 19 + 4,822 \text{ MEV}$
- 30 $1\text{F } 17(0,0) 1\text{O } 17 + 2,761 \text{ MEV}$
- 31 $1\text{F } 18(0,0) 1\text{O } 18 + 1,655 \text{ MEV}$
- 32 $1\text{NE } 18(0,0) 1\text{F } 18 + 4,444 \text{ MEV}$
- 33 $1\text{NE } 19(0,0) 1\text{F } 19 + 3,239 \text{ MEV}$
- 34 $1\text{H } 2(0,1\text{n}) 1\text{H } 1 + -2,224 \text{ MEV}$
- 35 $1\text{H } 3(0,1\text{n}) 1\text{H } 2 + -6,257 \text{ MEV}$
- 36 $1\text{HE } 3(0,1\text{H } 1) 1\text{H } 2 + -5,493 \text{ MEV}$
- 37 $1\text{HE } 4(0,1\text{n}) 1\text{HE } 3 + -20,577 \text{ MEV}$
- 38 $1\text{HE } 4(0,1\text{H } 1) 1\text{H } 3 + -19,814 \text{ MEV}$
- 39 $1\text{HE } 4(0,0) 2\text{H } 2 + -23,847 \text{ MEV}$
- 40 $1\text{LI } 6(0,1\text{H } 2) 1\text{HE } 4 + -1,474 \text{ MEV}$
- 41 $1\text{LI } 7(0,1\text{n}) 1\text{LI } 6 + -7,250 \text{ MEV}$
- 42 $1\text{LI } 7(0,1\text{H } 3) 1\text{HE } 4 + -2,467 \text{ MEV}$
- 43 $1\text{LI } 8(0,1\text{n}) 1\text{LI } 7 + -2,033 \text{ MEV}$
- 44 $1\text{LI } 8(0,0) 2\text{HE } 4 + 16,097 \text{ MEV}$
- 45 $1\text{LI } 9(0,1\text{n}) 1\text{LI } 8 + -4,062 \text{ MEV}$
- 46 $1\text{BE } 7(0,1\text{H } 1) 1\text{LI } 6 + -5,606 \text{ MEV}$
- 47 $1\text{BE } 7(0,1\text{HE } 3) 1\text{HE } 4 + -1,586 \text{ MEV}$
- 48 $1\text{BE } 10(0,1\text{n}) 1\text{BE } 9 + -6,812 \text{ MEV}$
- 49 $1\text{BE } 11(0,1\text{n}) 1\text{BE } 10 + -5,044 \text{ MEV}$
- 50 $1\text{BE } 11(0,1\text{HE } 4) 1\text{LI } 7 + 2,841 \text{ MEV}$

- 51 $1 \text{ BE } 12 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ BE } 11 + -3,168 \text{ MEV}$
- 52 $1 \text{ BE } 12 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ B } 11 + 8,337 \text{ MEV}$
- 53 $1 \text{ B } 8 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ BE } 7 + -0,138 \text{ MEV}$
- 54 $1 \text{ B } 8 (0, 0) 2 \text{ HE } 4 + 18,072 \text{ MEV}$
- 55 $1 \text{ B } 10 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ BE } 9 + -6,586 \text{ MEV}$
- 56 $1 \text{ B } 10 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ LI } 6 + -4,460 \text{ MEV}$
- 57 $1 \text{ B } 11 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ B } 10 + -11,454 \text{ MEV}$
- 58 $1 \text{ B } 11 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ BE } 10 + -11,228 \text{ MEV}$
- 59 $1 \text{ B } 11 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ LI } 7 + -8,665 \text{ MEV}$
- 60 $1 \text{ B } 12 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ B } 11 + -3,369 \text{ MEV}$
- 61 $1 \text{ B } 12 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ LI } 8 + -10,000 \text{ MEV}$
- 62 $1 \text{ B } 13 (0, 1 \text{ n } 1) 1 \text{ B } 12 + -4,879 \text{ MEV}$
- 63 $1 \text{ B } 13 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ LI } 9 + -10,817 \text{ MEV}$
- 64 $1 \text{ B } 13 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ C } 12 + 8,491 \text{ MEV}$
- 65 $1 \text{ B } 14 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ B } 13 + -0,969 \text{ MEV}$
- 66 $1 \text{ B } 14 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ C } 13 + 12,467 \text{ MEV}$
- 67 $1 \text{ C } 9 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ B } 8 + -1,300 \text{ MEV}$
- 68 $1 \text{ C } 11 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ B } 10 + -8,689 \text{ MEV}$
- 69 $1 \text{ C } 11 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ BE } 7 + -7,545 \text{ MEV}$
- 70 $1 \text{ C } 12 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ C } 11 + -18,721 \text{ MEV}$
- 71 $1 \text{ C } 12 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ B } 11 + -15,957 \text{ MEV}$
- 72 $1 \text{ C } 13 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ C } 12 + -4,946 \text{ MEV}$
- 73 $1 \text{ C } 14 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ C } 13 + -8,176 \text{ MEV}$
- 74 $1 \text{ C } 14 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ BE } 10 + -12,012 \text{ MEV}$
- 75 $1 \text{ C } 15 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ C } 14 + -1,218 \text{ MEV}$

76	1 C 16 (0 , 1 n)	1 C 15 +	-4,250 MEV
77	1 C 16 (0 , 1 n)	1 N 15 +	5,521 MEV
78	1 C 17 (0 , 1 n)	1 C 16 +	-0,735 MEV
79	1 C 17 (0 , 1 n)	1 N 16 +	7,284 MEV
80	1 C 18 (0 , 1 n)	1 N 17 +	8,980 MEV
81	1 N 12 (0 , 1 H 1)	1 C 11 +	-0,601 MEV
82	1 N 13 (0 , 1 H 1)	1 C 12 +	-1,943 MEV
83	1 N 14 (0 , 1 n)	1 N 13 +	-10,554 MEV
84	1 N 14 (0 , 1 H 1)	1 C 13 +	-7,551 MEV
85	1 N 15 (0 , 1 n)	1 N 14 +	-10,832 MEV
86	1 N 15 (0 , 1 H 1)	1 C 14 +	-10,207 MEV
87	1 N 16 (0 , 1 n)	1 N 15 +	-2,491 MEV
88	1 N 17 (0 , 1 n)	1 N 16 +	-5,882 MEV
89	1 N 17 (0 , 1 HE 4)	1 B 13 +	-11,116 MEV
90	1 N 17 (0 , 1 n)	1 O 16 +	4,537 MEV
91	1 N 18 (0 , 1 n)	1 N 17 +	-2,825 MEV
92	1 N 18 (0 , 1 n)	1 O 17 +	5,852 MEV
93	1 N 18 (0 , 1 HE 4)	1 C 14 +	7,669 MEV
94	1 N 19 (0 , 1 n)	1 N 18 +	-5,315 MEV
95	1 N 19 (0 , 1 n)	1 O 18 +	8,572 MEV
96	1 O 13 (0 , 1 H 1)	1 N 12 +	-1,516 MEV
97	1 O 13 (0 , 1 H 1)	1 C 12 +	15,823 MEV
98	1 O 14 (0 , 1 H 1)	1 N 13 +	-4,627 MEV
99	1 O 15 (0 , 1 H 1)	1 N 14 +	-7,297 MEV
100	1 O 16 (0 , 1 H 1)	1 N 15 +	-12,127 MEV

- 101 $1 \text{ O } 16 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ C } 12 + -7,162 \text{ MEV}$
- 102 $1 \text{ O } 17 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ O } 16 + -4,143 \text{ MEV}$
- 103 $1 \text{ O } 18 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ O } 17 + -8,044 \text{ MEV}$
- 104 $1 \text{ O } 18 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ C } 14 + -6,226 \text{ MEV}$
- 105 $1 \text{ O } 19 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ O } 18 + -3,957 \text{ MEV}$
- 106 $1 \text{ F } 17 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ O } 16 + -0,600 \text{ MEV}$
- 107 $1 \text{ F } 18 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ F } 17 + -9,150 \text{ MEV}$
- 108 $1 \text{ F } 18 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ O } 17 + -5,607 \text{ MEV}$
- 109 $1 \text{ F } 18 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ N } 14 + -4,415 \text{ MEV}$
- 110 $1 \text{ F } 19 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ F } 18 + -10,431 \text{ MEV}$
- 111 $1 \text{ F } 19 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ O } 18 + -7,995 \text{ MEV}$
- 112 $1 \text{ F } 19 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ N } 15 + -4,014 \text{ MEV}$
- 113 $1 \text{ NE } 16 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ NE } 15 + -8,071 \text{ MEV}$
- 114 $1 \text{ NE } 17 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ NE } 16 + -15,575 \text{ MEV}$
- 115 $1 \text{ NE } 17 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ O } 16 + 13,909 \text{ MEV}$
- 116 $1 \text{ NE } 17 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ N } 13 + 8,691 \text{ MEV}$
- 117 $1 \text{ NE } 18 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ NE } 17 + -19,237 \text{ MEV}$
- 118 $1 \text{ NE } 18 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ F } 17 + -3,924 \text{ MEV}$
- 119 $1 \text{ NE } 18 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ O } 14 + -5,112 \text{ MEV}$
- 120 $1 \text{ NE } 19 (0, 1 \text{ n}) 1 \text{ NE } 18 + -11,639 \text{ MEV}$
- 121 $1 \text{ NE } 19 (0, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ F } 18 + -6,411 \text{ MEV}$
- 122 $1 \text{ NE } 19 (0, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ O } 15 + -3,529 \text{ MEV}$
- 123 $1 \text{ HE } 6 (0, 2 \text{ n}) 1 \text{ HE } 4 + -0,975 \text{ MEV}$
- 124 $1 \text{ BE } 9 (0, 1 \text{ n}) 2 \text{ HE } 4 + -1,574 \text{ MEV}$
- 125 $1 \text{ LI } 9 (0, 1 \text{ n}) 2 \text{ HE } 4 + 12,033 \text{ MEV}$

- 126 $1\text{ B } 12(0, 0) 3\text{ HE } 4+ 6,094\text{ MEV}$
- 127 $1\text{ C } 9(0, 1\text{ H } 1) 2\text{ HE } 4+ 16,772\text{ MEV}$
- 128 $1\text{ C } 12(0, 0) 3\text{ HE } 4+ -7,275\text{ MEV}$
- 129 $1\text{ N } 12(0, 0) 3\text{ HE } 4+ 10,063\text{ MEV}$
- 130 $1\text{ H } 1(1\text{ n}, 0) 1\text{ H } 2+ 2,224\text{ MEV}$
- 131 $2\text{ H } 1(0, 0) 1\text{ H } 2+ 1,442\text{ MEV}$
- 132 $2\text{ H } 1(0, 0) 1\text{ H } 2+ 1,442\text{ MEV}$
- 133 $1\text{ H } 2(1\text{ n}, 0) 1\text{ H } 3+ 6,257\text{ MEV}$
- 134 $1\text{ H } 2(1\text{ H } 1, 0) 1\text{ HE } 3+ 5,493\text{ MEV}$
- 135 $2\text{ H } 2(0, 0) 1\text{ HE } 4+ 23,847\text{ MEV}$
- 136 $1\text{ H } 3(1\text{ H } 1, 0) 1\text{ HE } 4+ 19,814\text{ MEV}$
- 137 $1\text{ HE } 3(1\text{ n}, 0) 1\text{ HE } 4+ 20,577\text{ MEV}$
- 138 $1\text{ HE } 3(1\text{ H } 1, 0) 1\text{ HE } 4+ 19,796\text{ MEV}$
- 139 $1\text{ HE } 4(1\text{ H } 2, 0) 1\text{ LI } 6+ 1,474\text{ MEV}$
- 140 $1\text{ HE } 4(1\text{ H } 3, 0) 1\text{ LI } 7+ 2,467\text{ MEV}$
- 141 $1\text{ HE } 4(1\text{ HE } 3, 0) 1\text{ BE } 7+ 1,586\text{ MEV}$
- 142 $1\text{ LI } 6(1\text{ n}, 0) 1\text{ LI } 7+ 7,250\text{ MEV}$
- 143 $1\text{ LI } 6(1\text{ H } 1, 0) 1\text{ BE } 7+ 5,606\text{ MEV}$
- 144 $1\text{ LI } 6(1\text{ HE } 4, 0) 1\text{ B } 10+ 4,460\text{ MEV}$
- 145 $1\text{ LI } 7(1\text{ n}, 0) 1\text{ LI } 8+ 2,033\text{ MEV}$
- 146 $1\text{ LI } 7(1\text{ HE } 4, 0) 1\text{ B } 11+ 8,665\text{ MEV}$
- 147 $1\text{ LI } 8(1\text{ n}, 0) 1\text{ LI } 9+ 4,062\text{ MEV}$
- 148 $1\text{ LI } 8(1\text{ HE } 4, 0) 1\text{ B } 12+ 10,000\text{ MEV}$
- 149 $1\text{ LI } 9(1\text{ HE } 4, 0) 1\text{ B } 13+ 10,817\text{ MEV}$
- 150 $1\text{ BE } 7(1\text{ H } 1, 0) 1\text{ B } 8+ 0,138\text{ MEV}$

- 151 $1 \text{ BE } 7 (1 \text{ HE } 4, 0) \rightarrow 1 \text{ C } 11 + 7,545 \text{ MEV}$
- 152 $1 \text{ BE } 9 (1 \text{ n}, 0) \rightarrow 1 \text{ BE } 10 + 6,812 \text{ MEV}$
- 153 $1 \text{ BE } 9 (1 \text{ H } 1, 0) \rightarrow 1 \text{ B } 10 + 6,586 \text{ MEV}$
- 154 $1 \text{ BE } 10 (1 \text{ n}, 0) \rightarrow 1 \text{ BE } 11 + 0,504 \text{ MEV}$
- 155 $1 \text{ BE } 10 (1 \text{ H } 1, 0) \rightarrow 1 \text{ B } 11 + 11,228 \text{ MEV}$
- 156 $1 \text{ BE } 10 (1 \text{ HE } 4, 0) \rightarrow 1 \text{ C } 14 + 12,012 \text{ MEV}$
- 157 $1 \text{ BE } 11 (1 \text{ n}, 0) \rightarrow 1 \text{ BE } 12 + 3,168 \text{ MEV}$
- 158 $1 \text{ B } 8 (1 \text{ H } 1, 0) \rightarrow 1 \text{ C } 9 + 1,300 \text{ MEV}$
- 159 $1 \text{ B } 10 (1 \text{ n}, 0) \rightarrow 1 \text{ B } 11 + 11,454 \text{ MEV}$
- 160 $1 \text{ B } 10 (1 \text{ H } 1, 0) \rightarrow 1 \text{ C } 11 + 8,689 \text{ MEV}$
- 161 $1 \text{ B } 11 (1 \text{ n}, 0) \rightarrow 1 \text{ B } 12 + 3,369 \text{ MEV}$
- 162 $1 \text{ B } 11 (1 \text{ H } 1, 0) \rightarrow 1 \text{ C } 12 + 15,957 \text{ MEV}$
- 163 $1 \text{ B } 12 (1 \text{ n}, 0) \rightarrow 1 \text{ B } 13 + 4,879 \text{ MEV}$
- 164 $1 \text{ B } 13 (1 \text{ n}, 0) \rightarrow 1 \text{ B } 14 + 0,969 \text{ MEV}$
- 165 $1 \text{ B } 13 (1 \text{ HE } 4, 0) \rightarrow 1 \text{ N } 17 + 11,116 \text{ MEV}$
- 166 $1 \text{ C } 11 (1 \text{ n}, 0) \rightarrow 1 \text{ C } 12 + 18,721 \text{ MEV}$
- 167 $1 \text{ C } 11 (1 \text{ H } 1, 0) \rightarrow 1 \text{ N } 12 + 0,601 \text{ MEV}$
- 168 $1 \text{ C } 12 (1 \text{ n}, 0) \rightarrow 1 \text{ C } 13 + 4,946 \text{ MEV}$
- 169 $1 \text{ C } 12 (1 \text{ H } 1, 0) \rightarrow 1 \text{ N } 13 + 1,943 \text{ MEV}$
- 170 $1 \text{ C } 12 (1 \text{ HE } 4, 0) \rightarrow 1 \text{ O } 16 + 7,162 \text{ MEV}$
- 171 $1 \text{ C } 13 (1 \text{ n}, 0) \rightarrow 1 \text{ C } 14 + 8,176 \text{ MEV}$
- 172 $1 \text{ C } 13 (1 \text{ H } 1, 0) \rightarrow 1 \text{ N } 14 + 7,551 \text{ MEV}$
- 173 $1 \text{ C } 14 (1 \text{ n}, 0) \rightarrow 1 \text{ C } 15 + 1,218 \text{ MEV}$
- 174 $1 \text{ C } 14 (1 \text{ H } 1, 0) \rightarrow 1 \text{ N } 15 + 10,207 \text{ MEV}$
- 175 $1 \text{ C } 14 (1 \text{ HE } 4, 0) \rightarrow 1 \text{ O } 18 + 6,226 \text{ MEV}$

- 176 $1\text{C } 15 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{C } 16 + 4,250\text{ MEV}$
- 177 $1\text{C } 16 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{C } 17 + 0,735\text{ MEV}$
- 178 $1\text{N } 12 (1\text{H } 1, 0) \rightarrow 1\text{O } 13 + 1,516\text{ MEV}$
- 179 $1\text{N } 13 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{N } 14 + 10,554\text{ MEV}$
- 180 $1\text{N } 13 (1\text{H } 1, 0) \rightarrow 1\text{O } 14 + 4,627\text{ MEV}$
- 181 $1\text{N } 14 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{N } 15 + 10,832\text{ MEV}$
- 182 $1\text{N } 14 (1\text{H } 1, 0) \rightarrow 1\text{O } 15 + 7,297\text{ MEV}$
- 183 $1\text{N } 14 (1\text{HE } 4, 0) \rightarrow 1\text{F } 18 + 4,415\text{ MEV}$
- 184 $1\text{N } 15 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{N } 16 + 2,491\text{ MEV}$
- 185 $1\text{N } 15 (1\text{H } 1, 0) \rightarrow 1\text{O } 16 + 12,127\text{ MEV}$
- 186 $1\text{N } 15 (1\text{HE } 4, 0) \rightarrow 1\text{F } 19 + 4,014\text{ MEV}$
- 187 $1\text{N } 16 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{N } 17 + 5,882\text{ MEV}$
- 188 $1\text{N } 17 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{N } 18 + 2,825\text{ MEV}$
- 189 $1\text{N } 18 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{N } 19 + 5,315\text{ MEV}$
- 190 $1\text{O } 14 (1\text{HE } 4, 0) \rightarrow 1\text{NE } 18 + 5,112\text{ MEV}$
- 191 $1\text{O } 15 (1\text{HE } 4, 0) \rightarrow 1\text{NE } 19 + 3,529\text{ MEV}$
- 192 $1\text{O } 16 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{O } 17 + 4,143\text{ MEV}$
- 193 $1\text{O } 16 (1\text{H } 1, 0) \rightarrow 1\text{F } 17 + 0,600\text{ MEV}$
- 194 $1\text{O } 17 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{O } 18 + 8,044\text{ MEV}$
- 195 $1\text{O } 17 (1\text{H } 1, 0) \rightarrow 1\text{F } 18 + 5,607\text{ MEV}$
- 196 $1\text{O } 18 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{O } 19 + 3,957\text{ MEV}$
- 197 $1\text{O } 18 (1\text{H } 1, 0) \rightarrow 1\text{F } 19 + 7,995\text{ MEV}$
- 198 $1\text{F } 17 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{F } 18 + 9,150\text{ MEV}$
- 199 $1\text{F } 17 (1\text{H } 1, 0) \rightarrow 1\text{NE } 18 + 3,924\text{ MEV}$
- 200 $1\text{F } 18 (1\text{n}, 0) \rightarrow 1\text{F } 19 + 10,431\text{ MEV}$

- 201 $1 F_{18} (1 H_{1,0}) 1 NE_{19} + 6,411 \text{ MEV}$
- 202 $1 NE_{15} (1 n, 0) 1 NE_{16} + 8,071 \text{ MEV}$
- 203 $1 NE_{16} (1 n, 0) 1 NE_{17} + 15,575 \text{ MEV}$
- 204 $1 NE_{17} (1 n, 0) 1 NE_{18} + 19,237 \text{ MEV}$
- 205 $1 NE_{18} (1 n, 0) 1 NE_{19} + 11,639 \text{ MEV}$
- 206 $2 H_2 (0, 1 n) 1 HE_3 + 3,269 \text{ MEV}$
- 207 $2 H_2 (0, 1 H_1) 1 H_3 + 4,033 \text{ MEV}$
- 208 $1 H_3 (1 H_1, 1 n) 1 HE_3 + -0,764 \text{ MEV}$
- 209 $1 H_3 (1 H_1, 0) 2 H_2 + -4,033 \text{ MEV}$
- 210 $1 H_3 (1 H_2, 1 n) 1 HE_4 + 17,589 \text{ MEV}$
- 211 $1 HE_3 (1 n, 1 H_1) 1 H_3 + 0,764 \text{ MEV}$
- 212 $1 HE_3 (1 n, 0) 2 H_2 + -3,269 \text{ MEV}$
- 213 $1 HE_3 (1 H_2, 1 H_1) 1 HE_4 + 18,353 \text{ MEV}$
- 214 $1 HE_3 (1 H_3, 1 H_2) 1 HE_4 + 14,320 \text{ MEV}$
- 215 $1 HE_4 (1 n, 1 H_2) 1 H_3 + -17,589 \text{ MEV}$
- 216 $1 HE_4 (1 H_1, 1 H_2) 1 HE_3 + -18,353 \text{ MEV}$
- 217 $1 HE_4 (1 H_2, 1 H_3) 1 HE_3 + -14,320 \text{ MEV}$
- 218 $1 HE_4 (1 H_3, 1 n) 1 LI_6 + -4,782 \text{ MEV}$
- 219 $1 HE_4 (1 HE_3, 1 H_1) 1 LI_6 + -4,020 \text{ MEV}$
- 220 $2 HE_4 (0, 1 n) 1 BE_7 + -18,990 \text{ MEV}$
- 221 $2 HE_4 (0, 1 H_1) 1 LI_7 + -17,347 \text{ MEV}$
- 222 $1 LI_6 (1 n, 1 H_3) 1 HE_4 + 4,782 \text{ MEV}$
- 223 $1 LI_6 (1 H_1, 1 HE_3) 1 HE_4 + 4,020 \text{ MEV}$
- 224 $1 LI_6 (1 H_2, 1 n) 1 BE_7 + 3,382 \text{ MEV}$
- 225 $1 LI_6 (1 H_2, 1 H_1) 1 LI_7 + 5,026 \text{ MEV}$

- 226 1 LI 6 (1 HE 4, 1 H 1) 1 BE 9 + -2,125 MEV
- 227 1 LI 7 (1 H 1, 1 n) 1 BE 7 + -1,644 MEV
- 228 1 LI 7 (1 H 1, 1 H 2) 1 LI 6 + -5,026 MEV
- 229 1 LI 7 (1 H 1, 0) 2 HE 4 + 17,347 MEV
- 230 1 LI 7 (1 H 2, 1 H 1) 1 LI 8 + -0,191 MEV
- 231 1 LI 7 (1 H 3, 1 n) 1 BE 9 + 10,438 MEV
- 232 1 LI 7 (1 HE 4, 1 n) 1 B 10 + -2,790 MEV
- 233 1 LI 7 (1 HE 4, 1 H 1) 1 BE 10 + -2,564 MEV
- 234 1 LI 8 (1 H 1, 1 H 2) 1 LI 7 + 0,191 MEV
- 235 1 LI 8 (1 H 2, 1 n) 1 BE 9 + 14,662 MEV
- 236 1 LI 8 (1 HE 4, 1 n) 1 B 11 + 6,631 MEV
- 237 1 LI 8 (1 HE 4, 1 H 1) 1 BE 11 + -4,093 MEV
- 238 1 LI 9 (1 HE 4, 1 n) 1 B 12 + 5,938 MEV
- 239 1 BE 7 (1 n, 1 H 1) 1 LI 7 + 1,644 MEV
- 240 1 BE 7 (1 n, 1 H 2) 1 LI 6 + -3,382 MEV
- 241 1 BE 7 (1 n, 0) 2 HE 4 + 18,990 MEV
- 242 1 BE 7 (1 HE 4, 1 H 1) 1 B 10 + -1,145 MEV
- 243 1 BE 8 (1 HE 4, 1 n) 1 C 11 + -11,355 MEV
- 244 1 BE 9 (1 n, 1 H 2) 1 LI 8 + -14,662 MEV
- 245 1 BE 9 (1 n, 1 H 3) 1 LI 7 + -10,438 MEV
- 246 1 BE 9 (1 H 1, 1 HE 4) 1 LI 6 + 2,125 MEV
- 247 1 BE 9 (1 H 3, 1 n) 1 B 11 + 9,559 MEV
- 248 1 BE 9 (1 HE 4, 1 n) 1 C 12 + 5,701 MEV
- 249 1 BE 9 (1 HE 4, 1 H 1) 1 B 12 + -6,886 MEV
- 250 1 BE 10 (1 H 1, 1 HE 4) 1 LI 7 + 2,564 MEV

- 251 1 BE 10 (1 HE 4, 1 n) 1 C 13 + 3,836 MEV
- 252 1 BE 11 (1 H 1, 1 HE 4) 1 LI 8 + 4,093 MEV
- 253 1 BE 11 (1 HE 4, 1 n) 1 C 14 + 11,508 MEV
- 254 1 B 8 (1 HE 4, 1 H 1) 1 C 11 + 7,406 MEV
- 255 1 B 10 (1 n, 1 HE 4) 1 LI 7 + 2,790 MEV
- 256 1 B 10 (1 H 1, 1 HE 4) 1 BE 7 + 1,145 MEV
- 257 1 B 10 (1 HE 4, 1 n) 1 N 13 + 1,059 MEV
- 258 1 B 10 (1 HE 4, 1 H 1) 1 C 13 + 4,062 MEV
- 259 1 B 11 (1 n, 1 H 3) 1 BE 9 + -9,559 MEV
- 260 1 B 11 (1 n, 1 HE 4) 1 LI 8 + -6,631 MEV
- 261 1 B 11 (1 H 1, 1 n) 1 C 11 + -2,764 MEV
- 262 1 B 11 (1 HE 4, 1 n) 1 N 14 + 0,159 MEV
- 263 1 B 11 (1 HE 4, 1 H 1) 1 C 14 + 0,784 MEV
- 264 1 B 12 (1 n, 1 HE 4) 1 LI 9 + -5,938 MEV
- 265 1 B 12 (1 H 1, 1 n) 1 C 12 + 12,588 MEV
- 266 1 B 12 (1 H 1, 1 HE 4) 1 BE 9 + 6,886 MEV
- 267 1 B 12 (1 HE 4, 1 n) 1 N 15 + 7,622 MEV
- 268 1 B 13 (1 HE 4, 1 n) 1 N 16 + 5,234 MEV
- 269 1 C 9 (1 HE 4, 1 H 1) 1 N 12 + 6,711 MEV
- 270 1 C 11 (1 n, 1 H 1) 1 B 11 + 2,764 MEV
- 271 1 C 11 (1 n, 1 HE 4) 1 BE 8 + 11,355 MEV
- 272 1 C 11 (1 H 1, 1 HE 4) 1 B 8 + -7,406 MEV
- 273 1 C 11 (1 HE 4, 1 H 1) 1 N 14 + 2,923 MEV
- 274 1 C 12 (1 n, 1 H 1) 1 B 12 + -12,588 MEV
- 275 1 C 12 (1 n, 1 HE 4) 1 BE 9 + -5,701 MEV

276	1 C 12 (1 HE 4, 1 n) 1 O 15 + -8,502 MEV
277	1 C 12 (1 HE 4, 1 H 1) 1 N 15 + -4,965 MEV
278	1 C 13 (1 n, 1 HE 4) 1 BE 10 + -3,836 MEV
279	1 C 13 (1 H 1, 1 n) 1 N 13 + -3,003 MEV
280	1 C 13 (1 H 1, 1 HE 4) 1 B 10 + -4,062 MEV
281	1 C 13 (1 H 2, 1 n) 1 N 14 + 5,327 MEV
282	1 C 13 (1 HE 4, 1 n) 1 O 16 + 2,216 MEV
283	1 C 13 (1 HE 4, 1 H 1) 1 N 16 + -7,421 MEV
284	1 C 14 (1 n, 1 HE 4) 1 BE 11 + -11,508 MEV
285	1 C 14 (1 H 1, 1 n) 1 N 14 + -0,626 MEV
286	1 C 14 (1 H 1, 1 HE 4) 1 B 11 + -0,784 MEV
287	1 C 14 (1 H 2, 1 n) 1 N 15 + 7,983 MEV
288	1 C 14 (1 HE 4, 1 n) 1 O 17 + -1,817 MEV
289	1 C 15 (1 H 1, 1 n) 1 N 15 + 8,989 MEV
290	1 C 15 (1 HE 4, 1 n) 1 O 18 + 5,009 MEV
291	1 N 12 (1 H 1, 1 HE 4) 1 C 9 + -6,711 MEV
292	1 N 12 (1 HE 4, 1 H 1) 1 O 15 + 9,618 MEV
293	1 N 13 (1 n, 1 H 1) 1 C 13 + 3,003 MEV
294	1 N 13 (1 n, 1 HE 4) 1 B 10 + -1,059 MEV
295	1 N 13 (1 HE 4, 1 H 1) 1 O 16 + 5,218 MEV
296	1 N 14 (1 n, 1 H 1) 1 C 14 + 0,626 MEV
297	1 N 14 (1 n, 1 H 2) 1 C 13 + -5,327 MEV
298	1 N 14 (1 n, 1 HE 4) 1 B 11 + -0,159 MEV
299	1 N 14 (1 H 1, 1 n) 1 O 14 + -5,925 MEV
300	1 N 14 (1 H 1, 1 HE 4) 1 C 11 + -2,923 MEV

- 301 1 N 14 (1 HE 4, 1 n) 1 F 17 + -4,735 MEV
- 302 1 N 14 (1 HE 4, 1 H 1) 1 O 17 + -1,192 MEV
- 303 1 N 15 (1 n, 1 H 1) 1 C 15 + -8,989 MEV
- 304 1 N 15 (1 n, 1 H 2) 1 C 14 + -7,983 MEV
- 305 1 N 15 (1 n, 1 HE 4) 1 B 12 + -7,622 MEV
- 306 1 N 15 (1 H 1, 1 n) 1 O 15 + -3,536 MEV
- 307 1 N 15 (1 H 1, 1 HE 4) 1 C 12 + 4,965 MEV
- 308 1 N 15 (1 HE 4, 1 n) 1 F 18 + -6,417 MEV
- 309 1 N 15 (1 HE 4, 1 H 1) 1 O 18 + -3,981 MEV
- 310 1 N 16 (1 n, 1 HE 4) 1 B 13 + -5,234 MEV
- 311 1 N 16 (1 H 1, 1 n) 1 O 16 + 9,637 MEV
- 312 1 N 16 (1 H 1, 1 HE 4) 1 C 13 + 7,421 MEV
- 313 1 N 16 (1 HE 4, 1 n) 1 F 19 + 1,523 MEV
- 314 1 N 16 (1 HE 4, 1 H 1) 1 O 19 + -2,514 MEV
- 315 1 O 13 (1 HE 4, 1 n) 1 NE 16 + -6,525 MEV
- 316 1 O 14 (1 n, 1 H 1) 1 N 14 + 5,925 MEV
- 317 1 O 14 (1 HE 4, 1 n) 1 NE 17 + -14,125 MEV
- 318 1 O 14 (1 HE 4, 1 H 1) 1 F 17 + 1,191 MEV
- 319 1 O 15 (1 n, 1 H 1) 1 N 15 + 3.536 MEV
- 320 1 O 15 (1 n, 1 HE 4) 1 C 12 + 8,502 MEV
- 321 1 O 15 (1 H 1, 1 HE 4) 1 N 12 + -9,618 MEV
- 322 1 O 15 (1 HE 4, 1 n) 1 NE 18 + -8,110 MEV
- 323 1 O 15 (1 HE 4, 1 H 1) 1 F 18 + -2,882 MEV
- 324 1 O 16 (1 n, 1 H 1) 1 N 16 + -9,637 MEV
- 325 1 O 16 (1 n, 1 HE 4) 1 C 13 + -2,216 MEV

326 1 O 16 (1 H 1, 1 HE 4) 1 N 13 + -5,218 MEV
327 1 O 16 (1 HE 4, 1 n) 1 NE 19 + -12,134 MEV
328 1 O 16 (1 HE 4, 1 H 1) 1 F 19 + -8,114 MEV
329 1 O 17 (1 n, 1 HE 4) 1 C 14 + 1,817 MEV
330 1 O 17 (1 H 1, 1 n) 1 F 17 + -3,543 MEV
331 1 O 17 (1 H 1, 1 HE 4) 1 N 14 + 1,192 MEV
332 1 O 18 (1 n, 1 HE 4) 1 C 15 + -5,009 MEV
333 1 O 18 (1 H 1, 1 n) 1 F 18 + -2,437 MEV
334 1 O 18 (1 H 1, 1 HE 4) 1 N 15 + 3,981 MEV
335 1 O 19 (1 H 1, 1 n) 1 F 19 + 4,037 MEV
336 1 O 19 (1 H 1, 1 HE 4) 1 N 16 + 2,514 MEV
337 1 F 14 (1 HE 4, 1 H 1) 1 NE 17 + -4,864 MEV
338 1 F 16 (1 H 1, 1 n) 1 NE 16 + -14,091 MEV
339 1 F 17 (1 n, 1 H 1) 1 O 17 + 3,543 MEV
340 1 F 17 (1 n, 1 HE 4) 1 N 14 + 4,735 MEV
341 1 F 17 (1 H 1, 1 n) 1 NE 17 + -15,315 MEV
342 1 F 17 (1 H 1, 1 HE 4) 1 O 14 + -1,191 MEV
343 1 F 18 (1 n, 1 H 1) 1 O 18 + 2,437 MEV
344 1 F 18 (1 n, 1 HE 4) 1 N 15 + 6,417 MEV
345 1 F 18 (1 H 1, 1 n) 1 NE 18 + -5,228 MEV
346 1 F 18 (1 H 1, 1 HE 4) 1 O 15 + 2,882 MEV
347 1 F 19 (1 n, 1 H 1) 1 O 19 + -4,037 MEV
348 1 F 19 (1 n, 1 HE 4) 1 N 16 + -1,523 MEV
349 1 F 19 (1 H 1, 1 n) 1 NE 19 + -4,021 MEV
350 1 F 19 (1 H 1, 1 HE 4) 1 O 16 + 8,114 MEV

- 351 $1 \text{ NE } 16 (1 \text{ n}, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ F } 16 + 14,091 \text{ MEV}$
- 352 $1 \text{ NE } 16 (1 \text{ n}, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ O } 13 + 6,525 \text{ MEV}$
- 353 $1 \text{ NE } 17 (1 \text{ n}, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ F } 17 + 15,315 \text{ MEV}$
- 354 $1 \text{ NE } 17 (1 \text{ n}, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ O } 14 + 14,125 \text{ MEV}$
- 355 $1 \text{ NE } 17 (1 \text{ H } 1, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ F } 14 + 4,864 \text{ MEV}$
- 356 $1 \text{ NE } 18 (1 \text{ n}, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ F } 18 + 5,228 \text{ MEV}$
- 357 $1 \text{ NE } 18 (1 \text{ n}, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ O } 15 + 8,110 \text{ MEV}$
- 358 $1 \text{ NE } 19 (1 \text{ n}, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ F } 19 + 4,021 \text{ MEV}$
- 359 $1 \text{ NE } 19 (1 \text{ n}, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ O } 16 + 12,134 \text{ MEV}$
- 360 $1 \text{ H } 2 (1 \text{ H } 1, 1 \text{ n}) 2 \text{ H } 1 + -2,225 \text{ MEV}$
- 361 $2 \text{ H } 3 (0 \text{ } , 2 \text{ n}) 1 \text{ HE } 4 + 11,332 \text{ MEV}$
- 362 $2 \text{ HE } 3 (0 \text{ } , 2 \text{ H } 1) 1 \text{ HE } 4 + 12,860 \text{ MEV}$
- 363 $1 \text{ LI } 7 (1 \text{ H } 2, 1 \text{ n}) 2 \text{ HE } 4 + 15,121 \text{ MEV}$
- 364 $1 \text{ LI } 8 (1 \text{ H } 1, 1 \text{ n}) 2 \text{ HE } 4 + 15,313 \text{ MEV}$
- 365 $1 \text{ BE } 7 (1 \text{ H } 2, 1 \text{ H } 1) 2 \text{ HE } 4 + 16,766 \text{ MEV}$
- 366 $1 \text{ BE } 9 (1 \text{ H } 1, 1 \text{ H } 2) 2 \text{ HE } 4 + 0,651 \text{ MEV}$
- 367 $1 \text{ B } 8 (1 \text{ n}, 1 \text{ H } 1) 2 \text{ HE } 4 + 18,853 \text{ MEV}$
- 368 $1 \text{ B } 11 (1 \text{ H } 1, 0 \text{ }) 3 \text{ HE } 4 + 8,682 \text{ MEV}$
- 369 $1 \text{ C } 11 (1 \text{ n}, 0 \text{ }) 3 \text{ HE } 4 + 11,447 \text{ MEV}$
- 370 $1 \text{ O } 13 (1 \text{ HE } 4, 2 \text{ H } 1) 1 \text{ O } 15 + 8,102 \text{ MEV}$
- 371 $1 \text{ LI } 7 (1 \text{ H } 3, 2 \text{ n}) 2 \text{ HE } 4 + 8,864 \text{ MEV}$
- 372 $1 \text{ BE } 7 (1 \text{ HE } 3, 2 \text{ H } 1) 2 \text{ HE } 4 + 11,272 \text{ MEV}$
- 373 $2 \text{ H } 1 (1 \text{ n}, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ H } 2 + 2,225 \text{ MEV}$
- 374 $1 \text{ HE } 4 (2 \text{ n}, 0 \text{ }) 2 \text{ H } 3 + -11,332 \text{ MEV}$
- 375 $1 \text{ HE } 4 (2 \text{ n}, 0 \text{ }) 1 \text{ HE } 6 + 0,975 \text{ MEV}$

376	$1 \text{ HE } 4 (2 \text{ H } 1, 0) 2 \text{ HE } 3 + -12,860 \text{ MEV}$
377	$2 \text{ HE } 4 (1 \text{ n}, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ LI } 8 + -15,313 \text{ MEV}$
378	$2 \text{ HE } 4 (1 \text{ n}, 0) 1 \text{ BE } 9 + 1,574 \text{ MEV}$
379	$2 \text{ HE } 4 (1 \text{ n}, 1 \text{ H } 2) 1 \text{ LI } 7 + -15,121 \text{ MEV}$
380	$2 \text{ HE } 4 (1 \text{ H } 1, 1 \text{ H } 2) 1 \text{ BE } 7 + -16,766 \text{ MEV}$
381	$2 \text{ HE } 4 (1 \text{ H } 1, 1 \text{ n}) 1 \text{ B } 8 + -18,853 \text{ MEV}$
382	$2 \text{ HE } 4 (1 \text{ H } 2, 1 \text{ H } 1) 1 \text{ BE } 9 + -0,651 \text{ MEV}$
383	$3 \text{ HE } 4 (0 , 1 \text{ n}) 1 \text{ C } 11 + -11,447 \text{ MEV}$
384	$3 \text{ HE } 4 (0 , 1 \text{ H } 1) 1 \text{ B } 11 + -8,682 \text{ MEV}$
385	$3 \text{ HE } 4 (0 , 0) 1 \text{ C } 12 + 7,275 \text{ MEV}$
386	$1 \text{ O } 15 (2 \text{ H } 1, 1 \text{ HE } 4) 1 \text{ O } 13 + -8,102 \text{ MEV}$

Taula E.3. Els números de l'esquerra corresponen a l'identificador de la reacció i, a la dreta, es mostren els valors dels fluxos de totes les reaccions per a $t=1,289 \times 10^{-3}$ s.

1	1,92E-04
2	2,5205E-25
3	7,1635E-28
4	1,1662E-45
5	6,2651E-53
6	2,8377E-55
7	0
8	0
9	2,863E-53
10	0
11	3,4528E-50
12	5,7591E-56

13	0
14	0
15	8,8453E-98
16	0
17	5,9595E-57
18	0
19	0
20	2,1305E-53
21	0
22	0
23	6,8126E-53
24	1,1184E-54
25	1,3071E-51
26	5,3603E-53
27	0
28	0
29	0
30	3,0068E-75
31	3,6013E-51
32	0
33	0
34	7,3118788
35	1,5788E-11
36	4,3993E-11
37	1,1412E-34

38	1,8898E-32
39	1,3121E-41
40	3,5553E-31
41	3,7494E-40
42	1,2021E-33
43	0
44	0
45	2,8919E-44
46	4,8428E-40
47	1,1356E-34
48	0
49	0
50	0
51	1,2049E-45
52	1,4413E-55
53	0
54	0
55	0
56	0
57	0
58	0
59	0
60	0
61	0
62	1,0934E-44

63	1,5464E-54
64	9,7896E-53
65	7,148E-45
66	3,7046E-57
67	1,3274E-45
68	0
69	0
70	7,1909E-54
71	1,6762E-50
72	3,6133E-39
73	1,8654E-83
74	1,0545E-90
75	0
76	6,0326E-45
77	3,2867E-53
78	4,164E-45
79	2,3648E-57
80	0
81	3,4144E-42
82	0
83	2,1013E-42
84	2,8155E-39
85	4,7189E-47
86	2,5686E-46
87	0

88	9,2707E-45
89	9,7921E-54
90	1,2692E-51
91	3,3084E-45
92	1,5906E-55
93	1,7759E-55
94	3,6724E-45
95	1,5725E-51
96	3,5993E-42
97	6,6653E-54
98	0
99	0
100	9,5563E-52
101	3,0432E-49
102	4,8441E-40
103	0
104	0
105	0
106	2,7136E-61
107	2,6765E-45
108	1,0701E-40
109	3,7194E-40
110	2,399E-47
111	1,2715E-45
112	6,6077E-40

113	0
114	0
115	0
116	0
117	0
118	0
119	0
120	0
121	0
122	0
123	5,8047E-39
124	0
125	6,4681E-53
126	0
127	6,2495E-56
128	1,143E-40
129	7,8059E-55
130	7,3118788
131	7,128E-27
132	4,2698E-18
133	1,5865E-11
134	4,3919E-11
135	2,1623E-24
136	3,1413E-15
137	1,9204E-17

138	4,7859E-34
139	3,5553E-31
140	1,2021E-33
141	1,1357E-34
142	3,6059E-40
143	4,6308E-40
144	7,6337E-58
145	1,6822E-43
146	1,409E-60
147	2,8919E-44
148	3,2628E-62
149	8,4955E-63
150	3,2366E-45
151	9,8636E-62
152	6,7033E-45
153	3,2309E-43
154	6,4336E-45
155	1,7545E-44
156	1,291E-62
157	1,2049E-45
158	1,3274E-45
159	1,3004E-43
160	1,3661E-44
161	8,9577E-45
162	1,7621E-43

163	1,0935E-44
164	7,148E-45
165	7,0011E-63
166	2,1897E-43
167	9,454E-45
168	2,0262E-42
169	1,6394E-41
170	3,2475E-63
171	2,4415E-44
172	8,2402E-43
173	1,2951E-44
174	3,3396E-43
175	3,1357E-62
176	6,0326E-45
177	4,164E-45
178	1,8523E-43
179	3,8246E-42
180	1,7405E-43
181	1,7927E-43
182	1,1062E-43
183	1,1177E-61
184	3,0357E-44
185	3,4252E-43
186	2,7239E-62
187	9,2778E-45

188	3,3093E-45
189	3,6733E-45
190	9,0259E-66
191	7,9066E-64
192	1,9205E-44
193	7,1895E-45
194	1,5713E-45
195	6,8258E-44
196	5,0887E-44
197	5,5921E-44
198	7,005E-44
199	2,7745E-45
200	2,7835E-43
201	6,7925E-45
202	2,7716E-44
203	4,5055E-44
204	1,1285E-43
205	1,4016E-43
206	1,3438E-17
207	1,1701E-17
208	8,6054E-12
209	1,1815E-17
210	1,3971E-21
211	8,5317E-12
212	1,3451E-17

213	2,684E-22
214	6,7588E-29
215	8,3907E-39
216	1,6259E-39
217	4,0664E-46
218	2,7827E-35
219	1,5755E-35
220	2,9949E-58
221	1,6273E-57
222	2,6229E-35
223	1,506E-35
224	5,4651E-45
225	5,4651E-45
226	8,0191E-56
227	4,8958E-40
228	6,1043E-45
229	2,8699E-40
230	4,6327E-50
231	1,4053E-55
232	1,4746E-59
233	9,5E-61
234	1,4926E-39
235	5,2321E-50
236	1,0349E-57
237	3,5231E-64

238	1,5155E-57
239	4,4361E-39
240	5,5413E-44
241	9,6843E-40
242	4,7913E-59
243	3,022E-72
244	2,1604E-61
245	1,8557E-56
246	1,954E-39
247	4,2601E-55
248	3,7521E-58
249	3,0246E-68
250	1,7545E-39
251	4,5827E-58
252	6,1408E-40
253	1,4317E-57
254	6,0521E-60
255	1,7156E-39
256	6,142E-40
257	2,9293E-60
258	2,6478E-58
259	9,1795E-54
260	1,542E-50
261	5,8856E-43
262	8,5451E-59

263	2,8951E-59
264	2,7594E-49
265	9,0675E-40
266	4,5338E-40
267	6,1665E-58
268	1,9953E-58
269	9,6612E-61
270	1,682E-39
271	1,3536E-39
272	3,0284E-53
273	3,0488E-59
274	1,9215E-56
275	1,182E-46
276	1,2876E-67
277	2,6058E-62
278	4,8977E-47
279	8,5049E-44
280	4,4271E-46
281	1,7456E-50
282	6,9409E-59
283	1,2744E-68
284	3,2888E-57
285	1,4691E-40
286	7,7817E-42
287	3,1963E-50

288	9,0199E-60
289	1,0568E-39
290	3,0594E-58
291	5,9458E-53
292	2,0579E-58
293	5,1961E-40
294	2,9695E-44
295	1,6924E-59
296	4,2496E-40
297	3,2977E-47
298	6,6362E-41
299	4,3598E-47
300	8,2143E-45
301	1,124E-62
302	3,5075E-59
303	7,7187E-54
304	3,5624E-52
305	4,4451E-52
306	3,6874E-44
307	8,7495E-40
308	1,1862E-66
309	4,8904E-64
310	2,7935E-49
311	3,8571E-40
312	3,8571E-40

313	1,3131E-58
314	9,2887E-62
315	1,947E-68
316	2,3738E-39
317	1,5004E-78
318	1,8404E-68
319	1,4129E-39
320	1,651E-40
321	6,8756E-55
322	1,4729E-69
323	7,4229E-63
324	1,4054E-54
325	7,5674E-45
326	3,0258E-49
327	3,6079E-74
328	9,8656E-70
329	5,5942E-41
330	1,2652E-44
331	7,4444E-41
332	2,4016E-48
333	6,1893E-43
334	5,2166E-40
335	3,9074E-40
336	1,9587E-40
337	4,6705E-65

338	1,8445E-59
339	5,1214E-40
340	1,0202E-39
341	2,6928E-62
342	6,3813E-56
343	1,6173E-40
344	3,9112E-40
345	2,1807E-47
346	5,392E-41
347	9,5488E-47
348	6,7654E-44
349	1,8952E-45
350	1,3782E-40
351	1,7618E-39
352	5,7167E-41
353	1,572E-39
354	1,3928E-40
355	1,5253E-40
356	1,0882E-39
357	5,391E-40
358	4,1285E-40
359	1,3288E-39
360	1,9486E-10
361	8,4083E-28
362	1,1925E-29

363	3,8051E-49
364	3,7614E-39
365	4,974E-50
366	2,0288E-39
367	1,3606E-39
368	2,8826E-39
369	5,6297E-40
370	4,6139E-64
371	4,1639E-54
372	1,411E-56
373	1,9478E-10
374	5,0024E-45
375	5,8057E-39
376	7,2137E-47
377	6,6494E-67
378	3,2299E-49
379	2,1729E-66
380	3,1373E-68
381	2,8218E-71
382	8,6786E-56
383	2,3359E-78
384	3,4213E-74
385	1,4407E-68
386	1,839E-88

Taula E.4. Els números de l'esquerra corresponen a l'identificador de la reacció i , a la dreta, es mostren els valors dels fluxos de totes les reaccions per a $t= 1,27s$.

1	0,00019166
2	8,9889E-25
3	1,5842E-27
4	2,0558E-42
5	8,0572E-50
6	1,6218E-51
7	0
8	0
9	3,1566E-50
10	0
11	5,1111E-47
12	4,3487E-53
13	0
14	0
15	1,61E-109
16	0
17	4,3219E-54
18	0
19	0
20	6,3244E-52
21	0
22	0
23	1,1992E-49
24	1,1628E-51

25	2,0859E-48
26	3,9726E-51
27	0
28	0
29	0
30	5,4694E-87
31	5,204E-48
32	0
33	0
34	6,12147207
35	1,7046E-11
36	4,7367E-11
37	5,5506E-33
38	9,8001E-31
39	3,3627E-40
40	6,7326E-28
41	8,9052E-37
42	6,1053E-30
43	0
44	0
45	1,7503E-41
46	1,0878E-36
47	4,8827E-31
48	0
49	0

50	0
51	7,1581E-43
52	1,5891E-52
53	0
54	0
55	0
56	0
57	0
58	0
59	0
60	0
61	0
62	6,6426E-42
63	2,8787E-52
64	1,4492E-49
65	4,2399E-42
66	2,7974E-54
67	7,2004E-43
68	0
69	0
70	7,6325E-51
71	2,7272E-47
72	1,9542E-36
73	8,0929E-96
74	1,88E-103

75	0
76	3,4111E-42
77	4,3659E-50
78	2,3563E-42
79	1,715E-54
80	0
81	7,0762E-41
82	0
83	6,5798E-40
84	1,4379E-36
85	3,6222E-60
86	2,0571E-59
87	0
88	5,3621E-42
89	1,888E-51
90	2,2342E-48
91	1,8729E-42
92	1,6538E-52
93	1,8464E-52
94	2,079E-42
95	2,5095E-48
96	1,6728E-40
97	4,9398E-52
98	0
99	0

100	1,8342E-64
101	1,055E-61
102	2,2121E-37
103	0
104	0
105	0
106	3,5674E-73
107	7,4986E-43
108	5,401E-38
109	2,0662E-37
110	5,2251E-45
111	4,0207E-43
112	3,6841E-37
113	0
114	0
115	0
116	0
117	0
118	0
119	0
120	0
121	0
122	0
123	7,0412E-36
124	0

125	8,3184E-50
126	0
127	5,0041E-53
128	7,9527E-37
129	2,3172E-53
130	6,12147207
131	5,0863E-27
132	3,3446E-18
133	1,7218E-11
134	4,7205E-11
135	3,043E-24
136	8,8556E-15
137	5,0866E-17
138	1,2267E-33
139	6,7325E-28
140	6,1053E-30
141	4,8827E-31
142	8,5325E-37
143	1,0348E-36
144	3,1062E-51
145	1,1012E-39
146	1,526E-53
147	1,7503E-41
148	3,077E-56
149	7,947E-57

150	3,1104E-42
151	1,721E-55
152	3,8932E-42
153	1,7875E-40
154	3,4628E-42
155	9,6278E-42
156	1,1535E-56
157	7,1581E-43
158	7,2004E-43
159	7,7252E-41
160	7,4223E-42
161	5,2914E-42
162	9,9433E-41
163	6,6428E-42
164	4,2399E-42
165	6,0062E-57
166	1,2951E-40
167	4,6695E-42
168	3,4198E-38
169	2,7516E-37
170	6,9012E-56
171	1,6051E-41
172	5,0352E-40
173	4,0525E-41
174	1,0298E-39

175	1,5925E-55
176	3,4111E-42
177	2,3563E-42
178	9,6527E-41
179	2,2721E-39
180	1,0144E-40
181	3,9828E-40
182	2,117E-40
183	3,8237E-55
184	1,6056E-41
185	1,7439E-40
186	2,2541E-56
187	5,3621E-42
188	1,873E-42
189	2,079E-42
190	6,4537E-60
191	7,1966E-58
192	1,1409E-41
193	3,6782E-42
194	9,6533E-43
195	3,9096E-41
196	2,9394E-41
197	3,0964E-41
198	4,0866E-41
199	1,4831E-42

200	1,657E-40
201	3,7363E-42
202	1,6182E-41
203	2,6509E-41
204	6,6352E-41
205	8,1696E-41
206	1,9715E-17
207	1,714E-17
208	2,2485E-11
209	1,7141E-17
210	5,7997E-21
211	2,2322E-11
212	1,9567E-17
213	9,5309E-22
214	6,2246E-28
215	6,3616E-37
216	1,0532E-37
217	6,8992E-44
218	6,7494E-32
219	3,541E-32
220	2,9696E-53
221	2,0474E-52
222	6,3357E-32
223	3,3673E-32
224	1,6009E-41

225	1,6009E-41
226	2,2874E-49
227	2,4545E-36
228	1,5537E-41
229	1,7116E-36
230	3,9357E-46
231	3,0595E-51
232	1,0706E-52
233	6,6128E-54
234	8,9011E-37
235	3,8476E-47
236	1,0421E-51
237	1,7256E-58
238	1,4161E-51
239	4,6715E-36
240	2,9634E-41
241	9,5592E-37
242	6,6032E-53
243	2,1832E-65
244	9,5037E-60
245	1,714E-54
246	1,125E-36
247	8,0496E-52
248	3,3759E-52
249	8,9911E-63

250	9,6278E-37
251	4,1267E-52
252	3,3692E-37
253	1,2188E-51
254	5,5934E-54
255	1,0192E-36
256	3,2858E-37
257	2,4237E-54
258	2,1655E-52
259	9,3729E-52
260	2,7417E-48
261	2,1705E-40
262	7,5468E-53
263	2,5572E-53
264	5,1308E-47
265	4,8834E-37
266	2,4417E-37
267	5,0179E-52
268	1,7175E-52
269	7,8416E-55
270	9,9636E-37
271	7,997E-37
272	4,3327E-51
273	2,5313E-53
274	3,363E-53

275	6,2615E-43
276	8,935E-61
277	3,0057E-55
278	1,3303E-44
279	3,1936E-41
280	1,0523E-43
281	1,3155E-47
282	6,3277E-53
283	3,5223E-63
284	1,1809E-54
285	4,1357E-37
286	1,8387E-38
287	1,2126E-46
288	3,9297E-53
289	5,5903E-37
290	2,3773E-52
291	8,4213E-51
292	1,5487E-52
293	3,0926E-37
294	1,132E-41
295	1,4364E-53
296	8,9951E-37
297	2,6251E-44
298	1,1791E-37
299	3,4092E-44

300	8,541E-42
301	2,0557E-56
302	9,785E-53
303	8,1104E-52
304	4,3139E-50
305	5,0336E-50
306	1,1257E-41
307	4,3678E-37
308	4,1905E-61
309	2,3148E-58
310	5,4006E-47
311	2,007E-37
312	2,007E-37
313	9,8003E-53
314	5,5335E-56
315	6,7093E-63
316	1,3741E-36
317	1,3999E-73
318	9,2452E-62
319	8,467E-37
320	9,7337E-38
321	5,4746E-53
322	3,8262E-64
323	4,1922E-57
324	1,39E-52

325	2,4686E-42
326	5,7942E-47
327	4,5539E-69
328	2,1915E-64
329	3,3442E-38
330	4,0678E-42
331	3,8264E-38
332	4,3721E-46
333	2,3426E-40
334	2,9133E-37
335	2,0008E-37
336	1,0029E-37
337	3,0951E-59
338	2,9873E-56
339	3,0206E-37
340	6,2935E-37
341	1,1291E-60
342	2,9376E-52
343	9,5573E-38
344	2,4736E-37
345	5,3171E-45
346	2,8573E-38
347	2,4794E-44
348	2,2003E-41
349	5,6294E-43

350	7,0182E-38
351	1,0318E-36
352	3,3579E-38
353	9,1884E-37
354	8,1936E-38
355	8,1764E-38
356	6,336E-37
357	3,1373E-37
358	2,4411E-37
359	7,7068E-37
360	1,4089E-10
361	8,2425E-27
362	8,9359E-29
363	3,0783E-45
364	2,1521E-36
365	6,2322E-47
366	1,1752E-36
367	8,0831E-37
368	1,6522E-36
369	3,3453E-37
370	4,4432E-58
371	8,8278E-50
372	3,7404E-53
373	1,4082E-10
374	9,0239E-43

375	7,0412E-36
376	9,9197E-45
377	1,1381E-61
378	8,1026E-43
379	3,6927E-61
380	3,9313E-63
381	2,7354E-66
382	2,5141E-49
383	1,4505E-69
384	3,2922E-65
385	5,8373E-59
386	2,5734E-86

Taula E.5. Els números de l'esquerra corresponen a l'identificador de la reacció i, a la dreta, es mostren els valors dels fluxos de totes les reaccions per a $t=5,335 \times 10^1$ s.

1	0,00018072
2	8,5384E-18
3	3,8745E-24
4	1,9049E-35
5	3,6015E-33
6	3,704E-38
7	2,783E-53
8	4,8859E-54
9	2,6628E-44
10	2,4005E-38

11	4,1158E-41
12	6,0135E-53
13	0
14	3,1878E-46
15	4,3646E-47
16	3,7506E-47
17	2,6133E-54
18	0
19	0
20	1,0085E-51
21	1,2236E-45
22	6,4291E-48
23	1,2164E-43
24	1,9792E-48
25	5,4228E-43
26	7,8441E-50
27	6,5205E-52
28	3,1084E-46
29	4,6541E-51
30	1,36E-146
31	1,9225E-52
32	0
33	0
34	0,34046261
35	2,7972E-16

36	8,1842E-16
37	6,2208E-63
38	8,5146E-60
39	2,2244E-76
40	4,3211E-20
41	8,1616E-33
42	4,9192E-18
43	1,1678E-23
44	3,4138E-31
45	1,7565E-32
46	5,7581E-33
47	1,3329E-20
48	5,836E-48
49	2,0544E-41
50	1,4726E-55
51	5,3535E-43
52	1,3405E-46
53	8,6308E-30
54	2,6119E-41
55	2,2638E-46
56	2,3854E-40
57	5,7114E-58
58	2,6298E-60
59	1,8953E-50
60	4,9998E-37

61	1,2933E-60
62	5,2861E-45
63	4,9187E-67
64	1,1669E-43
65	2,1834E-44
66	3,8683E-54
67	4,7906E-44
68	4,2362E-59
69	5,5902E-55
70	1,9165E-81
71	2,2274E-73
72	2,5609E-39
73	5,352E-48
74	3,569E-64
75	1,8797E-37
76	4,2702E-43
77	1,0422E-42
78	1,1184E-44
79	1,037E-54
80	0
81	2,1118E-43
82	1,2312E-35
83	3,3719E-55
84	4,8904E-47
85	9,4289E-61

86	1,7155E-59
87	1,6803E-41
88	4,7832E-47
89	2,3438E-67
90	2,2662E-42
91	5,3473E-45
92	2,8149E-49
93	3,1428E-49
94	3,8431E-47
95	6,5242E-43
96	2,0908E-43
97	9,754E-51
98	6,1882E-51
99	2,6557E-55
100	8,016E-72
101	4,6329E-62
102	3,488E-41
103	3,5283E-61
104	2,7437E-57
105	4,2574E-49
106	1,88E-135
107	6,8493E-64
108	2,6219E-53
109	1,1335E-51
110	3,1871E-64

111	8,2299E-59
112	5,523E-47
113	0
114	0
115	0
116	0
117	0
118	0
119	0
120	0
121	0
122	0
123	1,775E-32
124	9,9855E-29
125	3,7182E-33
126	3,9707E-40
127	1,104E-50
128	1,2861E-47
129	3,6952E-53
130	0,36467433
131	1,9372E-29
132	6,7721E-20
133	8,8582E-10
134	2,0057E-09
135	1,5261E-19

136	2,0405E-09
137	1,9833E-12
138	2,5926E-29
139	6,4E-20
140	6,6958E-18
141	1,5091E-20
142	2,374E-26
143	1,0756E-26
144	1,626E-34
145	1,2063E-23
146	1,8374E-31
147	5,7582E-32
148	4,1601E-41
149	4,1108E-44
150	8,6308E-30
151	1,7948E-36
152	6,1925E-39
153	8,2334E-38
154	2,0019E-41
155	3,7236E-41
156	2,5126E-50
157	8,7963E-50
158	3,2239E-44
159	2,3298E-38
160	3,6807E-40

161	1,7256E-36
162	1,1171E-35
163	4,5017E-41
164	2,137E-44
165	3,2896E-54
166	4,3112E-43
167	1,2809E-45
168	2,7713E-36
169	1,3144E-35
170	5,3038E-50
171	4,1645E-37
172	2,8815E-36
173	1,8827E-37
174	2,7813E-36
175	3,217E-46
176	1,7967E-48
177	1,0808E-44
178	1,1387E-48
179	2,0297E-41
180	3,3878E-43
181	2,0058E-37
182	3,2857E-38
183	2,1806E-47
184	2,3488E-40
185	5,6577E-40

186	3,7214E-50
187	1,7371E-48
188	1,076E-43
189	1,3986E-49
190	2,9764E-63
191	4,8281E-56
192	1,6142E-46
193	3,9613E-48
194	6,6082E-43
195	6,0825E-42
196	2,3218E-48
197	6,5109E-49
198	4,0351E-48
199	2,541E-50
200	2,0086E-47
201	8,7689E-50
202	1,6053E-48
203	2,9036E-48
204	7,3221E-48
205	7,6466E-48
206	1,6595E-12
207	1,4245E-12
208	6,0137E-07
209	4,8855E-19
210	8,532E-12

211	7,6641E-07
212	7,253E-19
213	4,828E-14
214	1,3159E-16
215	3,7256E-62
216	1,673E-64
217	1,3238E-60
218	1,008E-27
219	2,1594E-28
220	1,003E-74
221	2,7685E-71
222	2,0938E-21
223	3,5637E-22
224	1,6486E-28
225	1,6486E-28
226	2,7153E-36
227	4,499E-23
228	6,1501E-35
229	4,9691E-21
230	1,8514E-27
231	9,9783E-29
232	7,3672E-35
233	2,5332E-36
234	1,9429E-27
235	4,9813E-35

236	2,6039E-36
237	4,3552E-50
238	7,2402E-39
239	6,8929E-23
240	9,4432E-35
241	5,4645E-24
242	3,9189E-36
243	7,4308E-77
244	1,0131E-82
245	6,2226E-70
246	1,4302E-33
247	2,8095E-42
248	7,7612E-44
249	1,5162E-65
250	3,7236E-36
251	1,0394E-45
252	9,8461E-45
253	1,1451E-53
254	2,5827E-49
255	3,0739E-34
256	1,0595E-35
257	3,0109E-47
258	2,4683E-45
259	6,4366E-64
260	2,7931E-55

261	7,6306E-40
262	1,7989E-42
263	5,126E-43
264	7,3791E-58
265	5,0367E-37
266	2,5183E-37
267	1,0442E-46
268	9,8659E-50
269	1,0161E-57
270	3,3781E-39
271	2,4679E-39
272	8,218E-68
273	4,0064E-51
274	3,4149E-74
275	8,6792E-53
276	3,9099E-67
277	5,2488E-56
278	1,1493E-48
279	2,8712E-42
280	9,4707E-49
281	3,1261E-41
282	5,2101E-44
283	2,1672E-66
284	1,0928E-72
285	9,7192E-35

286	1,0314E-37
287	1,2251E-40
288	1,5305E-45
289	7,8389E-44
290	4,0845E-54
291	3,8228E-72
292	1,6624E-55
293	2,8671E-39
294	1,1474E-47
295	4,5433E-51
296	1,2675E-34
297	5,6687E-52
298	4,707E-37
299	5,0907E-52
300	2,3515E-46
301	6,1151E-55
302	1,4054E-46
303	4,7998E-67
304	8,1265E-64
305	4,4321E-64
306	2,4273E-46
307	3,2354E-36
308	6,8233E-64
309	5,932E-58
310	2,5529E-64

311	1,0501E-44
312	1,0501E-44
313	4,1298E-55
314	3,5128E-61
315	1,2179E-74
316	1,1893E-43
317	1,172E-98
318	3,5313E-57
319	4,1366E-40
320	4,0904E-41
321	6,1027E-76
322	3,9343E-75
323	6,8204E-60
324	2,0462E-75
325	4,8605E-53
326	4,2527E-63
327	6,5414E-89
328	4,616E-78
329	2,4281E-38
330	1,3974E-48
331	1,6934E-39
332	2,9464E-64
333	1,3605E-51
334	6,966E-45
335	1,7413E-45

336	8,7257E-46
337	1,317E-61
338	2,562E-81
339	3,4946E-44
340	1,8676E-43
341	1,6003E-94
342	4,1384E-54
343	1,0769E-44
344	6,2741E-44
345	4,2919E-61
346	3,7151E-46
347	1,4525E-56
348	8,5562E-51
349	4,1075E-54
350	4,8399E-43
351	1,0712E-43
352	3,5264E-45
353	9,2524E-44
354	8,8004E-45
355	1,1247E-45
356	5,9212E-44
357	2,982E-44
358	2,8914E-44
359	6,4817E-44
360	6,0518E-13

361	1,785E-14
362	3,6451E-19
363	1,2324E-26
364	2,7659E-27
365	1,8392E-31
366	1,6515E-33
367	1,8937E-37
368	1,9568E-31
369	1,5295E-39
370	1,3929E-59
371	1,7968E-27
372	7,1011E-36
373	6,4776E-13
374	2,441E-58
375	1,8972E-32
376	3,0665E-63
377	1,5733E-77
378	3,0135E-31
379	7,4187E-77
380	7,3526E-82
381	6,9302E-88
382	4,647E-36
383	1,8388E-71
384	1,0432E-62
385	3,4759E-41

386 1,61E-104

Taula E.6. Els números de l'esquerra corresponen a l'identificador de la reacció i, a la dreta, es mostren els valors dels fluxos de totes les reaccions per a $t=1,562 \times 10^4$ s.

1	1,9841E-12
2	1,1237E-16
3	1,0937E-26
4	2,902E-83
5	6,4968E-37
6	1,2819E-24
7	5,9767E-42
8	1,078E-41
9	6,0019E-53
10	1,232E-28
11	2,7225E-43
12	7,9238E-55
13	0
14	7,3149E-22
15	4,4546E-29
16	3,6053E-32
17	4,4854E-54
18	0
19	0
20	4,2088E-32
21	5,5778E-27

22	2,0457E-34
23	8,5049E-49
24	4,656E-79
25	2,5148E-54
26	4,6181E-46
27	4,3897E-37
28	1,0724E-30
29	3,4022E-39
30	3,2155E-34
31	8,8808E-30
32	3,4758E-56
33	1,3261E-40
34	6,7857E-98
35	6,30E-107
36	7,67E-105
37	6,51E-101
38	6,51E-101
39	6,51E-101
40	3,7611E-80
41	2,34E-110
42	2,34E-110
43	3,69E-107
44	6,872E-24
45	3,39E-136
46	3,81E-109

47	1,1552E-80
48	4,10E-127
49	6,72E-53
50	3,249E-43
51	1,91E-153
52	3,0215E-55
53	2,3467E-22
54	3,0632E-21
55	3,70E-120
56	3,70E-120
57	3,09E-115
58	3,09E-115
59	3,09E-115
60	3,61E-129
61	3,65E-129
62	6,83E-144
63	6,83E-144
64	7,7191E-46
65	8,2816E-93
66	5,0971E-56
67	4,6716E-91
68	1,29E-117
69	1,29E-117
70	5,42E-115
71	5,42E-115

72	1,06E-115
73	1,16E-116
74	1,16E-116
75	1,049E-78
76	3,58E-145
77	3,2509E-46
78	1,5891E-79
79	1,7799E-54
80	0
81	4,2275E-59
82	9,56E-112
83	4,16E-116
84	4,16E-116
85	1,69E-119
86	1,69E-119
87	8,28E-133
88	1,00E-145
89	1,00E-145
90	1,5845E-47
91	4,68E-178
92	6,622E-80
93	7,3934E-80
94	2,16E-153
95	3,0256E-54
96	4,02E-115

97	5,7425E-47
98	4,47E-134
99	1,89E-127
100	5,77E-119
101	5,77E-119
102	1,80E-123
103	2,86E-124
104	2,86E-124
105	1,30E-136
106	4,4693E-59
107	8,44E-125
108	8,44E-125
109	8,442E-125
110	2,379E-127
111	2,379E-127
112	2,379E-127
113	0
114	0
115	0
116	0
117	8,384E-155
118	8,382E-155
119	8,383E-155
120	3,309E-138
121	3,309E-138

122	3,307E-138
123	2,357E-160
124	4,5322E-85
125	6,7074E-37
126	2,0379E-30
127	2,0282E-33
128	5,421E-115
129	1,542E-33
130	1,2731E-12
131	6,7023E-38
132	1,5048E-25
133	2,2674E-19
134	2,4028E-12
135	1,2112E-19
136	5,4519E-14
137	4,3945E-19
138	1,3644E-30
139	6,3364E-19
140	1,4076E-17
141	5,8651E-19
142	2,3776E-27
143	2,0642E-23
144	9,7381E-33
145	6,8689E-24
146	4,1112E-28

147	1,3201E-36
148	1,0552E-40
149	5,5612E-55
150	3,2957E-21
151	9,8991E-30
152	7,8355E-33
153	8,0935E-29
154	1,1032E-41
155	2,6415E-38
156	1,444E-48
157	6,029E-53
158	2,0276E-33
159	6,4045E-33
160	1,3208E-31
161	1,2524E-28
162	1,086E-25
163	2,7302E-43
164	8,4308E-55
165	1,4264E-62
166	1,8522E-30
167	4,3629E-32
168	5,6784E-29
169	4,1799E-28
170	4,7493E-44
171	1,2315E-30

172	3,115E-28
173	3,599E-32
174	2,1613E-29
175	1,0296E-43
176	3,2471E-46
177	6,2336E-54
178	5,174E-46
179	2,4523E-34
180	3,5609E-37
181	1,1545E-29
182	9,4651E-31
183	2,5521E-45
184	2,0356E-34
185	2,5448E-32
186	7,4949E-49
187	1,6599E-47
188	4,9563E-54
189	5,5013E-54
190	4,3888E-70
191	4,337E-60
192	1,4751E-32
193	2,9854E-34
194	5,8168E-39
195	9,3471E-39
196	3,3506E-39

197	4,573E-36
198	1,8158E-44
199	2,798E-48
200	2,7331E-37
201	1,291E-40
202	8,5452E-52
203	1,6352E-51
204	4,2022E-51
205	3,2706E-51
206	1,4537E-12
207	1,3987E-12
208	7,1858E-43
209	1,196E-114
210	1,7031E-12
211	2,0358E-13
212	3,45E-121
213	3,4432E-13
214	2,3199E-17
215	2,934E-117
216	1,235E-108
217	3,247E-113
218	1,052E-115
219	1,28E-113
220	5,431E-110
221	5,431E-110

222	7,7148E-23
223	6,0587E-19
224	1,3739E-23
225	1,3739E-23
226	3,195E-120
227	4,1618E-87
228	4,447E-118
229	3,0559E-17
230	1,0633E-41
231	3,1174E-24
232	3,399E-119
233	3,896E-119
234	4,028E-40
235	2,2201E-33
236	3,6934E-36
237	1,395E-131
238	1,0213E-49
239	5,0998E-17
240	1,721E-125
241	1,42E-19
242	2,3759E-71
243	1,87E-123
244	7,781E-135
245	7,781E-135
246	1,3284E-24

247	7,0025E-34
248	4,0056E-34
249	2,881E-127
250	2,6416E-33
251	7,969E-44
252	8,1017E-45
253	6,8904E-55
254	3,6065E-40
255	8,4499E-29
256	3,0819E-27
257	8,1017E-42
258	6,4683E-40
259	1,394E-131
260	1,394E-131
261	5,088E-123
262	9,4842E-35
263	2,6493E-37
264	1,65E-145
265	1,0096E-36
266	5,0485E-37
267	7,694E-49
268	4,5501E-58
269	3,5707E-56
270	1,1691E-26
271	9,6639E-27

272	2,451E-125
273	4,069E-40
274	2,444E-131
275	2,444E-131
276	9,051E-124
277	9,051E-124
278	4,781E-132
279	2,088E-123
280	2,013E-123
281	9,1164E-31
282	3,3785E-38
283	1,77E-124
284	5,211E-133
285	5,9366E-49
286	1,4393E-73
287	1,0308E-31
288	5,813E-106
289	3,8787E-39
290	3,0266E-53
291	1,327E-140
292	1,6663E-57
293	3,8632E-32
294	3,407E-101
295	1,2579E-47
296	5,2671E-28

297	1,877E-132
298	4,324E-50
299	7,901E-124
300	7,915E-124
301	6,95E-125
302	1,212E-86
303	7,638E-136
304	7,638E-136
305	7,638E-136
306	3,22E-127
307	4,3619E-29
308	2,828E-128
309	2,829E-128
310	9,514E-149
311	2,6601E-42
312	2,6601E-42
313	1,0593E-57
314	3,07E-141
315	5,896E-147
316	5,1207E-43
317	7,512E-143
318	6,3871E-63
319	3,4382E-36
320	3,1737E-37
321	3,59E-135

322	3,158E-136
323	3,126E-136
324	2,6E-135
325	2,902E-135
326	1,094E-126
327	9,626E-128
328	9,626E-128
329	4,5128E-35
330	3,427E-131
331	1,2815E-36
332	1,29E-140
333	2,52E-132
334	7,8962E-34
335	2,0534E-47
336	1,0293E-47
337	1,932E-146
338	7,857E-145
339	1,9319E-40
340	7,7844E-39
341	5,678E-139
342	1,559E-115
343	1,3399E-34
344	1,8526E-33
345	1,602E-132
346	2,824E-37

347	1,073E-143
348	4,073E-131
349	4,514E-135
350	1,8408E-40
351	5,7104E-47
352	1,8107E-48
353	4,6865E-47
354	4,6513E-48
355	2,1526E-50
356	2,6476E-47
357	1,3963E-47
358	3,8165E-47
359	4,1956E-47
360	6,247E-112
361	1,2202E-17
362	1,0765E-18
363	6,2249E-21
364	3,6287E-28
365	3,845E-21
366	1,3297E-24
367	6,1684E-29
368	6,3155E-22
369	9,6639E-27
370	4,0047E-71
371	6,334E-24

372	2,3386E-28
373	7,735E-29
374	6,614E-134
375	2,8679E-83
376	1,172E-116
377	2,449E-126
378	1,3192E-35
379	2,449E-126
380	1,031E-117
381	1,031E-117
382	5,3029E-60
383	3,023E-119
384	3,023E-119
385	1,0037E-42
386	3,408E-143