

# ESTRELLES I FORATS NEGRES

APLICACIÓ DE LA INFORMÀTICA  
EN OBJECTES ASTRONÒMICS

Mamotto

# AGRAÏMENTS

Voldria donar les gràcies per la col·laboració de totes aquelles persones i institucions que han fet possible la realització d'aquest treball.

En primer lloc, m'agradaria agrair al meu primer tutor de recerca, ....., per haver-me donat l'oportunitat d'endinsar-me en aquest tema, ja que sense la seva autorització i confiança, res d'això haguera estat possible. També pel constant suport i interès que ha mostrat, malgrat que no hagi estat possible la seva tutorització fins al final d'aquest procés. Així doncs, agrair també en ..... per haver acceptat la tutorització d'aquest treball malgrat el pocs temps que quedava.

En segon lloc, es fa necessari el fet de donar les gràcies a ..... Especialment, agrair a ..... per la seva atenció i temps dedicat durant l'estiu, i a en ..... per ajudar-me en la comprensió dels programes informàtics i atendre els meus dubtes per molt irrelevantes que fossin.

A qui també m'agradaria donar les gràcies és a la meva família. Particularment a la meva mare, per haver estat un pilar fonamental i ajudar-me a qualsevol cosa que necessités. També, perquè si no fos per la seva constant insistència, la finalització d'aquest treball hagués estat dubtosa. Altrament, a la meva germana i al meu pare per aguantar amb paciència que el tema de conversa o discussions hagi estat sempre el mateix, per molt farragós que fos.

Gràcies a tots.

# RESUM DE TREBALL

En este trabajo de investigación, se plantea el estudio y observación de las estrellas y los agujeros negros para responder a la principal hipótesis planteada: ¿Existen los agujeros negros? ¿Podemos demostrar la existencia de los mismos y de las estrellas mediante la informática? Por otra parte, ¿podrían los agujeros negros absorber el planeta Tierra? En primer lugar, me he centrado en estudiar la composición y estructura del universo y algunas de las leyes físicas que le son aplicadas, concretando en el tema principal del trabajo. En segundo término, me he adentrado más en el mundo de las estrellas: sus propiedades y características, clasificación, evolución... A continuación, he desarrollado el apartado sobre los agujeros negros, explicando sus tipos, su estructura, su formación... introduciendo también algunos experimentos para entender mejor ciertos conceptos con la ayuda de vídeos. Finalmente, y conociendo ya, todos los conceptos previos que necesitaba, he procedido a hacer la parte práctica del trabajo, consistente en hacer una recopilación de fotografías, y mediante diversos programas informáticos, hacer la medida de la magnitud de un cuásar y la tricromía de una nebulosa planetaria. Fruto de este estudio, y después de tratar las imágenes de estos objetos astronómicos mediante la informática, se ha comprobado su existencia. Sin embargo, se considera prácticamente imposible que un agujero negro absorba al planeta Tierra.

## ABSTRACT

In this research work, the study and observation of stars and black holes is proposed in order to answer the main hypothesis raised: Do black holes exist? Can we prove the existence of them and the stars through computing? On the other hand, could a black hole absorb planet earth? First of all, I have engrossed on studying the composition and structure of the Universe, and some of the physic laws that apply to it, focusing on the primary topic of the work. Secondly, it has been developed the world of stars: their proprieties and characteristics, classification, evolution... Coming up next, the section of black holes has been developed by explaining their types, formation, structure... on top adding some experiments in order to better understand certain concepts with the help of videos. Finally, and already knowing all the previous concepts needed, the practical part got started. It consisted on producing a compilation of photographs, and through the use of several computer programs, to measure the magnitude of a quasar and do the trichromia of a planetary nebula. As a result of this exhaustive study, and after treating the images of these astronomical objects using computer science, their existence has been proven. However, it is considered virtually impossible for a black hole to absorb planet Earth.

# ÍNDEX DE CONTINGUTS

<b>AGRAÏMENTS</b> .....	0
<b>RESUM DE TREBALL</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	1
<b>ÍNDEX DE CONTINGUTS</b> .....	2
<b>ÍNDEX D'IL·LUSTRACIONS</b> .....	5
<b>ÍNDEX DE TAULES</b> .....	8
<b>INTRODUCCIÓ</b> .....	9
Objectius .....	9
Estructura .....	10
<b>CALENDARI DE TREBALL</b> .....	11
<b>CAPÍTOL 1</b> .....	12
<b>MARC TEÒRIC</b> .....	12
<b>COSMOLOGIA I ESTRUCTURA DE L'UNIVERS</b> .....	13
<b>ASTRONOMIA</b> .....	13
<b>DEFINICIÓ DE COSMOLOGIA. BREU HISTÒRIA</b> .....	13
<b>ESTRUCTURA DE L'UNIVERS</b> .....	14
<b>DE QUÈ ESTÀ FORMADA LA MATÈRIA?</b> .....	15
<b>UNITATS DE MESURA</b> .....	16
<b>LLEIS DE NEWTON</b> .....	17
<b>1<sup>RA</sup> LLEI DE NEWTON : LLEI DE LA INÈRCIA</b> .....	17
<b>2<sup>NA</sup> LLEI DE NEWTON : LLEI FONAMENTAL DE LA DINÀMICA</b> .....	18
<b>3<sup>RA</sup> LLEI DE NEWTON : PRINCIPI D'ACCIÓ I RECCIÓ</b> .....	19
<b>4<sup>TA</sup> LLEI DE NEWTON : LLEI DE LA GRAVITACIÓ UNIVERSAL</b> .....	19
<b>TEORIA DE LA RELATIVITAT ESPECIAL</b> .....	22
<b>TEORIA RELATIVITAT GENERAL</b> .....	23
<b>LLEI DE HUBBLE</b> .....	25
<b>TEORIA DEL BIG BANG</b> .....	27
<b>ONES GRAVITACIONALS</b> .....	28
<b>ESPECTROSCOPIA</b> .....	30
<b>EFFECTE DOPPLER</b> .....	32
<b>MECÀNICA QUÀNTICA</b> .....	33
<b>TEORIA DE CORDES</b> .....	34

GRAVETAT QUÀNTICA DE LLAÇOS.....	35
STEPHEN HAWKING I LA RADIACIÓ .....	36
ESTRELLES.....	37
QUÈ ÉS UNA ESTRELLA? .....	37
ESTRUCTURA DE LES ESTRELLES.....	38
LA CLASSIFICACIÓ ESTEL·LAR.....	41
NAIXEMENT DE LES ESTRELLES .....	48
FORATS NEGRES .....	51
QUÈ ÉS UN FORAT NEGRE? .....	51
PARTS DELS FORATS NEGRES.....	52
PROPIETATS DELS FORATS NEGRES.....	55
TIPUS DE FORATS NEGRES.....	55
NAIXEMENT I CREIXEMENT DELS FORATS NEGRES.....	56
EFACTES DE MAREA I ELS TDE.....	57
<b>CAPÍTOL 2.....</b>	<b>60</b>
<b>MARC PRÀCTIC.....</b>	<b>60</b>
INTRODUCCIÓ .....	61
MÈTODES D'OBSERVACIÓ.....	61
MATERIAL UTILITZAT .....	62
TELESCOPI.....	62
CÀMERES CCD (Charge Coupled Device) .....	63
ORDINADORS.....	65
SOFTWARE UTILITZAT .....	65
ASTROART.....	65
AAVSO.....	65
ALADIN.....	66
MICROSOFT EXCEL.....	66
BLENDER.....	66
PLANIFICACIÓ D'UNA SESSIÓ D'OBSERVACIÓ ASTRONÒMICA .....	67
PREPARACIÓ DE L'OBSERVACIÓ.....	68
CÀLCUL DE LA MAGNITUD APARENT DEL QUÀSAR BL Lac.....	69
OBTENCIÓ D'IMATGES .....	69
OBTENCIÓ DELS DARKS I FLATS.....	70
PRETRACTAMENT .....	71
FOTOMETRIA.....	73
RESULTATS .....	80

ESTIMACIÓ DE COM ES VEURIA LA NEBULOSA PLANETÀRIA M27 EN COLOR: Tricromia .....	81
OBTENCIÓ D'IMATGES .....	81
OBTENCIÓ DELS FLATS I DARKS.....	81
PRETRACTAMENT .....	82
FOTOMETRIA.....	83
RESULTAT .....	86
<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>87</b>
<b>REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES.....</b>	<b>88</b>
<b>ANNEXOS .....</b>	<b>95</b>
ANNEX 1 .....	96
EXPERIMENT 1: EXPERIMENT DE LA MALLA ELÀSTICA: MODELANT L'ACTUACIÓ O COMPORTAMENT D'UN FORAT NEGRE MITJANÇANT LA TRAJECTÒRIA DE LA LLUM .....	96
EXPERIMENT 2: UN GLOBUS COM A METÀFORA DE L'UNIVERS. ....	97
ANNEX 2 .....	99
EL PROJECTE DE FUSIÓ NUCLEAR: ITER.....	99
ANNEX 3 .....	104
PRIMERA FOTOGRAFIA D'UN FORAT NEGRE .....	104
ANNEX 4 .....	110

# ÍNDIX D'IL·LUSTRACIONS

<b>Il·lustració 1.</b> Paral·laxi. Extret de Tema 12 Astronòmica Sabadell .....	17
<b>Il·lustració 2.</b> Velocity, acceleration, momentum and force are vectors quantities. Extret de <a href="https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/newtons-laws-of-motion/">https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/newtons-laws-of-motion/</a> .....	18
<b>Il·lustració 3.</b> Newton's third Law. Extret de <a href="http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Newt.html">http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Newt.html</a> .....	19
<b>Il·lustració 4.</b> La fuerza nuclear débil. Extret de <a href="https://www.enterarse.com/20200130_0001-las-cuatro-fuerzas-fundamentales-de-la-fisica">https://www.enterarse.com/20200130_0001-las-cuatro-fuerzas-fundamentales-de-la-fisica</a> i modificat per Mamotto .....	19
<b>Il·lustració 5.</b> Campo gravitatorio de una masa puntual. Extret de <a href="https://n9.cl/674b1">https://n9.cl/674b1</a> .....	21
<b>Il·lustració 6.</b> Suma gráfica de fuerzas gravitatorias. Extret de <a href="https://n9.cl/674b1">https://n9.cl/674b1</a> .....	21
<b>Il·lustració 7.</b> Relatividad General Extret de min 12:18 <a href="https://n9.cl/pyxj7">https://n9.cl/pyxj7</a> .....	24
<b>Il·lustració 8.</b> La representación de la curvatura del espacio-tiempo Extret de <a href="https://www.agenciasinc.es/Entrevistas/Diez-preguntas-para-entender-la-teoria-de-la-relatividad-general-de-Einstein">https://www.agenciasinc.es/Entrevistas/Diez-preguntas-para-entender-la-teoria-de-la-relatividad-general-de-Einstein</a> .....	24
<b>Il·lustració 9.</b> Ley de Hubble. Extret de <a href="https://n9.cl/pzzrh">https://n9.cl/pzzrh</a> .....	26
<b>Il·lustració 10.</b> Historia del Universo. Extret de <a href="https://www.agenciasinc.es/Noticias/Las-medidas-de-la-expansion-del-universo-no-cuadran">https://www.agenciasinc.es/Noticias/Las-medidas-de-la-expansion-del-universo-no-cuadran</a> .....	28
<b>Il·lustració 11.</b> Gravitational wave resulting from two colliding black holes (simulation) Extret de <a href="https://serviastro.ub.edu/es/materiales/articulos/virgo-y-ligo-cazadores-de-ondas-gravitacionales">https://serviastro.ub.edu/es/materiales/articulos/virgo-y-ligo-cazadores-de-ondas-gravitacionales</a> .....	29
<b>Il·lustració 12.</b> Espectroscopia. Extret de <a href="https://n9.cl/dp8p2">https://n9.cl/dp8p2</a> .....	30
<b>Il·lustració 13.</b> Espectres. Extret de <a href="https://web.ua.es/cuantica/docencia/QCE/node107.html">https://web.ua.es/cuantica/docencia/QCE/node107.html</a> .....	30
<b>Il·lustració 14.</b> Efecto Doppler. Extret de <a href="http://www.astronuestra.com/2019/10/16/espectroscopia-y-efecto-doppler/">http://www.astronuestra.com/2019/10/16/espectroscopia-y-efecto-doppler/</a> .....	32
<b>Il·lustració 15.</b> A spectrum being red/blue shifted. Extret de <a href="https://www.quora.com/What-is-infinitely-redshifted-light-What-does-it-become">https://www.quora.com/What-is-infinitely-redshifted-light-What-does-it-become</a> .....	32
<b>Il·lustració 16.</b> Partícules elementals. Extret de <a href="https://lacienciaalteumon.cat/the-big-bang-theory-i-la-teoria-de-cordes/">https://lacienciaalteumon.cat/the-big-bang-theory-i-la-teoria-de-cordes/</a> .....	34
<b>Il·lustració 17.</b> Radiació de Hawking. Extret de <a href="https://www.encyclopedia.cat/ec-gec-0269534.xml">https://www.encyclopedia.cat/ec-gec-0269534.xml</a> .....	36
<b>Il·lustració 18.</b> Equilibri hidroestàtic d'una estrella. Extret de Tema 1 Astronòmica Sabadell. 37	
<b>Il·lustració 19.</b> Capes d'una estrella. Extret de <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Solar_internal_structure.svg">https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Solar_internal_structure.svg</a> .....	38
<b>Il·lustració 20.</b> Cadena Protón-Protón. Extret de <a href="https://n9.cl/cvkqa">https://n9.cl/cvkqa</a> .....	39
<b>Il·lustració 21.</b> Diagrama ciclo CNO. Extret de <a href="https://nusgrem.es/reacciones-nucleares-en-las-estrellas/">https://nusgrem.es/reacciones-nucleares-en-las-estrellas/</a> i modificada per Mamotto .....	40
<b>Il·lustració 22.</b> Classes espectrals. Extret de <a href="https://n9.cl/qmn4b">https://n9.cl/qmn4b</a> .....	41
<b>Il·lustració 23.</b> Gegant blanca. Extret de <a href="https://n9.cl/r461n">https://n9.cl/r461n</a> .....	42
<b>Il·lustració 24.</b> Rigel. Extret de <a href="https://www.astrobitecora.com/la-clasificacion-estelar/">https://www.astrobitecora.com/la-clasificacion-estelar/</a> .....	42
<b>Il·lustració 25.</b> Sirio A Extret de <a href="https://www.astrobitecora.com/la-clasificacion-estelar/">https://www.astrobitecora.com/la-clasificacion-estelar/</a> .....	42
<b>Il·lustració 26.</b> Sol. Extret de <a href="https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/sol-mas-cerca-que-nunca_15750">https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/sol-mas-cerca-que-nunca_15750</a> .....	42
<b>Il·lustració 27.</b> Canopus. Extret de <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_estelar">https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_estelar</a> .....	42
<b>Il·lustració 28.</b> Arcturus. Extret de <a href="https://www.constellation-guide.com/arcturus/">https://www.constellation-guide.com/arcturus/</a> .....	43

<b>Il·lustració 29.</b> Betelgeuse. Extret de <a href="https://www.shutterstock.com/es/search/betelgeuse">https://www.shutterstock.com/es/search/betelgeuse</a> ..	43
<b>Il·lustració 30.</b> Composició química de les estrelles. Extret de <a href="https://www.handprint.com/ASTRO/specclass.html">https://www.handprint.com/ASTRO/specclass.html</a> .....	44
<b>Il·lustració 31.</b> Tipo espectral. Extret de <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_estelar">https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_estelar</a> .....	45
<b>Il·lustració 32.</b> Spectral class. Extret de <a href="https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/cosmicengine/stars_hrldiagram.html">https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/cosmicengine/stars_hrldiagram.html</a> ..	45
<b>Il·lustració 33.</b> Diagrama H-R. Extret de <a href="https://www.universetoday.com/39974/hertzsprung-russell-diagram/">https://www.universetoday.com/39974/hertzsprung-russell-diagram/</a> .....	45
<b>Il·lustració 34.</b> Spectral Class. Extret de <a href="https://atomtouniv.com/hertzsprung-russell/">https://atomtouniv.com/hertzsprung-russell/</a> .....	46
<b>Il·lustració 35.</b> HR diagrams. Extret de <a href="http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec11.html">http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec11.html</a> .....	47
<b>Il·lustració 36.</b> Main sequence. Extret de <a href="http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec11.html">http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec11.html</a> .....	47
<b>Il·lustració 37.</b> Omega o M17. Extret de <a href="http://www.jouscout.com/astro/nebulosa.htm">http://www.jouscout.com/astro/nebulosa.htm</a> .....	49
<b>Il·lustració 38.</b> Las Plèiades. Extret de <a href="https://fotosastronomia.wordpress.com/2018/11/04/subaru-7-cabrelles/">https://fotosastronomia.wordpress.com/2018/11/04/subaru-7-cabrelles/</a> .....	49
<b>Il·lustració 39.</b> M78 o Orió. Extret de <a href="http://www.jouscout.com/astro/nebulosa.htm">http://www.jouscout.com/astro/nebulosa.htm</a> .....	49
<b>Il·lustració 40.</b> Cap de cavall. Extret de <a href="http://www.apod.cat/la-nebulosa_cap-de-cavall">http://www.apod.cat/la-nebulosa_cap-de-cavall</a> .....	50
<b>Il·lustració 41.</b> Dumbbell o M27. Extret de <a href="http://www.jouscout.com/astro/nebulosa.htm">http://www.jouscout.com/astro/nebulosa.htm</a> ....	50
<b>Il·lustració 42.</b> Cassiopea A. Extret de <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Cassiopeia_A">https://es.wikipedia.org/wiki/Cassiopeia_A</a> .....	50
<b>Il·lustració 43.</b> Discs d'acreció. Extret de <a href="https://n9.cl/vb4k9">https://n9.cl/vb4k9</a> i modificat per Mamotto .....	52
<b>Il·lustració 44.</b> Relativistic jets. Extret de <a href="https://scitechdaily.com/new-clues-about-early-universe-from-black-hole-powered-cosmic-jet-13-billion-light-years-from-earth/">https://scitechdaily.com/new-clues-about-early-universe-from-black-hole-powered-cosmic-jet-13-billion-light-years-from-earth/</a> .....	53
<b>Il·lustració 45.</b> Event horizon. Extret de <a href="https://www.ponews.net/all/n823p73h7r.html">https://www.ponews.net/all/n823p73h7r.html</a> .....	53
<b>Il·lustració 46.</b> Esfera de fotones. Extret de <a href="https://cocnc.org/wiki/Sfera_fotonica">https://cocnc.org/wiki/Sfera_fotonica</a> .....	54
<b>Il·lustració 47.</b> Structure of a rotating Black hole. Extret de <a href="https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-a-rotating-black-hole_fig1_328736247">https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-a-rotating-black-hole_fig1_328736247</a> ...	54
<b>Il·lustració 48.</b> Singularitat. Extret de <a href="https://n9.cl/psqe7">https://n9.cl/psqe7</a> .....	54
<b>Il·lustració 49.</b> Principi de les mareas terrestres. Extret de tema 11 Astronòmica Sabadell .....	57
<b>Il·lustració 50.</b> Componentes fuerza de marea. Extret de <a href="http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm">http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm</a> .....	58
<b>Il·lustració 51.</b> <i>Telescopi newtonià de l'Astronòmica de Sabadell. Fet per Mamotto</i> .....	62
<b>Il·lustració 52.</b> <i>Funcionament d'un telescopi newtonià de tipus reflector.</i> Extret de <a href="https://www.saracco.com/telescopios-caracteristicas-generales/">https://www.saracco.com/telescopios-caracteristicas-generales/</a> .....	62
<b>Il·lustració 53.</b> <i>Diferència en l'angle de l'arribada de la llum de dos astres.</i> Part Pràctica Astronòmica Sabadell.....	63
<b>Il·lustració 54.</b> Focus. Extret de Part Pràctica Astronòmica Sabadell .....	63
<b>Il·lustració 55.</b> <i>Representació gràfica d'un píxel.</i> Extret de <a href="https://www.cavsi.com/preguntasrespuestas/definicion-pixel/">https://www.cavsi.com/preguntasrespuestas/definicion-pixel/</a> .....	63
<b>Il·lustració 56.</b> Funcionament d'una CCD. Extret de Part Pràctica Astronòmica Sabadell .....	64
<b>Il·lustració 57.</b> Distribució píxels. Extret de <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Mosaico_de_Bayer">https://es.wikipedia.org/wiki/Mosaico_de_Bayer</a>	64
<b>Il·lustració 58.</b> Filtre RGB. Extret de <a href="https://www.astrocity.es/50accesoriosastrofotografia?id_category=50&amp;n=80&amp;p=2">https://www.astrocity.es/50accesoriosastrofotografia?id_category=50&amp;n=80&amp;p=2</a> .....	64
<b>Il·lustració 59.</b> <i>Ordinadors de l'Astronòmica de Sabadell per a l'obtenció d'imatges.</i> Fet per Mamotto .....	65
<b>Il·lustració 60.</b> Logo d'AstroArt. Extret de <a href="https://n9.cl/8oo8y">https://n9.cl/8oo8y</a> .....	65
<b>Il·lustració 61.</b> Logo de l'Aavso: Variable Star Plotter. Extret de <a href="https://www.aavso.org/">https://www.aavso.org/</a> .....	66



<b>Il·lustració 62.</b> Logo d'Aladin. Extret de <a href="https://aladin.u-strasbg.fr/AladinDesktop/">https://aladin.u-strasbg.fr/AladinDesktop/</a> .....	66
<b>Il·lustració 63.</b> Logo del Microsoft Excel. Extret de <a href="https://es.logodownload.org/microsoft-excel-logo/">https://es.logodownload.org/microsoft-excel-logo/</a> .....	66
<b>Il·lustració 64.</b> Logo de Blender. Extret de <a href="https://1000marcas.net/blender-logo/">https://1000marcas.net/blender-logo/</a> .....	66
<b>Il·lustració 65.</b> Previsió meteorològica. Extret de <a href="https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/sabadell_esp%C3%B1a_3111199">https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/sabadell_esp%C3%B1a_3111199</a> .....	67
<b>Il·lustració 66.</b> Senyal, salt i fons. Fet per Mamotto .....	69
<b>Il·lustració 67.</b> Cercles concèntrics en l'estrella. Fet per Mamotto .....	69
<b>Il·lustració 68.</b> Dark. Fet per Mamotto .....	70
<b>Il·lustració 69.</b> Flat. Fet per Mamotto .....	70
<b>Il·lustració 70.</b> Dark frame del Flat field. Fet per Mamotto .....	71
<b>Il·lustració 71.</b> Localització de la carpeta de pretractament. Fet per Mamotto.....	71
<b>Il·lustració 72.</b> Carpeta de pretractament. Fet per Mamotto .....	72
<b>Il·lustració 73.</b> Distribució de les imatges, falts, darks i darks dels flats. Fet per Mamotto .....	72
<b>Il·lustració 74.</b> Activació de l'alineació automàtica. Fet per Mamotto.....	73
<b>Il·lustració 75.</b> Carpeta per a obrir imatges. Fet per Mamotto .....	73
<b>Il·lustració 76.</b> Cerca del quàsar a l'Aladin. Fet per Mamotto .....	74
<b>Il·lustració 77.</b> Cerca de les coordenades del quàsar a l'Aladin. Fet per Mamotto.....	74
<b>Il·lustració 78.</b> Aavso. Fet per Mamotto .....	75
<b>Il·lustració 79.</b> Imatge resultant, Aavso. Fet per Mamotto .....	75
<b>Il·lustració 80.</b> Marques en les estrelles de comparació, AstroArt. Fet per Mamotto .....	76
<b>Il·lustració 81.</b> Magnituds estels de comparació, Excel. Fet per Mamotto .....	76
<b>Il·lustració 82.</b> Corba de creixement. Fet per Mamotto .....	76
<b>Il·lustració 83.</b> Radi 3 (senyal) per a la fotometria d'obertura. Fet per Mamotto.....	77
<b>Il·lustració 84.</b> Data juliana. Fet per Mamotto .....	77
<b>Il·lustració 85.</b> ADUS de cada estrella, AstroArt. Fet per Mamotto.....	77
<b>Il·lustració 86.</b> ADUS de cada estrella, Excel. Fet per Mamotto .....	78
<b>Il·lustració 87.</b> Resultat pel càlcul de la magnitud. Fet per Mamotto .....	78
<b>Il·lustració 88.</b> ADUS de cada estrella en les 10 imatges. Fet per Mamotto .....	78
<b>Il·lustració 89.</b> Resultat pel càlcul de la magnitud en les 10 imatges. Fet per Mamotto .....	78
<b>Il·lustració 90.</b> Pretractament, filtre vermell. Fet per Mamotto .....	82
<b>Il·lustració 91.</b> Pretractament, filtre verd. Fet per Mamotto .....	82
<b>Il·lustració 92.</b> Pretractament, filtre blau. Fet per Mamotto.....	82
<b>Il·lustració 93.</b> Selecció d'imatge. Fet per Mamotto .....	83
<b>Il·lustració 94.</b> Imatge resultant. Fet per Mamotto .....	83
<b>Il·lustració 95.</b> Composició RGB. Fet per Mamotto .....	84
<b>Il·lustració 96.</b> Imatge resultant sense alinear. Fet per Mamotto.....	84
<b>Il·lustració 97.</b> Imatge alineada. Fet per Mamotto.....	85
<b>Il·lustració 98.</b> Balanç de color. Fet per Mamotto .....	85
<b>Il·lustració 99.</b> Edició del calibratge de color. Fet per Mamotto .....	86
<b>Il·lustració 100.</b> Resultat del la tricromia de la nebulosa M27. Fet per Mamotto .....	86

# ÍNDIX DE TAULES

<b>Taula 1.</b> Troballes cosmològiques -----	14
<b>Taula 2.</b> Composició química del cosmos -----	15
<b>Taula 3.</b> Forces fonamentals-----	20
<b>Taula 4.</b> Classes espectrals-----	43
<b>Taula 5.</b> Magnitud aparent 10 imatges -----	80
<b>Taula 6.</b> Magnitud mitjana aparent-----	80
<b>Taula 7.</b> Error de càlcul-----	80

# INTRODUCCIÓ

Primerament, vull explicar per què he elegit aquest treball. Des de fa molt de temps que l'espai i, sobretot els forats negres, m'han generat moltes preguntes, inquietuds i curiositat. No va ser gaire abans d'entrar a batxillerat que vaig començar a llegir Stephen Hawking i, a raó d'això, cada vegada mirava més notícies sobre novetats astronòmiques.

Per tot això va ser que vaig plantejar-me de traduir aquests interessos en el meu treball de recerca. Com sabia que era un tema que costaria de ser acceptat pel nivell de batxillerat, el primer que vaig fer va ser buscar informació per veure com el podia orientar; i buscant, vaig trobar un curs teòric, on també n'oferien un altre de pràctic, a l'Astronòmica de Sabadell.

Si aconseguia apuntar-me i que m'acceptessin, tenia on resoldre dubtes, tutoritzar el treball externament, a banda del tutor de l'institut que és qui m'ha guiat durant el treball, i un suport perquè m'acceptessin el TR a l'Institut. I per sort, així va ser.

El meu treball de recerca es titula "Estrelles i Forats negres: Aplicació de la informàtica en objectes astronòmics" i el que pretenc és saber i comprendre què són i com funcionen els forats negres dins el conjunt de l'Univers i, a la mateixa vegada, entendre la seva existència; sempre dins el meu nivell de coneixements d'estudiant de batxillerat.

He enfocat el TR sobre la hipòtesi de l'existència dels forats negres i si un forat negre podria arribar a absorbir el Planeta Terra.

## Objectius

Els objectius del treball de recerca que em vaig plantejar en un inici es poden resumir en els següents:

1. Adquirir informació sobre els forats negres, estrelles i Univers amb un Curs teòric de Cosmologia i a partir de la recerca d'informació a Internet, lectura de llibres o articles, o fins i tot a força de mirar documentals, conferències o pel·lícules.
2. Interioritzar el funcionament de l'Univers i tot el que l'envolta, en concret els forats negres i tots els processos que es relacionen amb aquests.
3. Realitzar una pràctica principal a base de programes informàtics amb l'ajut d'un curs pràctic de mesura d'estrelles, quàsars i forats negres, i portar a terme diverses pràctiques/experiments addicionals per fer més comprensibles i assequibles els conceptes teòrics explicats en el marc teòric.

A partir d'aquest curs pràctic, també em vaig plantejar que seria una bona idea simular un forat negre en un programa informàtic, cosa que al final he intentat amb Blender però no m'ha acabat de funcionar. Trobareu el vídeo a l'ANNEX 4.

## Estructura

El treball de recerca l'he estructurat en dues parts principals:

✚ Marc Teòric

✚ Marc Pràctic

Aquestes estan precedides d'una altra part general que compren els agraïments, els resum/abstract del treball, l'índex de continguts, il·lustracions, taules i gràfics, la introducció, i el calendari de treball, que explica com he estructurat el temps.

El marc teòric compren tota la part de teoria. En primer terme parlo de l'Estructura de l'Univers i introdueixo algunes lleis físiques necessàries per a entendre la part principal del treball. Posteriorment, i més extensament, em centro en les estrelles i els forats negres (les seves característiques, la seva mecànica, etc.).

Durant aquests apartats faig esment a una sèrie d'experiments, que trobareu posteriorment desenvolupats a l'annex, per acabar d'entendre que són, amb l'ajuda de vídeos demostratius.

Posteriorment, en el marc pràctic, faig el càlcul de magnitud d'un quàsar i la tricromia d'una nebulosa planetària.

I per acabar, trobem una altra part general de la qual en formen part les conclusions, les referències bibliogràfiques i els annexos.

# CALENDARI DE TREBALL

SETMANES		5	6 8	9	10	11	12	13	14	15	16	17 24	25	26	27	28	29 31	32 35	36 37	38 42	43 45	46	47	48 49	50	51 52	1 2	
TR	PRESENTACIÓ SOL·LICITUD																											
	ACCEPTACIÓ																											
	ENTREVISTES AMB EL TUTOR																											
	SESSIONS TR OBLIGATÒRIES																											
TREBALL PART TEÒRICA	CERCA INFORMACIÓ																											
	REDACCIÓ PARCIAL																											
	UNIR, VERIFICAR																											
	POWER POINT																											
	PRESENTACIÓ FINAL TUTOR																											
TREBALL PART PRÀCTICA	CERCA INFORMACIÓ																											
	CAMPUS PRÀCTIC																											
	REDACCIÓ																											
	POWER POINT																											
CURS TEÒRIC COSMOLOGIA																												
FINALITZACIÓ TR	CONCLUSIONS ANNEXOS																											
	AGRAÏMENTS																											
	ÍNDEX TREBALL BIBLIOGRAFIA																											
	ENTREGA TR																											
	AVANTPROJECTE																											
EXPERIMENTS AFEGITS	REDACCIÓ INICIAL																											
	REALITZACIÓ																											
	REDACCIÓ FINAL. RESULTATS																											

# CAPÍTOL 1.

# MARC TEÒRIC

## COSMOLOGIA I ESTRUCTURA DE L'UNIVERS

### ASTRONOMIA

S'anomena astronomia la ciència que s'encarrega d'estudiar tot el que fa referència als astres, els seus moviments i les lleis que els regeixen. Es fa càrrec de l'estudi de l'univers físic i dels fenòmens que tenen lloc en el mateix.

Estudia tots els cossos celestes de l'univers: des dels objectes que podem veure a simple vista com el Sol, els planetes i els seus satèl·lits; passant per objectes que només podem veure amb telescopis o altres instruments com els cometes, asteroides, les estrelles, galàxies i la matèria interestel·lar; incloent-hi, fins i tot, coses que no es poden veure en absolut com la matèria i l'energia fosca.

Com a branques de l'astronomia trobem:

- L'astrofísica: Estudia les característiques dels cossos celestes.
- L'astronomia de posició: Mesura i determina posició dels astres.
- La mecànica celeste: Estudia el moviment dels astres.
- L'astronàutica: Aconseguir que l'home visiti els astres.
- La planetologia: estudia els planetes coneguts i busca els que encara no es coneixen.
- L'astronomia dels raigs X: s'especialitza en el mesurament dels raigs X provinents de l'espai exterior.
- La cosmologia: Formació i evolució de l'univers, al qual dedicaré l'apartat següent.

### DEFINICIÓ DE COSMOLOGIA. BREU HISTÒRIA.

La cosmologia és l'estudi de l'estructura i la història de l'Univers a gran escala. Tracta de l'origen, la distribució i les lleis d'aquest; estudia com es va formar l'univers a partir del Big Bang. La cosmologia es relaciona també amb la filosofia i la religió. Els cosmòlegs estudien conceptes d'allò més variats i complexos; des de la teoria de cordes, l'energia i la matèria fosca, fins a si vivim en un únic univers o hi ha diversos universos. Estudia l'Univers com un tot.

Si ens traslладem a la cosmologia actual, aquesta es fonamenta sobre tres pilars:

1. Les proves observacionals.
2. La teoria de la gravetat: relativitat general.
3. Alguns principis filosòfics.

Tanmateix, l'estudi d'aquesta ve de fa molt més temps. Podem situar el començament de la cosmologia occidental a uns 2500 anys enrere, en l'època grega. La primera gran teoria

cosmològica, que va perdurar fins al Renaixement, va ser la defensada per Plató i, sobretot, Aristòtil; la qual incloïa els quatre elements: terra, aigua, aire i foc; i el moviment etern i perfecte dels objectes celestes que es consideraven fixats en vuit esferes cristal·lines rotants, la matèria de les quals era l'anomenada cinquena essència. Més tard, l'astrònom Claudi Ptolemeu va fer correccions sobre la teoria de Plató i Aristòtil per a explicar les anomalies que s'observaven en el moviment dels astres.

No va ser fins a l'any 1543 que el model geocèntric d'Aristòtil fou canviat, per l'heliocèntric, del matemàtic Nicolau Copèrnic, que va publicar un treball sobre la revolució de les esferes celestes. Aquestes idees es van anar perfeccionant per astrònoms com Johannes Kepler i Isaac Newton.

Ja en l'època moderna trobem com a dates importants:

1905	Teoria de la Relativitat especial.	1931	Lemaitre proposa la idea del Big Bang.
1915	Teoria de la Relativitat General.	1933	S'introdueix per part de Zwicky el terme de matèria fosca.
1916	Karl Schwarzschild pública un treball sobre equacions de camp d'Einstein.	1967	Wheeler va donar el concepte de Forat negre al treball de 1916 de Schwarzschild.
1919	Eddington mesura en un eclipse la curvatura que experimenta la llum al passar prop del sol.	1981	Guth i Linde proposen les primeres teories sobre univers inflacionari.
1929	Hubble estableix la Llei d'expansió de l'Univers.		

*Taula 1. Troballes cosmològiques*

## ESTRUCTURA DE L'UNIVERS

El terme d'Univers es refereix a un sistema tancat que ho abasta tot: espai, temps, energia, matèria... També s'anomena Cosmos. Tota la matèria observable de l'univers representa només el 4,9% de la totalitat de l'espai: Satèl·lits, planetes, estrelles, nebuloses de gas i pols interestel·lar, galàxies, inclús nosaltres mateixos; tots estem englobats en aquest petit percentatge. El percentatge restant està dividit en dos: un 26,8% compren la matèria fosca, mentre que el 68,3% restant de l'Univers l'ocupa l'energia fosca.

Les observacions indiquen que l'Univers va néixer, evoluciona i canvia sense parar. No obstant això, les lleis físiques que el regeixen es consideren constants en qualsevol lloc i moment, excepte en els primers instants, encara difícils d'entendre. La teoria que millor explica el seu funcionament és, de moment, la TEORIA RELATIVITAT GENERAL.



El límit de l'Univers observable es diu horitzó de llum còsmica i la matèria del cosmos està ordenada. A més, la força de gravetat fa que la matèria s'agrupi formant estructures: des de les més simples, fins a més grans i complexes. Aquestes estructures les podem classificar en estructures grans i menors:

- ❑ Estructures grans: galàxies, estrelles, planetes, satèl·lits, sistemes, cúmuls, supercúmuls de galàxies, muralles.
- ❑ Estructures menors: meteors, meteorits, nebuloses, cometes.

Com a conclusió cal dir que l'estructura de l'univers s'expandeix constantment i cada dia es descobreixen noves estructures.

## DE QUÈ ESTÀ FORMADA LA MATÈRIA?

Tota la matèria que existeix a l'Univers es compon de partícules. Cada tipus de partícula compleix una funció diferent; i és degut a la interacció entre els diferents tipus de partícules que es fa possible l'Univers tal com el coneixem.

Les partícules elementals són les parts o porcions més petites en què pot dividir-se la matèria.

Hi ha dues classes de partícules elementals: fermions i bosons.

- Els fermions formen la massa de la matèria.
- Els bosons s'encarreguen d'aplicar a aquesta massa les quatre forces fonamentals: electromagnetisme, força nuclear forta, força nuclear feble i força de la gravetat.

La composició química del cosmos observable és la següent:

Element	Proporció
<b>Hidrogen</b>	74%
<b>Heli</b>	24%
<b>Resta d'elements</b>	2%

*Taula 2. Composició química del cosmos*

A la natura hi ha 90 elements químics estables, representats per l'àtom corresponent. Tots aquests àtoms tenen la mateixa estructura bàsica: un nucli de protons i neutrons al voltant de el qual orbiten un o diversos electrons, depenent de l'element. Qualsevol objecte està format per protons, neutrons i electrons. Si ens fixem en els elements que formen el cosmos, l'hidrogen es compon d'un protó i un electró i l'heli està compost per dos protons, dos neutrons i dos electrons. En el cas de la resta d'elements, podríem parlar del carboni, el ferro, el plom o l'urani, entre d'altres. El carboni està compost per sis protons, sis neutrons i sis electrons. Els elements

més pesants, com ara el ferro, el plom i l'urani, contenen un nombre encara més gran de protons, neutrons i electrons.

Als astrònoms els agrada anomenar "matèria bariònica" a tot el material format per aquestes partícules. Aquesta, tal com he dit anteriorment, és el 4,6% de la matèria visible que compon l'Univers. Es diu també matèria ordinària i està formada per àtoms. Pot estar en quatre estats: sòlid, líquid, gasós i plasma. Passa d'un estat a un altre al guanyar o perdre calor. La major part de la matèria visible de l'Univers està en estat de plasma, ja que és el que forma les estrelles.

## UNITATS DE MESURA

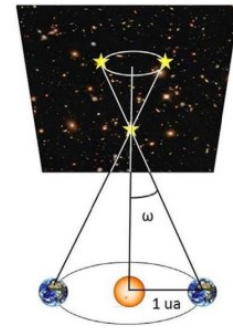
Un dels grans problemes per a ubicar un objecte en l'espai és la immensa distància que existeix entre aquest i el seu referent. L'escala de quilòmetres o milles resulta irrisòria quan parlem d'aquests tipus de magnituds astronòmiques. La Unió Astronòmica Internacional (UAI) va establir el 1976 un sistema d'unitats astronòmiques per ajudar els astrònoms en els seus càlculs. Així doncs, en astronomia hi ha bàsicament tres unitats de mesura de distàncies: la Unitat Astronòmica (UA), l'any llum (all) i el parsec (pc).

- Unitat Astronòmica (UA): La Unitat Astronòmica és la distància mitjana entre la Terra i el Sol; equival a 149.597.870.700 metres. Aquesta distància no és exacta sinó la mitjana de múltiples mesures, ja que l'òrbita de la Terra al voltant de Sol no és circular sinó més aviat el·líptica. És una unitat que va quedar establerta per la Unió Astronòmica Internacional el 2012, però que ja s'utilitzava des del segle XVII.
- Any Llum (all): L'any llum es tracta de la distància que recorre la llum en un any. Es considera un patró de mesura ideal pel fet que la llum en el buit té una velocitat molt alta i sobretot constant; així i tot, per a l'Univers és una distància insignificant. La seva expressió seria equivalent a 9.460.730.472.580,8 km, és a dir, la distància que recorreria un fotó en el buit en un any julià a la velocitat de la llum (299 792 458 m/s).
- Parsec (pc): El parsec es defineix a partir d'un dels mètodes de càlcul de distàncies, la paral·laxi<sup>1</sup>. Considerat la distància sota la qual la paral·laxi observada seria d'1 segon d'arc, és la unitat de mesura més usada en cosmologia, i equival a 3,2616 anys llum.

---

<sup>1</sup> Es defineix la paral·laxi de l'estrella com el semiangle del seu desplaçament aparent després de sis mesos de moviment terrestre. El que es fa és mesurar la seva posició un dia qualsevol i tornar-la a mesurar al cap de sis mesos. En aquest interval és quan la separació aparent de l'estrella és màxima.

Per a determinar la distància de les estrelles més properes s'usa el mètode de la paral·laxi: observant una estrella propera s'adverteix que al llarg de l'any no està quieta respecte del fons de les estrelles llunyanes, sinó que es desplaça un cert angle. El que es fa és mesurar la seva posició en el cel en un moment de l'any, i tornar a mesurar la seva posició mig any després, quan la Terra es troba a l'altre costat de la seva òrbita. Aquesta estrella s'haurà desplaçat un cert angle, i amb una senzilla fórmula trigonomètrica es pot calcular la seva distància. A la meitat d'aquest angle desplaçat se l'anomena **paral·laxi**.



*Il·lustració 1. Paral·laxi.*  
Extret de Tema 12  
Astronòmica Sabadell

Com a conclusió diré que com més lluny anem, els errors es van acumulant i les distàncies són menys precises.

## LLEIS DE NEWTON

Isaac Newton (1643-1727) va ser un astrònom, físic, matemàtic, filòsof, inventor, alquimista i teòleg anglès conegut principalment per:

- Establir les bases de la mecànica clàssica a través de les tres lleis del moviment i la seva llei de la gravitació universal.
- Desenvolupar el càlcul integral i diferencial (de forma simultània i independent de Gottfried Leibniz).
- Descobrir que la llum blanca està composta pel conjunt de tots els colors.

Newton és, gairebé amb seguretat, el major científic de tots els temps. Amb ell culmina i acaba la revolució científica iniciada per Copèrnic. Com ell mateix deia:

*"Si he vist més lluny que altres homes és perquè he pujat sobre les espatlles de molts gegants"*

Les lleis de Newton, també conegudes com a Llei de la Dinàmica són tres principis matemàtics a través dels quals és possible explicar pràcticament tots els moviments que succeeixen l'Univers.

Ara passo a explicar-les amb més detall.

### 1<sup>RA</sup> LLEI DE NEWTON : LLEI DE LA INÈRCIA

La primera llei de Newton, coneguda també com a Llei d'inèrcia defensa que *"Tot cos roman en el seu estat de repòs o de moviment rectilini uniforme a menys que altres cossos actuïn sobre ell"*. Dit d'una altra manera, no és possible que un cos canviï el seu estat inicial tret que una força externa actuï sobre ell; i és d'aquí que deriva la relació entre la massa i la força. La fórmula de la primera llei de Newton és:

$$\Sigma F = 0 \leftrightarrow dv/dt = 0$$

Com sabem, el moviment és relatiu, és a dir, depèn de quin sigui l'observador que descrigui el moviment. Així, podem dir que per a un passatger d'un tren, el revisor ve caminant lentament pel passadís del tren, mentre que per a algú que veu passar el tren des de l'andana d'una estació, el revisor s'està movent a una gran velocitat. Es necessita, per tant, un sistema de referència al qual referir el moviment. Aquesta llei serveix per definir els sistemes de referència inercials, que són aquells sistemes de referència des dels quals s'observa que un cos sobre el qual no actua cap força neta es mou amb velocitat constant.

No obstant, en realitat és impossible trobar un sistema de referència inercial, ja que sempre hi ha algun tipus de força actuant sobre els cossos. Per això, és impossible reproduir exactament aquesta llei. Fins i tot en el buit espacial hi ha partícules i pols còsmica que frenen el moviment dels cossos. Tot i així, sí que podem trobar un sistema de referència en què el problema que estiguem estudiant pugui ser tractat com si estiguéssim en un sistema inercial. En molts casos, suposar a un observador fix a la Terra és una bona aproximació de sistema inercial, ja que tot i comptar amb una acceleració translacional i una altre rotacional, totes dues són de l'ordre de  $0,01 \text{ m/s}^2$ .

## 2<sup>NA</sup> LLEI DE NEWTON : LLEI FONAMENTAL DE LA DINÀMICA

La llei fonamental de la dinàmica, segona llei de Newton o llei fonamental s'encarrega de quantificar el concepte de força, ja que sosté que "La força d'un cos A que actua sobre un cos B és directament proporcional a la seva acceleració (adquirida en la seva trajectòria)". La constant de proporcionalitat és la massa del cos. Sempre que aquestes forces aplicades no s'anul·lin, el cos B s'accelerarà en la direcció de la força majoritària.

La fórmula de la segona llei de Newton s'expressa de dues maneres diferents en funció de si la massa del cos roman constant o no.

- Amb massa constant:  $F = m \cdot (V_1 - V_0) / (t_1 - t_0)$ . El canvi de velocitat dividit pel canvi de temps és la definició d'acceleració **a**. En aquest cas, la segona llei de Newton es redueix al producte d'una massa i una acceleració:  $F = m \cdot a$
- Amb massa variable:  $F = (m_1 \cdot V_1 - m_0 \cdot V_0) / (t_1 - t_0)$  Es parla de canvis en la quantitat de moviment ( $m \cdot V$ ); de manera que, en aquest punt, no és possible separar quant canvia la massa i la velocitat. Només sabem la variació del producte ( $m \cdot V$ ).

Force = Change of Momentum with Change of Time

Difference form:  $F = \frac{m_1 V_1 - m_0 V_0}{t_1 - t_0}$

With constant mass:  $F = m \frac{V_1 - V_0}{t_1 - t_0}$

$F = m a$

Force = mass x acceleration

t = time  
X = location  
m = mass  
V = Velocity

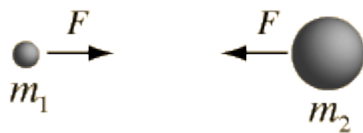
*Il·lustració 2. Velocity, acceleration, momentum and force are vectors quantities. Extret de <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/newtons-laws-of-motion/>*

### 3<sup>RA</sup> LLEI DE NEWTON : PRINCIPI D'ACCIÓ I RECCIÓ

La tercera llei, també coneguda com a Principi d'acció i reacció ens diu que "Quan un cos A exerceix una força sobre un altre cos B, aquest exerceix sobre el primer una força exactament igual però en sentit oposat". No hi ha forces aïllades.

Tanmateix, encara que els parells d'acció i reacció tinguin el mateix valor i sentits contraris, no s'anul·len entre si, ja que actuen sobre cossos diferents.

Un sistema no pot "arrencar-se" a si mateix en moviment amb forces internes; per aconseguir una força neta i una acceleració, ha d'interactuar amb un objecte extern a si mateix.



*Il·lustració 3. Newton's third Law.* Extret de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Newt.html>

Sense especificar la naturalesa o origen de les forces sobre les dues masses, la tercera llei de Newton estableix que si sorgeixen d'elles mateixes, les seves forces han de ser d'igual magnitud, però direcció oposada perquè cap força neta sorgeixi de forces internes.

### 4<sup>TA</sup> LLEI DE NEWTON : LLEI DE LA GRAVITACIÓ UNIVERSAL

Els objectes que hi ha a l'Univers interaccionen entre ells; d'aquestes interaccions en diem forces i en podem veure moltes de diferents. Ara bé, si les analitzem millor veurem que a la natura actualment només hi ha quatre forces fonamentals, que determinen totes les formes d'interacció de la matèria. Aquestes quatre forces, anomenades de la més feble a la més forta, són les següents:

- La força gravitatòria: És la força fonamental més feble de totes; en canvi, pot actuar a través de distàncies infinites, és a dir, és d'abast infinit. Tot i això, com més gran sigui la distància, menys força gravitatòria experimentaran els cossos. D'altra banda, és una força sempre atractiva i que depèn d'una propietat dels objectes: la seva massa.
- La força nuclear feble: És la responsable de la desintegració radioactiva de les partícules elementals. Aquest és el canvi literal d'un tipus de partícula subatòmica a un altre. La força es realitza pels bosons W i Z. El seu abast és extremadament curt. Quan una partícula com un neutrí s'acosta a un quark,



*Il·lustració 4. La fuerza nuclear débil.* Extret de [https://www.enterarse.com/20200130\\_0001-las-cuatro-fuerzas-fundamentales-de-la-fisica](https://www.enterarse.com/20200130_0001-las-cuatro-fuerzas-fundamentales-de-la-fisica) i modificat per Mamotto

la força feble fa que el quark canviï enviant un bosó W. Això pot convertir un neutró en un protó i el neutrí en un electró.

- La força electromagnètica: És deguda a una altra propietat de la matèria: la seva càrrega elèctrica. Hi ha dos tipus de càrregues diferents, que anomenem positiva i negativa. Si dues càrregues són iguals, la força és repulsiva i si les dues càrregues són diferents, la força és atractiva. El seu abast és teòricament infinit.
- La força nuclear forta: És la que manté units els components dels nuclis atòmics, i actua indiferentment entre dos nuclis qualssevol, protons o neutrons. És una força de molt curt abast, per tant, només es nota al voltant de les partícules elementals o en els nuclis atòmics, més enllà ja no.

En la taula següent es poden veure les característiques principals de les diferents forces:

INTERACCIÓ	RANG	INTENSITAT
Gravitatòria	Infinit	1
Feble	$10^{-18}$ m	1025
Electromagnètica	Infinit	1036
Força	$10^{-15}$ m	1038

*Taula 3. Forces fonamentals*

Per tant, quines forces hem de tenir en compte per a estudiar l'Univers? Per començar, podem descartar les dues forces nuclears pel seu curtíssim abast. Dues estrelles o dos forats negres no notaran cap força nuclear entre ells. I la força electromagnètica també la podem descartar perquè tots els astres són elèctricament neutres. Així doncs, al final només queda una força que és la que domina l'Univers a més gran escala: la força gravitatòria.

La força és una magnitud vectorial, això vol dir que per descriure-les necessitem conèixer el valor de la intensitat, i també la direcció, el sentit i el punt d'aplicació de la força. Les forces gravitatòries, que s'exerceixen per exemple en el Sol i la Terra, es caracteritzen perquè:

- La direcció de la força és la de la recta que uneix els dos cossos afectats, el que la crea i el que la rep.
- El sentit de la força es dirigeix cap a la massa que crea la interacció gravitatòria.
- El mòdul és directament proporcional a les masses que intervenen en la interacció gravitatòria i inversament proporcional al quadrat de la distància que les separa.
- Les forces degudes a la interacció gravitatòria són sempre atractives.

La llei formulada per Newton i que rep el nom de llei de la gravitació universal, afirma que *“La força d'atracció que experimenten dos cossos és directament proporcional al producte de les seves masses i inversament proporcional al quadrat de la distància que els separa”*.

La llei inclou una constant de proporcionalitat ( $G$ ) que rep el nom de constant de la gravetat universal i el valor del qual, és de:

$$G = 6,670 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$$

La fórmula que explica la naturalesa de les interaccions gravitatòries i indica el valor de la força que dona lloc a aquestes interaccions, s'expressa com a:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

On  $F$  és la força gravitatòria,  $m_1$  i  $m_2$  les masses que intervenen a la interacció gravitatòria i  $r$  és la distància que separa ambdós cossos.

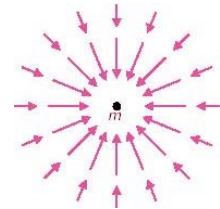
Aquesta llei pot expressar-se també en format vectorial:

$$\vec{F}_{12} = G \frac{m_1 \times m_2}{R_{12}^2} (\vec{R}_1 - \vec{R}_2) = -\vec{F}_{21}$$

La llei implica que com més a prop i més massius siguin dos cossos, més intensament s'atrauran.

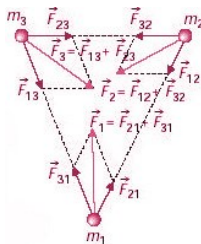
No obstant això, avui dia sabem que, a partir de certa quantitat de massa, aquesta llei perd la seva validesa (en cas d'objectes supermassius), i es fa necessari treballar amb la llei de Relativitat General formulada en 1915 per Albert Einstein. La llei de gravitació universal és llavors una aproximació a la llei d'Einstein, però, així i tot, és útil per comprendre la major part dels fenòmens gravitatoris del sistema solar.

Com he anomenat anteriorment, les forces gravitatòries actuen a distància; sense necessitat que existeixi contacte físic entre els cossos implicats. Aquesta idea, es pot resumir amb el concepte de "camp", que s'entén com a la pertorbació que produeix un objecte en l'espai intrínsecament.



*Il·lustració 5. Camp gravitatori d'una massa puntual. Extret de <https://n9.cl/674b1>*

El camp gravitatori és sempre de naturalesa atractiva; és per això que les



*Il·lustració 6. Suma gràfica de forces gravitatoris. Extret de <https://n9.cl/674b1>*

línies de força del mateix apunten en direcció a la massa. La interacció gravitatòria verifica la llei de superposició de forces.

Així, donades tres masses puntuals  $m_1$ ,  $m_2$  i  $m_3$ , la força gravitatòria conjunta que exerceixen les dues primeres sobre la tercera és igual a la suma vectorial de la força que exerciria la primera sobre la tercera si la segona no fos present, més la que induiria la segona sobre la tercera si no existís la primera massa.

$$\vec{F}_3 = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$$

## TEORIA DE LA RELATIVITAT ESPECIAL

La Teoria de la Relativitat és una teoria de la mecànica que explica com es mouen les coses i el perquè es mouen. Va ser formulada per Einstein el 1905 i se li diu Especial perquè és un cas singular que bassa les seves explicacions en la relativitat sense gravetat, en absència de camps gravitacionals.

Es basa en dos postulats senzills:

1. **Principi de la Relativitat:** Totes les lleis de la física han de ser les mateixes en tots els sistemes de referència inercials.
2. **Constància de la velocitat de la llum:** Tots els observadors mesuren el mateix valor per a la velocitat de la llum.

Les mesures de longitud i d'interval de temps no són les mateixes, sinó que depenen del sistema de referència de l'observador. Per exemple, la mesura de la longitud d'un vagó dona resultats diferents, segons l'observador sigui dins del vagó, o sigui fora i immòbil a terra; el mateix passa per al pas del temps.

Tot depèn del punt de vista des d'on es mirin les coses. El temps que observem depèn de la velocitat relativa entre els diferents sistemes de referència. El temps no és un fet universal, ni molt menys, és un fet relatiu. Aquest es dilata. Per exemple, dos observadors que es moguin a diferents velocitats mesuraran diferents temps. En concret, a més velocitat, més lentament es mesura el temps.

I amb l'espai que succeeix? L'espai es contrau. Dos observadors que es moguin a diferents velocitats mesuraran diferents longituds d'espai. En concret, a més velocitat, menys longitud dels cossos mesuraran.

Tot això que acabem té una altra implicació: l'espai i el temps no són independents, sinó que el temps apareix com una nova dimensió lligada a l'espai. Així doncs, es parla de l'espai-temps. La massa i l'energia tampoc són independents, així que també estan íntimament lligades.

En la relativitat especial, la geometria no roman constant quan hi ha implicada una acceleració, el que comporta l'aplicació d'una força ( $F = dt$ ), i en conseqüència un canvi d'energia.

D'altra banda, en física clàssica la massa d'una partícula és una constant que no depèn del sistema de referència que es faci servir. Ara bé, en relativitat especial entenem la massa d'un objecte com una resistència d'aquell objecte a ser accelerat. Així doncs, podem redefinir la massa com a massa en repòs  $m_0$  i la massa en moviment com una funció de la massa en repòs i de la velocitat del cos. I de la mateixa manera que la fórmula de la massa canvia, la fórmula de l'energia cinètica també.



Així és com arribem a la deducció de la famosa equació:

$$E = mc^2$$

que autoritzava a utilitzar l'energia total d'un cos en comptes de la seva massa.

Einstein buscava Lleis de moviment que fossin vàlides per a tots els observadors; i amb la Relativitat especial aconseguia lleis que fossin independents de moviments inercials, és dir sense acceleració.

Per tant, amb la Relativitat general amplia el rang de validesa. Ell buscava l'absolut, allò invariable. Aquests factors indiquen la necessitat d'una teoria més àmplia que permetés estudiar les relacions de transformació entre sistemes de referència no inercials o sotmesos a l'acció de forces. Aquests indicis van dur finalment a la formulació de la teoria de la relativitat general, en la qual la curvatura intrínseca de l'espai-temps és directament proporcional a la densitat d'energia en aquest punt.

## TEORIA RELATIVITAT GENERAL

Els forats negres son una predicció de la teoria de la relativitat que va trigar molt temps a ser acceptada i entesa: de fet, Einstein no la va arribar a acceptar mai i és justament en els forats negres on les conseqüències més dràstiques de la seva teoria es fan més evidents. La Teoria de la Relativitat General va ser publicada el 1915 i estava precedida fins aquell moment per les Lleis de Newton, explicades anteriorment. Actualment s'accepta com la teoria que descriu la gravitació en física moderna.

És una teoria de camps no lineal que inclou la interacció gravitacional i que ens lliga les fonts del camp o camps amb el camp gravitacional. Les 3 dimensions de l'espai: alçada, amplitud i profunditat, més el temps, formen l'espai-temps, espai quadridimensional, concepte introduït el 1908 per Hermann Minkowski.

Aquesta teoria ve precedida per l'entesa de varis conceptes o principis:

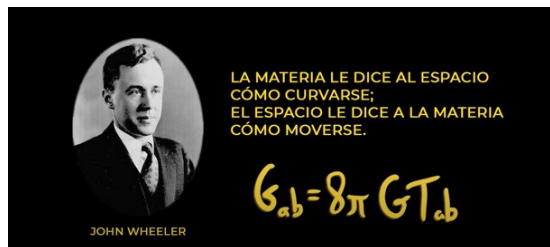
1. **Principi d'equivalència:** És el nexa entre la Relativitat especial i la relativitat general. Per exemple, si ens llancem en caiguda lliure des d'un penya-segat, veiem que no hi ha força que ens aturi. Si posem una bàscula a sota nostre, aquesta pesaria zero i si mentre caiem, traiem unes bales de la butxaca, veurem com descendeixen al costat nostra. Això fa pensar que la gravetat no és una força. Per tant afirma que, puntualment, és indistingible un sistema de camp gravitatori d'un sistema de referència no inercial accelerat.
2. **La constància de la velocitat de la llum:** Tots els observadors inercials mesuren la mateixa velocitat de la llum.

3. **Paradoxa d'Ehrenfest:** Es refereix a la rotació d'un disc "rígid". La circumferència d'un disc giratori ha de contraposar-se, però no el radi, ja que el radi és perpendicular a la direcció del moviment.

L'equació de la Relativitat general és en realitat un sistema de deu equacions, però es poden escriure de manera unificada de la següent manera:

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - \Lambda g_{\mu\nu}}_{\text{espai-temps}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}}_{\text{massa-energia}}$$

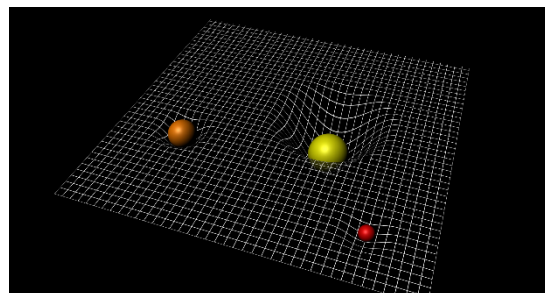
Aquesta relaciona dos aspectes: curvatura de l'espai-temps amb Massa (energia).



*Il·lustració 7. Relatividad General* Extret de min 12:18 <https://n9.cl/pyxi7>

Amb l'aportació d'Einstein, la teoria de Newton es va veure desbancada per una altra que la incloïa com una aproximació només vàlida per a masses i velocitats relativament petites. La teoria d'Einstein canviava completament el concepte de què és i com actua la gravetat. Va suposar que la gravetat està íntimament unida a l'espai i al temps. Va proposar que el nexa d'unió era la geometria. Segons Einstein en presència d'una massa, l'espai-temps es "deforma", de manera que qualsevol altra massa nota aquest espai deformat, i es veu obligada a seguir trajectòries diferents a quan l'espai estava sense deformar (sense cap massa).

Per exemple i utilitzant una metàfora, si imaginem l'espai-temps com una mena de llit elàstic i el sol que és una estrella massiva, com una bola pesada que al ser col·locada sobre el llit elàstic fa que aquest es corbi veiem que llavors, si deixem caure els planetes, com la terra, al llit elàstic, aquests al ser més petits i lleugers no avancen línia recta sinó que descriuen una òrbita al voltant del sol. Si el sol desapareix es forma una ona gravitacional que viatjarà cap als planetes a la velocitat de la llum i a la vegada que deixarem de veure el sol brillar els planetes perdran la seva òrbita. Amb això veiem que els planetes no orbiten al voltant del sol per la gravetat sinó per la pròpia geometria de l'Espai-temps.



*Il·lustració 8. La representació de la curvatura del espai-temps* Extret de <https://www.agenciasinc.es/Entrevistas/Diez-preguntas-para-entender-la-teoria-de-la-relatividad-general-de-Einstein>

La relativitat general afegeix a la relativitat especial la possibilitat que la presència de matèria podria deformar localment l'espai-temps, de manera que les trajectòries geodèsiques (la línia més curta que va d'un punt a un altre dins una superfície) a través de l'espai-temps tenen propietats de curvatura. Aquesta curvatura és determinada per la distribució de l'energia, i la massa, segons l'equació d'Einstein.

La teoria d'Einstein té implicacions astrofísiques importants. Per exemple, implica l'existència dels forats negres com a estat final dels estels massius. Hi ha moltes proves que la radiació intensa emesa per certs tipus d'objectes astronòmics es deu als forats negres; per exemple, els microquàsars i les galàxies actives provenen de la presència de forats negres estel·lars i dels forats negres d'un tipus més massiu, respectivament.

La relativitat general és la base dels models cosmològics actuals d'un univers en expansió. L'equació de camp d'Einstein en la seva forma més compacta és:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$$

Tot això és verificat quotidianament en els acceleradors de partícules, on aquestes assoleixen velocitats comparables amb la de la llum.

I finalment dir que si hi ha algun dubte sobre l'aplicació pràctica de la Teoria de la Relativitat general solament hi ha que veure el funcionament d'un GPS. Si aquest no tingués en compte l'efecte, petitíssim però mesurable, que la curvatura de l'espai-temps té sobre el senyal que l'aparell rep dels satèl·lits, els nostres cotxes acabarien en pocs minuts a la carretera equivocada.

## LLEI DE HUBBLE

La cosmologia científica va néixer amb la llei de Hubble, la primera observació amb significat purament cosmològic. Va ser formulada per primera vegada per Edwin Hubble el 1929 i estableix que les galàxies s'allunyen les unes de les altres a una velocitat proporcional a la seva distància. Aquesta llei porta al model de l'univers en expansió i, retrocedint en el temps, a la teoria del Big Bang. Hubble va comparar les distàncies a les galàxies amb els seus respectius desplaçaments al vermell deguts a l'allunyament relatiu entre elles, trobant entre ambdues magnituds una relació lineal i sent el coeficient de proporcionalitat la constant de Hubble.

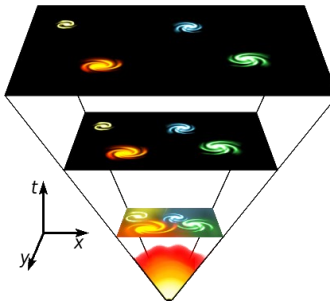
La llei es pot escriure com a:

$$V = H_0 D$$

sent:

- V: la velocitat de recessió deguda a l'expansió de l'univers (generalment a km/s)
- D: la distància actual a la galàxia (en megaparsec, Mpc).
- $H_0$ : la constant de Hubble

Aquesta relació aproximada per a petits desplaçaments al vermell podria implicar, per extrapolació directa, una relació lineal entre la velocitat i la distància que es complís per a qualsevol distància considerada. Això es pot interpretar com que l'Univers està en expansió.



Il·lustració 9. Ley de Hubble. Extret de <https://n9.cl/pzzrh>

Però una llei amb aquesta fórmula coneguda com a relació velocitat-distància, té moltes més implicacions:

1. Aquesta és l'única relació possible que produeix una expansió homòloga que no canvia la forma de les estructures de l'Univers.
2. És compatible amb una visió copernicana a on la nostra posició a l'univers no és de particular importància. Tots els observadors, a qualsevol lloc de l'Univers, veuran el mateix tipus de llei.
3. Per a una distància suficientment gran, un objecte es pot allunyar amb una velocitat més gran que la de la llum, el que implica que hi ha algun tipus d'horitzó cosmològic.

Aquest horitzó, conegut com a radi de Hubble, es produeix a una distància:

$$D = c/H_0 = 3000 h^{-1}$$

on  $h$  és un nombre adimensional àmpliament utilitzat.

Per últim, si extrapolem l'expansió enrere en el temps, sembla que podria haver-hi un temps en què les galàxies estiguessin molt més a prop i la densitat de l'Univers podria créixer indefinidament si no anem suficientment enrere en el temps.

Podem fer una primera estimació del temps en expansió (denominat temps de Hubble) com la inversa de la constant de Hubble.

$$t_H = 1/H_0 = 9.78 h^{-1}$$

on  $1 G_{any} = 10^9$  anys = mil milions d'anys = 1 eó

Els sistemes amb lligams gravitacionals, com les galàxies, o el nostre sistema solar no es troben subjectes a la llei de Hubble, i no s'expandeixen.

Amb la finalitat d'entendre millor i de manera més simple què és la Llei de Hubble i, en concret, l'expansió de l'Univers, considerarem el següent experiment, que trobareu a l'ANNEX 1.

## TEORIA DEL BIG BANG

El Big Bang, literalment anomenat «la gran explosió», constitueix el moment en què del res emergeix tota la matèria, és a dir, l'origen de l'univers. Aquesta teoria és el model més factible que tenim actualment per explicar aquest origen i per què el cosmos continua en expansió. Als anys trenta es van trobar explicacions amb la Teoria de la Relativitat General com a base segons les quals l'univers estava en expansió i havia tingut un origen, el Big Bang. Segons aquesta teoria l'Univers comença sent un punt extremadament petit que s'ha anat expandint amb el temps. Coincideix amb l'expansió de l'Univers segons la llei de Hubble.

Però van sorgir dos problemes a aquestes explicacions:

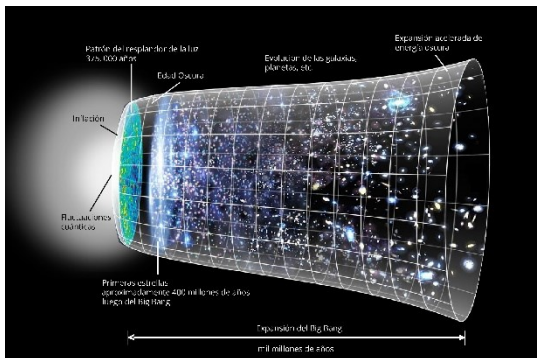
1. L'edat teòrica que es calculava de l'Univers era menor que l'edat de la Terra
2. Calien més proves observacionals i explicar com hauria d'haver sigut l'Univers més primitiu i la seva evolució fins avui.

Aquestes són les quatre principals proves del Big Bang:

- **L'Univers s'expandeix:** A mesura s'expandeix, permet que les temperatures baixin.
- **L'Univers ha evolucionat:** Els primers objectes que van demostrar que l'Univers havia canviat van ser els quàsars. Tanmateix, es creu que durant els primers instants només hi havia quarks i fotons.
- **La composició química de l'Univers:** Si l'Univers havia nascut amb un Big Bang, la seva temperatura inicial hauria d'haver estat molt alta i amb el temps s'havia d'haver anat refredant. Amb una temperatura molt alta no podien existir ni molècules, ni àtoms ni nuclis atòmics; només en refredar-se, es podien haver format tots aquests agregats de matèria. Després del Big Bang es van formar els elements químics més lleugers: l'hidrogen i l'heli, mentre que la resta d'elements químics més pesats s'han format a l'interior de les estrelles o durant la seva explosió en forma de supernova.
- **La Radiació de Fons de Microones:** Gamow va predir que si l'Univers va néixer en un Big Bang, tot ell havia d'estar ple d'una llum de microones, però no va ser fins al 1965 que

provant una antena de microones ultrasensible van detectar una radiació de fons inexplicable que no hi havia manera d'eliminar. L'existència d'aquesta radiació de fons es remunta a fa 400.000 anys, quan després que l'Univers s'anés expandint, aquest es va refredar i es van formar els primers àtoms d'hidrogen. En aquell moment, la llum infraroja que estava atrapada en aquest oceà primordial va ser alliberada. Actualment, podem veure aquesta llum, encara que ja no com a llum infraroja, sinó com a microones; pel fet que es va estirar en viatjar per l'espai: a això en diem el Fons Còsmic de Microones o CMB.

Però que hi havia abans del Big Bang?



*Il·lustració 10. Historia del Universo. Extret de <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Las-medidas-de-la-expansion-del-universo-no-cuadran>*

El CERN (Organització Europea per la Investigació Nuclear) afirma que hi ha una característica fonamental que diferencia a una bomba del Big Bang. Mentre una explosió normal s'expandeix a través de l'aire, el Big Bang no es va expandir a través de res: abans del Big Bang no hi havia espai, ni temps. Més aviat, els físics creuen que el Big Bang va crear i estendre l'espai mateix. Un procés que continua passant avui dia.

## ONES GRAVITACIONALS

Les ones gravitacionals són definides com a deformacions de l'espai-temps, que es produeixen quan masses molt grans s'acceleren o es deformen i que es propaguen en forma d'ones a la velocitat de la llum.

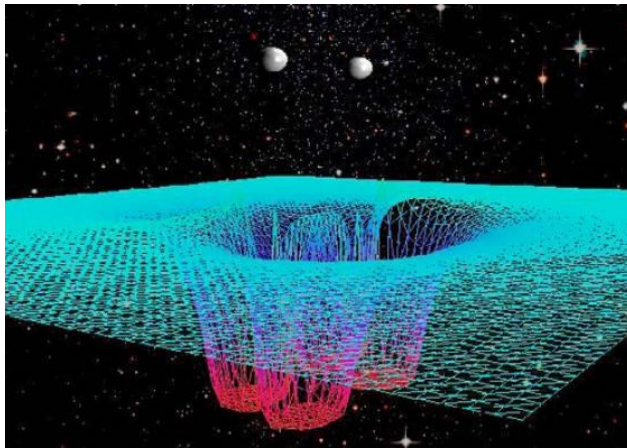
Es coneix l'existència de les ones gravitacionals des de la publicació de la teoria de la relativitat general d'Einstein, l'any 1916. Einstein va predir que quan dos cossos orbiten entre si, es produeixen ondulacions a l'espai, de la mateixa manera que en llançar una pedra a una superfície d'aigua es formen onades. Tot i saber de la seva existència, la primera detecció d'una ona gravitacional no es va produir fins gairebé cent anys més tard del seu descobriment teòric. El detector LIGO va observar, el 14 de setembre de 2015, l'ona gravitacional GW150914, producte de la fusió d'un sistema binari de dos forats negres 1.300 milions d'anys enrere. Els detectors d'ones gravitacionals LIGO i Virgo són interferòmetres làser terrestres situats als Estats Units i a l'Observatori Gravitacional Europeu d'Itàlia respectivament.

Les principals propietats de les ones gravitacionals són:

1. Tenen la capacitat d'estendre i estrènyer el mateix espai-temps al seu pas. Això és degut al fet que són perturbacions de l'espai-temps mateix.
2. La seva velocitat de propagació és igual a la velocitat de la llum. Això permet que pugem triangular la posició de la qual procedeix.
3. Un sistema en rotació (sistema binari o cos en rotació sobre si mateix) genera el doble d'ones gravitacionals en el període d'una rotació. És a dir, en cada òrbita es generen dues  $\lambda$ . Així doncs, el període (T) de les ones gravitacionals és la meitat del període de l'òrbita, i la freqüència serà el doble de gran que la de l'òrbita.

Les fonts d'ones gravitacionals són els fenòmens més violents de l'Univers, com les explosions de supernoves o les interaccions entre forats negres, estrelles de neutrons o sistemes binaris, i són tan potents com perquè siguin detectades amb els instruments actuals.

Entre les fonts més prometedores d'ones gravitacionals hi ha els forats negres en col·lisió, tot i que només causen variacions de grandària diminutes. Per exemple, un regle d'1 m experimentaria una estirada de només  $10^{-22}$  m.



*Il·lustració 11. Gravitational wave resulting from two colliding black holes (simulation) Extret de <https://serviastro.ub.edu/es/materiales/articulos/virgo-y-ligo-cazadores-de-ondas-gravitacionales>*

Hi ha diferents tipus d'ones gravitacionals:

- Contínues: Tenen com a font un sistema constant, i una freqüència bastant ben definida. Són generades per cossos en rotació, o sistemes binaris encara molt distants. Les ones acostumen a tenir períodes llargs i solen ser poc energètiques.
- En espiral: Són les que es produeixen en la part final d'un sistema binari, en el moment en què els dos cossos es fusionen. La freqüència de l'ona depèn de la de l'òrbita, però aquesta va augmentant progressivament a mesura que s'acosta la col·lisió. Ara per ara, aquestes són l'únic tipus d'ona que ha estat detectat.
- D'explosió: Provenen de fonts desconegudes o no anticipades de curta duració, en què, per tant, l'ona gravitacional és més semblant a un únic pols. És l'exemple d'una supernova.
- No programades: Aquest és el tipus d'ones que formarien, per exemple, un fons estocàstic d'ones originades en l'Univers primordial. Una idea semblant al fons de radiació de microones, però amb ones gravitacionals en lloc d'electromagnètiques.

## ESPECTROSCOPIA

L'espectroscòpia és l'estudi de la interacció que hi ha entre la radiació electromagnètica i la matèria. És la tècnica que permet descompondre la llum i obtenir el seu espectre (la quantitat d'energia que arriba per a cada longitud d'ona); la qual es realitza de la mateixa manera que un prisma divideix la llum en un arc de Sant Martí de colors. De fet, l'espectroscòpia d'estil antic es va fer utilitzant un prisma i plaques fotogràfiques.



Il·lustració 12. Espectroscopia. Extret de <https://n9.cl/dp8p2>

Tanmateix, a l'espectroscòpia moderna s'utilitzen reixetes de difracció per dispersar la llum, que després es projecta a les CCD.

Amb l'aparició d'aquesta tècnica va néixer l'astrofísica, ja que ens permet conèixer com és un astre: la seva composició química, la seva temperatura superficial, la seva gravetat superficial, etc. Hi ha tres tipus diferents d'espectres: l'espectre continu, l'espectre d'absorció i l'espectre d'emissió. En l'espectre d'un astre es poden observar, superposats, els tres tipus diferents.

- » **Espectre continu:** Un cos incandescent emet en totes les longituds d'ona, de manera més o menys aproximada a l'espectre de radiació del cos negre. En paral·lelisme amb l'espectroscòpia a partir d'un prisma, quan es descompon la llum blanca del sol s'observa un ventall de colors. Es diu que la llum blanca té un espectre continu perquè passa d'un color a l'altre sense interrupció en la successió de colors.
- » **Espectre d'absorció:** Si entre el cos i el detector s'interposa un núvol de gas, quan li arriba la llum que procedeix de l'espectre continu dels àtoms, el gas absorirà algunes longituds d'ona i, a continuació, les remetrà en qualsevol direcció. Per tant, el més probable és que aquestes longituds d'ona no arribin mai al detector, i apareixeran unes línies negres superposades a l'espectre continu, anomenades línies espectrals (d'absorció).
- » **Espectre d'emissió:** Si s'escalfa un gas de baixa densitat, per exemple fent-li arribar llum ultraviolada, els seus electrons s'excitaran i a continuació cauran en cascada emetent diversos fotons d'energia més baixa. El que resulta és un espectre format només per línies brillants discretes. Les línies brillants s'anomenen línies espectrals d'emissió. Un bon exemple d'això el tenim en les nebuloses o en les aurores polars.



Il·lustració 13. Espectres. Extret de <https://web.ua.es/cuantica/docencia/QCE/node107.html>



Les línies espectrals que apareixen en l'espectre dels astres proporcionen moltíssima informació:

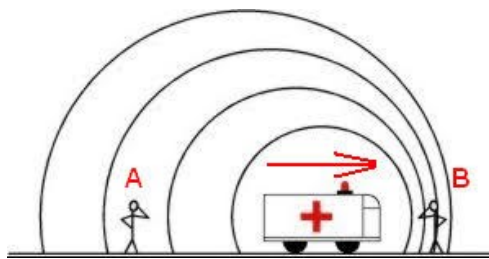
- a) **La composició química:** N'hi ha prou amb determinar les longituds d'ona de les línies i veure amb quins elements químics es corresponen. Solen aparèixer centenars de línies.
- b) **La temperatura:** Imaginem-nos, per exemple, el cas d'un metall que s'escalfa en un forn. Al principi, quan el metall està a algunes centenes de graus, res especial és visible a simple vista. Tanmateix, és possible sentir la calor del metall col·locant la mà a la proximitat. Aquesta sensació tradueix el fet que el metall irradia la llum infraroja. Quan la temperatura continua augmentant, el metall es posa a poc a poc a brillar, per acabar tornant-se incandescent. La llum que prové d'un cos depèn, doncs, de la temperatura. En el cas de les estrelles, per exemple, els colors revelen la seva temperatura superficial.
- c) **L'abundància dels elements químics:** Coneixent la temperatura de l'astre, segons s'ha calculat abans, es pot determinar a priori la profunditat que han de tenir les línies, la qual cosa està relacionat amb l'abundància.
- d) **La velocitat relativa de l'astre emissor:** Una ona qualsevol varia la seva freqüència i, per tant, la seva longitud d'ona quan el focus que l'emet es mou respecte al detector. Si el focus emissor s'acosta al detector, la longitud d'ona disminueix, mentre que si s'allunya la longitud d'ona augmenta. L'augment o disminució de la longitud d'ona serà major com més gran sigui la velocitat relativa entre la font i l'observador.
- e) **La densitat i la gravetat superficial:** Una línia espectral presenta un perfil més o menys obert a causa de l'efecte Doppler del gas emissor. Aquest perfil proporciona informació sobre la temperatura i pressió del gas i, per tant, sobre la densitat i la gravetat superficial.
- f) **Rotació:** L'amplada de les línies espectrals ens informa sobre la rotació del gas emissor. Si les línies tenen una gran amplada la font emissora es troba en rotació, sinó no.
- g) **El camp magnètic:** Una línia espectral en presència d'un camp magnètic es desdobra perquè el camp afecta els nivells d'energia de l'àtom. Aquest fenomen es coneix amb el nom d'efecte Zeeman. La separació que hi ha entre les dues línies ens informa sobre la intensitat del camp magnètic.

La mesura de les línies espectrals també pot ser utilitzada com a avaluador del desplaçament al vermell o al blau dels objectes distants que es mouen a altes velocitats, fenomen que es coneix com a efecte Doppler.

## EFECTE DOPPLER

L'efecte Doppler és així anomenat en reconeixement del físic austríac Christian Doppler (1803-1953). L'efecte Doppler té lloc per a tota mena d'ones quan l'emissor i el receptor es mouen relativament un respecte a l'altre. Quan un cos que emet radiació té una velocitat radial diferent de zero en relació amb un observador, la longitud d'ona de l'emissió s'escurça o s'allarga, depenent de si el cos s'està acostant o allunyant-se d'un observador. Es coneix com a desplaçament Doppler aquest canvi en la longitud d'ona.

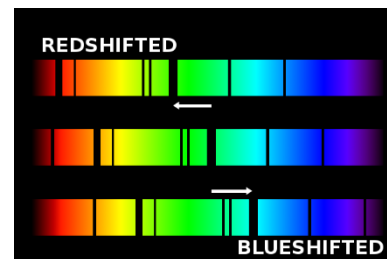
Aquest efecte sol il·lustrar-se a la nostra vida diària amb el xiulet de la sirena d'una ambulància



*Il·lustració 14. Efecto Doppler.* Extret de <http://www.astrononuestra.com/2019/10/16/espectroscopia-y-efecto-doppler/>

que primer s'apropa a nosaltres per allunyar-se a continuació. La sirena de l'ambulància produeix un so uniforme, i si nosaltres fóssim el conductor, així ho percebriem; ja que ens desplaçem al costat de la font del so. Però un vianant extern que, sense moure's d'on sigui, senti aproximar-se a l'ambulància percebrà un so més agut que el que percep el conductor i, una vegada l'ambulància s'està allunyant, el que notarà és que el so és més greu.

Com que la llum és una ona, també està sotmesa l'efecte Doppler. El seu efecte s'aprecia molt bé si ens fixem en les ratlles espectrals. Quan una ratlla espectral no apareix en la seva posició sinó desplaçada, podem sospitar que és degut a un moviment de la font respecte de nosaltres. Si l'objecte observat s'allunya, la longitud d'ona augmenta, i aleshores es manifesta un "desplaçament al vermell". Si l'objecte s'acosta, la longitud d'ona disminueix i se'ns presenta un desplaçament al blau. A més, de la quantitat de desplaçament se'n pot deduir la velocitat d'apropament o allunyament i conèixer la velocitat de qualsevol astre.



*Il·lustració 15. A spectrum being red/blue shifted.* Extret de <https://www.quora.com/What-is-infinitely-redshifted-light-What-does-it-become>

Aquest fenomen ha tingut aplicacions molt útils en astronomia. Estudiant els espectres de llum de les estrelles i galàxies i mesurant els desplaçaments al vermell o al blau de les bandes d'absorció s'ha pogut, per exemple, demostrar d'una nova forma la rotació del Sol. Les línies espectrals que s'originen a partir de les vores de la corona solar i es dirigeixen a nosaltres, es desplacen al blau. Les línies de la vora oposada mostren un desplaçament al vermell, ja que aquesta part s'allunya de nosaltres. Aquest efecte també es pot fer servir per determinar la rotació d'objectes sense detalls cridaners que facilitin observar el seu moviment, com els anells de Saturn. L'efecte Doppler serveix també per detectar estrelles binàries, per mesurar la velocitat de gir de les estrelles i galàxies, o per detectar exoplanetes. Per exemple, un mètode

per detectar planetes, o estrelles companyes febles, és buscar un canvi Doppler en l'emissió de la línia espectral de l'estrella en funció del temps.

Tanmateix, el major descobriment astronòmic realitzat gràcies a l'efecte Doppler, sigui segurament el realitzat per Edwin Hubble, que les galàxies s'estan allunyant totes les unes de les altres, a més velocitat aparent com més distanciades estiguin, mostrant un acusat desplaçament al vermell als seus espectres; teoria la qual explica que l'Univers està en expansió, i que va portar la idea del Big Bang.

Malgrat tot, hem de tenir en compte que el desplaçament Doppler és diferent del desplaçament al vermell cosmològic causat per l'expansió de l'Univers, i al desplaçament al vermell gravitacional degut a un fort camp gravitacional.

## MECÀNICA QUÀNTICA

La mecànica quàntica s'ocupa de les partícules més petites, o corpuscles, que constitueixen la matèria i de les lleis que les regeixen. Amb ella neix la física moderna, gràcies als treballs del físic alemany Max Planck als voltants del 1900.

Planck sostenia que la radiació era discontinua, que l'energia s'alliberava (i s'absorbia) en forma de paquets o unitats. Cadascun d'aquests paquets fou batejat amb el mot 'quàntum', que passava a designar la quantitat elemental d'energia.

La mecànica quàntica explica i revela l'existència de l'àtom i els misteris de l'estructura atòmica.

I si les partícules més elementals de l'univers no foren objectes puntuals sinó extensos? Cordes que poden oscil·lar i que representen un tipus de partícula o una altra en funció de l'estat vibracional en el qual es troben. Com afectaria això a la percepció del nostre món i a les lleis que el regeixen?

Tot això i molt més, és el que ens proposa la Teoria de cordes, un conjunt d'idees pioneres que pretén englobar totes les lleis de la física sota les mateixes regles, inclosa la llei de la gravetat.

## TEORIA DE CORDES

Per entendre la teoria de cordes, el que és essencial és veure que hi ha diferents tipus de partícules subatòmiques elementals (és a dir, que no estan formades per res més que per elles mateixes):

- **Leptons:** Partícules elementals que tenen càrrega elèctrica entera i spin  $1/2$ . La càrrega elèctrica, la massa i l'spin són característiques importants de les partícules subatòmiques, de manera breu, el terme spin fa referència al moment angular intrínsec d'una partícula, que té a veure el moviment de la partícula i la seva rotació. El leptó més conegut és l'electró.
- **Quarks:** Partícules elementals amb spin  $1/2$  i càrrega elèctrica fraccionària. Hi ha 6 tipus de quarks. Si, per exemple, s'ajunten dos quarks up i un quark down obtenim un protó; si s'ajunten un quark up i dos down, un neutró. Per tant, el neutró i el protó són partícules subatòmiques compostes.
- **Bosons:** són partícules d'spin sencer i els responsables de les interaccions; se'ls acostuma a anomenar bosons portadors d'interaccions. Són els responsables de les quatre forces (interaccions) fonamentals existents en la natura.

Grup	Partícula	Massa	Càrrega	Spin
QUARKS	up (u)	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
	charm (c)	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
	top (t)	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
	down (d)	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$
	strange (s)	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$
	bottom (b)	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$
LEPTONS	electron (e)	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$-1$	$1/2$
	muon (μ)	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$-1$	$1/2$
	tau (τ)	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$-1$	$1/2$
	electron neutrino (ν <sub>e</sub> )	$< 2 \text{ eV}/c^2$	$0$	$1/2$
GAUGE BOSONS	muon neutrino (ν <sub>μ</sub> )	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$0$	$1/2$
	tau neutrino (ν <sub>τ</sub> )	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$0$	$1/2$
	Z boson (Z)	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	$0$	$1$
	W boson (W)	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	$\pm 1$	$1$
	gluon (g)	$0$	$0$	$1$
	photon (γ)	$0$	$0$	$1$
	Higgs boson (H)	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	$0$	$0$

*Il·lustració 16. Partícules elementals.* Extret de <https://lacienciaalteumon.cat/the-big-bang-theory-i-la-teoria-de-cordes/>

La teoria de cordes es va desenvolupar inicialment en la dècada de 1970 en un intent d'explicar algunes inconsistències amb el comportament energètic dels hadrons i altres partícules fonamentals de la física.

Explica que l'univers està format per cordes molt i molt petites. Aquestes cordes tenen la longitud de Planck, que és la longitud mínima que pot existir segons diu el model estàndard de la física; aquesta longitud val  $1,61624 \times 10^{-35}$  metres i vibren a freqüències de ressonància. La tensió que haurien de tenir aquestes cordes ( $8,9 \cdot 10^{42}$  N) és al voltant de 1041 vegades la tensió d'una corda depiano habitual (735 N). Aquestes cordes que conformen l'univers poden vibrar de diferent manera (a més, poden ser cordes tancades o obertes). Depenent de com vibrin, nosaltres hi veurem una partícula elemental concreta. És a dir, si una corda vibra en una freqüència específica tindrem una partícula elemental, per exemple, un electró; en canvi, si una altra corda vibra a més (o menys) freqüència i/o té una estructura diferent hi veurem una altra partícula subatòmica elemental diferent. Aquest fet és anàleg al que passa amb les cordes d'un instrument: diferents freqüències impliquen diferents sons.

La teoria de supercordes o Teoria M, és una versió de la teoria de cordes estàndard que inclou els fermions i incorpora la supersimetria (relaciona bosons i fermions). Un aspecte destacable d'aquesta versió és que, per tal que la descripció de la natura sigui consistent matemàticament, es necessita que l'espai-temps tingui 10 dimensions, en lloc de les 4 dimensions observades (tres d'espacials i una de temporal). Hom generalment suposa que, de les 10 dimensions, n'hi ha 6 que es troben caragolades (plegades) en escales properes a la longitud de Planck, i per aquest motiu no es poden percebre. Nosaltres percebem el moviment (vibració) de la corda d'una d'aquestes dimensions misterioses i aquesta percepció es converteix en l'spin o la càrrega elèctrica, termes o característiques que fan evidents les diferències entre partícules fonamentals.

Hi ha cinc teories independents de superstring: tipus I, tipus IIA, tipus IIB, heteròtica SO(32) i heteròtica E8×E8.

## GRAVETAT QUÀNTICA DE LLAÇOS

Carlo Rovelli (Verona, 1956), és físic teòric i un dels fundadors de l'anomenada «gravetat quàntica de llaços» definida per ell mateix com un intent d'unir la mecànica quàntica i la relativitat general. A partir de la relativitat general ha crescut la cosmologia, l'astrofísica, l'estudi de les ones gravitacionals, dels forats negres... I amb la mecànica quàntica s'assenten les bases de la física atòmica, de la física nuclear, de les partícules elementals, la matèria condensada... Són fonamentals, però es contradiuen l'una amb l'altra. La relativitat general explica que el món és un espai corbat on tot és continu. La mecànica quàntica diu que el món és un espai pla on salten quàntums d'energia.

Segons la gravetat quàntica de llaços, a l'espai hi ha estructures petites que, com petits llaços, uneixen aquests dos mons. Aquesta teoria també anomenada «Teoria de la Xarxa d'espín» és, ara com ara, una teoria incompleta. Explica que l'espai-temps estaria quantificat de manera que no poden existir longituds menors que la longitud de Planck, ni temps menors que el temps de Planck (és el temps que trigaria un fotó a travessar una distància igual a la longitud de Planck i representa la mínima quantificació del temps) i que és igual a  $5,391 \times 10^{-44}$  segons. Segons aquesta teoria, l'espai-temps forma una xarxa canviant en què la matèria ocupa els nusos de xarxa esmentada. Per un altre costat, les longituds, i els temps, serien múltiples sencers de les esmentades longitud de Planck i temps de Planck. Aquesta teoria seria una versió quàntica de la teoria de la relativitat d'Einstein i, per tant, de la gravetat.

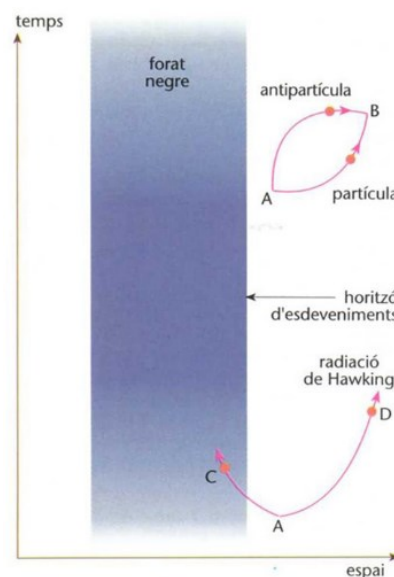
## STEPHEN HAWKING I LA RADIACIÓ

Stephen Hawking va ser un físic teòric, cosmòleg i divulgador científic britànic que va canviar la manera com avui comprem l'univers. Va néixer a Oxford el 1942 i morí al 2018. Quan tenia 22 anys li va ser diagnosticat d'esclerosi lateral amiotròfica (ELA).

Hawking va elaborar la principal i més pionera: la fórmula de temperatura d'un forat negre. Segons aquesta teoria, els forats negres, en veritat, no són del tot 'negres', sinó que emeten i alliberen radiació a la regió del seu horitzó d'esdeveniments: l'anomenada radiació de Hawking, formulada l'any 1974 basant-se en la relativitat general i la mecànica quàntica. També es coneix com a evaporació de forats negres perquè comporta la reducció de la massa i energia d'un forat negre en rotació. Així doncs, un forat negre que no acumuli matèria anirà perdent tota la seva massa i energia amb el pas del temps fins, finalment, dissipar-se.

Hawking va predir que les fluctuacions d'energia del buit provoquen la generació de parells de partícules-antipartícula de partícules virtuals prop de l'horitzó de l'esdeveniment del forat negre. Una de les partícules cau al forat negre mentre l'altra s'escapa abans que tinguin l'oportunitat d'aniquilar-se. El resultat net és que, a algú que veu el forat negre, sembla que s'ha emès una partícula.

Atès que la partícula que s'emet té energia positiva, la partícula absorbida pel forat negre té una energia negativa respecte a l'univers exterior. Això fa que el forat negre perdi energia i, per tant, massa (perquè  $E = mc^2$ ). Els forats negres primaris més petits poden emetre més energia del que absorbeixen, el que els fa perdre la massa neta. Els forats negres més grans, com els que són una massa solar, absorbeixen més radiació còsmica que els que emeten a través de la radiació de Hawking.



*Il·lustració 17. Radiació de Hawking. Extret de <https://www.encyclopedia.cat/ec-gec-0269534.xml>*

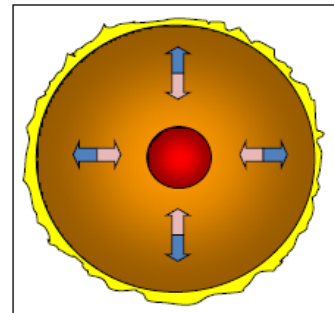
## ESTRELLES

### QUÈ ÉS UNA ESTRELLA?

Les estrelles són motors d'energia còsmica que produeixen calor, llum, raigs ultraviolats, raigs X i altres formes de radiació. La composició mitjana d'una estrella de la seqüència principal és d'un 70% d'hidrogen, un 28% d'heli, un 1,50% de carboni, ozó, oxigen i neó i un 0,50% de ferro i altres elements.

Veient aquesta composició podem dir que una estrella és una enorme esfera de gas molt calent que emet llum per si mateixa. Normalment un gas qualsevol - el que hi ha a una habitació, per exemple - no emet llum, però si s'arribés a escalfar moltíssim - fins a uns milers de graus - començaria a brillar. És el mateix que passa quan s'escalfa un tros de ferro fins que es torna incandescent i brillant. Per tant, una estrella brilla perquè està a molt alta temperatura.

Aquesta alta temperatura és deguda, en part, al fet que el seu gas s'ha comprimit per efecte de la força de la gravetat. Ara bé, hi ha una altra raó que és la causant d'aquesta enorme emissió d'energia: just al seu centre, el gas està tan comprimit que la temperatura arriba als deu milions de graus. A aquesta temperatura comencen a tenir lloc reaccions nuclears de fusió que produeixen energia en forma de llum i que manté l'estrella molt calenta durant tota la seva vida.



*Il·lustració 18. Equilibri hidrostàtic d'una estrella. Extret de Tema 1 Astronòmica Sabadell*

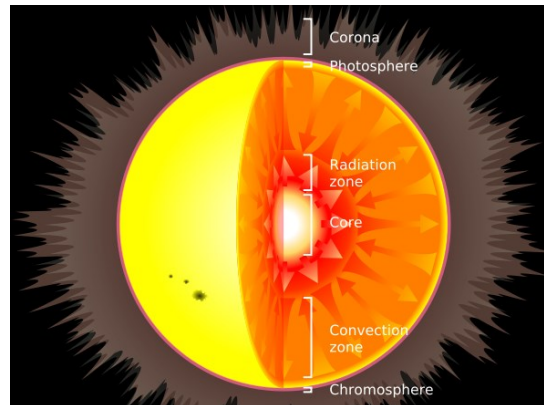
Mentre hi hagi aquesta font d'energia al centre de l'estrella, aquesta es troba en un equilibri gairebé perfecte, anomenat equilibri hidrostàtic. D'altra banda trobem els fotons, que en sortir de l'estrella exerceixen una pressió cap a l'exterior, anomenada pressió de radiació.

Per tant, l'estrella es troba en equilibri a causa d'aquests dos factors que s'igualen: la força de gravetat que tendeix a contraure l'estrella, i les pressions, tant del gas com de la radiació, que tendeixen a expandir-la.

Altrament, encara que l'estrella més coneguda, el Sol, existeix en solitari, tres de cada quatre estrelles existeixen com a part d'un sistema binari compost per dues estrelles orbitant mútuament. A més, poden formar-se planetes al voltant d'una estrella central.

## ESTRUCTURA DE LES ESTRELLES

Usualment, un estel es divideix en nucli, mantell i atmosfera. Al nucli és on es produeixen les reaccions nuclears que generen la seva energia. El mantell és l'embolcall de l'estrella on es porta a terme el transport d'energia des del nucli fins a les capes exteriors; i segons com la transporti, per convecció o per radiació, es dividirà en dues zones: la part radiant i la convectiva. Finalment, l'atmosfera és la part més superficial de les estrelles i l'única que és visible. Es divideix en cromosfera, fotosfera i corona solar.



*Il·lustració 19. Capes d'una estrella.* Extret de [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Solar\\_internal\\_structure.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Solar_internal_structure.svg)

Al llarg del seu cicle de vida, les estrelles experimenten canvis i, així doncs, la naturalesa de les capes anteriorment anomenades també es modifica amb el temps i l'evolució seguida per l'estrella. En algunes la zona radiant se situarà abans que la convectiva i en altres al revés, depenent tant de la massa com de la fase de fusió en què es troba. Així mateix, el nucli també pot modificar-ne les característiques i la mida al llarg de l'evolució de l'estrella.

### El nucli i la font d'energia de les estrelles

El nucli és la part més interna de l'estrella, així com la més densa i calenta, i la gravetat sempre hi és present, ja que és una de les quatre forces de la natura. Qualsevol partícula del gas atreu la resta de partícules. En canvi, la pressió del gas depèn de la seva temperatura. Com més calent sigui el gas, més pressió farà cap enfora, i viceversa. Si en algun moment la pressió del gas és major que la gravetat, l'estrella s'expandirà, i si en algun moment la gravetat supera la pressió del gas, l'estrella es contraurà.

En brillar, les estrelles van perdent energia; però com que són estables han de tenir una font d'energia interna que contraresti aquesta energia perduda. Aquesta ingent font d'energia va ser descoberta a finals dels anys trenta del segle XX i es va anomenar **reaccions nuclears**.

Malgrat tot, en alguns casos, arribat al punt on l'hidrogen, el seu principal combustible nuclear, es va esgotant, l'estrella s'infla i després expel·leix les capes més externes a l'espai formant el que es coneix com una nebulosa planetària, al centre del qual hi ha el nucli nu, conegut com a nana blanca.



### Les reaccions nuclears

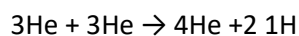
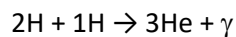
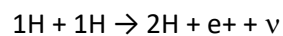
Els centres de les estrelles són enormes centrals nuclears de fusió i, és a causa de la seva enorme temperatura, que al seu interior la matèria es troba en forma de plasma, on es produeix una barreja de nuclis atòmics i d'electrons que no estan lligats entre si. Aquest procés s'està intentant imitar en EL PROJECTE DE FUSIÓ NUCLEAR: ITER.

En condicions normals, els protons es repel·leixen entre si perquè a causa de les seves càrregues elèctriques positives no arriben a xocar. Ara bé, a l'interior de les estrelles la temperatura i pressió són tan altes que alguns protons sí que poden xocar entre si. Quan això té lloc, entra en joc la força nuclear forta. Aquesta força uneix els protons i els manté enganxats. És en aquest moment que es diu que s'ha produït una reacció nuclear.

Així doncs al centre de les estrelles es produeixen reaccions nuclears. En realitat, són sèries de reaccions nuclears que acaben per transformar els nuclis d'hidrogen en nuclis d'heli. A més, en aquest procés s'allibera energia en forma de radiació gamma.

Hi ha diverses cadenes de reaccions nuclears diferents. Les més senzilles s'anomenen cicles protó-protó i es produeixen en estrelles poc massives; en canvi, en estrelles més massives és més important el cicle CNO:

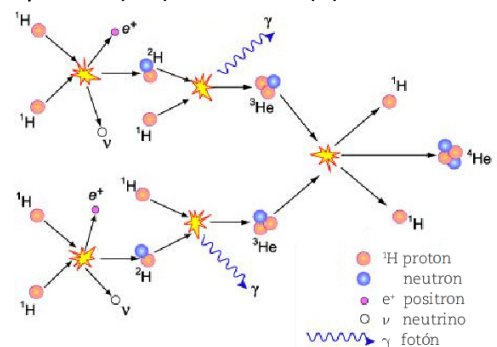
- **Cicle protó-protó I:** El cicle protó-protó I, conegut com a ppl, és el camí més provable per arribar a la producció de  $4\text{He}$  (tot i que hi ha dos altres camins: pp2 i pp3) i està format per les següents reaccions nuclears:



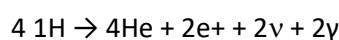
En la primera reacció s'uneixen dos protons i un d'ells es transforma en un neutró, donant lloc a un nucli de deuteri ( $2\text{H}$ ) més un positró ( $e^+$ ) i un neutrí ( $\nu$ ).

En la segona reacció un protó i un deuteri s'uneixen formant un isòtop d'heli-3 més radiació  $\gamma$ . Aquest procés es porta a terme en dues vegades independents i llavors, en la tercera reacció, dos isòtops d'heli-3 s'uneixen formant un isòtop d'heli-4 (dos protons i dos neutrons) més dos protons.

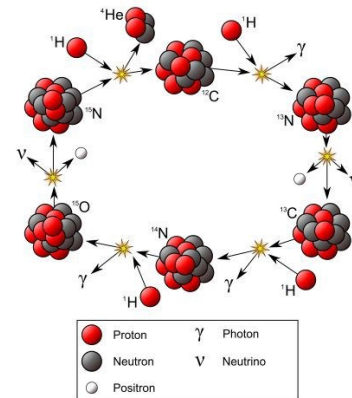
El resultat final és que 4 nuclis d'hidrogen ( $1\text{H}$ ) es transformen en un nucli d'heli-4 ( $4\text{He}$ ). Així doncs, la cadena ppl es pot resumir en la següent reacció:



*Il·lustració 20. Cadena Protó-Protó. Extret de <https://n9.cl/cvkqa>*



- Cicle CNO: El cicle CNO (carboni, nitrogen i oxigen)** és la font d'energia dominant per a les estrelles massives, ja que aquestes estrelles tenen una temperatura central de 17 milions de graus, que és la necessària perquè es produeixi. Aquest cicle és catalític i més ràpid que la cadena protó-protó perquè els nuclis implicats són més pesats i, per tant, més carregats. A partir del carboni es produeixen les diferents reaccions del cicle, fins que al final es recupera el carboni i s'allibera un nucli d'heli. Pel camí s'han absorbit els quatre protons i s'han emès dos positrons i dos neutrins, a més de radiació gamma. En la figura següent hi ha representada la cadena de reaccions nuclears del cicle CNO. Com podem apreciar, els nuclis C, N i O participen al cicle, però no apareixen al balanç final, que continua sent la transformació de 4 protons a 1 nucli d'heli.



*Il·lustració 21. Diagrama ciclo CNO. Extret de <https://nugrem.es/reacciones-nucleares-en-las-estrellas/> i modificada per Mamotto*

### El mantell i el transport d'energia

L'energia que es produeix al nucli de les estrelles surt cap enfora fins a la seva superfície, i des d'aquest punt, es mou cap a l'espai en totes direccions; és a raó d'això que les estrelles brillen. En general podem trobar tres tipus diferents de transport d'energia: per radiació, per convecció i per conducció. Tanmateix, només em centraré en els dos primers tipus esmentats, ja que són els que es produeixen a les estrelles "normals", la majoria de les estrelles. El tercer tipus, el transport d'energia per conducció, només té lloc en estrelles molt denses com les nanes blanques o les estrelles de neutrons.

- Transport per radiació:** Aquest transport d'energia té lloc a una regió altament radioactiva on la calor viatja en forma de radiació. En el transport per radiació, la llum viatja per l'estrella, però no pot fer-ho lliurement perquè va xocant contínuament amb la matèria estel·lar: els àtoms i les partícules subatòmiques que es va trobant. En aquest procés la llum és absorbida i reemesa contínuament per la matèria, però la seva reemissió es produeix de forma aleatòria; és per això que no viatja en línia recta cap a la superfície de l'estrella. La capacitat del material estel·lar d'aturar la radiació rep el nom d'opacitat. Aquesta gran opacitat produeix dos resultats. En primer lloc, dificulta el pas de la radiació en el seu viatge cap a la superfície de l'estrella. I en segon terme, la radiació va perdent gradualment energia en anar-se filtrant des del centre.
- Transport per convecció:** En el cas del transport per convecció hi ha un transport d'energia però també de matèria. Aquesta és una diferència important del transport per radiació, que no requereix moviment de matèria. A més, hi ha una considerable barreja de matèria: la matèria més propera al nucli es desplaça cap a zones més superficials.

### Les atmosferes estel·lars

Entre les capes més externes d'una estrella, podem diferenciar tres atmosferes estel·lars:

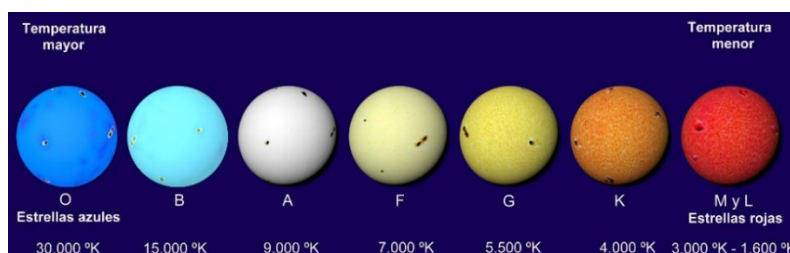
- **Fotosfera:** La fotosfera és la zona a partir de la qual la radiació procedent de l'interior de les estrelles pot escapar-se cap a l'espai. No es tracta d'una superfície de l'estrella com seria la superfície d'un planeta, sinó més aviat una regió menys densa de gas. Aquesta és la zona que veiem. S'emet llum visible.
- **Cromosfera:** és una capa de plasma formada per gasos a baixa pressió que se situa per fora de la fotosfera. Les flamarades solars es disparen des d'aquesta capa.
- **Corona:** És la zona més externa de l'estrella. Es pot estendre a través de milions de quilòmetres. La corona solar només es pot veure a simple vista durant els eclipsis. Les prominències solars són núvols immensos de gas molt brillants, i són emesos per la zona superior de la cromosfera cap a la corona.

### LA CLASSIFICACIÓ ESTEL·LAR

La classificació estel·lar es divideix en dues categories diferents, però alhora complementàries. La primera és en funció del tipus espectral de les estrelles i la seva temperatura (color), i va ser realitzada per Edward Pickering i les "dones calculadores" de Harvard a principis del segle XX. Aquestes dones van fer un estudi de milers i milers d'espectres estel·lars i van arribar a classificar les estrelles en diferents grups. La segona classificació es fa segons la lluminositat de les estrelles, i va ser realitzada a l'observatori de Yerkes l'any 1943. Per això també es coneix com a classificació espectral de Yerkes.

### Les classes espectrals

En astronomia, el tipus espectral permet classificar les estrelles segons les característiques del seu espectre electromagnètic, que indica la seva temperatura i l'abundància de certs elements químics. El sistema utilitzat actualment consta de set classes espectrals principals, dins de les quals es pot incloure el 90% de les estrelles. La classificació utilitza les lletres O, B, A, F, G, K i M, en ordre descendent; és a dir, les estrelles de tipus O són les que tenen una temperatura més elevada, i les de tipus M són les més fredes. D'altra banda, aquesta classificació pot ser recordada gràcies a la regla mnemotècnica *Oh, Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me*.



Il·lustració 22. Classes espectrals. Extret de <https://n9.cl/qmn4b>

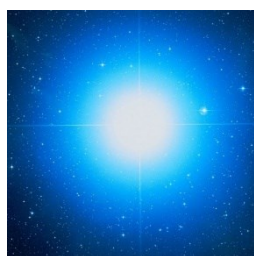
Per a una classificació més precisa, cada classe se subdivideix en 10 subclasses, numerades del 0 al 9. Així doncs, una estrella de la classe F5 estaria aproximadament a mig camí entre les classes F0 i G0. Les estrelles més calentes, dins la seqüència principal, pertanyen a la classe O5 amb temperatures superficials d'uns 50.000 K i les més fredes a la classe M8, amb temperatures d'uns 2.200 K.

#### Classes d'estrelles de la línia principal

**Classe O:** Només el 0,00003% de les estrelles en la seva seqüència principal són de tipus O. Com tenen temperatures i lluminositats molt altes, solen acabar les seves vides de forma ràpida i en violentes explosions de supernova, donant lloc a forats negres i estrelles de neutrons.



*Il·lustració 23. Gegant blanca.* Extret de <https://n9.cl/r461n>



*Il·lustració 24. Rigel.* Extret de <https://www.astrobotica.com/la-clasificacion-estelar/>

**Classe B:** Aquestes estrelles són extremadament lluminoses; solen tenir una massa d'entre 2 i 16 vegades la del Sol i tenen períodes de rotació molt ràpids. Aquestes estrelles no tenen ni corona (l'aura de plasma que envolta estrelles com el Sol), ni una zona de convecció (la zona de l'estrella en la qual l'energia és transmesa per convecció).

**Classe A:** Tenen una massa d'entre 1,4 i 2,1 vegades la massa solar. Alguns estudis afirmen que els planetes massius se solen formar al voltant d'estrelles de classe A (encara que són difícilment detectables).



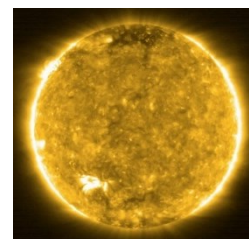
*Il·lustració 25. Sirio A* Extret de <https://www.astrobotica.com/la-clasificacion-estelar/>



*Il·lustració 27. Canopus.* Extret de [https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n\\_estelar](https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_estelar)

**Classe F:** Tenen una massa molt semblant a la del Sol, que va des d'1,0 a 1,4 masses solars.

**Classe G:** Tenen una massa d'entre 0,8 i 1,2 vegades la de Sol. Aquestes estrelles acostumen a anomenar-se nanes grogues, encara que no coincideixi gaire amb la realitat. Només les estrelles més fredes d'aquesta classe emeten un color lleugerament groc; la resta (inclosa la nostra), emeten un color blanc, tot i que nosaltres



*Il·lustració 26. Sol.* Extret de [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/sol-mas-cerca-que-nunca\\_15750](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/sol-mas-cerca-que-nunca_15750)

ho veiem en groc pel fenomen de la dispersió de Rayleigh. Les estrelles d'aquest tipus tenen una vida aproximada (en la seva fase principal) d'uns 10.000 milions d'anys.

Classe K: La seva massa és d'entre 0,6 i 0,9 masses solars i tenen un període de vida molt més llarg: d'entre 15 i 30.000 milions d'anys. A més, aquestes estrelles són al voltant de quatre vegades més comuns que les de Classe G, i això fa que siguin un dels objectius favorits dels astrònoms per buscar planetes en els quals pugui haver-hi vida extraterrestre (tenint en compte, també, que com emeten menys radiació ultraviolada és més fàcil que l'ADN estigui protegit d'aquesta radiació).



*Il·lustració 28. Arcturus.*  
Extret de  
<https://www.constellation-guide.com/arcturus/>



*Il·lustració 29.*  
*Betelgeuse.* Extret de  
<https://www.shutterstock.com/es/search/betelgeuse>

Classe M: Són les estrelles més longeves de l'univers. Tant és així, que s'estima que la seva vida en fase principal està en l'ordre dels bilions d'anys. És a dir, com l'univers, en comparació, és molt més jove, no hi ha cap nana vermella que estigui en una fase avançada de la seva evolució. D'altra banda, és el tipus d'estrella més comú a la nostra galàxia.

A més, hi ha altres classes complementàries; per exemple, per les estrelles més fredes, hi ha dues classes semblants a les de tipus M: les de tipus C i S, ambdues amb temperatures superficials d'entre 2400 K i 3500 K. També trobem estrelles de tipus L, entre d'altres.

A la taula següent podem observar certes característiques dels tipus d'estrelles anomenats anteriorment:

CLASSE	TEMPERATURA	COLOR	LÍNIES D'ABSORCIÓ	EXEMPLES
O	≥ 30000 K	Blau	Heli ionitzat amb metalls i hidrogen feble	10 Lacertra
B	10000 – 30000 K	De blau a blanc blavós	Heli neutre, metalls ionitzats i hidrogen forta	Rigel
A	7300 – 10000 K	De blanc a blanc blavós	Heli i hidrogen dominant	Sirius
F	6000 – 7300 K	Blanc	Hidrogen feble, calci i metalls neutres	Canopus
G	5300 – 6000 K	Blanc groguenc	Calci, heli, hidrogen feble i metalls neutres	El Sol
K	3800 – 5300 K	Groc ataronjat	Metalls neutres i òxid de titànic	Arcturus
M	2500 – 3800 K	Ataronjat	Metalls neutres i òxid de titànic	Betelgeuse
C	2400 – 3200 K	Taronja vermellós	Forts metalls neutres, calci neutre i hidrogen molt feble.	BL Orionis
S	2400 – 3500 K	Taronja/Groc	Metalls neutres i òxid de zirconi	U Cassiopeiae
L	1300 – 2100 K	Vermell fosc marronós	Enanes marrons	2MASS

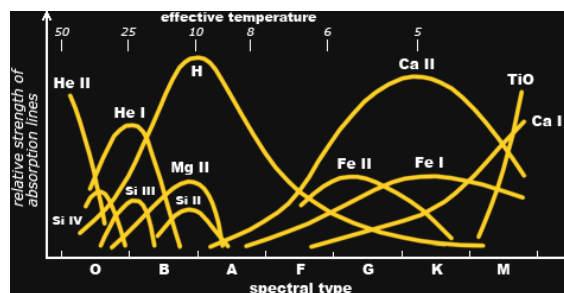
*Taula 4. Classes espectrals*

Aproximadament un 70% de totes les estrelles són de tipus M, un 10% són de tipus K i un 4% són de tipus G. I, per tant, només un 1% de les estrelles són de major massa i tipus O, B, A o F. El 15% restant de les estrelles són dels tipus restants: C, S L, T, Y, D, Q, P, W.

Com el color d'una estrella depèn directament de la seva temperatura superficial, les classes espectrals defineixen, a més d'una escala de colors, una escala de temperatures.

Respecte a la composició química de les estrelles, podem comprovar diverses afirmacions mitjançant les línies espectrals:

- Les estrelles més brillants mostren línies d'heli i de diversos elements pesants ionitzats.
- A les estrelles més fredes no es veuen línies d'heli, però sí que es poden observar múltiples línies d'àtoms neutres i molècules.
- Malgrat les diferències d'intensitat en certes línies d'absorció, i en la presència de certes línies, la composició química, respecte a abundàncies elementals, és similar a totes les estrelles.

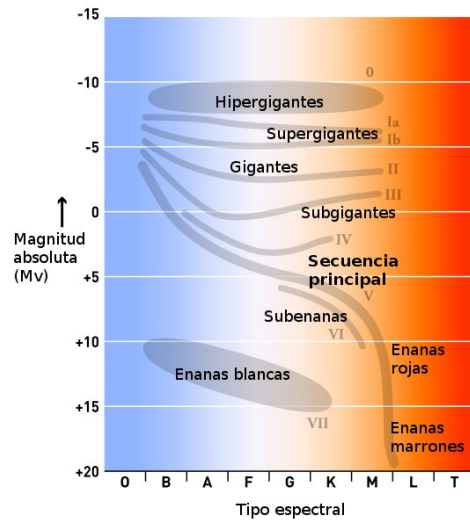


*Il·lustració 30. Composició química de les estrelles. Extret de <https://www.handprint.com/ASTRO/specclass.html>*

### Classificació espectral de Yerkes

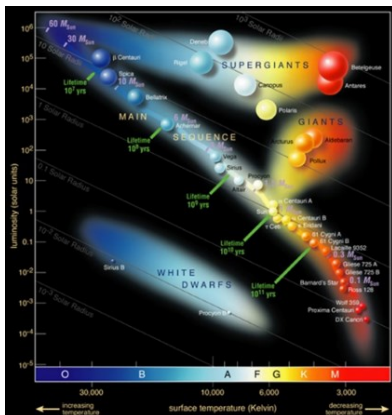
La classificació espectral de Yerkes o sistema MK, que es va crear després de la classificació espectral de Harvard, té en compte tant la temperatura estel·lar com la gravetat superficial, que influeix en la lluminositat. En astronomia, la lluminositat és la quantitat d'energia emesa per un objecte celeste en un interval de temps determinat i, per tant, es refereix a la sortida de llum total de l'estrella. Així doncs, es distingeixen les següents "classes de lluminositat" diferents:

- I. Supergigants
  - a. Ia-0. Supergigants extremadament lluminoses
  - b. Ia. Supergigants lluminoses
  - c. Iab. Supergigants
  - d. Ib. Supergigants menys lluminoses
- II. Gegants brillants
- III. Gegants
- IV. Subgegants
- V. Estrelles de la seqüència principal (nanes)
  - a. Vab. Nanes lluminoses
  - b. Vb. Nanes normals
- VI. Nanes de la seqüència principal secundària
- VII. Nanes blanques



**Il·lustració 31.** Tipo espectral. Extret de [https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n\\_estelar](https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_estelar)

### Diagrama H-R

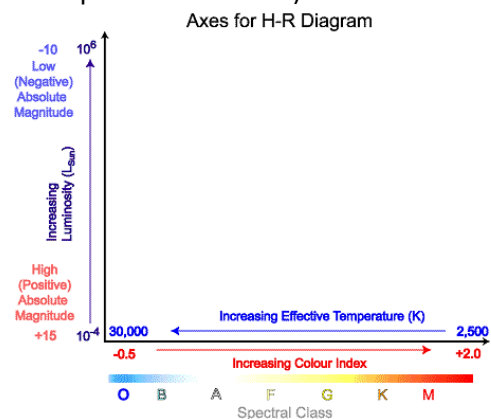


**Il·lustració 33.** Diagrama H-R. Extret de <https://www.universetoday.com/39974/hertzsprung-russell-diagram/>

Una manera molt útil de representar les classificacions estel·lars anteriors és el diagrama de Hertzsprung-Russell, anomenat així pel nom dels seus creadors. Es tracta d'una eina molt potent per als astrofísics, considerat la taula periòdica de les estrelles. De manera que es pot conèixer l'estructura interna i l'etapa evolutiva d'una estrella simplement determinant la seva posició en el diagrama.

El diagrama H-R permet veure la relació entre la classe espectral (per tant, la temperatura i el color) i la lluminositat de les estrelles. Es tracta d'un gràfic de doble entrada.

A l'eix horitzontal es representen els tipus espectrals de les estrelles i a l'eix vertical es representa la lluminositat intrínseca de les estrelles (o el que és equivalent, la seva magnitud absoluta), que es representa creixent de baix a dalt. Pel que fa a l'eix horitzontal, hi ha diverses maneres d'interpretar-lo en funció de si està representada la classe espectral, la temperatura o el color.



**Il·lustració 32.** Spectral class. Extret de [https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/cosmicengine/stars\\_hrDiagram.html](https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/cosmicengine/stars_hrDiagram.html)

A l'inrevés que a un gràfic típic, en aquest diagrama la temperatura efectiva no augmenta a mesura que va d'esquerra a dreta, sinó que disminueix; és a dir, la temperatura més alta es troba a la banda esquerra i la més baixa a la dreta. Si es fa servir l'índex de color en lloc de la temperatura, es representa de negatiu (blau) a l'esquerra cap a positiu (vermell) a la dreta. Pel que va a la classe espectral, està representada de la classe O a la classe M d'esquerra a dreta. Per descomptat, les tres opcions mostren essencialment el mateix.

La creació del diagrama de Hertzsprung-Russell va permetre entendre que les estrelles experimenten diferents etapes al llarg de la seva vida i, amb això, avançar en la comprensió de l'evolució estel·lar. Així doncs, el diagrama H-R no és estàtic. Una mateixa estrella se situarà en un punt o un altre del diagrama en diferents moments de la seva vida.

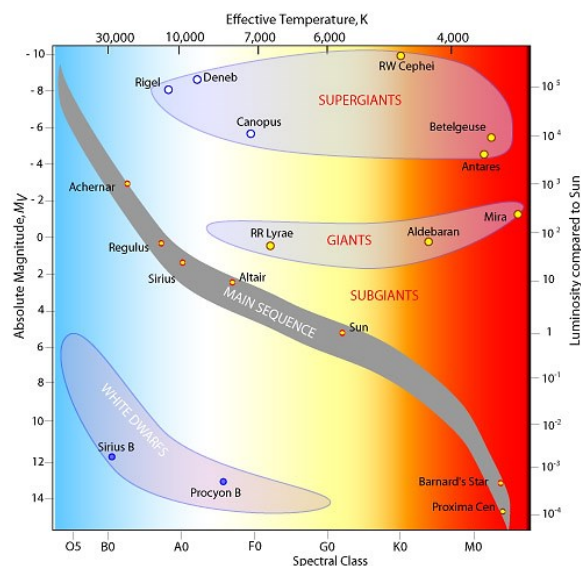
Hi ha 3 regions principals o etapes evolutives del diagrama HR per les quals passen els estels:

1. La **seqüència principal** que s'estén des de la part superior esquerra (estrelles calentes i

lluminoses) fins a la part inferior dreta (estrelles fredes i dèbils) domina el diagrama de HR. És aquí on les estrelles passen al voltant del 90% de les seves vides, estables i equilibrades, cremant hidrogen en heli en els seus nuclis. Dins de qualsevol estrella, cada element de volum està sotmès a dues forces oposades que es cancel·len mútuament: el seu propi pes i la pressió del gas. En les parts més internes i més calentes, la pressió de radiació, produïda pels fotons presents en el medi,

contribueix, també, a sostenir el pes de l'estrella. Es diu que l'estrella es troba en equilibri hidroestàtic. Alhora, l'estrella està també en equilibri tèrmic, és a dir, cada capa perd cap a l'exterior la mateixa quantitat d'energia que rep des de l'interior. Així doncs, una estrella és un reactor termonuclear que es regula a si mateix. Quan l'estrella ha consumit tot el seu hidrogen, abandona la seqüència principal i es converteix en una gegant vermella o en una supergegant vermella en funció de la seva massa.

2. La zona d'**estrelles gegants vermelles i supergegants**, ocupen la regió per sobre de la seqüència principal. Tenen temperatures superficials baixes i lluminositats altes. Les estrelles entren en aquesta etapa evolutiva una vegada que han esgotat el combustible d'hidrogen en els seus nuclis i han començat a cremar heli i altres elements més pesants.



Il·lustració 34. Spectral Class. Extret de <https://atomtouniv.com/hertzsprung-russell/>

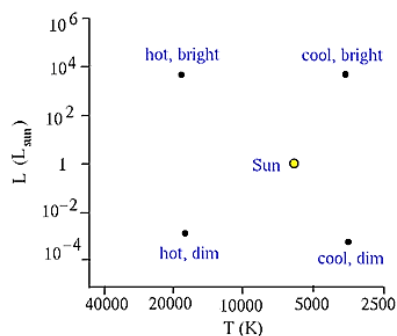


3. Les **nanes blanques** són l'etapa evolutiva final de les estrelles de massa baixa a intermèdia i es troben a la zona inferior esquerra del diagrama. Aquestes estrelles són molt calentes, però tenen poca lluminositat causa de la seva petita grandària.

Com ja he mencionat anteriorment, a part de seguir l'evolució de les estrelles al llarg de les 3 regions, el diagrama HR ens és molt útil per poder conèixer les característiques de cada estrella en particular i, per tant, un cop col·locada una estrella al diagrama, ja es poden conèixer la resta dels paràmetres estel·lars com són el radi, massa, edat, temps que viurà l'estrella i com morirà:

### 1) Els radis estel·lars

Les estrelles calentes habiten a la banda esquerra del diagrama, mentre que les estrelles fredes al costat dret. D'altra banda, les estrelles més brillants -emeten més energia- se situen a la part superior i les estrelles tènues a la part inferior.



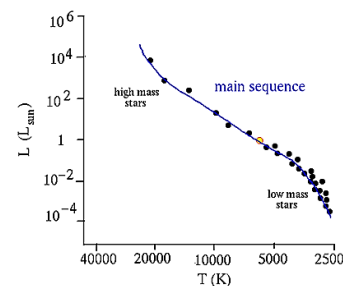
Al costat dret, les estrelles més tènues a la part inferior. Així doncs, com podem veure a la imatge, l'estrella central del nostre sistema solar, el Sol, és un estel bastant promig.

A la part superior dreta les estrelles són fredes però alhora molt lluminoses. Cada metre quadrat d'una estrella freda emet poca energia, però com que aquestes estrelles, en conjunt, emeten molta energia, vol dir que han de ser estrelles gegants. Si fem el mateix anàlisi per a la part inferior esquerra del diagrama: en aquest cas, són estrelles molt calentes però poc

lluminoses; per tant, això vol dir que cada metre quadrat d'una estrella calenta emet molta energia, però com que globalment emeten poca energia, han de ser estrelles molt petites. Si es representa el diagrama HR amb escala logarítmica, les estrelles d'igual radi es troben sobre la mateixa línia descendent.

### 2) Les masses estel·lars

Les estrelles de la Seqüència Principal se situen segons la seva massa. A cada punt de la Seqüència Principal, les estrelles de poca massa estan situades en l'extrem inferior, i les de gran massa en el seu extrem superior. Si s'avança per la Seqüència Principal de baix a dalt, les masses de les estrelles van creixent lentament. Com que la lluminositat del diagrama HR augmenta de baix a dalt, es pot afirmar que les estrelles de la Seqüència Principal més lluminoses també són les més massives, i viceversa.



*Il·lustració 36. Main sequence.*

Extret de <http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec11.html>

### 3) Les edats estel·lars

Quan tenim una estrella situada al diagrama, ja podem saber la seva edat, en quin moment es troba de la seva vida, quant temps viurà, i de quina manera morirà.

## NAIXEMENT DE LES ESTRELLES

Les estrelles només es formen a l'interior dels núvols moleculars. Aquests, han de ser núvols on la concentració de gas, principalment hidrogen, és molt alta. Quan en una petita regió d'aquests núvols, per qualsevol raó, la gravetat és lleugerament superior a la que hi ha al seu voltant, el gas es comença a acumular en aquest punt.

En conseqüència, els núvols moleculars es divideixen en nombrosos fragments, cadascun dels quals donarà lloc a una estrella independent.

Tanmateix, a l'interior d'un núvol interestel·lar el gas es manté en equilibri hidroestàtic. Això vol dir que la força d'atracció entre les molècules que la componen és equilibrada perfectament per la pressió de gas. Sota determinades condicions aquest equilibri pot trencar-se i la pressió ja no és capaç de suportar el pes del núvol, que comença a col·lapsar.

Per trencar l'equilibri cal una pertorbació; d'altra banda, perquè un núvol col·lapsi cal que tingui una massa mínima, anomenada massa de Jeans, o de forma equivalent, un radi mínim, el radi de Jeans.

A mesura que el núvol col·lapsa es fragmenta en núvols cada vegada més petits, fins que els fragments resultants tenen una massa que pot formar una estrella. Cadascun d'aquests fragments, a mesura que es contrauen, s'escalfen per efecte de la pèrdua d'energia potencial gravitatòria que s'ha convertit en energia cinètica i comença a emetre radiació per desprendre's de l'energia sobrant. Aquesta radiació impedeix que el núvol s'escalfi en excés i l'agitació tèrmica pugui aturar el col·lapse.

Durant aquesta etapa, per tant, l'efecte de la força gravitatòria cap endins (el seu pes) és superior a l'efecte de l'agitació tèrmica que empeny les partícules cap enfora. Mentre es manté aquest desequilibri, l'estrella està en formació.

La fase naixent d'aquesta estrella, és coneguda com a protoestrella. D'aquesta manera, l'estrella ja s'hauria format.

Milions d'anys després, quan la temperatura del nucli puja a uns 27 milions de graus Fahrenheit (15 milions de graus Celsius), comença la fusió nuclear, que encén el nucli i desencadena la següent etapa, i la més llarga, de la vida d'una estrella, coneguda com la seva seqüència principal.

En conclusió, podem dir que les nebuloses mostren fases del naixement i la mort de les estrelles, ja que totes les estrelles han nascut a l'interior d'una nebulosa. Però què són les nebuloses?

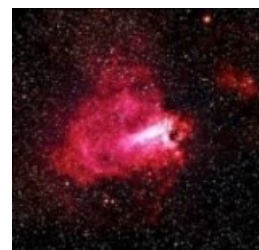
Les nebuloses són grans núvols formats principalment de gas i pols. El gas que les forma és fonamentalment hidrogen i heli, però no per això les nebuloses són sempre iguals. Hi ha nebuloses de tipus molt diferents, tant per les seves característiques com pel seu origen. En

aquest sentit trobem nebuloses amb orígens totalment oposats. Per exemple, hi ha nebuloses de les quals en neixen les estrelles i nebuloses que es formen quan mor una estrella.

Quan estudiem i observem l'Univers, podem trobar milers de nebuloses. Malgrat tot, només hi ha sis tipus de nebuloses: d'emissió, de reflexió, nebuloses d'emissió i reflexió, nebuloses fosques, planetàries, i romanents de supernova.

### NEBULOSES D'EMISSIÓ

Les nebuloses d'emissió són les que brillen amb llum pròpia, ja que les estrelles properes provoquen la seva ionització. D'aquesta manera, el gas de la nebulosa és capaç d'emetre llum en diferents longituds d'ona en funció del gas que forma i de l'energia que rep de les estrelles del voltant.



*Il·lustració 37. Omega o M17. Extret de <http://www.jouscout.com/astro/nebulosa.htm>*

Aquestes nebuloses són, generalment, les més brillants i espectaculars. La seva forma és irregular, però sempre apareixeran envoltades d'estrelles.

### NEBULOSES DE REFLEXIÓ

Les nebuloses de reflexió no reben prou energia de les estrelles properes per emetre llum pròpia. Això no obstant, sí que són capaces de reflectir la llum d'aquestes estrelles properes. Aquestes nebuloses són generalment de colors blavosos, encara que també hi podem trobar nebuloses de reflexió d'altres colors. Tanmateix, les nebuloses d'aquest tipus no són tan brillants com les d'emissió, per la qual cosa solen resultar més difícils d'observar.



*Il·lustració 38. Las Plèiades. Extret de <https://fotosastronomia.wordpress.com/2018/11/04/subaru-7-cabrelles/>*

### NEBULOSES D'EMISSIÓ I REFLEXIÓ

En aquesta classificació hi trobem nebuloses que poden entrar en dues o més categories. Un exemple molt clar és la nebulosa d'Orió, que combina regions d'emissió i de reflexió. El centre de la nebulosa és il·luminada per les estrelles joves, mentre que la resta de la nebulosa emet llum pròpia.



*Il·lustració 39. M78 o Orió. Extret de <http://www.jouscout.com/astro/nebulosa.htm>*

### NEBULOSES FOSQUES O D'ABSORCIÓ

Una nebulosa fosca és un núvol de gas i pols interestel·lar, prou opaca i obscura per a ocultar la llum de les estrelles que hi ha al darrere. Les nebuloses fosques no estan associades a cap estrella. Per tant, no estan ionitzades ni reflecteixen la llum de cap astre. Així doncs, una nebulosa fosca és una zona de gas i pols interestel·lar que no brilla ni emet llum. Una de les nebuloses d'absorció més conegudes és la nebulosa Cap de Cavall.



*Il·lustració 40. Cap de cavall.*  
Extret de  
[http://www.apod.cat/la-nebulosa\\_cap-de-cavall](http://www.apod.cat/la-nebulosa_cap-de-cavall)

### NEBULOSES PLANETÀRIES

Les nebuloses planetàries són molt diferents de la resta de nebuloses a causa del seu origen. Tot i això, són nebuloses d'emissió. En aquest cas el núvol de gas es genera pel creixement gradual i imparabile de les capes externes de l'estrella, fins al punt en què aquestes capes se separen completament del nucli estel·lar.



*Il·lustració 41. Dumbbell o M27.*  
Extret de  
<http://www.jouscout.com/astro/nebulosa.htm>

Per consegüent, una nebulosa planetària és, bàsicament, el resultat de què una estrella (una gegant vermella) projecti quasi tota la seva matèria enfora quan ha arribat al final de la seva vida, formant un embolcall de gas. L'estrella queda reduïda a una simple nana blanca, situada al centre, que amb la seva radiació ultraviolada ionitza el gas de la nebulosa i la fa brillar. Un exemple d'aquest tipus de nebulosa, seria la nebulosa Dumbbell o M27, la qual treballaré amb més profunditat més endavant.

### ROMANENTS DE SUPERNOVA

Són nebuloses formades per l'explosió d'una estrella supergegant. Una supernova és una estrella massiva que explota violentament al final de la seva vida. L'estrella queda pràcticament destruïda, però l'explosió la fa brillar amb força durant algunes setmanes o mesos.



*Il·lustració 42. Cassiopea A.*  
Extret de  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Cassiopeia\\_A](https://es.wikipedia.org/wiki/Cassiopeia_A)

## FORATS NEGRES

### QUÈ ÉS UN FORAT NEGRE?

Un forat negre – el qual, personalment, considero l'objecte més fascinant de l'espai exterior – és una regió en l'espai-temps o objecte astronòmic extremadament dens, amb una força gravitatòria tan forta que res, ni tan sols la llum, pot escapar del seu abast si s'apropa suficientment. Una altra forma de dir-ho és que un forat negre és un objecte per al qual la velocitat d'escapament és més gran que la velocitat de la llum, coneguda com l'últim límit de velocitat en l'univers.

Es diu "forat" perquè les coses poden caure dins seu, però no sortir-hi, i és «negre» perquè ni la llum pot escapar-ne. Tanmateix, els forats negres en realitat no són forats. No se'ns hauria ni d'ocórrer la idea que estiguin buits; ja que els forats negres contenen la major quantitat de matèria en el menor espai que cap altre objecte en tot l'univers (si més no pel que se sap).

El mite que "devoren" tot el que està al seu pas, no és del tot cert tampoc. El que passa és que com ja hem esmentat, el seu camp gravitatori és tan fort, que quan un estel brillant és a prop d'un forat negre, el primer no es podrà veure, ja que els forats absorbeixen la llum estel·lar dels objectes propers. La gravetat acostuma a "arrencar", en certa manera, els gasos exteriors d'una estrella, i d'aquesta manera fan créixer un disc al seu voltant anomenat disc d'acreció.

Així doncs, els forats negres absorbeixen tota matèria que s'acosti massa, però no s'ha d'entendre com que són grans buits que vaguen per l'univers alimentant-se de planetes i tot el que s'interposi. Amb això, descartem que els forats puguin representar un perill per a la Terra, com m'havia plantejat personalment en un inici, ja que es necessitaria que l'òrbita d'un d'ells s'ubiqui molt a prop del sistema solar, cosa que no és probable.

Per tenir una idea més clara i simplificada del que és un forat negre, considerarem el següent experiment mental: suposem que podem comprimir la Terra perquè la seva mida sigui la d'una bala. Ja d'inici, podem suposar que augmentarà la densitat de la Terra i es crearà una regió de l'espai amb una atracció gravitacional tan forta que res es podrà escapar.

L'acceleració gravitacional a la Terra depèn de la massa i el radi. Calculem aleshores aquesta acceleració gravitacional:

$$a_{gravity} = \frac{GM_E}{R_E^2} = \frac{(6,67 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2})(5,972 \times 10^{24}kg)}{6371 \times 10^6m} = 9,81m/s^2$$

Com podem comprovar, el resultat que ens dona és conegut: l'acceleració gravitacional, o més coneguda com a força de gravetat, de la Terra.

Però i llavors, què passaria si encongim la Terra a la mida d'una bala d'1 cm de radi? Per saber-ho calcularem l'acceleració deguda a la gravetat d'aquesta petita bala amb el pes de la Terra.

$$a_{gravity} = \frac{GM_E}{R_E^2} = \frac{(6,67 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2})(5,97 \times 10^{24} kg)}{(0,01m)^2} \sim 3,98 \times 10^{18} m/s^2$$

Aquesta nova gravetat obtinguda, de 3,98 trilions, és tan forta que ni tan sols la llum podria escapar d'aquesta regió de l'espai. I bàsicament és així com es defineix un forat negre.

Per tal d'exemplificar el què hem explicat, que ni tan sols la llum pot escapar de la força gravitatòria d'un forat negre, plantejaré un experiment que trobareu desenvolupat a l'ANNEX 1.

Una vegada fet i entès el comportament bàsic d'aquests objectes, procediré a parlar de les parts i propietats dels forats negres, a fi d'aprofundir en aquests.

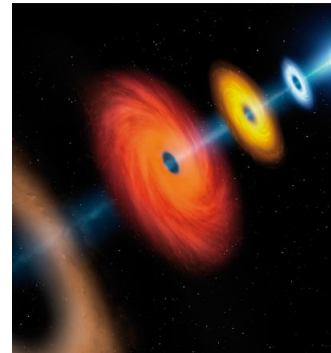
## PARTS DELS FORATS NEGRES

### Disc d'acreció

El disc d'acreció és el grup de cercles d'elements gasosos que giren en òrbites al voltant d'un forat negre, formant un disc general que els envolta. Aquests elements gasosos que formen els discs d'acreció, provenen dels gasos exteriors d'una estrella.

Com més s'aproxima la matèria o discs d'acreció a un forat negre, més es comprimeixen i més ràpidament giren. Al mateix temps, la temperatura d'aquests augmenta degut a la fricció produïda al disc per l'augment de la velocitat.

La principal font de lluminositat del disc d'acreció és l'energia gravitacional alliberada quan els gasos en el disc baixen en espiral cap a l'horitzó d'esdeveniments.



*Il·lustració 43. Discs d'acreció.*  
Extret de <https://n9.cl/vb4k9> i modificat per Mamotto

### ISCO

La ISCO (Innermost Stable Circular Orbit) és la regió de l'última òrbita circular estable del disc d'acreció, cercle de radi més petit, fora del qual les partícules poden orbitar de manera estable al voltant d'un forat negre.

### Jets (relativistes)

Els jets o raigs relativistes són corrents de matèria estreta, llargues i ràpides que emergeixen de regions molt compactes al voltant d'un forat negre, generalment en direccions oposades o perpendiculars al pla dels discs d'acreció.



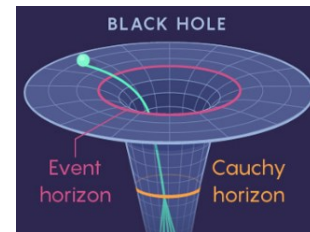
Els jets són la conseqüència d'una petita fracció de partícules de matèria que, en lloc de caure al forat negre, s'acceleren a una velocitat gairebé tan gran com la velocitat de la llum i s'escampen en dos feixos estrets al llarg de l'eix de rotació del forat negre.

*Il·lustració 44. Relativistic jets.* Extret de <https://scitechdaily.com/new-clues-about-early-universe-from-black-hole-powered-cosmic-jet-13-billion-light-years-from-earth/>

La seva brillantor és superior a la d'un centenar de vies làcties.

### Horitzó d'esdeveniments

L'horitzó d'esdeveniments o radi d'Schwarzschild no és una superfície física, sinó l'esfera que envolta la singularitat del forat negre de la qual no escapa res. Es pot considerar com l'entrada per accedir a un forat negre. Actua com una membrana d'un sol sentit, on les partícules i la radiació poden entrar, però no en poden sortir; és com una vàlvula amb atracció en un sol sentit.



L'horitzó d'esdeveniments divideix dues àrees que no es poden comunicar entre si:

*Il·lustració 45. Event horizon.* Extret de <https://www.ponews.net/all/n823p73h7r.html>

- » Horitzó exterior d'esdeveniments (Outer event horizon)

L'horitzó exterior és l'horitzó d'esdeveniments del forat negre en el sentit habitual del terme. És el límit de la regió des d'on les corbes nul·les (els camins dels raigs de llum) no escapen a l'infinit.

- » Horitzó interior d'esdeveniments (Inner event horizon)

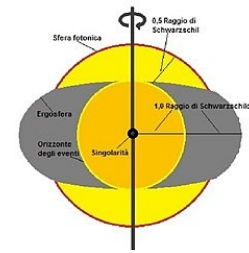
L'horitzó interior, que es troba completament dins de l'horitzó exterior, és el que anomenem un horitzó de Cauchy. Un horitzó de Cauchy és el límit de la regió que conté geodèsics tancats (o corbes tancades, CTC). Els CTC són bucles no trivials a través de l'espai-temps que, en principi, poden ser recorreguts per una partícula massiva, que comença i acaba en la mateixa coordenada temporal. En altres paraules, viatjar en el temps.

### Esguera de fotons

Encara que un forat negre és fosc, el plasma ardent que l'envolta sí que brilla. Mentre poden, els fotons es desplacen en línia recta, com el raig de llum d'una llanterna; això no obstant, en els voltants de l'horitzó d'esdeveniment, la gravetat ja és prou fort com per corbar les trajectòries dels fotons, motiu pel qual percebem un anell brillant que envolta una fosca 'ombra' més o menys circular.

Per als forats negres que no giren, l'esfera de fotons té un radi d'1,5 vegades el radi de Schwarzschild. Les seves òrbites serien dinàmicament inestables, per tant, qualsevol petita pertorbació, com una partícula de matèria que cau, causaria una inestabilitat que augmentaria amb el temps, ja sigui col·locant al fotó en una trajectòria cap a fora i fent que escapi del forat negre, o cap a dins.

Per a un forat negre de Kerr, el radi de l'esfera de fotons depèn del paràmetre de gir i dels detalls de l'òrbita del fotó, que pot ser prògrada o retrògrada.



*Il·lustració 46. Esfera de fotons.*

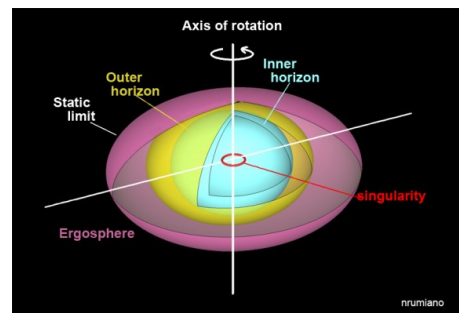
Extret de

[https://cocnc.org/wiki/Sfera\\_fotonica](https://cocnc.org/wiki/Sfera_fotonica)

### Ergosfera

L'ergosfera és la regió que hi ha al voltant d'un forat negre en rotació. En aquesta regió, el mateix espai-temps s'arrossega en la mateixa direcció que la rotació del forat negre a una velocitat major que la velocitat de la llum. La influència gravitatòria mantindrà els objectes en òrbites, tot i que amb una velocitat d'escapament suficient, aquests objectes encara podrien escapar de la influència del forat negre.

La frontera exterior de l'ergosfera, dins la qual els objectes han de romandre en moviment per evitar ésser empassats pel forat negre, és denominada amb el nom de límit estàtic.

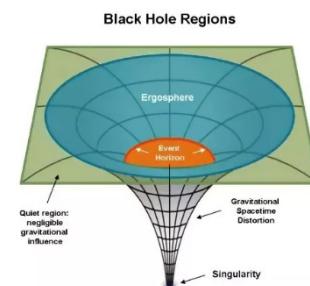


*Il·lustració 47. Structure of a rotating Black hole.* Extret de

[https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-a-rotating-black-hole\\_fig1\\_328736247](https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-a-rotating-black-hole_fig1_328736247)

### Singularitat

La singularitat és un punt de no retorn situat després de l'horitzó d'esdeveniments, i és considerada l'última part d'un forat negre. És una regió on la curvatura de l'espai-temps és tan extrema que es deforma de manera infinita i deixa d'existir. Quan la matèria entra dins la regió de la singularitat, es destrueix totalment.



*Il·lustració 48. Singularitat.*

Extret de <https://n9.cl/psqe7>



## PROPIETATS DELS FORATS NEGRES

Un forat negre és, en certa manera, un objecte molt simple: Pels astrònoms, les úniques tres propietats físiques que especifiquen completament les característiques d'un forat negre són la seva massa, la seva càrrega elèctrica i el seu moment angular o rotació. En conseqüència de la manera en què els forats negres es formen, la càrrega elèctrica d'alguns forats és zero, el qual els fa encara més simples. Altrament, la massa i la rotació no són propietats en si mateixes del forat negre: Aquests no roten; això és comparable a quan diem que "tenen massa" tot i que sabem que dins el forat negre no hi ha res. La massa, o el moment angular, són propietats de la matèria que ha caigut en ell. Un cop dins, aquesta matèria "es transforma en gravetat", i les seves propietats són "traduïdes" a propietats gravitatòries. Per tant, diem que la massa s'interpreta com a intensitat del camp gravitatori; mentre que el moment angular, o la rotació, és representat com al forat negre obligant a girar a totes les coses que tingui a prop. És, a raó d'això, que diem que els forats negres "no tenen pèl"; metàfora que fa referència a la idea que només hi ha tres propietats, anteriorment esmentades, observables. Totes les altres característiques haurien de ser empassades pel forat en si i, per tant no serien observables.

## TIPUS DE FORATS NEGRES

Hi ha diferents formes de poder classificar els forats negres. Actualment, es distingeixen quatre tipus principals de forats negres classificats segons la massa en ordre creixent:

1. **Els forats negres primordials.** Tenen masses comparables o inferiors (poden arribar a tenir la massa d'un àtom o menys) a la de la Terra. Aquests objectes purament hipotètics es podrien haver format a través del col·lapse gravitacional de regions d'alta densitat en el moment del Big Bang. L'existència d'aquest tipus de forat negre no s'ha pogut demostrar. Però si passessin a través de la Terra, ho farien directament en 1 minut sense gairebé cap efecte. Algunes investigacions de l'Institut Max Planck d'Alemanya han revelat que un micro forat negre o forat negre primordial amb una massa de mil milions de tones penetraria a través de la Terra provocant terratrèmols menors de magnitud 4. La forma de les ones a conseqüència del terratrèmol serien úniques i diferents de totes les formes que un terratrèmol podria provocar. I, per tant, mesurar aquestes ones seria una gran evidència d'aquest tipus de forat negre.
2. **Els forats negres de massa estel·lar.** Els forats negres de massa estel·lar són els més nombrosos de tots els tipus de forats negres. Aquests tenen masses compreses entre aproximadament 4 i 100 masses solars i són el resultat del col·lapse del nucli d'una estrella massiva al final de la seva vida.

3. **Forats negres de massa intermèdia.** També poden existir forats negres d'entre  $10^2$  i  $10^5$  masses solars. El primer bon IMBH (intermediate-mass black hole) és la font de raigs X HLX -1, vista en una projecció a prop del centre de la galàxia S0 ESO 243-49.
4. **Forats negres supermassius.** Pesen entre  $10^5$  i  $10^{10}$  masses solars, i es troben en els centres de la majoria de les grans galàxies. Els forats negres supermassius no poden acumular matèria tan ràpidament com voldrien. Si l'entrada supera un límit determinat (lluminositat d'Eddington), la pressió de radiació del disc d'acreció ultralluminós és prou forta per allunyar la matèria més enllà. Gràcies a aquesta explicació se li pot donar una justificació a les lluminositats observades dels quàsars.

Segons la teoria de la relativitat general, una vegada que es crea un forat negre, durarà infinitament, ja que res no pot escapar d'ell. Tanmateix, si també es considera la mecànica quàntica, resulta que, teòricament, tots els forats negres eventualment s'evaporaran a mesura que perdin la radiació de Hawking amb el pas del temps. Això vol dir que la vida útil d'un forat negre depèn de la seva massa i, per tant, com menys massa tingui un forat negre més ràpid s'evapora, i a la inversa. Per exemple, un forat negre d'1 massa solar tardaria  $10^{67}$  anys a evaporar-se, mentre que un forat negre de només  $10^{11}$  kg s'evaporarà en 3 mil milions d'anys.

D'altra banda, els forats negres també poden ser classificats segons les seves altres dues propietats físiques de rotació i càrrega:

1. **Forat negre de Schwarzschild.** També conegut com a "forat negre estàtic", és el forat negre més senzill possible, ja que no té rotació ni càrrega. Es caracteritza únicament per la seva massa; a raó d'això, es considera adimensional.
2. **Forat negre de Reissner-Nordström.** No gira, però té càrrega elèctrica.
3. **Forat negre de Kerr.** En rotació però sense càrrega.
4. **Forat negre de Kerr-Newman.** En rotació i amb càrrega.

## NAIXEMENT I CREIXEMENT DELS FORATS NEGRES

L'origen d'un forat negre s'estableix teòricament.

En primer lloc, es creu que els forats negres primordials es van formar a l'univers d'hora, poc després del Big Bang. Mentre que un forat negre estel·lar, es formaria quan un cos d'una determinada massa es contrau a una mida més petita que el seu radi gravitacional. Aquesta contracció és deguda a la gran força de gravetat que atrau els objectes al centre de massa del cos.

Per exemple, si el Sol s'encongís fins a una grandària de 3 km, es transformaria en un forat negre amb una força gravitacional de  $1,5 \times 10^{12}$  vegades la gravetat de la Terra.

La majoria dels forats negres es formen dels romanents de grans estrelles que exploten com a supernoves. Tanmateix, també es podrien formar pel xoc entre dues estrelles o el xoc entre un forat negre amb una estrella de neutrons.

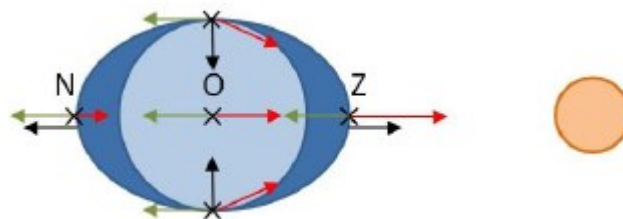
Quan s'ha format un forat negre, pot continuar creixent absorbint matèria addicional. Qualsevol forat negre absorbeix i pols interestel·lar del seu entorn de manera continuada. Aquest procés de creixement és una possible forma a través de la qual es poden haver format alguns forats negres supermassius, encara que la formació de forats negres supermassius és encara un camp de recerca obert; ja que també hi ha la teoria que els forats negres supermassius es van formar en el mateix instant que les galàxies a les quals corresponen.

Els forats negres també es poden fusionar amb altres objectes com estrelles o fins i tot amb altres forats negres.

La PRIMERA FOTOGRAFIA D'UN FORAT NEGRE es va fer el 10 d'abril de 2019, pels investigadors del Telescopio Horizonte de Sucesos.

## EFFECTES DE MAREA I ELS TDE

Les forces de marea són una conseqüència de la força gravitatòria. Si tenim dos cossos, com per exemple un planeta i un satèl·lit, s'exerceixen una força gravitatòria mútua. Ara bé, si ens fixem en un dels cossos, la zona més propera a l'altre astre experimenta una força més intensa que la seva zona més llunyana. I les seves zones perpendiculars experimenten una força obliqua, en la direcció del centre de l'altre cos. Totes aquestes diferents forces deformen l'astre; i si era esfèric, ara és més una el·lipse.



*Il·lustració 49. Principi de les mareas terrestres. Extret de tema 11 Astronòmica Sabadell*

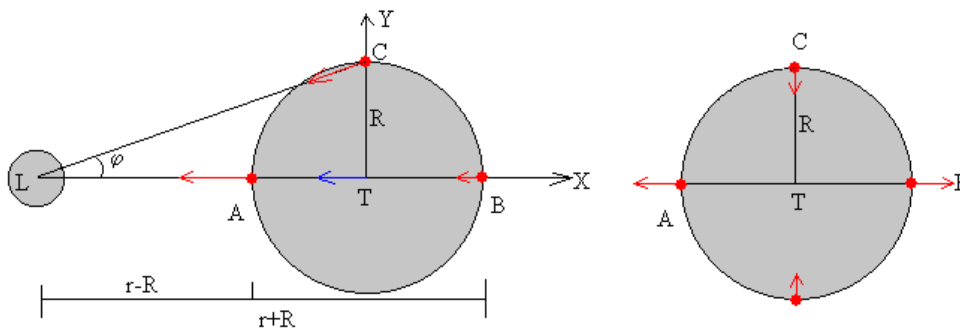
Aquest és el principi de les mareas terrestres. En el nostre cas, la Lluna i el Sol deformen les diferents capes de la Terra, i aquesta deformació es nota sobretot en l'aigua del mar, l'alçada de la qual puja i baixa.

L'origen de les forces de marea és degut al fet que la Terra és un cos extens i el camp gravitatori produït per la Lluna o pel Sol no és homogeni en tots els seus punts, ja que hi ha uns punts que estan més propers i altres més allunyats d'aquests cossos celestes.

Suposarem que la Terra és un cos rígid de forma esfèrica de radi  $R$ , que està coberta per una capa d'aigua de gruix uniforme i de fondària petita. El cos pertorbador, per exemple la Lluna, se suposa que és al pla equatorial de la Terra.

Tot i que la Lluna es mou, es considera que l'aigua està en tot moment en equilibri. A més, la velocitat i l'acceleració de qualsevol element de líquid respecte de la Terra és menyspreable.

Considerem la Terra i la Lluna immòbils a l'espai estant els seus centres separats una distància  $r$ . La força de marea, en una determinada posició  $P$  de la superfície de la Terra, és igual a la diferència entre la força d'atracció que la Lluna exerceix sobre un objecte situat en aquesta posició, i la força d'atracció que exerciria sobre aquest objecte si estigués al centre de la Terra.



*Il·lustració 50. Componentes fuerza de marea. Extret de <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm>*

Dibuixem les forces d'atracció que exerceix la Lluna (en color vermell) i la força que exerciria (en color blau) sobre aquest objecte si estigués situat al centre  $T$  de la Terra. A la dreta, es dibuixen les forces de marea (diferència entre els vectors vermells i blau).

Vist això, arribem a la conclusió que la Lluna frena la rotació de la Terra, i a la inversa.

L'efecte de les marees és una disminució de la velocitat de rotació de la Terra, però de manera progressiva. La durada del dia s'incrementa en 3,5 mil·lsegons per cada segle.

Si considerem que la Lluna va tenir alguna vegada a la seva història una part fluida, els efectes de marea provocats per l'acció de la Terra van ser enormes. Aquests efectes són 6000 vegades més grans que els que produeix la Lluna a la Terra. Així doncs, l'efecte d'aquestes marees intensíssimes explica el fet que sempre veiem la mateixa cara de la Lluna.

El 1988, Martin Rees, de la Universitat de Cambridge, va proposar una nova via per estudiar els forats negres: els anomenats EDM o Esdeveniments disruptius de marea (TDE en anglès). La idea és la següent: de tant en tant una estrella es podria acostar massa a un forat negre. Si aquest fos molt gran, engoliria l'estrella sencera sense miraments, però si fos una mica menor, faria

trossets l'estrella que s'acostés a menys d'uns 50 milions de quilòmetres, aproximadament la distància entre Mercuri i el Sol.

La destrossa de l'estrella seria deguda als efectes de marea, les diferències de la força de gravetat que notaria l'estrella en els seus diferents punts.

Igual que passa entre la Terra i la Lluna, l'estrella es deformaria, i com que la força de marea seria de gran intensitat, s'aniria aplanant fins que es trencaria. Després, les restes estel·lars s'estendrien i començarien a desviar-se de la seva trajectòria inicial. Més o menys la meitat del material seria expulsat en forma de llargs filaments, mentre que l'altra meitat continuaria orbitant entorn del forat negre i formaria un disc d'acreció. En el procés, el material del disc s'acceleraria fins a arribar quasi a la velocitat de la llum, es comprimiria, s'escalfaria fins als 250.000 graus. Durant un període de setmanes o mesos, un TDE típic faria que un forat negre prèviament inactiu i invisible eclipsés totes les estrelles d'una galàxia.

Els EDM van ser uns fenòmens teòrics fins a l'any 2010, quan l'astrònoma Suvi Gezari de la Universitat de Maryland va descobrir-ne el primer.

# CAPÍTOL 2.

# MARC PRÀCTIC

## INTRODUCCIÓ

La part pràctica d'aquest treball consistirà en 3 parts diferents.

Primerament, faré el càlcul de la magnitud aparent del quàsar BL Lac. En segon lloc, utilitzaré la tècnica de la Tricromia per estimar la visualització de la nebulosa planetària M27 en color. I finalment, simularé la visualització teòrica d'un forat negre.

L'objectiu d'aquestes tres pràctiques és demostrar l'existència de les estrelles i els forats negres mitjançant la informàtica.

Abans de res, i per tal de dur a terme aquest marc pràctic, introduiré una breu explicació dels mètodes d'observació. En acabat, descriuré el material necessari i fet servir per dur a terme les observacions. Tot seguit, esmentaré els programes informàtics que es necessiten per processar i pretractar les imatges, i obtenir-ne dades a partir d'aquestes. Posteriorment, explicaré la planificació d'una sessió d'observació astronòmica i la preparació in situ d'aquesta.

I, finalment, ens endinsarem específicament en cadascuna de les tres parts abans esmentades.

## MÈTODES D'OBSERVACIÓ

Per començar, explicaré alguns conceptes previs que cal saber per entendre de què estem parlant. En el món de l'astronomia, tenim i necessitem diferents mètodes d'observació. Gràcies a aquesta varietat, s'aconsegueix obtenir informació més àmplia i precisa; de fet, segons el tipus d'objecte espacial que s'estigui estudiant, serà necessari l'ús d'un tipus de tècnica concreta.

En primer lloc, trobem l'**astrometria**. Consisteix a conèixer la posició, paral·laxis i moviment propi d'un astre qualsevol en un moment determinat i amb la major precisió possible per tal d'establir les coordenades celestes, els seus canvis en el temps i reconstruir el moviment de les estrelles. L'Astrometria es pot dividir en dues parts:

- L'astrometria global; que s'ocupa de catalogar posicions sobre grans parts del cel donant lloc a catàlegs estel·lars i a sistemes de referència.
- L'astrometria de camp petit; on les posicions relatives són mesurades en el camp observable mitjançant les imatges CCD; i la qual ens interessa més en aquest projecte.

D'altra banda, hi ha l'**espectroscòpia**, ja explicada en el marc teòric, que és la disciplina de la ciència que estudia la interacció entre la radiació electromagnètica i la matèria.

Finalment, trobem la **fotometria**. Aquesta tècnica s'ocupa de mesurar el flux o la intensitat de la radiació electromagnètica d'un objecte astronòmic. Hi ha diversos mètodes per a fer fotometria; en el meu cas, d'acord amb el detector emprat, he utilitzat la fotometria CCD. És una tècnica que mesura la brillantor d'una estrella o quàsar en una imatge.

## MATERIAL UTILITZAT

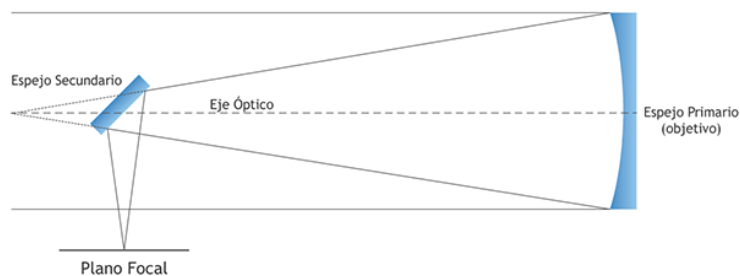
### TELESCOPI

Hi ha tres grans tipus de telescopis: els reflectors, els refractors i els catadiòptrics. En aquest treball he utilitzat el telescopi proporcionat a l'Astronòmica de Sabadell, el qual és un telescopi newtonià de tipus reflector. Es considera que el primer telescopi newtonià funcional de la història va ser la millora o perfeccionament del telescopi del físic Zucchi que va desenvolupar Newton l'any 1668; i d'aquí el seu nom.



*Il·lustració 51. Telescopi newtonià de l'Astronòmica de Sabadell. Fet per Mamotto*

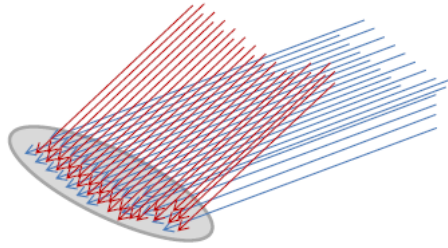
Aquest tipus de telescopis es caracteritza per l'ús d'un mirall primari còncau i un mirall secundari de pla diagonal. Bàsicament, la llum entra pel tub des de fora fins a arribar al mirall principal, el qual torna la llum. Per evitar que el focus de l'espill travessi per davant de l'obertura del tub i ens impedeixi observar, el mirall secundari desvia el feix de llum en  $90^\circ$  i el treu lateralment. Entrant, d'aquesta manera, al portaocular; el qual només cal girar cap endins o cap enfora per enfocar.



*Il·lustració 52. Funcionament d'un telescopi newtonià de tipus reflector. Extret de <https://www.saracco.com/telescopios-caracteristicas-generales/>*

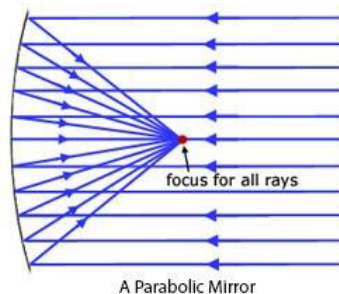
El que diferencia la llum de dos astres és la diferència d'angle amb què ens arriba la seva llum.





*Il·lustració 53. Diferència en l'angle de l'arribada de la llum de dos astres. Part Pràctica Astronòmica Sabadell*

Tota aquesta llum entra a través d'una gran superfície del telescopi i ha d'acabar a un receptor molt més petit. Per tant, el que fa el telescopi és concentrar tota aquesta llum a partir de miralls en un sol punt i després fer-la sortir paral·lela però amb un diàmetre molt més petit. L'objectiu de tot aquest procés és que tots els raigs de llum vagin a parar al mateix punt; d'aquesta manera serem capaços de veure nítidament.



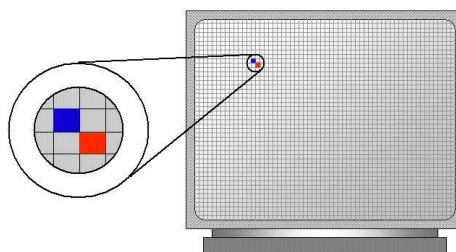
*Il·lustració 54. Focus. Extret de Part Pràctica Astronòmica Sabadell*

El punt on es concentra tota la llum s'anomena el focus. Com a resultat, podem veure que hi ha dos paràmetres importants dels miralls per a telescopis: el diàmetre i la seva distància focal.

### CÀMERES CCD (Charge Coupled Device)

L'esquema de funcionament bàsic està compost d'un sensor d'imatge, un sistema de digitalització i un canal de comunicació per passar la informació a l'ordinador.

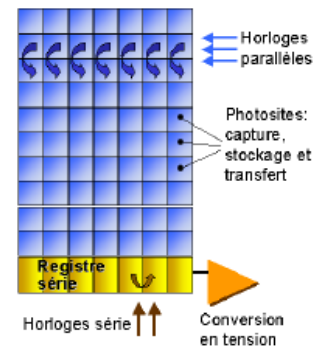
El sensor CCD, la part més important de la càmera, és un dispositiu per a detectar la llum, el qual consta d'un circuit integrat que té una cara fotosensible. La cara fotosensible és rectangular i està dividida en píxels.



*Il·lustració 55. Representació gràfica d'un píxel. Extret de <https://www.cavsi.com/preguntasrespuestas/definicion-pixel/>*

Quan un fotó arriba a un píxel, genera una petita càrrega elèctrica que s'emmagatzema. La quantitat de càrrega acumulada augmenta en funció del nombre de fotons que incideixin a la superfície del sensor CCD i, per tant, en funció de la llum que arribi. Aquesta relació ens confirma que es pot calcular la quantitat de llum que ha captat cada píxel, si mirem la quantitat de càrrega emmagatzemada. Aquesta càrrega es converteix en un número, el qual es registra en unes unitats anomenades ADU (Analog Digital Unit).

Acabada l'exposició, els electrons produïts són transferits columna per columna, llegits, convertits en senyal digital i transferits a l'ordinador. Cada píxel es buida de càrrega i torna a estar a punt per a obtenir una altra imatge.



*Il·lustració 56. Funcionament d'una CCD. Extret de Part Pràctica Astronòmica Sabadell*

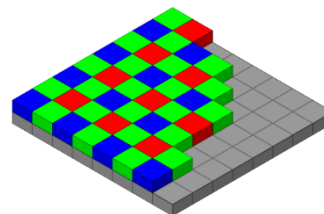
L'important és que el nombre d'electrons produïts a cada píxel és proporcional a la quantitat de llum rebuda. D'aquesta manera es pot comparar la magnitud entre diferents astres de la mateixa imatge.

La majoria de les càmeres CCD són en blanc i negre. Per produir imatges en color cal prendre 3 exposicions a través de tres filtres de diferents colors. En general, s'utilitzen dos tipus de sets de filtres: un filtre RGB de colors primaris format per tres colors (vermell, verd i blau), i un filtre de colors complementaris CMYG format per quatre colors (cian, magenta, groc i verd).

Per a la presa d'imatges d'aquest treball, utilitzarem el filtre RGB.



*Il·lustració 58. Filtre RGB. Extret de [https://www.astrocity.es/50accesorios/astrofotografia?id\\_categoria=50&n=80&p=2](https://www.astrocity.es/50accesorios/astrofotografia?id_categoria=50&n=80&p=2)*



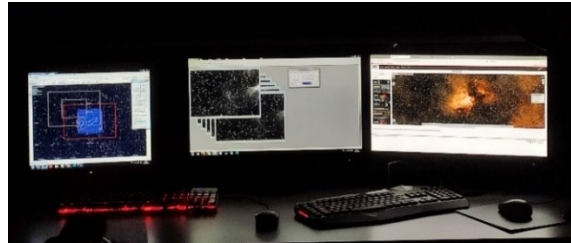
*Il·lustració 57. Distribució píxels. Extret de [https://es.wikipedia.org/wiki/Mosaico\\_de\\_Bayer](https://es.wikipedia.org/wiki/Mosaico_de_Bayer)*

## FONTS DE SOROLL DE LES CÀMERES CCD

Com hem comprovat, les càmeres CCD en s són molt útils per a l'astrofotografia. Tanmateix, tenen un problema: Els sensors CCD, en ser dispositius electrònics, pateixen de manera constant de senyal captat, que en el cas de les càmeres CCD astronòmiques, no prové d'estels o d'astres que s'estiguin observant; sinó que provenen del mateix sistema electrònic. Per tant, és llum que cal eliminar mitjançant certs mètodes de correcció. El valor que ens permet avaluar com és de bona la imatge d'un astre és la relació entre el senyal del mateix i el senyal de soroll: la relació senyal-soroll (s/n). Es considera que una bona relació s/n major que 20.

## ORDINADORS

En primer lloc, per a l'obtenció d'imatges, flats, darks i darks de flats, hem fet servir els ordinadors de l'observatori de Sabadell. Des d'aquests dos ordinadors (tres pantalles) tenim obert el programa "Cartes du ciel" i l'AstroArt.



*Il·lustració 59. Ordinadors de l'Astronòmica de Sabadell per a l'obtenció d'imatges. Fet per Mamotto*

En la segona part del projecte, el pretractament de les imatges i la fotometria, he fet servir el meu propi ordinador.

No hi ha un requeriment especial respecte a quin ordinador s'ha d'utilitzar, però si bé és cert, contra més potència i capacitat tingui l'ordinador, més fàcil i ràpidament podrem obtenir les imatges, pretractar-les i obtenir-ne dades.

## SOFTWARE UTILITZAT

### ASTROART

AstroArt és el programa principal que he utilitzat per a la part pràctica d'aquest treball. Consisteix en un software complet especialitzat per a l'astrofotografia: processament d'imatges, astrometria, fotometria, control de càmera i telescopi. AstroArt consta de múltiples funcions; entre d'elles els filtres adaptatius, l'opció de fer tricromia, una finestra pel pretractament o l'alineació automàtica.



*Il·lustració 60. Logo d'AstroArt. Extret de <https://n9.cl/8oo8y>*

### AAVSO

El traçador d'estrelles variables és el programa de traçat de gràfics en línia d'Aavso que representa dinàmicament gràfics d'estels per a qualsevol ubicació del cel o qualsevol objecte anomenat que es trobi actualment a l'índex d'estrelles variables. Consisteix en una pàgina web que serveix per ajudar a localitzar una estrella variable a base de l'ús de cartes buscadores amb seqüències d'estrelles, la magnitud visual de les quals ha estat ben determinada. En aquest treball, l'Aavso: Variable Star Plotter, l'he utilitzat per a localitzar i saber la magnitud d'estrelles de comparació a l'astre que estava estudiant.



*Il·lustració 61.* Logo de l'Aavso: Variable Star Plotter. Extret de <https://www.aavso.org/>

## ALADIN

Aladin és un atlas del cel interactiu que permet visualitzar imatges astronòmiques, o superposar entrades de catàlegs o bases de dades, així com accedir a dades i informació de tots els objectes astronòmics coneguts, com per exemple trobar magnituds o coordenades. Es podria dir que aquest software és com un catàleg astronòmic digitalitzat. El punt fort d'Aladin és que funciona sense necessitat de connexió Wi-Fi i, per tant, evitem descarregar Gigues innecessàriament.



*Il·lustració 62.* Logo d'Aladin. Extret de <https://aladin.u-strasbg.fr/AladinDesktop/>

## MICROSOFT EXCEL

És un programa informàtic que compta amb càlcul, eines gràfiques, taules per a calcular i un llenguatge de programació. Excel és el full de càlcul més utilitzat per analitzar i processar bases de dades amb milers de funcions útils a diferents nivells que fan més simple i còmode el procés de càlcul. Va des d'operacions matemàtiques simples, com pot ser una mitjana, o funcions per a organitzar dades, fins a fórmules complexes.



*Il·lustració 63.* Logo del Microsoft Excel. Extret de <https://es.logodownload.org/microsoft-excel-logo/>

## BLENDER

Blender és un programa informàtic multiplataforma de creació de contingut 3D, que ofereix una gran varietat d'eines: va des del modelatge, la il·luminació o l'edició de vídeos, fins a l'animació, la creació de gràfics tridimensional, o alguns tipus de simulacions. En el meu cas, he emprat Blender per al que es podria anomenar la simulació o creació tridimensional d'un forat negre.



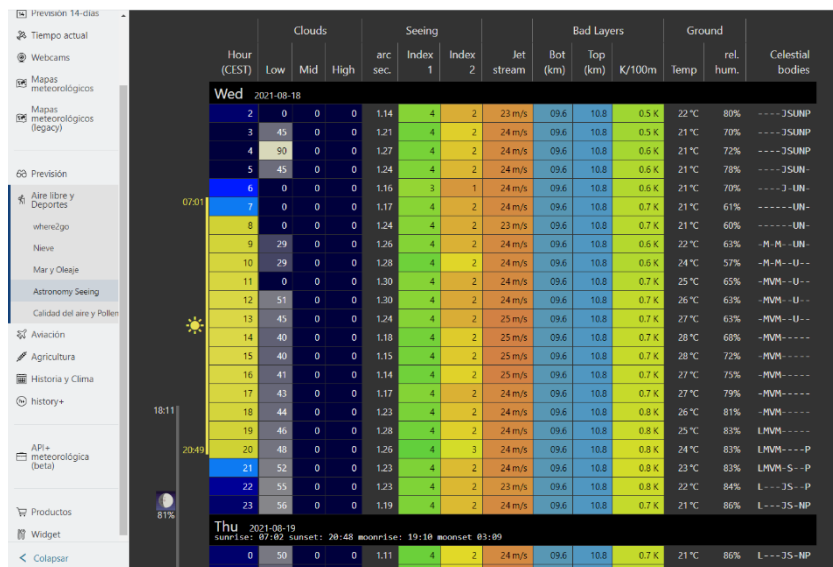
*Il·lustració 64.* Logo de Blender. Extret de <https://1000marcas.net/blender-logo/>

## PLANIFICACIÓ D'UNA SESSIÓ D'OBSERVACIÓ ASTRONÒMICA

Per tal de planificar l'observació, o més concretament, la presa d'imatges d'un objecte astronòmic determinat, hem de tenir en consideració diversos factors:

1. Cal conèixer les seves coordenades equatorials<sup>2</sup>.
2. Hem de buscar amb anterioritat la seva magnitud i que aquesta sigui menor que 16.
3. L'astre que volem observar ha de ser visible durant l'estona que volem fer la presa d'imatges i ha d'estar situat per sobre dels 20° sobre l'horitzó. En relació amb això, hem de procurar que durant la nit o matinada d'observació no hi hagi lluna plena o gairebé plena o que la lluna estigui lluny de l'astre; ja que ens afectaria a l'hora de prendre imatges. Aquesta afectació és deguda a la llum que reflecteix la lluna; la qual augmenta la brillantor al cel i, per tant, disminueix la visibilitat dels cossos celestes del "deep sky". Com a conseqüència, i per tal de saber l'alçada del nostre objecte astronòmic durant l'estona d'observació i per saber si la Lluna és a prop, anirem a la web: <http://catserver.ing.iac.es/staralt/>. En aquesta pàgina haurem d'omplir certes dades tals com la data d'observació i el nom o coordenades de l'observatori des del qual prendrem les imatges. D'altra banda, també hem d'evitar l'observació a prop de les ciutats a causa de la contaminació lumínica.
4. En últim lloc, s'ha de tenir en compte la previsió meteorològica. Per tal de comprovar-la, he fet servir la web:

[https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/sabadell\\_espa%C3%B1a\\_3111199](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/sabadell_espa%C3%B1a_3111199)



*Il·lustració 65.* Previsió meteorològica. Extret de

[https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/sabadell\\_espa%C3%B1a\\_3111199](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/sabadell_espa%C3%B1a_3111199)

<sup>2</sup>Les coordenades equatorials permeten determinar la posició d'un cos respecte de l'equador celeste i el primer punt d'Àries. Les seves dues coordenades són l'ascensió recta i la declinació.

Amb la finalitat de determinar si podrem observar o no, busquem al menú de l'esquerra "Aire libre y deportes", llavors cliquem a "**Astronomy seeing**" i, per consegüent, ens apareixerà el que podem veure a la imatge de dalt.

Meteoblue ens ofereix múltiples previsions per cada dia i hora; però per exemple, ens podríem fixar en els núvols: indicats a les tres primeres columnes, hi ha tres tipus de núvols (els baixos, els mitjans i els alts); contra més a prop del 0 estigui el nombre que indica els núvols, més idoni serà per a l'observació.

## PREPARACIÓ DE L'OBSERVACIÓ

Un cop planificada l'observació i duts a terme tots els requisits per dur-la a terme, ens haurem d'esperar que el cel estigui prou fosc per començar a treballar. En el meu cas, vaig realitzar l'observació astronòmica el 16 de juliol de 2021 de les 22:00 de la nit fins a les 00:30.

Però abans d'encetar cap observació, hem de preparar el material i mantenir certes condicions:

1. Per començar, l'observatori està dividit en dues parts: un espai tancat on està situat el telescopi, i la sala des d'on controlarem els ordinadors. Tanmateix, ambdós espais els mantindrem en total obscuritat. En el cas que necessitéssim alguna llum, per exemple per a veure el teclat, utilitzarem llum vermella perquè no afecti l'observació.
2. Encenem els ordinadors necessaris. Des del primer controlarem els motors del telescopi i tindrem obert el programa "Cartes du ciel", el qual és un tipus de mapa del cel que ens permetrà consultar la posició de l'objecte a observar; i des del segon ordinador obrirem AstroArt, des d'on controlarem la càmera i farem les imatges.
3. En tercer terme, encenem els motors del telescopi i la càmera CCD, la qual mantindrem a uns  $-20^{\circ}\text{C}$  tant per a fer les imatges com per fer els darks, flats i darks dels flats.

Passos a seguir els dos softwares anteriorment indicats:

- Cartes du Ciel:
  - a. Busquem el quàsar i la nebulosa que volem observar, a través de les seves coordenades.
  - b. Connectem el programa amb el telescopi, per tal que busqui la direcció des d'on s'han de prendre les imatges.
  - c. El telescopi "s'orientarà per si mateix" en direcció al que volem observar.
- AstroArt:
  - d. Enguegem el control de la càmera.
  - e. Triem el filtre adequat: en el cas del quàsar BL Lac, hem fet servir el filtre vermell (R) i en el cas de la nebulosa Dumbbell utilitzem el set de filtres RGB.
  - f. Refredem la càmera lentament perquè el possible vapor d'aigua no es condensi
  - g. Enfoquem la imatge

Quan hem seguit tots els passos indicats i ho tenim tot preparat, ja podem dur a terme la presa d'imatges.

## CÀLCUL DE LA MAGNITUD APARENT DEL QUÀSAR BL Lac

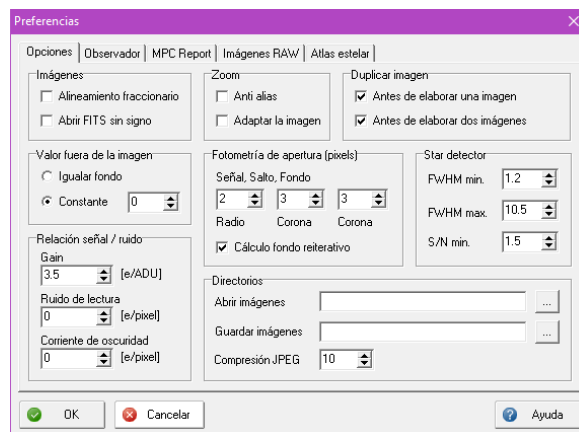
### OBTENCIÓ D'IMATGES

Per a l'obtenció d'imatges de quàsars, hem fet 10 fotografies, ja que és una quantitat suficient per després fer-ne la mitjana. No cal dir que com més imatges fem millor, ja que separarem més la imatge desitjada del soroll de fons.; però també és cert que quan haguéssim de calcular la magnitud del quàsar trigariem més estona.

La presa d'imatges està feta amb un temps d'exposició de 60 segons, ja que la relació senyal/soroll ha estat major que 20, que és el mínim necessari. Per a saber la relació senyal-soroll (s/n) amb el programa AstroArt, s'ha de seguir el procés següent:

- Seleccionar el quàsar BL Lac
- Anar a "archivo" → "preferencias" → "opciones"

A "fotometría de apertura" hi posarem: 2, 3, 3 (senyal, salt, fons) per exemple.



*Il·lustració 66. Senyal, salt i fons. Fet per Mamotto*

Aquests tres valors volen dir que al voltant de l'astre es dibuixen 3 cercles concèntrics de radi 2, 5 i 8, ja que se sumen els valors. El primer cercle ha d'incloure l'astre del qual volem calcular la fotometria (el senyal); la zona entre el primer i el segon és per aïllar (el salt), i la zona del segon al tercer cercle és d'on es calcula el soroll de fons. Hem de prendre en consideració que en aquest últim anell no hi ha d'haver cap estrella. Si és així, canviarem els valors perquè no passi.



*Il·lustració 67. Cercles concèntrics en l'estrella. Fet per Mamotto*

Una vegada fetes les corones, s'ha de calcular la relació s/n:

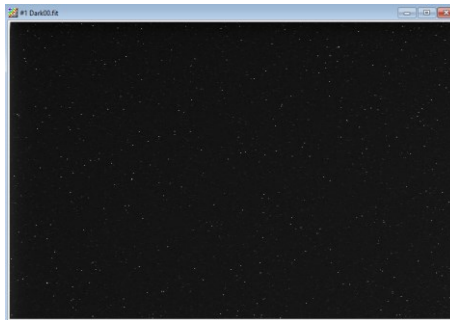
- Cliquem sobre l'estrella
- Anem a "herramientas" → "curva de crecimiento"

Coma resultat, s'obté la relació senyal/soroll en funció dels píxels. Si el pic màxim de la corba (que sempre està entorn els 2 píxels) és major que 20 perfecte, si no caldrà augmentar el temps d'exposició.

## OBTENCIÓ DELS DARKS I FLATS

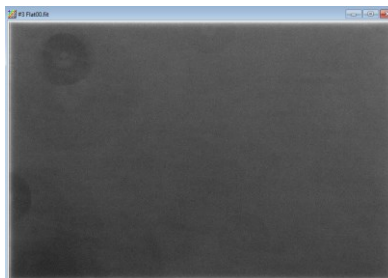
En el procés de la presa d'imatges, també anomenades Lights, es generaran 3 tipus d'errors: un tèrmic, un altre mecànic i un altre òptic. Amb la finalitat de corregir aquestes irregularitats, haurem d'obtenir els darks de les imatges, els flats i els darks dels flats:

- ❑ **Darks.** Registren l'error tèrmic. Han de fer-se en les mateixes condicions que els Lights, però en la foscor, amb el tub tapat. Per tant, hem obtingut 10 dark frames de la imatge amb un filtre vermell i amb un temps d'exposició de 60 segons.



*Il·lustració 68. Dark. Fet per Mamotto*

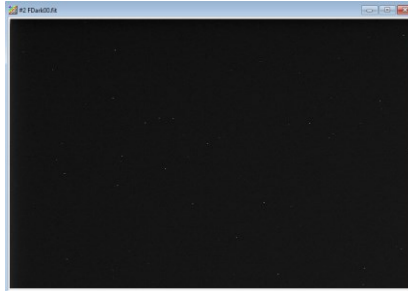
- ❑ **Flats.** Són fotografies d'exposició clara que registren els defectes d'òptica. A la boca del tub hi posem una superfície uniformement il·luminada i ens assegurem que l'enfocament és correcte i igual al de les imatges. Llavors, procedim a fer la presa de flats: hem obtingut 10 flat fields de la imatge amb un temps d'integració de 5 segons, i hem regulat la llum de manera que es completi aproximadament la meitat de la capacitat total del píxel. Els flats tracten la imatge eliminant les partícules de pols situades en el xip i que apareixen en forma de taques



*Il·lustració 69. Flat. Fet per Mamotto*



- ❑ **Dark frames dels flat fields.** Són igual que els darks; però en comptes de tractar les imatges, tracten els flats. Hem fet 10 darks dels flats amb el mateix temps d'exposició que els flats (5 segons).



*Il·lustració 70. Dark frame del Flat field. Fet per Mamotto*

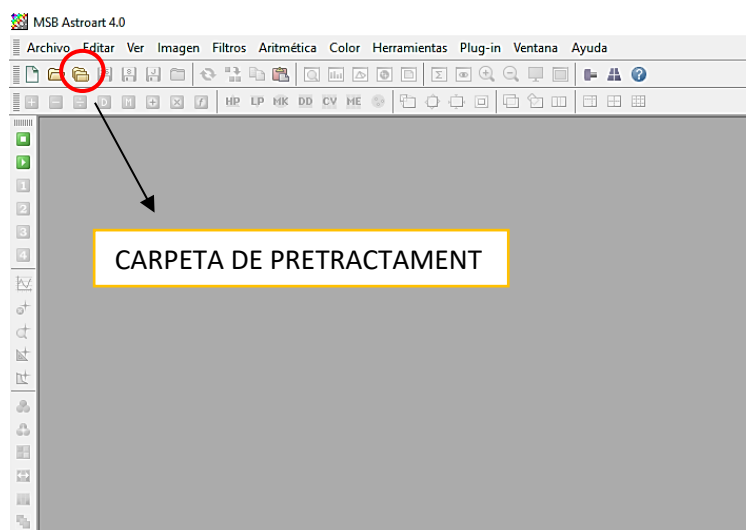
Totes les imatges de calibratge han d'efectuar-se a la mateixa temperatura a la qual hagin estat preses les imatges astronòmiques. D'altra banda, no és apreciable per la mida de les imatges (il·lustracions 68 i 70), però en els darks i els dark frames dels flat fields podríem contemplar la visualització de múltiples estrelles.

## PRETRACTAMENT

Una vegada feta la presa d'imatges, flats, darks i darks dels flats, prosseguirem a fer el pretractament. D'entrada revisarem les imatges, i si en alguna d'elles apareix algun objecte estrany, esborrarem la imatge. Fer el pretractament de les imatges significa corregir-les de sorolls i d'alineaments amb els darks, els flats i els darks dels flats. Això no obstant, en les imatges preses del quàsar BL Lac, no trobem cap objecte estrany, així que seguim endavant sense esborrar cap imatge.

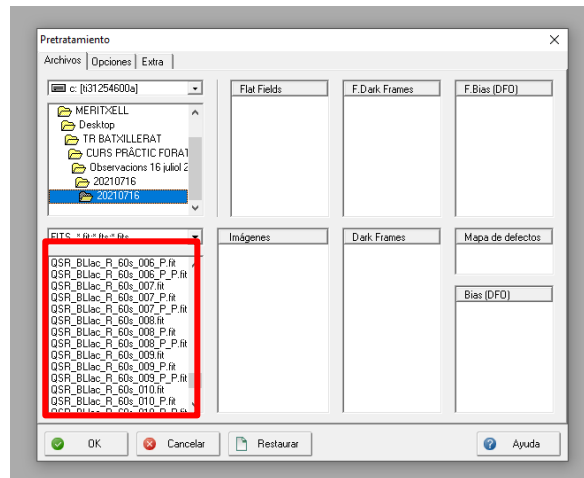
Passos a seguir:

1. Obrim AstroArt i ens dirigim a la carpeta de pretractament.



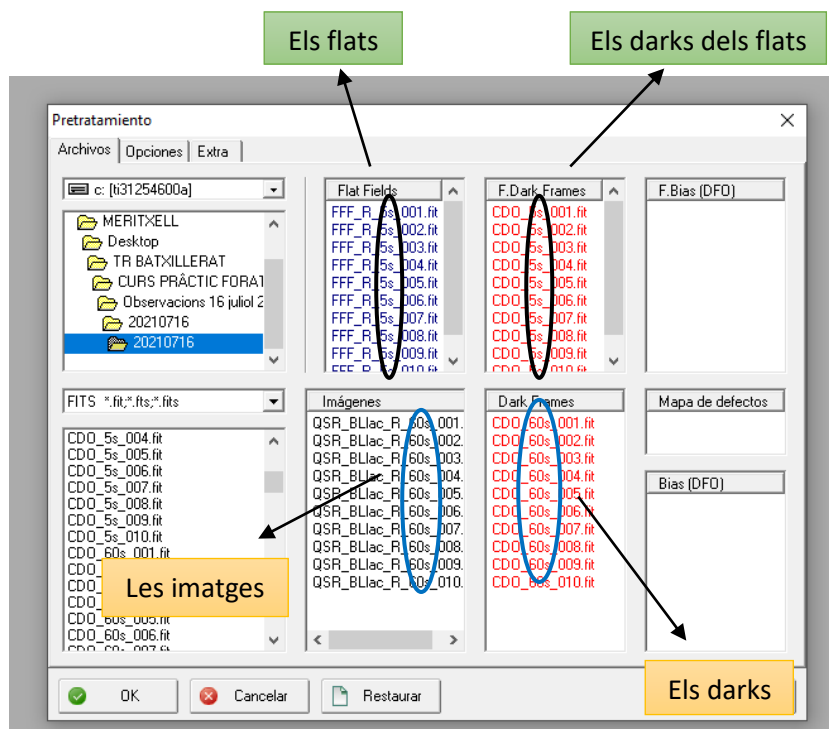
*Il·lustració 71. Localització de la carpeta de pretractament. Fet per Mamotto*

- Quan la pestanya ja està oberta, procedim a buscar el fitxer del quàsar que estem estudiant i l'obrim. Sabem que hem obert el fitxer quan apareixen les imatges, els flats, els darks i els darks dels flats a la capsa de baixa a l'esquerra.



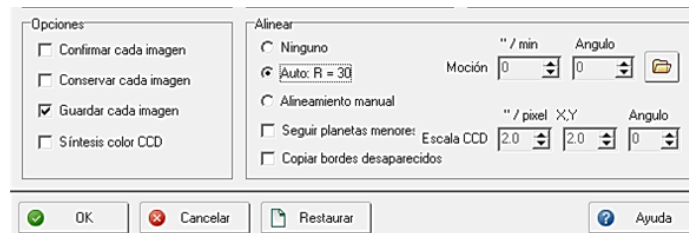
*Il·lustració 72. Carpeta de pretractament. Fet per Mamotto*

- Seguidament, col·loquem cada imatge al requadre corresponent. Hem de tenir en compte els temps d'exposició:
  - Els Flats Fields han de ser del mateix temps d'exposició que els F. Dark Frames; i, alhora, les imatges han de ser del mateix d'exposició que els Dark Frames.



*Il·lustració 73. Distribució de les imatges, flats, darks i darks dels flats. Fet per Mamotto*

4. Anem a la segona pestanya (Opciones) i seleccionem les variables segons ens convingui:
- Dark Frames i Flat Fields: “media”.
  - Imatges: afegir les imatges resultants, guardar cada imatge i activar l’alineació automàtica<sup>3</sup>



*Il·lustració 74. Activació de l’alineació automàtica. Fet per Mamotto*

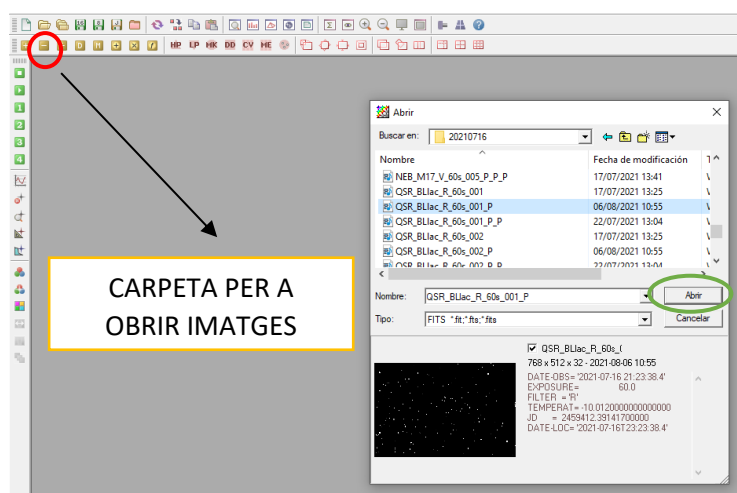
Una vegada tenim configurades les opcions anteriors, pressionem l’“OK” i AstroArt 4.0 calcularà les mitges dels darks, dels flats i dels darks dels flats. També calcularà les imatges ja pretractades; les quals haurà gravat amb el mateix nom però afegint una P al final.

## FOTOMETRIA

Seguides totes les indicacions anteriors, hem fet ja el pretractament de les imatges i, per tant, procedim a fer la fotometria.

Passos a seguir:

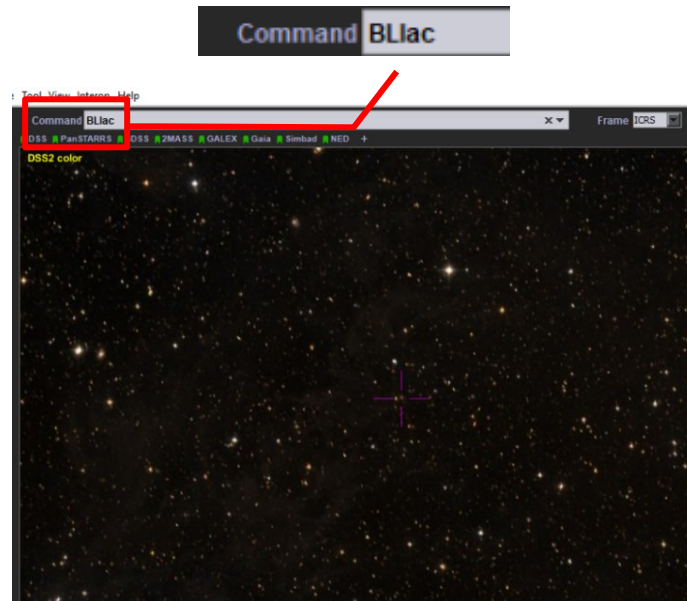
1. Ens dirigim a la carpeta que veiem marcada a la imatge i busquem el fitxer del quàsar que estem tractant. Una vegada obert, veurem que ens hi apareixen tres tipus d’imatges; malgrat això, a nosaltres només ens interessa seleccionar una imatge qualsevol del tipus que té una P darrere del nom, ja que són les imatges que hem pretractat. Per tant, en seleccionem una i l’obrim.



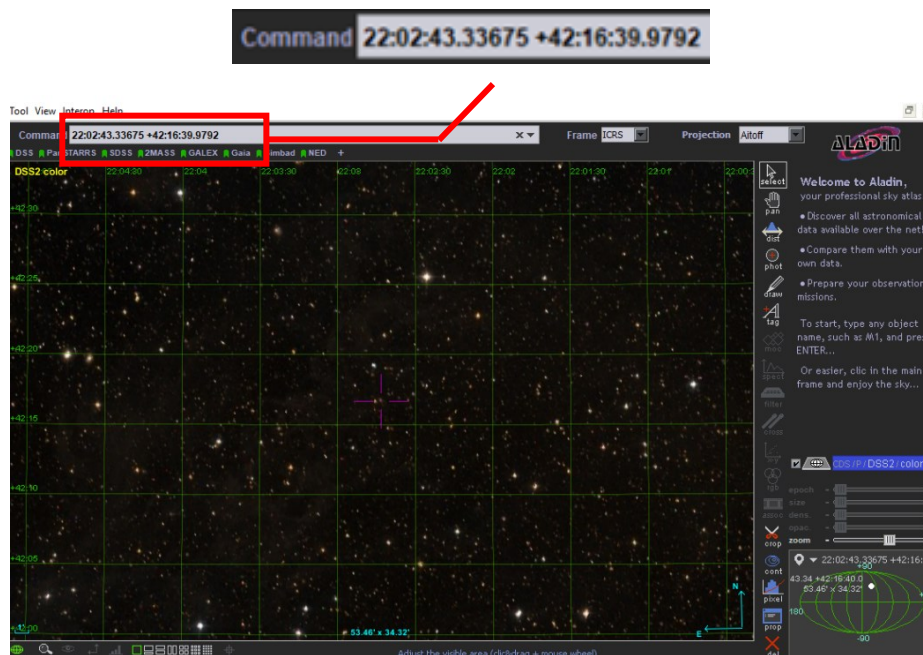
*Il·lustració 75. Carpeta per a obrir imatges. Fet per Mamotto*

<sup>3</sup> L’alineació automàtica a AstroArt 4.0 serveix per a alinear i apilar múltiples imatges (prèviament adquirides per tal d’augmentar la relació senyal/soroll) ràpidament a partir de diferents algorismes.

- Quan ja tenim la imatge oberta, necessitem seleccionar l'objecte i tres estrelles de comparació. Per tal de fer això, hem d'anar a l'Avso; però prèviament hem de saber les coordenades del quàsar BL Lac. Consegüentment, primerament obrirem Aladin; on escriurem "BL Lac" al buscador i trobarem les coordenades que necessitem.



*Il·lustració 76. Cerca del quàsar a l'Aladin. Fet per Mamotto*

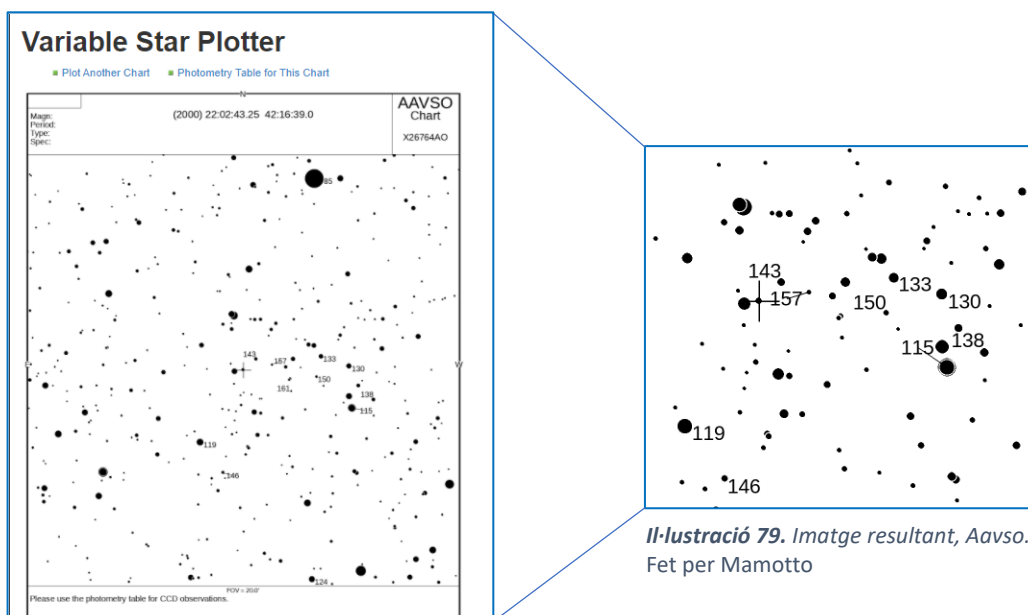


*Il·lustració 77. Cerca de les coordenades del quàsar a l'Aladin. Fet per Mamotto*

3. En acabat, ja podem obrir l'Aavso: Variable Star Plotter i omplir les caselles necessàries per a obtenir la magnitud i visualització de les estrelles de comparació més properes al quàsar BL Lac.

*Il·lustració 78. Aavso. Fet per Mamotto*

4. Immediatament després de prémer el botó “Plot Chart”, ens apareixerà la imatge següent; on podem veure l’objecte que estem estudiant marcant amb una creu i les estrelles de comparació amb les seves respectives magnituds.



*Il·lustració 79. Imatge resultant, Aavso. Fet per Mamotto*

5. Seguidament, hem elegit tres de les diferents estrelles de comparació que ens ha ofert l'Aavso i hem anat a la pestanya de l'AstroArt. Una vegada estem en aquest programa, hem marcat amb una creu primerament l'objecte que estem estudiant, i després les tres estrelles.



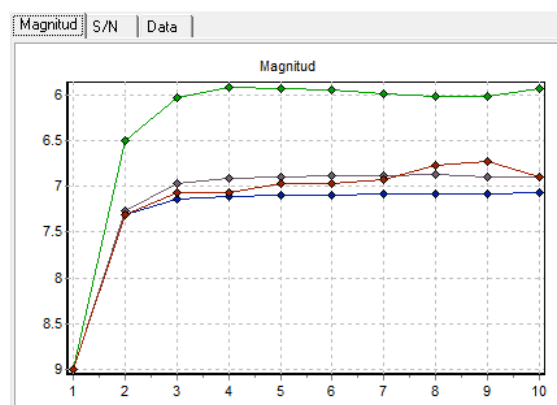
Il·lustració 80. Marques en les estrelles de comparació, AstroArt. Fet per Mamotto

6. Una vegada hem elegit i marcat les estrelles de comparació, hem tornat a l'Aavso per recordar les magnituds dels estels. Llavors ens dirigim a l'Excel i omplim les caselles corresponents amb la magnitud de cada estel respectivament.

3	Mag Estels de comparació	
4	Estel 1	11,9
5	Estel 2	14,3
6	Estel 3	15,7

Il·lustració 81. Magnituds estels de comparació, Excel. Fet per Mamotto

7. Tot seguit, tornem a Astroart i cliquem a "Herramientas" → "Curva de crecimiento". D'aquesta manera, ens apareixerà el gràfic següent:



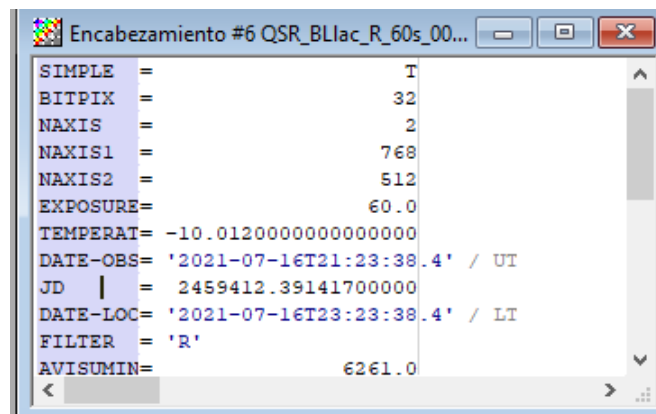
Il·lustració 82. Corba de creixement. Fet per Mamotto

El que ens permet aquesta corba de creixement, és observar el radi que necessitem per a la fotometria d'obertura. I com ho sabem? Doncs ben senzill: agafarem el valor en l'eix de les X quan la corba comenci a ser estable. En aquest cas, hem agafat el nombre 3; el qual haurem d'introduir a la seva casella:



*Il·lustració 83. Radi 3 (senyal) per a la fotometria d'obertura. Fet per Mamotto*

8. Introduït aquest nombre, pitgem l'“OK” i ens dirigim a la icona “Encabezado FITS”, on podrem observar la data juliana (DJ). Que més tard, ens serà una dada útil per a fer els càlculs.



*Il·lustració 84. Data juliana. Fet per Mamotto*

9. Quan ja hem trobat la DJ, minimitzem la pestanya i haurem de clicar en una altra icona diferent. En aquest cas ens dirigim a la icona “Estrelles”, on trobarem la xifra dels ADUS de cada estrella i de l'objecte que estem estudiant.

N#	Xc	Yc	ADU	A	P	R.A.*	DEC.*
1	400.25	240.71	94678				
2	341.16	128.34	151372				
3	418.86	257.77	21248				
4	443.22	250.35	6613				

*Il·lustració 85. ADUS de cada estrella, AstroArt. Fet per Mamotto*

10. Tan bon punt hem obtingut la data juliana i els ADUS, traslladarem les dades a l'Excel:

Data juliana	ADU O	ADU C1	ADU C2	ADU C3
2459412,39142	94.678	151372	21248	6613

Il·lustració 86. ADUS de cada estrella, Excel. Fet per Mamotto

Gràcies a aquestes dades, obtenim els resultats següents, que ens serviran per a calcular la magnitud:

G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Estel	Maq Catàleg	Maq mesurada	Diferència C-M		Dev Est Cs	0,204221089				
C1	11,90	12,123	-0,223		Coef correl	0,999987591				
C2	14,30	14,255	0,045							
C3	15,70	15,522	0,178							
mo	m1	m2	m3	Offset 1	Offset 2	Offset 3	Offset promig		m1 av	-12,950
-12,441	-12,950	-10,818	-9,551	24,85	25,12	25,25	25,07		m2 av	-10,818
									m3 av	-9,551

Il·lustració 87. Resultat pel càlcul de la magnitud. Fet per Mamotto

11. Amb el propòsit que el càlcul de la magnitud del quàsar BL Lac sigui més acurat, repetirem el mateix procés, des del punt 5 fins al punt 10, amb les 9 imatges restants.

Data juliana	ADU O	ADU C1	ADU C2	ADU C3
2459412,39142	94.678	151372	21248	6613
2459412,39213	94783	150448	21303	6424
2459412,39284	95888	151421	21348	6383
2459412,39356	96140	152454	21895	6294
2459412,39427	95735	152345	21742	6707
2459412,39498	96485	152890	22084	6714
2459412,39570	97121	152625	21544	6738
2459412,39641	97779	153084	22001	6226
2459412,39712	96584	153002	21937	6205
2459412,39783	97225	152397	22409	5617

Il·lustració 88. ADUS de cada estrella en les 10 imatges. Fet per Mamotto

Com a conseqüència, obtindrem les dades de dates julianes i ADUS que veiem a la part superior de la imatge; que es veuran reflectides en els resultats de la imatge que veiem a continuació:

G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Estel	Maq Catàleg	Maq mesurada	Diferència C-M		Dev Est Cs	0,16092808				
C1	11,90	12,115	-0,215		Coef correl	0,999790455				
C2	14,30	14,227	0,073							
C3	15,70	15,558	0,142							
mo	m1	m2	m3	Offset 1	Offset 2	Offset 3	Offset promig		m1 av	-12,956
-12,441	-12,950	-10,818	-9,551	24,85	25,12	25,25	25,07		m2 av	-10,844
-12,442	-12,943	-10,821	-9,520	24,84	25,12	25,22	25,06		m3 av	-9,513
-12,454	-12,950	-10,823	-9,513	24,85	25,12	25,21	25,06			
-12,457	-12,958	-10,851	-9,497	24,86	25,15	25,20	25,07			
-12,453	-12,957	-10,843	-9,566	24,86	25,14	25,27	25,09			
-12,461	-12,961	-10,860	-9,567	24,86	25,16	25,27	25,10			
-12,468	-12,959	-10,833	-9,571	24,86	25,13	25,27	25,09			
-12,476	-12,962	-10,856	-9,486	24,86	25,16	25,19	25,07			
-12,462	-12,962	-10,853	-9,482	24,86	25,15	25,18	25,07			
-12,469	-12,957	-10,876	-9,374	24,86	25,18	25,07	25,04			

Il·lustració 89. Resultat pel càlcul de la magnitud en les 10 imatges. Fet per Mamotto



Tots aquests càlculs fets a l'Excel automàticament, venen d'unes fórmules concretes que hem inserit per tal que es calculi més ràpidament. Amb a finalitat de facilitar-ne la comprensió, explicaré quines fórmules he utilitzat, de quina manera ho he fet i perquè serveix cadascuna d'elles.

El procediment és el següent: Tenim varies estrelles de comparació de les quals coneixem les seves magnituds (amb el filtre utilitzat), que anomenaré  $m_i$ . En les imatges trobem els ADUS de la nostra estrella i de les estrelles de comparació.

La fórmula per a calcular la magnitud mesurada de les estrelles de comparació és la següent:

$$m_i = -2,5 \log(ADUS)$$

Llavors, per tal de trobar la diferència de magnitud entre la real i la que he mesurat jo mateixa, resto la magnitud calculada amb la magnitud real per a cada estrella de comparació:

$$C_i = m_i^{real} - m_i^{calculada}$$

I trobem el valor mig de les diferències:

$$C = \frac{1}{N} \sum C_i$$

On N és considerada el nombre d'estrelles de comparació que tenim en compte.

Un cop tenim això calculat, ja podem calcular la magnitud de la nostra estrella a partir de la imatge i sumar-li la diferència que hem calculat:

$$m = -2,5 \log(ADUS) + C$$

I l'error de la magnitud serà:

$$\Delta m = \sqrt{\Delta m_{cal}^2 + \Delta C^2}$$

On el primer component sumant dins l'arrel quadrada serà calculat de la següent manera:

$$\Delta M_{cal} = \frac{1}{S/R}, \text{ la qual després elevaré al quadrat.}$$

I el segon component sumant de l'arrel quadrada el calcularé amb la fórmula:

$$\Delta C = \frac{1}{\sqrt{N-1}} \sqrt{\sum (C_i - C)^2}, \text{ la qual després elevaré al quadrat.}$$

## RESULTATS

IMATGES	DATA JULIANA	MAGNITUD APARENT
1	2459412,39142	12,633
2	2459412,39213	12,620
3	2459412,39284	12,608
4	2459412,39356	12,611
5	2459412,39427	12,636
6	2459412,39498	12,635
7	2459412,39570	12,620
8	2459412,39641	12,592
9	2459412,39712	12,603
10	2459412,39783	12,566

Taula 5. Magnitud aparent 10 imatges

MAGNITUD MITJANA APARENT
<b>12,612</b>

Taula 6. Magnitud mitjana aparent

ERROR
<b>0,003</b>

Taula 7. Error de càlcul

## ESTIMACIÓ DE COM ES VEURIA LA NEBULOSA PLANETÀRIA M27 EN COLOR: Tricromia

### OBTENCIÓ D'IMATGES

L'obtenció d'imatges de la nebulosa Dumbbell es farà de la mateixa manera que amb el quàsar BL Lac amb una diferència important: fins ara l'enfocament de les imatges no era massa important, en canvi, ara, intentarem enfocar el màxim que puguem. Per a fer-ho farem servir el mateix AstroArt i l'enfocador de la càmera. Altrament, hi ha una altra gran diferència: amb el quàsar només utilitzàvem un filtre (vermell), i en el cas de la nebulosa haurem de canviar el filtre tres vegades; és a dir, farem 30 imatges, 10 imatges amb cada filtre (vermell, verd i blau).

### OBTENCIÓ DELS FLATS I DARKS

Quan acabem d'obtenir les imatges, farem els darks, els flats i els darks dels flats, de la mateixa manera que amb el quàsar però amb una diferència: els filtres.

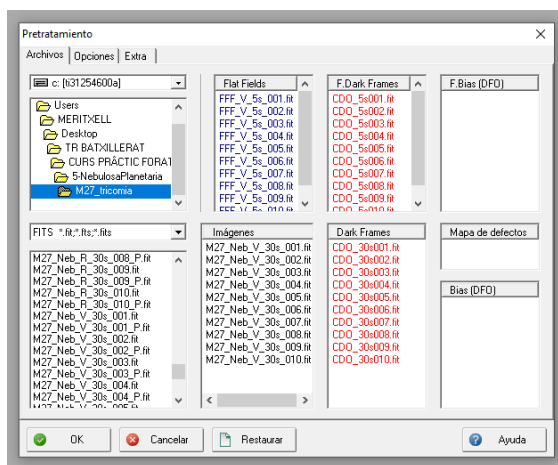
- » **Dark frames de la imatge.** En farem 10, igual que amb les imatges. A més cal fer-los amb el mateix temps d'integració de les imatges, el qual hem decidit que sigui de 30 segons, i amb el mateix filtre que s'han fet les imatges.
- » **Flat fields de la imatge.** En farem 10. El temps d'exposició serà de 5 segons.
- » **Darks frames dels flats fields.** També en farem 10. El temps d'integració serà igual que el dels Flat Fields.

Hem de repetir el mateix procés tres vegades, amb els tres filtres diferents RGB. Això no obstant, en els Flats i Darks dels Flats que hem fet amb el filtre blau, hem utilitzat un temps d'exposició de 30 segons, el qual és considerablement més gran. Això és degut al fet que en funció del filtre es pot requerir un temps més o menys llarg d'integració.; aquesta variació no només és a causa del rendiment del filtre i la resposta de la CCD sinó també perquè un cos celeste del deep-sky pot emetre molta menys llum en una banda que en una altra.

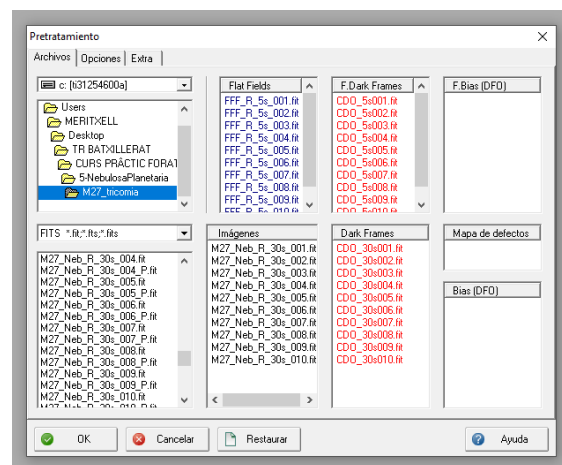
## PRETRACTAMENT

Tan bon punt acabem la presa d'imatges, flats, darks i darks dels flats amb els tres filtres diferents, començarem el pretractament. Abans, però, i de la mateixa manera que a la pràctica anterior, revisarem les imatges. No obstant això, en aquesta pràctica tampoc no trobem cap objecte estrany, així que seguim endavant sense esborrar cap imatge.

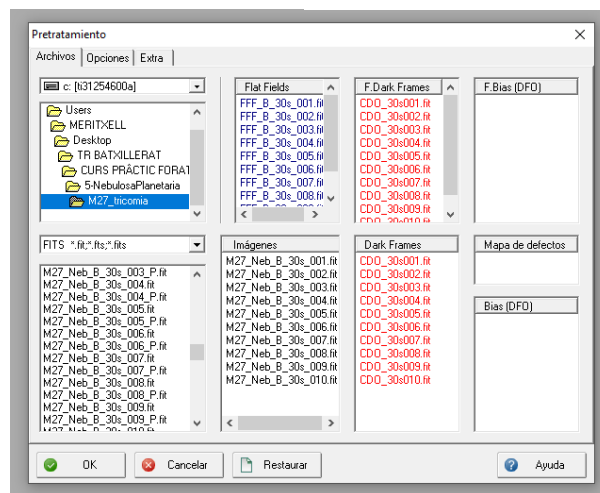
El pretractament de la nebulosa planetària M27 és exactament igual al del quàsar BL Lac, amb l'única diferència que com les imatges d'M27 estan fetes amb tres filtres diferents (RGB), haurem de fer el pretractament tres vegades: una amb el filtre verd, l'altre amb el filtre vermell, i l'última amb el blau.



II-Il·lustració 91. Pretractament, filtre verd. Fet per Mamotto



II-Il·lustració 90. Pretractament, filtre vermell. Fet per Mamotto



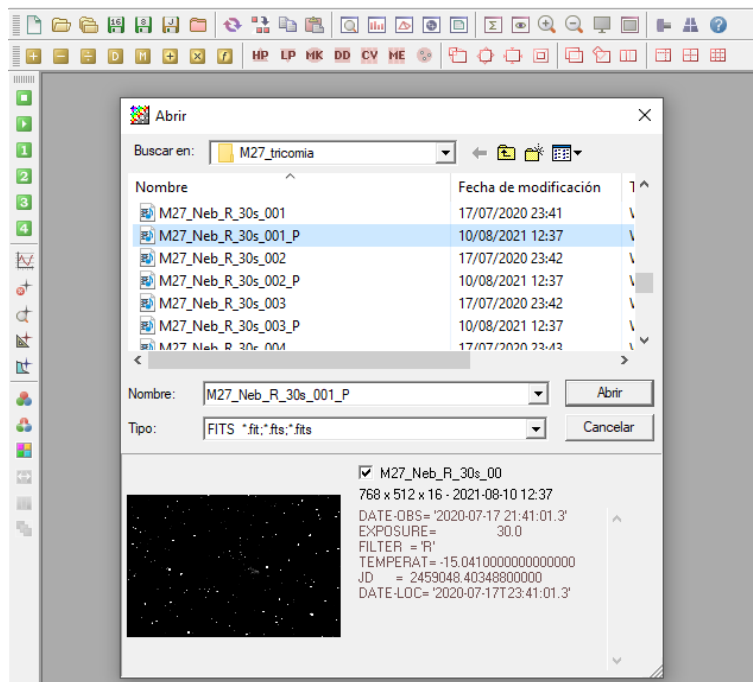
II-Il·lustració 92. Pretractament, filtre blau. Fet per Mamotto

## FOTOMETRIA

Així que hem acabat el pretractament de les imatges, seguirem amb la fotometria; la qual ens permetrà donar-li color a les imatges, és a dir, fer la tricromia.

Passos a seguir:

1. Obrim la carpeta que hi ha marcada a la imatge d'avall i busquem el fitxer de la nebulosa Dumbbell M27. Una vegada obert, veurem que ens hi apareixen tres tipus d'imatges; tanmateix, i de la mateixa manera que amb el quàsar a la pràctica anterior, a nosaltres només ens interessa seleccionar una imatge qualsevol del tipus que té una P darrere del nom. Per tant, en seleccionem una i l'obrim.



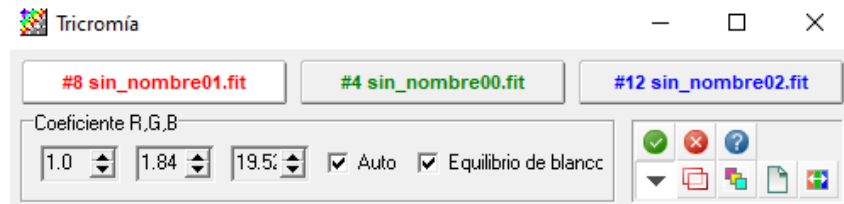
*Il·lustració 93. Selecció d'imatge. Fet per Mamotto*

IMATGE RESULTANT:



*Il·lustració 94. Imatge resultant. Fet per Mamotto*

- Ara que tenim oberta la imatge resultant del punt anterior i les tres imatges que hem obtingut prèviament amb els tres filtres diferents, ja podem fer la composició RGB. Per tal de fer-ho, hem de prémer “Color” → “Tricromía” i n’apareixerà el següent:



*Il·lustració 95. Composició RGB. Fet per Mamotto*

- A cada un dels tres botons de la imatge de dalt, hi col·locarem la imatge corresponent en funció del filtre utilitzat: a la casella vermella hi posem la imatge feta amb el filtre vermell, a la casella verda la imatge del filtre verd, i a l’últim botó hi posem la imatge del filtre blau. D’altra banda, podem veure un triangle negre a la part inferior dreta, el qual activarem per tal de veure la vista prèvia de la imatge, que apareixerà així:



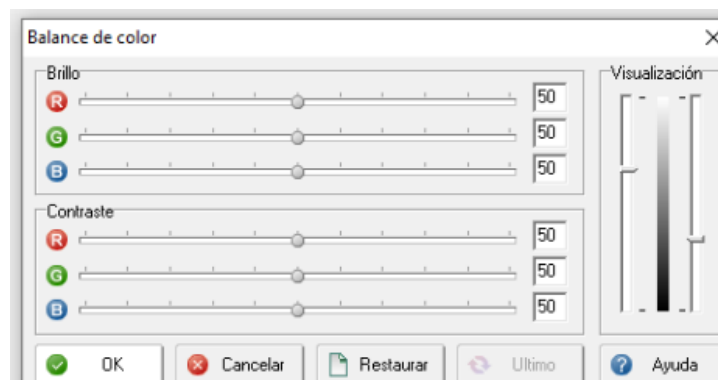
*Il·lustració 96. Imatge resultant sense alinejar. Fet per Mamotto*

4. Com podem observar, la imatge i els colors estan desquadrats; això és degut al fet que els tres fotogrames encara no s'han alineat entre ells. Amb l'objectiu d'aconseguir que s'alineïn, AstroArt ens ho posa molt fàcil: simplement farem clic sobre el botó de la dreta del triangle, el qual consta de dos quadrats superposats, i el programa utilitzarà els seus potents algorismes d'alineació automàtica i, d'aquesta manera, obtenir una superposició correcta. Tot seguit polsem el tick verd i podrem veure la imatge següent:



*Il·lustració 97. Imatge alineada. Fet per Mamotto*

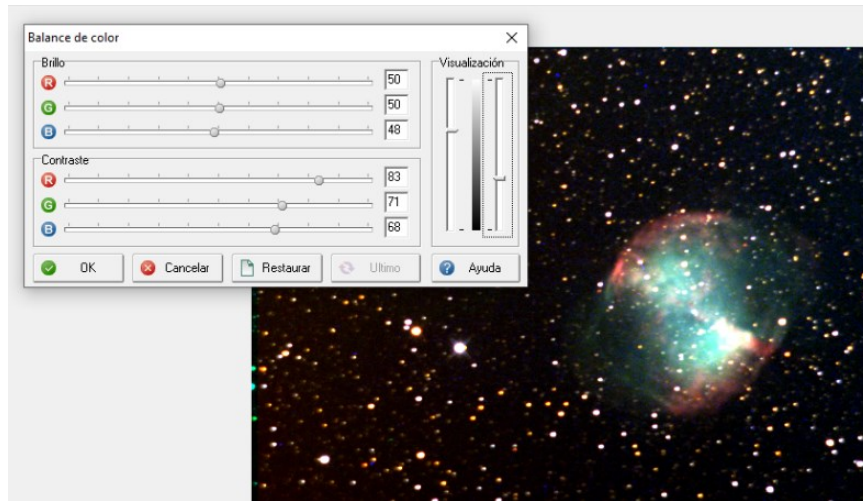
5. A continuació, després d'obtenir la imatge anterior, pitjarem "Color" → "Balance de color". El que ens permetrà aquesta opció és tan sols una millora d'efecte visual.



*Il·lustració 98. Balanç de color. Fet per Mamotto*

Nogensmenys, és important obtenir un calibratge de color més proper a la visió real de l'ull humà. No només pel fet que nosaltres puguem saber quina és la visualització a la vida real, sinó que també perquè els colors siguin compatibles amb les classes espectrals. El que vull dir amb això és que degut a l'emissió de radiació en bandes aïllades i estretes de les nebuloses (raó per la qual es diu que tenen un espectre d'emissió caracteritzat per línies de brillants), el color d'aquest tipus d'objectes està fortament condicionat per aquestes "discontinuitats" en les emissions de radiació i sobretot pel nostre "sistema de visió" o pel telescopi, la càmera CCD i, sobretot, pels filtres utilitzats per disparar.

## IMATGE RESULTANT:



*Il·lustració 99. Edició del calibratge de color. Fet per Mamotto*

## RESULTAT



*Il·lustració 100. Resultat de la tricromia de la nebulosa M27. Fet per Mamotto*



# CONCLUSIONS

Partint de la hipòtesi de l'existència dels forats negres i les estrelles i vistes les dades aportades en ambdues parts, teòrica i pràctica, he constatat que els forats negres són, en efecte, objectes astronòmics que han deixat d'ésser part d'una realitat teòrica per passar a ser objectes de la nostra realitat diària.

Gràcies al càlcul de la magnitud del quàsar BL Lac, he pogut demostrar que els forats negres existeixen, ja que els quàsars són les radiacions que emeten els mateixos forats.

D'altra banda, si bé estem acostumats a l'existència de les estrelles, les veiem com a punts brillants al cel que ens il·luminen a la nit, i no interioritzem el fet que són objectes astronòmics amb naixement i mort que tenen un espai a l'Univers. Així doncs, a partir de la tricromia de la nebulosa planetària M27, s'evidencia l'existència de les estrelles com a objectes en moviment i que canvien d'estat. Les estrelles i les nebuloses, com bé he tractat durant aquest treball, són dos objectes astronòmics estretament relacionats i, per tant, si les nebuloses planetàries existeixen, les estrelles també, ja que aquestes són el resultat del final de la vida d'una estrella.

Finalment, com a valoració personal, crec que, tot i partir d'un coneixement bàsic o nul sobre el tema, he aconseguit consolidar i interioritzar conceptes astronòmics necessaris reflectits en el marc teòric. Així doncs, una vegada ara amb el treball acabat, estic segura que, tot i els maldecaps que m'ha portat, tornaria a fer el mateix tema.

Inicialment, estava molt més interessada en els forats negres que en les estrelles i, per tant, volia enfocar-lo més cap a aquests. Però mentre vaig anar consolidant el treball, em vaig sorprendre que les estrelles m'estaven interessant tant o més que els forats negres.

# REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

## 1. LLIBRES:

National geographic (2018) La evolución de las estrellas. Atlas del Cosmos. Tomo 5. Navarra: RBA coleccionables S.A.U ISBN: 978-607-8572-24-3

National geographic (2018) Los agujeros negros. Atlas del Cosmos. Tomo 2. Navarra: RBA coleccionables S.A.U ISBN: 978-607-8572-21-2

Stephen W. Hawking (2019) La teoría del todo. El origen y destino del universo. Barcelona: DeBolsillo ISBN: 978-84-8346-891-3

## 2. CURSOS REALITZATS:

Morral, Albert. Astronòmica Sabadell. (02-06/2021) Curs teòric online: Cosmologia

Morral, Albert. Astronòmica Sabadell. (12-16/07/2021) Curs pràctic presencial: Estrellas y agujeros negros.

## 3. PÀGINES WEB MARC TEÒRIC:

7 Graus (18/10/19) *Agujero Negro* Consultat 04/10/21 des de <https://www.todamateria.com/agujero-negro/>

Alcaraz Pelegrina, Manuel (4-9-1999) *Leyes de Newton* Consultat 05-06/07/2021 des de <https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd98/Fisica/02/leyes.html>

Allen, Jesse S. (n.d.) *The classifications of stellar spectra* Consultat 21-30/09/21 des de [http://www.star.ucl.ac.uk/~pac/spectral\\_classification.html](http://www.star.ucl.ac.uk/~pac/spectral_classification.html)

American Museum of Natural History. (2021) *What is astronomy?* Consultat 28/06/2021 des de <https://www.amnh.org/explore/ology/astronomy/what-is-astronomy>

Aparici, Albert (21/07/20) *Agujeros negros: el vacío también puede girar* Consultat 04/10/2021 des de <https://www.larazon.es/ciencia/20200429/yxaclg6nezbebobynxu64d7cxa.html>

Artigas, Mariano. (1992) *La cosmología cuántica y el origen del universo. Física y creación* Consultat el 28/06/2021 des de <https://www.unav.edu/web/ciencia-razon-y-fe/cosmologia-cuantica-y-origen-del-universo>

Astronomia (2010) *Tipos de estrellas* Consultat 21-30/09/21 des de <https://red-estelar.webcindario.com/Tipos-de-estrellas.html>

Astronomia para principiantes (2011) *¿Que es una estrella?* Consultat 21-30/09/21 des de <https://www.astronomia-iniciacion.com/que-es-una-estrella.html>

Bertran Prieto, Pol (2021) *Las 3 leyes de Newton (características y explicación)* Consultat 05/07/2021 des de <https://medicoplus.com/ciencia/leyes-newton>

Blanco, Gerardo (02/01/18) *El juego de las enanas* Consultat 21-30/09/21 des de <https://www.noticiasdelcosmos.com/2018/01/el-juego-de-las-enanas.html>

Bravo, Roberto (18/11/19) *¿Que es una nebulosa? Tipos de nebuloses* Consultat 21-30/09/21 des de <https://astroaficion.com/2019/11/18/que-es-una-nebulosa-tipos-de-nebulosas/>

Bravo, Roberto (8-7-2019) *Unidades de medida de distancias en astronomia* Consultat el 29/06/2021 des de <https://astroaficion.com/2019/07/08/unidades-de-medida-de-distancias-en-astronomia/>

Coluccio Leskow, Estefania (2021) *Ley de gravitación universal.* Consultat 06/07/2021 des de <https://concepto.de/ley-de-gravitacion-universal/>

Corma, Paco (10/12/11) *Què és un forat negre i el descobriment de dos forats negres supermassius* Consultat 06/10/21 des de <http://cormelius.blogspot.com/2011/12/que-es-un-forat-negre-forat-negre-es.html>

Delgado, Isabel. 7Graus. (2019) *Significado de astronomia y otros* Consultat 28/06/2021 i 05/07/2021 des de <https://www.significados.com/>

Ecured Contributors (29/08/19) *Mecánica Cuántica* Consultat 20/20/21 des de [https://www.ecured.cu/index.php?title=Mec%C3%A1nica\\_cu%C3%A1ntica&oldid=3531505](https://www.ecured.cu/index.php?title=Mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica&oldid=3531505)

Enciclopedia Contributors (1/4/20) *Ley de Hubble* Consultat 18/10/21 des de [http://enciclopedia.us.es/index.php?title=Ley\\_de\\_Hubble&oldid=664688](http://enciclopedia.us.es/index.php?title=Ley_de_Hubble&oldid=664688)

Enterarse, equipo investigación (26/5/20) *El Big Bang explicado: la teoría sobre el origen de todo* Consultat 19/10/21 des de [https://www.enterarse.com/20200526\\_0001-el-big-bang-explicado-la-teoria-sobre-el-origen-de-todo](https://www.enterarse.com/20200526_0001-el-big-bang-explicado-la-teoria-sobre-el-origen-de-todo)

Equipo editorial, Etecé. (5/8/2021) *Astronomía* Consultat: 28/06/2021 des de <https://concepto.de/astronomia/>

Ernst, Oscar Roberto (30/12/08) *Agujeros negros* Consultat 1-15/10/21 des de <https://www.monografias.com/trabajos65/agujeros-negros/agujeros-negros.shtml>

Euroinnova Business School. (2021) *¿Qué estudia la astronomía? Historia, ramas e instrumentos* Consultat 28/06/2021 des de <https://www.euroinnova.edu.es/blog/que-estudia-la-astronomia>

Fernández, Tomás i Tamaro, Elena (2004) *Biografía de Stephen Hawking* Consultat 20/10/21 des de <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/h/hawking.htm>

Franco Garcia, Ángel ( 2010) *El fenómeno de las mareas* Consultat 16/10/21 des de <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/mareas/mareas.htm>

García, Francisco (16/10/19) *Espectroscopia y efecto Doppler* Consultat 20/09/21 des de <http://www.astronuestra.com/2019/10/16/espectroscopia-y-efecto-doppler/>

Gobierno Vasco (18/10/2017) *Ley de Newton de la Gravitación Universal* Consultat 06/07/2021 i altres des de <https://www.amarauna.euskadi.eus/es/recurso/ley-de-newton-de-la-gravitacion-universal/5b28dfdd-a097-4be2-9720-030da35890cd>

Goethe University Frankfurt (24/5/21) *Not All Theories Can Explain the Gargantuan Black Hole M87\** Consultat 04/10/21 des de <https://scitechdaily.com/not-all-theories-can-explain-the-gargantuan-black-hole-m87/>

Grolle, Johann (n.d.) *Así es un agujero negro* Consultat 04/10/21 des de <https://www.xlsemanal.com/conocer/ciencia/20190513/como-que-es-agujero-negro-espacio-universo.html>

Heras, Antonio (2013) *El análisis espectral, la temperatura y la composición química* Consultat 20/09/21 des de [https://antonioheras.com/historia\\_de\\_astronomia/analisis-espectral-temperatura-composicion.htm](https://antonioheras.com/historia_de_astronomia/analisis-espectral-temperatura-composicion.htm)

Holguín, Alejandra i altres. GCF Global (2021) *Leyes de Newton* Consultat 05/07/2021 des de <https://edu.gcfglobal.org/es/fisica>

Jiménez, David (05/2009) *Llei de la Gravitació Universal* Consulta 06/07/2021 des de <http://www.digits.cat/colaboracions/llei-de-la-gravitacio-universal>

Jouscout (n.d.) *Nebuloses* Consultat 21-30/09/21 des de <http://www.jouscout.com/astro/nebulosa.htm>

*La teoria del Big Bang y el origen del Universo* Consultat 19/10/21 des de <https://www.astromia.com/astronomia/teoriabigbang.htm#m0>

Lopez Sancho, José M<sup>a</sup> i altres. (2006) *La Tierra en el universo* Consultat 05/07/2021 des de <http://museovirtual.csic.es/salas/universo/universo12.htm>

MacEvoy, Bruce (26/11/13) *Spectral classification of stars* Consultat 21-30/09/21 des de <https://www.handprint.com/ASTRO/specclass.html>

Martín, Marta (16/10/20) *VIRGO i LIGO, caçadors d'ones gravitacionals* Consultat 19/10/21 des de <https://serviastro.ub.edu/materials/articles/virgo-i-ligo-cacadors-dones-gravitacionals>

Moreno Luque, Ricardo (n.d.) *Ley De Hubble* Consultat 18/10/21 des de [https://serviastro.ub.edu/sites/serviastro/files/fitxers/material/2019-09/Llei\\_de\\_Hubble.pdf](https://serviastro.ub.edu/sites/serviastro/files/fitxers/material/2019-09/Llei_de_Hubble.pdf)

Mukhi, Sunil (30/12/19) *La Teoria de Cordes: Una introducció detallada* Consultat 20/10/21 des de <https://sci-bit.blogspot.com/2019/12/la-teoria-de-cordes-una-introduccio.html>

NASA, imagine Team Dra Mattson Barbara (11/2016) *Black Holes* Consultat 1-15/10/21 des de [https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/black\\_holes1.html](https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/black_holes1.html)

Nasa / JPL-Caltech (1999) *Doppler Shift* Consultat 20/09/21 des de <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/D/doppler+shift>

NASA/WMAP Science Team, Dr. Edward J. Wollack. (24-1-2014) *Universe 101* Consultat 28/06/2021 al 04/07/2021 des de <https://map.gsfc.nasa.gov/>

NASA/WMAP Science Team, Dra. Nancy Hall (25/5/2021) *What are Newton's laws of motion?* Consultat 05/07/2021 des de <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/newtons-laws-of-motion/>

Nave, Carl Rod. HyperPhysics concepts (2009) *Newton's Laws* Consultat 05/07/2021 al 07/07/2021 des de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Newt.html>

Nikos, DrakosCBLU, University of Leeds. *La Web de la Física. Relatividad especial. Barbo.* Consultat 01/07/2021 des de <https://www.lawebdefisica.com/apuntsfis/relatividad/>

NuStar (n.d.) *Relativistic jets* Consultat 04/10/21 des de <https://www.nustar.caltech.edu/page/science>

Olivella, Josep i altres (2021) *Perquè una Unitat anomenada Planetes i estrelles?* Consultat 06/07/2021 i altres des de [http://cesire.cat/mialias.net/recursos/context/fisica/unitat%207/21\\_la\\_llei\\_de\\_la\\_gravitaci\\_universal.html](http://cesire.cat/mialias.net/recursos/context/fisica/unitat%207/21_la_llei_de_la_gravitaci_universal.html)

Ortega, Renan (25-5-2020) *Las cuatro fuerzas fundamentales de la física* Consultat 06/07/2021 des de [https://www.enterarse.com/20200130\\_0001-las-cuatro-fuerzas-fundamentales-de-la-fisica](https://www.enterarse.com/20200130_0001-las-cuatro-fuerzas-fundamentales-de-la-fisica)

Particle Science (17/01/20) *Spectrometry and spectroscopy: What's the difference?* Consultat 20/09/21 des de <https://www.atascientific.com.au/spectrometry/>

Pericas, Ramon (25/11/2015) *De la física de les estrelles i la curvatura de l'espai/temps* Consultat 02/07/2021 des de <https://mon.uvic.cat/udivulga/de-la-fisica-de-les-estrelles-i-la-curvatura-de-lespaitemps/>

Rebato, Carlos (4/8/2015) *La teoria de la Relatividad especial, explicada de manera sencilla* Consultat 01/07/2021 des de <https://es.gizmodo.com/la-teoria-de-la-relatividad-especial-explicada-de-mane-1691315854>

Redondo Díaz, Miriam (n.d.) *Les forces* Consultat el 06/07/2021 des de <https://blocs.xtec.cat/naturalsom/2n-eso/9-les-forces/>

Rehm, Jeremy (1-10-2019) *The Four Fundamental Forces of Nature* Consultat 06/07/2021 des de <https://www.space.com/four-fundamental-forces.html>

Riveiro, Alex (25/05/15) *La clasificación estelar* Consultat 21-30/09/21 des de <https://www.astrobitacora.com/la-clasificacion-estelar/>

Riveiro, Alex. (2017) *Cosmologia: el origen y evolución del universo*. Consultat el 28/06/2021 des de <https://www.astrobitacora.com/cosmologia-el-estudio-del-universo/>

Ruiz Jiménez, Carlos (2020) *Introducción a la Cosmología*. Consultat el 28/06/2021 des de <http://www.fisicafundamental.net/memoria/cosmologia.html>

Saber es práctico (9-4-2021) *Biografía Isaac Newton* Consultat 05/07/2021 des de <https://www.saberespractico.com/biografias-resumidas/newton/>

Sacristán, Enrique (20/11/2005) *Diez preguntas para entender la teoría de relatividad general de Einstein* Consultat 02/07/2021 des de <https://www.agenciasinc.es/Entrevistas/Diez-preguntas-para-entender-la-teoria-de-la-relatividad-general-de-Einstein>

Sáez, Diego i altres ( 16/5/2005) *Einstein, l'astrofísica i la cosmologia modernes* Consultat 02/07/2021 des de <https://metode.cat/revistes-metode/dossiers/einstein-lastrofisica-i-la-cosmologia-modernes.html>

Simoës, Christian (1/06/13) *Estrellas* Consultat 21-30/09/21 des de <http://www.astronoo.com/es/estrellas.html>

Stricker, Mathias and Sun.org (2021) *Black Hole* Consultat 1-15/10/21 des de <https://www.sun.org/encyclopedia/black-hole>

Swinburne university (n.d.) *Black Hole* Consultat 1-15/10/2021 des de <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/b/black+hole>

Tarres, Roger (n.d.) *De què ens sona la teoria de cordes?* Consultat 20/10/21 des de <https://lacienciaalteumon.cat/the-big-bang-theory-i-la-teoria-de-cordes/>

Tomé López, César Experiencia Docet (4-8-2015) *La verdadera composición del universo(I): Más allá del modelo estándar* Consultat 29/06/2021 des de <https://culturacientifica.com/2015/08/04/la-verdadera-composicion-ultima-del-universo-i-mas-alla-del-modelo-estandar/>

Turner, Monica ( 22/05/14) *Curioseando en la oscuridad: modelando agujeros negros en la escuela primaria* Consultat 3/12/2021 des de <https://www.scienceinschool.org/es/article/2014/blackholes-es/>

*Universo avanzado y otros* Consultat 29/06/2021 al 06/07/2021 des de <https://www.astromia.com/mapa.htm>

Unusversus (2021) *L'estructura de l'univers* Consultat el 29/06/2021 des de <http://unusversus.com/big-bang/estructura-de-lunivers/>

- Viquipèdia (12/6/21) *Ona gravitacional* Consultat 19/10/21 des de [https://ca.wikipedia.org/wiki/Ona\\_gravitacional](https://ca.wikipedia.org/wiki/Ona_gravitacional)
- Viquipèdia (2021) *Gravitació quàntica* Consultat 20/10/21 des de [https://ca.wikipedia.org/wiki/Gravitaci%C3%B3\\_qu%C3%A0ntica#Gravitaci%C3%B3\\_qu%C3%A0ntica\\_de\\_lla%C3%A7os\\_\(teoria\\_de\\_la\\_xarxa\\_d%27esp%C3%ADn](https://ca.wikipedia.org/wiki/Gravitaci%C3%B3_qu%C3%A0ntica#Gravitaci%C3%B3_qu%C3%A0ntica_de_lla%C3%A7os_(teoria_de_la_xarxa_d%27esp%C3%ADn)
- Viquipèdia (2021) *Llei de hubble-Lemaître* Consultat 18/10/21 des de [https://ca.wikipedia.org/wiki/Llei\\_de\\_Hubble-Lema%C3%AEtre](https://ca.wikipedia.org/wiki/Llei_de_Hubble-Lema%C3%AEtre)
- Viquipèdia (27/09/21) *Forat negre* Consultat 1-15/10/21 des de [https://ca.wikipedia.org/wiki/Forat\\_negre](https://ca.wikipedia.org/wiki/Forat_negre)
- Viquipèdia (30/06/2021) *Relativitat especial* Consultat 01/07/2021 des de [https://ca.wikipedia.org/wiki/Relativitat\\_especial](https://ca.wikipedia.org/wiki/Relativitat_especial)
- Viquipèdia (30/6/2021) *Relativitat General* Consultat 02/07/2021 des de [https://ca.wikipedia.org/wiki/Relativitat\\_general](https://ca.wikipedia.org/wiki/Relativitat_general)
- Wikipedia (2021) *Black Hole* Consultat 1-15/10/21 des de [https://en.wikipedia.org/wiki/Black\\_hole#Properties\\_and\\_structure](https://en.wikipedia.org/wiki/Black_hole#Properties_and_structure)
- Wikipedia (2021) *La clasificación estelar* Consultat 21-30/09/21 des de [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Clasificaci%C3%B3n\\_estelar&oldid=140050384](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Clasificaci%C3%B3n_estelar&oldid=140050384)
- Wikipedia (n.d) *Paradoja d'Ehrenfest* Consultat 02/07/2021 des de [https://tvd.wiki/wiki/Ehrenfest\\_paradox](https://tvd.wiki/wiki/Ehrenfest_paradox)
- Zapata, Fanny (28/01/20) *Estrellas* Consultat 21-30/09/21 des de <https://www.lifeder.com/caracteristicas-estrellas/>
- Zimmerman Jones, Andrew (2021) *Forats Negres i Radiació Hawking* Consultat 20/10/21 des de <https://ca.eferrit.com/forats-negres-i-radiacio-hawking/> i des de <https://ca.eferrit.com/els-fonaments-de-la-teoria-de-cordes/>
- Zuckerman, Catherine (20/03/19) *Everything you want to know about stars* Consultat 21-30/09/21 des de <https://www.nationalgeographic.com/science/article/stars>

#### 4. PÀGINES WEB MARC PRÀCTIC:

- Fotometria (astronomia)* Consultat 09-22/08/21 des de [https://wikihastags.com/wiki/Photometry\\_\(astronomy\)](https://wikihastags.com/wiki/Photometry_(astronomy))
- Filtros de color primario y complementario* Consultat 09-22/08/21 des de <https://www.mundodelafotografia.com/filtros-de-color-primario-y-complementario/>

De Bernardini, Enzo (7/03/2017) *Telescopios y astrografia* Consultat 09-22/08/21 des de <https://astronomiasur.com.ar/index.php?a=instrumental-telescopios>

Díaz, José Vicente (13/04/15) *Cámaras CCD: características* Consultat 09-22/08/21 des de <https://josevicentediaz.com/2015/04/13/camaras-ccd-caracteristicas/>

Ecured Contributors (25/08/19) *Astrometria* Consultat 09-22/08/21 des de <https://www.ecured.cu/Astrometr%C3%ADa>

Pedraza, Gonzalo (22/01/20) *Astrofotografía I - Los tipos de tomas: Lights, Darks, Bias y Flats* Consultat 09-22/08/21 des de <https://gonzaloprofe.blogspot.com/2020/01/inicios-en-astrofotografia-i-los-tipos.html>

Tilano TV (21/01/15) *Características de los CCD* Consultat 09-22/08/21 des de <https://tilanotv.es/caracteristicas-de-los-ccd/>

Wikipedia (2021) *Dispositivo de carga acoplada* Consultat 09-22/08/21 des de [https://es.wikipedia.org/wiki/Dispositivo\\_de\\_carga\\_acoplada](https://es.wikipedia.org/wiki/Dispositivo_de_carga_acoplada)

Zamorano, Jaime (n.d.) *Técnicas experimentales en Astrofísica: fotometria* Consultat 09-22/08/21 des de [https://webs.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/TEA/tea\\_04.pdf](https://webs.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/TEA/tea_04.pdf)

#### 5. DOCUMENTS:

AAVSO ISBN 978-1-939538-13-0 (2015) Consultat des de [https://www.aavso.org/sites/default/files/publications\\_files/ccd\\_photometry\\_guide/CCDPhotometryGuide-Spanish/SpanishPhotometryGuide.pdf](https://www.aavso.org/sites/default/files/publications_files/ccd_photometry_guide/CCDPhotometryGuide-Spanish/SpanishPhotometryGuide.pdf)

Girbau, Joan (9/2/2005) *L'equació d'Einstein de la relativitat general i la seva relació amb l'equació d'ona* Consultats 01/07/2021 des de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.2/280/280\\_Presentacio.pdf?sequence=6&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.2/280/280_Presentacio.pdf?sequence=6&isAllowed=y)

#### 6. SOFTWARE:

(2021) Aavso. <https://www.aavso.org/>

(2021) Aladin Sky Atlas. Centre de dades astronòmiques d'Estrasburg.

(2021) Astroart 4.0. MSB software. Plataforma: Windows

(2021) Excel 2016. Microsoft Office 2016 Hogar y Empresa. Plataforma: Windows.

(2021) Power point 2016. Microsoft Office 2016 Hogar y Empresa. Plataforma: Windows

(2021) Word 2016. Microsoft Office 2016 Hogar y Empresa. Plataforma: Windows.



# ANNEXOS

## ANNEX 1

### EXPERIMENT 1: EXPERIMENT DE LA MALLA ELÀSTICA: MODELANT L'ACTUACIÓ O COMPORTAMENT D'UN FORAT NEGRE MITJANÇANT LA TRAJECTÒRIA DE LA LLUM

Aquest experiment consisteix a simular, de manera simple i amb materials comuns, la trajectòria de la llum, representada per una bala, i com aquesta es deforma o corba degut al poder d'atracció d'un forat negre, representat per una bola pesada.

#### MATERIALS

- Una bena elàstica lleugera
- Una bala petita
- Una bola molt pesada (com les que s'utilitzen en jocs de bitlles, de botxes o a la petanca).
- Un parell de tisores.

#### PROCEDIMENT:

1. Tallem un tros de bena elàstica tubular, del tipus Lidergrip talla L, de 40 cm de llargària. En consegüent, i a fi de fer-la més ample, tallem a tot el llarg d'un costat.
2. Seguidament, amb l'ajuda de la meva família, estirem la bena horitzontalment per tal que quedi tibant i fer la representació de l'espai bidimensional, el qual és, en realitat, tridimensional.
3. Una vegada ben estirada, posem la bala sobre la malla i la fem rodar sobre la superfície d'aquesta, movent la bena des de les cantonades.
4. Seguidament i havent vist el comportament de la bala, passarem a observar com es comporta la bola més gran i més pesada seguint el mateix procediment.
5. Finalment, procedim a fer la tercera part de l'experiment, on veurem què passa amb la trajectòria de la bala quan roda a prop de la bola pesada. El procediment que seguirem serà col·locar la bola gran a la bena i, tot seguit llençar la bala des d'un extrem per veure el recorregut de la seva trajectòria en funció de l'objecte més pesat. També podem augmentar la velocitat del nostre moviment per veure que succeeix.

#### RESULTATS:

- » En la primera part veiem com la bala petita fa una trajectòria prou recta com si fos un raig de llum travessant l'espai.

- » En el cas de la bola pesada hem pogut observar que deforma la bena, que associem a l'espai. És a dir, veiem que l'espai es corba al voltant d'una massa pesada.
- » En acabar, quan posem les dues, bala i bola, observem que la trajectòria de la primera es veu alterada per la deformació de la bena (espai) degut a la presència de la bola (forat negre). Això ho podem relacionar a quan la llum passa a prop d'un objecte massiu que deforma l'espai que l'envolta.
- » Quan hem augmentat la velocitat hem vist que la trajectòria de la bala canvia.

**CONCLUSIONS:**

- Com més pesada sigui la massa central més corbada estarà la bena (l'espai). Això ens augmentarà la profunditat del «pou gravitacional» del que la bala no seria capaç d'escapar.
- Tan aviat la bala passa propera a la bola més gran, comença a donar-li voltes. Això seria equivalent a l'objecte que passa prop del forat negre, li dona voltes i finalment cau dins seu.
- Una vegada cau dintre d'ell, veuríem la dificultat que tenen en sortir de nou, aquests objectes, a causa de la gravetat d'aquest forat negre que deforma l'espai.

El vídeo demostratiu d'aquest experiment, el trobareu a l'ANNEX 4

**EXPERIMENT 2: UN GLOBUS COM A METÀFORA DE L'UNIVERS.**

Aquest experiment consisteix a simular, de manera simple i amb materials comuns, l'expansió de l'Univers.

**MATERIALS:**

- Un globus
- Un retolador permanent

**PROCEDIMENT:**

1. Agafem un globus. Sense inflar-ho, dibuixem estrelles, galàxies i resta d'objectes que considerem de l'espai. És a dir, hi fem punts.
2. Una vegada dibuixat, inflem el globus.
3. Observem que passa a l'inflar-se i la seva expansió.
4. Això és el que va succeir amb el Big Bang.

**RESULTATS:**

Si comparem el globus a l'Univers, veiem que els punts representen les galàxies, i el plàstic del globus representa l'espai-temps, de manera que a mesura que s'engrandeix l'espai, les galàxies s'allunyen unes de les altres, i com més lluny, més ràpid se'n van de nosaltres.

En el cas que poguéssim ancorar observadors en les marques, aquests veurien com s'allunyen mútuament entre si a velocitats proporcionals a la seva distància.

Tanmateix, hi ha certes mancances en aquest experiment:

- La superfície del globus és un objecte bidimensional mentre que l'espai és tridimensional
- El globus es troba immers en un espai tridimensional, però l'univers no ha d'estar immers en res, puix que l'Univers podria ser tot el que existeix, encara que no sigui necessàriament així. D'altra banda, és convenient pensar que tot l'univers està representat per la superfície de la goma del globus.
- Per al globus existeix un centre geomètric, mentre que en l'Univers real aquest centre d'expansió no existeix; simplement tot s'expandeix de tot.
- El globus és una superfície finita, però il·limitada, en el sentit que no hi ha cantells. L'Univers podria similarment ser finit i il·limitat, però també podria ser infinit.
- Els punts pintats en el globus s'allunyen els uns dels altres com les galàxies en l'univers real. No obstant això, les galàxies en si no augmenten de grandària a causa que els seus objectes estan lligats per l'atracció gravitatòria. Les galàxies, en realitat, no tenen aquesta velocitat que aparenten. L'expansió de l'Univers és una expansió de l'espai, mentre les galàxies, moviments propis al marge, mantenen mida i posició.

Però malgrat totes aquestes irregularitats, aquest experiment segueix sent un bon model per entendre de manera senzilla a què ens referim quan parlem de l'Univers i de l'expansió d'aquest.

El vídeo demostratiu d'aquest experiment, el trobareu a l'ANNEX 4

## ANNEX 2

### EL PROYECTO DE FUSIÓN NUCLEAR: ITER

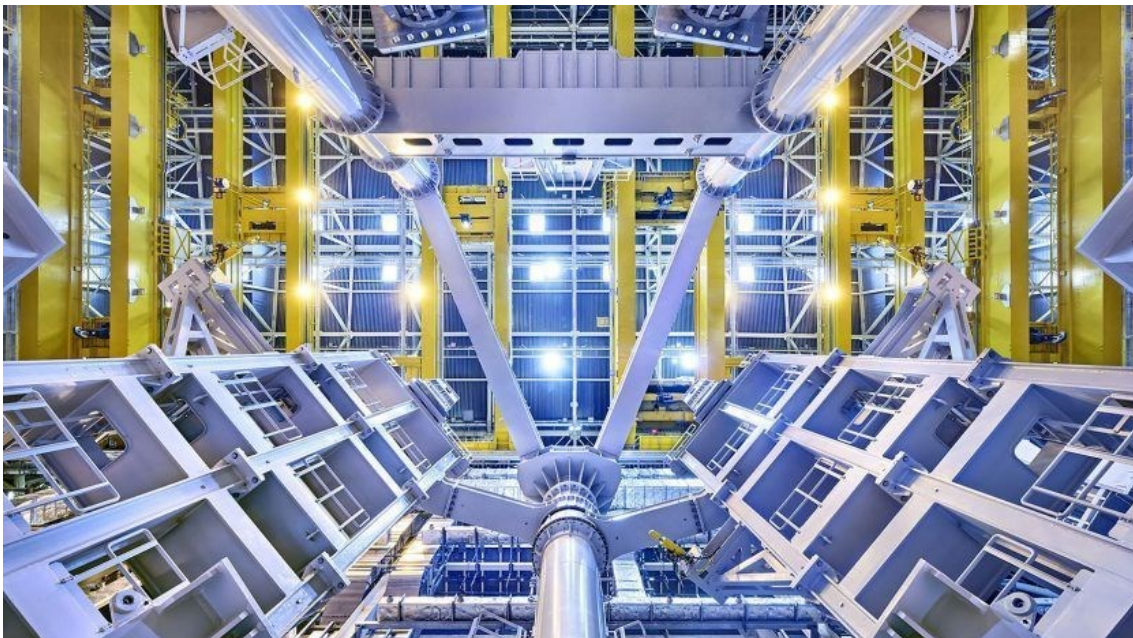
El acrónimo ITER responde a las siglas *International Thermonuclear Experimental Reactor* (Reactor Experimental Termonuclear Internacional), aunque la palabra "Iter" también significa "el camino" en latín. Se trata de uno de los proyectos energéticos más ambiciosos del mundo.

**El proyecto ITER busca demostrar la viabilidad de la fusión como fuente de energía a gran escala**

La instalación de este proyecto se encuentra en Cadarache, al sur de Francia, y cuenta con **la colaboración de 35 países para construir el Tokamak más grande del mundo**, un dispositivo de fusión magnética diseñado para demostrar la viabilidad de la fusión como fuente de energía a gran escala y libre de emisiones de carbono, basándose en el mismo principio por el cual el sol y las estrellas generan su energía.

Este proyecto experimental es de crucial importancia para el avance de la fusión nuclear y para preparar el camino para las **centrales comerciales de fusión**.

ITER será el primer dispositivo de fusión que conseguirá una **ganancia neta de energía** (es decir, se produce más energía que la absorbida por el funcionamiento del sistema), así como el primer dispositivo que mantendrá la fusión durante periodos largos de tiempo. También será el primero en poner a prueba las tecnologías integradas, materiales y física necesarios para la producción comercial de la electricidad de fusión.



Proyecto ITER (Imagen © ITER.org)

#### ¿Qué podrá hacer ITER?

La cantidad de energía que puede producir un Tokamak es el resultado directo del número de reacciones de fusión que se producen en su núcleo. Los científicos saben que cuanto más grande

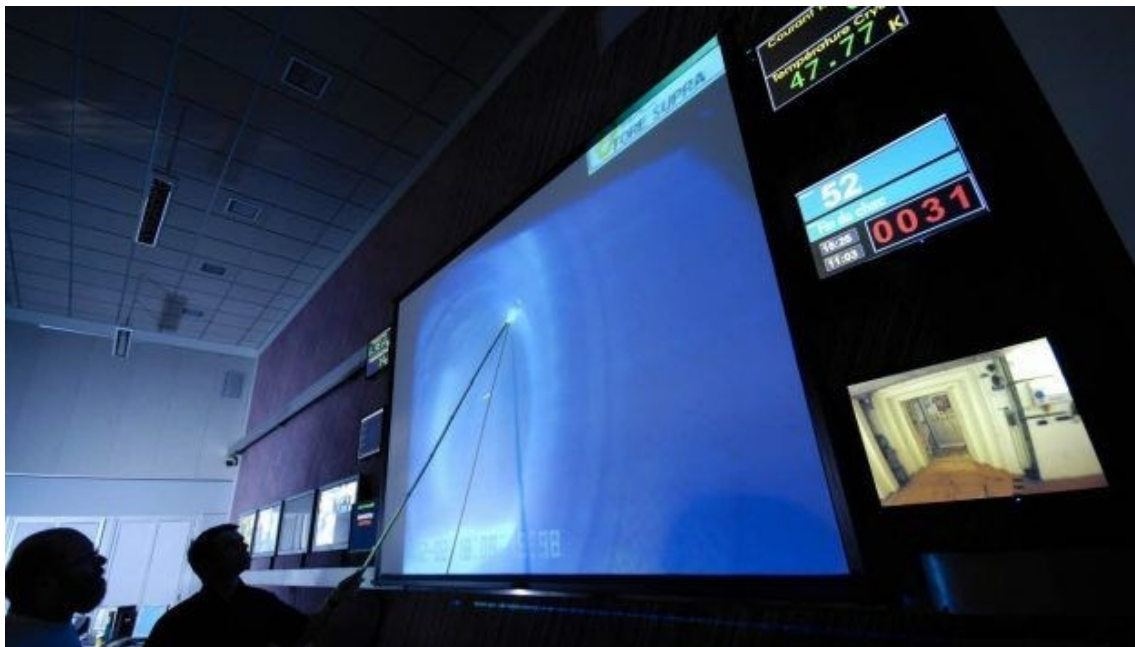
es la vasija en la que se contiene, mayor es el volumen del plasma, y por lo tanto mayor será el potencial de la energía de fusión.

**El Tokamak de ITER tiene un volumen de plasma diez veces superior al dispositivo en funcionamiento más grande actualmente.** Será una herramienta experimental única, diseñada específicamente para:

- **Desarrollar una potencia de 500 MW**  
El récord mundial de energía de fusión actualmente corresponde al Tokamak europeo JET. En 1997, JET produjo 16 MW de energía de fusión. ITER está diseñado para producir 500 MW. ITER no transforma toda la energía que produce en electricidad, pero al ser el primer proyecto de fusión que produce energía de ganancia neta prepara el camino para diseñar una máquina que sea capaz de hacerlo.
- **Demostrar la operación integrada de tecnologías para una central de fusión**  
ITER acortará la distancia entre los dispositivos experimentales de fusión de más pequeña escala actuales y las centrales de energía de fusión de demostración del futuro. Los científicos podrán estudiar plasmas en condiciones similares a las que se esperan de una central nuclear futura y probar aspectos tales como calentamiento, control, diagnóstico, criogenia y mantenimiento remoto.
- **Conseguir plasma de deuterio y tritio donde la reacción sea prolongada mediante calentamiento interno**  
Hoy en día, la investigación de fusión se encuentra a las puertas de conseguir "plasma en combustión", donde el calor de la reacción de fusión está confinado dentro del plasma de manera que se pueda prolongar la reacción durante un plazo amplio. Los científicos confían en que los plasmas de ITER no solo producirán mucha más energía de fusión sino que se mantendrán estables durante periodos más largos.
- **Hacer pruebas para la producción de tritio**  
Una de las misiones de las últimas etapas de la operación ITER será demostrar la viabilidad de producir tritio dentro de la vasija en vacío. El suministro mundial de tritio (que se utiliza con el deuterio para producir la reacción de fusión) no basta para cubrir las necesidades de las centrales nucleares del futuro. ITER aportará una oportunidad única para hacer pruebas de simulación de producción de tritio.
- **Demostrar la seguridad de las características de un dispositivo de fusión**  
ITER alcanzó un hito importante en la historia de la fusión en 2014, cuando obtuvo licencia como operador nuclear en Francia tras un riguroso examen de sus procedimientos de seguridad. Uno de los objetivos principales de la operación de ITER es demostrar el que se pueden controlar el plasma y las reacciones de fusión sin consecuencias para el medio ambiente.



Vista del lugar de construcción de ITER (Imagen © ITER.org)



Proyecto ITER (Imagen © ITER.org)

El ITER pretende traer a la tierra las reacciones que se producen en el Sol y las estrellas

### ¿Qué es la fusión?

La fusión es la reacción nuclear que tiene lugar en el Sol y las estrellas. Los núcleos de hidrógeno colisionan gracias a la alta temperatura y la fuerza de gravedad que se producen en el núcleo de estos cuerpos estelares, fusionándose hasta formar átomos de helio más pesados y liberando enormes cantidades de energía.

Según la ciencia de fusión, la reacción de fusión más eficiente es la conocida como DT, que se produce entre dos isótopos de hidrógeno, deuterio (D) y tritio (T). Esta reacción produce la mayor cantidad de ganancia de energía con las temperaturas más bajas.

Para obtener fusión en un laboratorio deben cumplirse tres condiciones: una temperatura muy elevada (aproximadamente 100 millones de grados Celsius), la suficiente densidad de partículas de plasma (para aumentar las posibilidades de que se produzcan colisiones) y el suficiente tiempo de contención (para mantener el plasma, que tiene tendencia a expandirse, dentro de un volumen definido).



Imagen de la mecánica de fusión dentro del núcleo (Imagen © ITER.org)

### ¿Qué es un Tokamak?

El término "Tokamak" proviene de un acrónimo ruso que significa "cámara toroide con espirales magnéticas". Se trata de una máquina experimental diseñada para aprovechar la energía de fusión. La energía se absorbe dentro del Tokamak en forma calor, adherido a las paredes de la vasija. La central de fusión utiliza este calor para producir vapor y después electricidad mediante turbinas y generadores.

En un dispositivo Tokamak se utilizan campos magnéticos muy potentes para confinar y controlar el plasma.

El corazón del Tokamak es una cámara de vacío en forma toroidal (es decir, de rosquilla). Dentro de esta cámara, y bajo la influencia de enormes presiones y temperaturas, el combustible de hidrógeno gaseoso se convierte en plasma para permitir la fusión de los átomos del hidrógeno.



Las partículas cargadas del plasma pueden controlarse mediante las enormes espirales magnéticas que hay ubicadas alrededor de la vasija.

### 35 países colaboran en el proyecto de fusión ITER que se construye en Francia

#### ¿Quién participa en el proyecto ITER?

El proyecto ITER es una colaboración de 35 países comprendidos dentro de siete miembros principales: **China, la Unión Europea, Japón, Corea del Sur, Rusia y Estados Unidos**. Tras la firma del Acuerdo para su desarrollo en 2006 los miembros se han comprometido a compartir el coste de la construcción, operación y desmantelamiento del proyecto, así como los resultados experimentales y cualquier propiedad intelectual generada.



Proyecto ITER (Imagen © ITER.org)

#### Participación de España en ITER

España participa en el ITER activamente: **alrededor de 50 empresas españolas han obtenido más de 100 contratos por un importe superior a los 600 millones de euros** ([ver noticia de mayo 2015](#)). España está fabricando los primeros componentes europeos para el proyecto ITER, y también participa en el ensamblaje de los nueve sectores de la cámara de vacío y de los 54 puertos del reactor.

Consultar [nota de prensa del Ministerio de Economía y Competitividad \(Mineco\)](#).

#### ¿Cuándo comenzarán los experimentos?

La construcción de las instalaciones donde se alojará el ITER comenzaron en 2010. En 2015 se trasladaron los primeros componentes de gran tamaño, la primera fase de ensamblaje está prevista que comience en 2018, la fase de puesta en marcha en 2024, **el primer plasma en 2025 y el comienzo de la operación de fusión DT en 2035**.

Para más información: [ITER](#)

Fuentes: ITER y Foro Nuclear. © Copyright de las imágenes: ITER.org

## ANNEX 3

## PRIMERA FOTOGRAFIA D'UN FORAT NEGRE

Las ecuaciones de Einstein predecían la existencia de los agujeros negros y ahora una imagen lo ha confirmado. Una red global de radiotelescopios, en la que participa el observatorio español IRAM desde Sierra Nevada, ha logrado fotografiar los límites de un agujero negro en el centro de Messier 87, una gigantesca galaxia masiva vecina.

[10/4/2019 15:45 CEST](#)

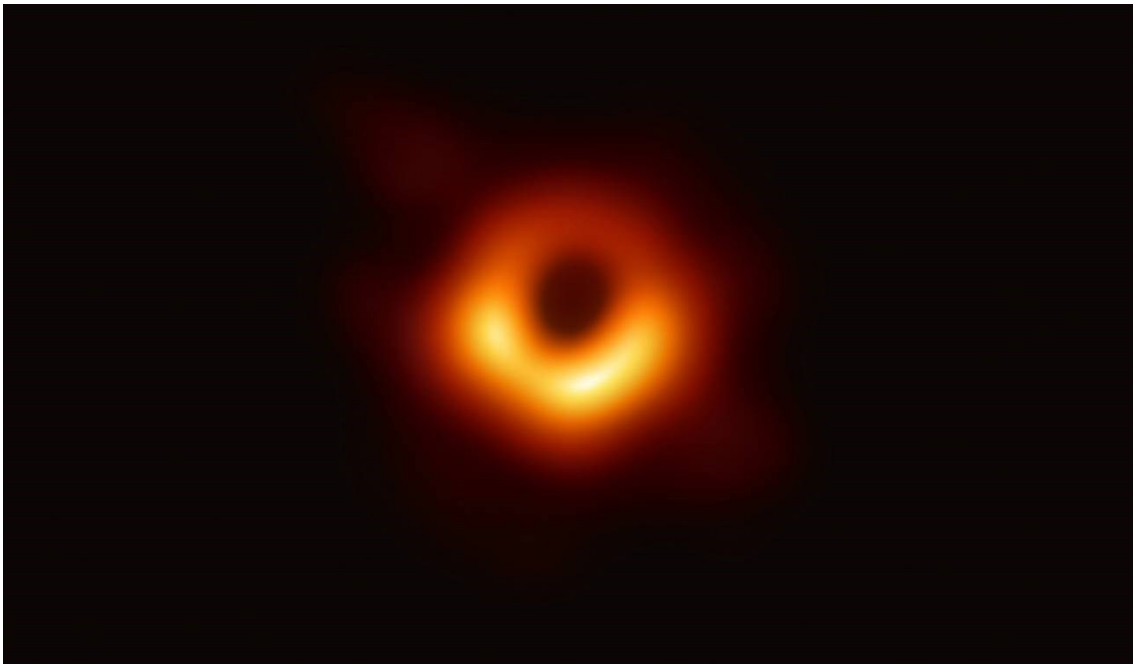


Imagen del agujero negro situado en el centro de la galaxia M87, rodeado por una emisión de gas caliente arremolinándose a su alrededor bajo la influencia de una fuerte gravedad bajo su horizonte de sucesos. Crédito: EHT

En una serie de conferencias de prensa internacionales simultáneas celebradas hoy miércoles, 10 de abril, por todo el planeta, investigadores del Telescopio Horizonte de Sucesos (EHT por sus siglas en inglés) han mostrado la primera evidencia visual directa de un agujero negro supermasivo y de su sombra.

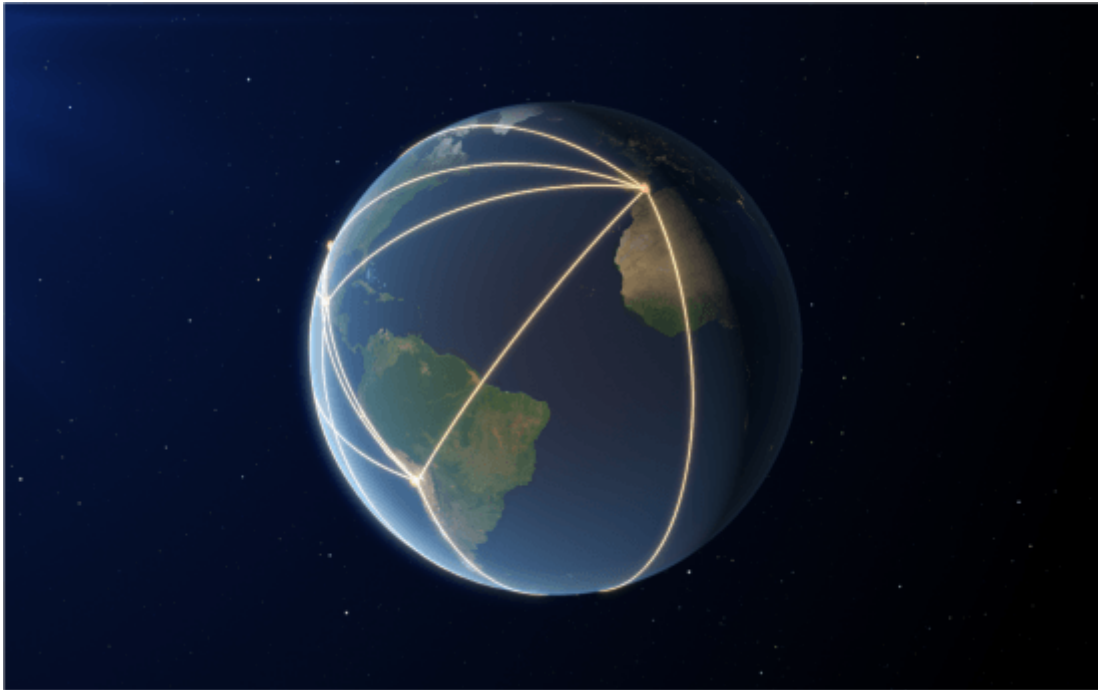
El hito se ha anunciado en una serie de seis artículos científicos publicados hoy en una edición especial de la revista *Astrophysical Journal Letters*. La imagen muestra el agujero negro **en el centro de Messier 87 (M87)**, una galaxia masiva situada en el cercano cúmulo de galaxias Virgo. Este agujero negro se encuentra a 55 millones de años luz de la Tierra y es 6.500 millones de veces más masivo que el Sol.

Para lograr esta imagen se ha formado un telescopio virtual del tamaño de la Tierra con una sensibilidad y resolución sin precedentes

Para lograr esta imagen se han conectado las señales de **ocho radiotelescopios repartidos por todo el planeta** y se ha logrado formar un telescopio virtual del tamaño de la Tierra con una sensibilidad y resolución sin precedentes.

El EHT es el resultado de años de colaboración internacional y ofrece a los científicos una nueva forma de estudiar los objetos más extremos del universo predichos por la relatividad general de Einstein, un siglo después del histórico experimento que confirmó esta teoría por primera vez.

“Hemos tomado la primera imagen de un agujero negro”, ha dicho el director del EHT, **Sheperd S. Doeleman**, del Center for Astrophysics Harvard & Smithsonian (Estados Unidos). “Se trata de un hito histórico en astronomía obtenido por un equipo de más de 200 investigadores”, ha añadido.



Localizaciones de los telescopios que forman parte del EHT y distancias entre ellos. Crédito: ESO/ L. Calçada

### La sombra del agujero

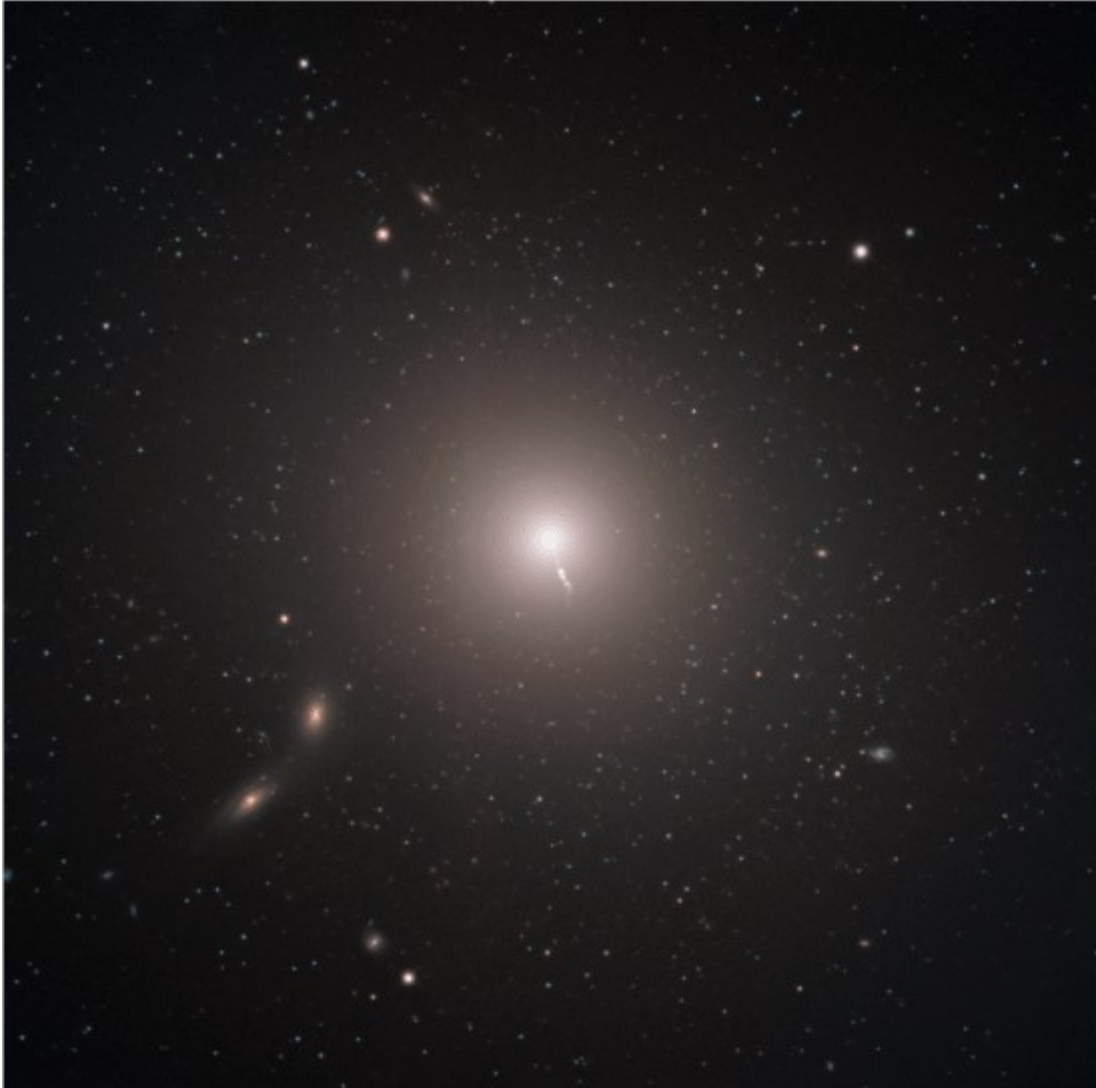
“Cuando se encuentra inmerso en una región brillante, como un disco de gas incandescente, esperamos que un agujero negro genere una región oscura similar a la de una **sombra**, algo ya predicho por la relatividad general de Einstein que nunca habíamos visto hasta ahora”, ha explicado el director del consejo científico del EHT, **Heino Falcke**, de la Universidad de Radboud (Países Bajos).

“Esta sombra, causada por la **curvatura gravitacional** y la absorción de luz por el **horizonte de sucesos**, revela mucho sobre la naturaleza de esos fascinantes objetos y nos ha permitido medir la colosal masa del agujero negro de la galaxia M87”, ha detallado.

La imagen es una estructura en forma de anillo con una región oscura central: la sombra del agujero negro

Múltiples observaciones independientes del EHT han revelado una estructura en forma de anillo con una región oscura central: la sombra del agujero negro.

“Una vez seguros de que habíamos captado la sombra, pudimos comparar nuestras observaciones con una amplia serie de simulaciones por ordenador que incluyen la física del espacio curvo, la materia sobrecalentada y los potentes campos magnéticos alrededor del agujero negro. Muchas de estas características de la imagen observada concuerdan sorprendentemente bien con nuestras predicciones teóricas”, destaca Paul T.P. Ho, miembro del consejo de EHT y director del East Asian Observatory. “Esto reafirma nuestra interpretación teórica de las observaciones, incluida la estimación de la masa del agujero negro”.



La enorme aureola que rodea la galaxia elíptica Messier 87. Crédito: Chris Mihos (Case Western Reserve University)/ESO

### De Hawái a Granada

La creación del EHT ha supuesto un reto formidable, que requirió modernizar y conectar una red mundial de ocho telescopios ya existentes situados en zonas remotas a una gran altitud. Estas localizaciones incluyen volcanes en **Hawái** (Estados Unidos) y **México**, montañas en **Arizona** (Estados Unidos) y **Sierra Nevada** (Granada, España), el desierto chileno de **Atacama** y la **Antártida**.

El EHT alcanza una resolución angular suficiente para poder leer un periódico en Nueva York desde una cafetería en París

Las observaciones del EHT emplean una técnica denominada interferometría de muy larga base (VLBI por sus siglas en inglés), la cual sincroniza telescopios por todo el mundo y aprovecha la rotación de la Tierra para formar un gigantesco telescopio virtual del tamaño de nuestro planeta. Observando a una longitud de onda de 1,3 milímetros y gracias a la técnica VLBI, el EHT alcanza una resolución angular de solo 20 microsegundos de arco, suficiente para poder leer un periódico en Nueva York desde una cafetería en París.

La puesta en marcha del EHT y las observaciones que se han anunciado hoy suponen la culminación de décadas de trabajo observacional, técnico y teórico. Este ejemplo de trabajo en equipo global ha requerido la colaboración de investigadores de todo el mundo. 13 instituciones asociadas han trabajado para crear el EHT, empleando infraestructuras ya existentes y financiación extra obtenida de una gran variedad de agencias, entre las que se encuentran la US National Science Foundation (NSF), el European Research Council (ERC) y agencias financieras de Asia.

### **Astrónomos españoles**

Varios astrónomos españoles han participado en este hito científico. **José Luis Gómez**, investigador del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en el **Instituto de Astrofísica de Andalucía** (IAA), ha desarrollado uno de los tres algoritmos usados para la reconstrucción de las imágenes de la sombra del agujero negro en M87. Además, Gómez es uno de los coordinadores del artículo científico, publicado hoy, donde se presentan y analizan estas imágenes.

**Antxon Alberdi**, director del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), lidera investigaciones sobre la formación de chorros relativistas a partir del acrecimiento en torno a agujeros negros supermasivos. **Iván Martí-Vidal**, del Instituto Geográfico Nacional (IGN), diseñó los algoritmos que permitieron combinar los datos de ALMA (el elemento más sensible del EHT) con el resto de radiotelescopios; es además coordinador del grupo de polarimetría (cuyo principal objetivo es estudiar el papel de los campos magnéticos en las proximidades del agujero negro).

“Ha transformado nuestra visión de los agujeros negros en algo real que puede ser estudiado a través de observaciones astronómicas”, ha comentado Gómez

**Miguel Sánchez-Portal** (director del Instituto de Radioastronomía Milimétrica –IRAM), Salvador Sánchez e Ignacio Ruiz (ingenieros), Pablo Torné (investigador) y Rebecca Azulay (Universidad de Valencia) han participado en la organización, configuración del equipamiento técnico y en la realización de las observaciones desde el radiotelescopio IRAM 30 metros en Sierra Nevada, Granada.

“El Telescopio Horizonte de Sucesos ha transformado nuestra visión de los agujeros negros de un concepto matemático en algo real que puede ser estudiado a través de repetidas observaciones astronómicas”, ha comentado Gómez.

“Hemos logrado algo que parecía simplemente imposible hace tan sólo una generación”, ha concluido Doeleman. “Los avances tecnológicos y la puesta en marcha de nuevos radiotelescopios durante la última década han permitido a nuestro equipo crear este nuevo instrumento, diseñado para ver lo invisible”.

El Comisario europeo **Carlos Moedas**, responsable de Investigación, Ciencia e Innovación, ha afirmado desde Bruselas: “La ficción a menudo inspira a la ciencia, y los agujeros negros han alimentado durante mucho tiempo nuestros sueños y nuestra curiosidad. Este sorprendente

descubrimiento demuestra una vez más cómo el trabajo conjunto con socios de todo el mundo puede llevar a lograr lo impensable y a ampliar los horizontes de nuestro conocimiento".

### ¿Qué es un agujero negro y cómo se ve?

Los agujeros negros son objetos fascinantes predichos por la relatividad general de Einstein, aunque en realidad el famoso físico no creía mucho en ellos.

Son regiones del espacio-tiempo con una masa y un campo gravitatorio tan colosales que nada, ninguna partícula, ni siquiera la luz, puede escapar de su interior. Por tanto, no se pueden ver directamente; aunque debido a la inmensa atracción gravitatoria que ejercen sobre su entorno, los científicos deducen su existencia de forma indirecta.

Pero hay otra forma de observar un agujero negro. El límite más allá del cual la luz y toda la materia queda atrapada por este oscuro objeto se llama [horizonte de sucesos](#), un punto de no retorno. En el preciso momento en que las partículas cruzan este límite, se emite una descarga final de luz.

Esta emisión se puede observar en el rango de longitud de onda milimétrica. Por tanto, es posible trazar el horizonte de un agujero negro y detectarlo de forma directa. Ese es precisamente el objetivo del proyecto EHT.



Ilustración de un agujero negro supermasivo girando rápidamente. Entre otras características, se muestra el horizonte de sucesos y su disco de acreción alrededor (restos de una estrella destrozada). / ESO, ESA/Hubble, M. Kornmesser

### Un equipo de ocho gigantes coordinados

El consorcio internacional **Telescopio Horizonte de Sucesos** (EHT por sus siglas en inglés: [Event Horizon Telescope](#)) es una red global de radiotelescopios y estaciones de [interferometría de muy larga base \(VLBI, very long baseline interferometry\)](#) repartida por varios continentes.

Su objetivo es observar el **entorno inmediato de agujeros negros supermasivos**. En concreto dos: **Sagitario A\***, localizado en el centro de la Vía Láctea a unos 25.000 años luz de la Tierra y

con unos 4 millones de masas solares; y otro aún más grande (con varios miles de millones de masas solares) en la vecina y gigantesca galaxia **Messier 87**.

Estas son las instituciones que integraban en 2017 el EHT:

- [Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array \(ALMA\) - Chile](#)
- [The Submillimeter Array \(SMA\) - Hawái \(EE UU\)](#)
- [South Pole Telescope \(SPT\) - Antártida](#)
- [Submillimeter-wave Astronomy \(SMT/ARO\) - Arizona \(EE UU\)](#)
- [IRAM Pico Veleta \(30-meter telescope\) - España](#)
- [James Clerk Maxwell Telescope \(JCMT\) - Hawái \(EE UU\)](#)
- [The Large Millimeter Telescope \(LMT\) - México](#)
- [Atacama Pathfinder EXperiment \(APEX\) - Chile](#)

Está previsto que otros tres observatorios estén operativos dentro de la red en 2020 ([IRAM NOEMA Observatory](#) en Francia –donde ya funcionan algunas de sus antenas–, [Greenland Telescope](#) en Groenlandia y [Kitt Peak National Observatory \(KPNO\)](#) en Arizona, EE UU).

En cada estación digitalizan y almacenan la información en discos duros, que luego se mandan por avión al observatorio Haystack del MIT en Massachusetts (EE UU) y al Instituto Max Planck de Radioastronomía en Bonn (Alemania), donde se juntan y sincronizan los datos con supercomputadoras para generar la imagen final del agujero negro.



Los ocho observatorios del consorcio internacional Telescopio Horizonte de Sucesos (EHT) que participaron en las observaciones del agujero negro en 2017. / EHT

Fuente: **ESO/CSIC**

Derechos: **Creative Commons**

## ANNEX 4

- VÍDEOS DEMOSTRATIUS EXPERIMENTS

Vídeo 1: experiment de l'expansió de l'Univers.

<https://drive.google.com/file/d/1Qlw66tHlitFrr-24jVb-UhTJRyhSALsp/view?usp=sharing>

Vídeo 2: experiment sobre el comportament de la llum respecte d'un forat negre.

<https://drive.google.com/file/d/1XYb0ajik-8dGwkJitmLJTgRI5LascxJM/view?usp=sharing>

- VÍDEO DEMOSTRATIU ITER. Adjunto enllaç del vídeo, que a més, trobareu al CD adjunt.

<https://www.youtube.com/watch?v=yLe0irF9q9s>

<https://drive.google.com/file/d/1p-3NqkN63gOYoldq4pJ8oEbBM6Zflbdr/view?usp=sharing>

- SIMULACIÓ FORAT NEGRE. Adjunto enllaç de l'intent de simulació, que no he sabut acabar.

<https://drive.google.com/file/d/1pNkifnNIIkcC082dP7TUAj-LKiH1RZnw/view?usp=sharing>





Estrelles i Forats negres. Aplicació de la informàtica en objectes astronòmics por Mamotto se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).