



**ELS
FORATS NEGRES
I LA SEVA DETECCIÓ**

Estrella polar
Curs 2020-2021

*“L’Univers no només té una història,
sinó qualsevol història possible.”*

Stephen Hawking

M'agradaria agrair a l’Agrupació Astronòmica de Sabadell tota l’ajuda que he rebut per part seva durant la realització de la memòria, i per proporcionar-me les eines necessàries per a l’elaboració de la part pràctica del treball.

També voldria donar les gràcies al tutor que m’ha portat el treball, per haver-me guiat al llarg de la seva realització.

Abstract

Black holes are the most dangerous and mysterious celestial bodies of the Universe. Their infinite density and gravity have made black holes a paramount object of study in physics nowadays. Nothing can ever escape from their gravitational field, not even the light, and in their centre there is a point called singularity, in which all the physics we have knowledge of makes no sense.

The theoretical part of this project explains what black holes actually are, besides giving a detailed explanation of each one of their parts. Furthermore, it explains the connection between black holes and quantum mechanics, and it enumerates the types of black holes that exist. Moreover, it explains how black holes are created and their impact among the rest of the Universe. Finally, it explains the different techniques that can be used to detect black holes.

The practical part of this project consists in the detection of a supermassive black hole using a telescope. This detection has been possible due to the localization of the blazar Markarian 421, emitted by the mentioned black hole. I have also taken photographs of this blazar using the telescope and a CCD camera provided by the *Astronòmica de Sabadell*. I treated the photos using many computer programmes in order to obtain a clear and useful image to work with. Using the Markarian 421' image, I have made many calculations of different physical characteristics of black holes, such as their apparent magnitude or their mass.

Índex

1. Introducció	5
2. Teories relativistes.....	7
2.1. Teoria de la Relativitat Especial	7
2.2. Teoria de la Relativitat General	7
3. Què són els forats negres?.....	9
3.1. El forat negre i les seves parts.....	9
3.2. Tipus de forats negres	11
3.3. Els forats negres i la mecànica quàntica	12
4. Formació dels forats negres.....	15
4.1. Formació de forats negres estel·lars i de massa intermèdia.....	15
4.2. Formació de forats negres supermassius.....	17
4.3. Formació de forats negres primordials	18
5. Impacte dels forats negres sobre la resta de l'Univers	19
5.1. Impacte dels forats negres envers altres astres	19
5.2. Efectes del forat negre sobre un cos que hi cau en ell	20
6. Detecció dels forats negres.....	22
6.1. Radiacions electromagnètiques.....	22
6.2. Detecció de forats negres gràcies al disc d'acreció	23
6.3. Detecció de forats negres per EDM.....	23
6.4. Detecció de forats negres binaris (ones gravitacionals).....	23
6.5. Detecció de forats negres pels esclats de raigs gamma (GRB).....	24
6.6. Detecció de forats negres per mesura de l'efecte Doppler	25
7. Part pràctica.....	26
7.1. Introducció	26
7.2. Els quàsars i els blàzars	27

7.3.	El telescopi i la càmera CCD	28
7.4.	Flats i darks	28
7.5.	El temps universal i el temps julià	29
7.6.	Magnitud aparent i magnitud absoluta.....	30
7.7.	Coordenades equatorials: ascensió recta i declinació	30
7.8.	Obtenció i anàlisi d'imatges del blàzar Markàrian 421	31
7.9.	Càlcul de dades físiques del blàzar	44
8.	Conclusions	46
9.	Fonts documentals.....	49
9.1.	Font de les imatges	50
10.	Annex	52
10.1.	Teories relativistes (ampliació).....	52
10.2.	Tipus de forats negres (ampliació).....	58

1. Introducció

Aquest treball consisteix en l'explicació d'un fenomen molt important dins el context de l'Univers, el forat negre. Per a aquest treball m'he proposat **detectar un forat negre amb un telescopi i fer-ne fotografies**; és la hipòtesi plantejada per a aquest treball, que serà resolta al final.

En la part teòrica s'explica què són aquests cossos celestes i es tracten diferents aspectes sobre aquests, com poden ser la seva formació o la seva detecció. La informació d'aquesta part del treball ha sigut extreta en la seva majoria de pàgines web dedicades a la divulgació del tema, tot i que també s'han fet servir articles de revistes o llibres de divulgació científica. A més, vaig assistir a un curs sobre forats negres a l'Astronòmica de Sabadell, en el qual vaig aprendre molts conceptes de teoria que he pogut incloure al treball.

La part pràctica consisteix en la detecció d'un forat negre i la realització de fotografies del blàzar que emet. Aquestes són posteriorment analitzades per tal de poder calcular diferents magnituds físiques del forat negre. També s'explica com es realitzen les observacions astronòmiques fetes des d'un observatori. La part pràctica la vaig fer al curs esmentat anteriorment, on se'm va proporcionar la informació i eines necessàries per a realitzar-la.

Vaig decidir triar aquest tema perquè des de sempre m'ha fascinat l'Univers. De ben petita volia ser astronauta, i amb el pas del temps m'he adonat que una de les branques de la ciència que més m'agrada és l'astrofísica. Els forats negres són uns cossos celestes molt misteriosos actualment: encara no es coneixen a la perfecció. Se sap que existeixen, però posen en contradicció diferents teories, fent que actualment siguin un objecte d'estudi molt important. Es creu que si aconseguim entendre els forats negres, aconseguirem unificar la Teoria de la Relativitat i la mecànica quàntica, la qual cosa seria un gran avenç per a la física.

A l'hora de plantejar aquest treball he decidit proposar una sèrie d'objectius que intentaré assolir al llarg d'aquesta memòria:

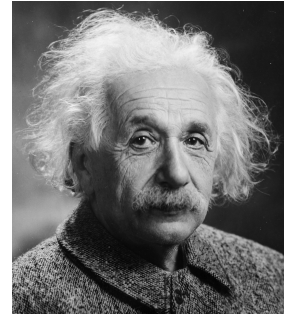
- Evidenciar la presència d'un forat negre, tot realitzant fotografies d'aquest o observant-lo amb un telescopi.
- Descriure els forats negres de forma entenedora de manera que qualsevol lector o lectora no especialista entengui les característiques bàsiques d'aquests.
- Conèixer les teories més recentment formulades que defineixen l'Univers, la relativitat i la mecànica quàntica. Els forats negres són importants per a l'estudi d'aquestes dues teories.
- Aprendre com treballen les científiques i els científics dedicats a l'astronomia i com es realitzen les observacions amb telescopi.
- Calcular les característiques d'un forat negre mitjançant fórmules matemàtiques.

Com he mencionat, la hipòtesi plantejada per a aquest treball és la següent: **puc detectar un forat negre amb un telescopi i realitzar fotografies d'aquest?**

2. Teories relativistes

En aquest capítol es resumeixen les teories relativistes necessàries per comprendre la naturalesa dels forats negres. Degut a la dificultat d'aquestes teories, l'annex 10.1 inclou un desenvolupament més extens per tal d'ampliar la informació.

Al segle XX, el físic teòric Albert Einstein (1879-1955) va publicar dues teories relacionades entre si: la primera que va publicar va ser la *Teoria de la Relativitat Especial*, l'any 1905, i el 1915 va publicar la *Teoria de la Relativitat General*.



Imatge 1. Albert Einstein (1879-1955).

2.1. Teoria de la Relativitat Especial

Aquesta teoria ens diu que només existeix una magnitud absoluta: la velocitat de la llum en el buit (300.000 km/s), res que transporti informació pot viatjar més ràpid que la llum. L'espai i el temps no són magnituds absolutes, és a dir, que tant l'espai com el temps varien en funció de l'observador¹.

Apareix el concepte de la *dilatació del temps*² i la *contracció de Lorentz*³. També diu que la massa d'un cos és energia concentrada, això es demostra amb la fórmula $E = mc^2$ (on E és energia, m és massa i c la velocitat de la llum). La teoria també explica que la massa d'un cos augmenta amb la velocitat.

2.2. Teoria de la Relativitat General

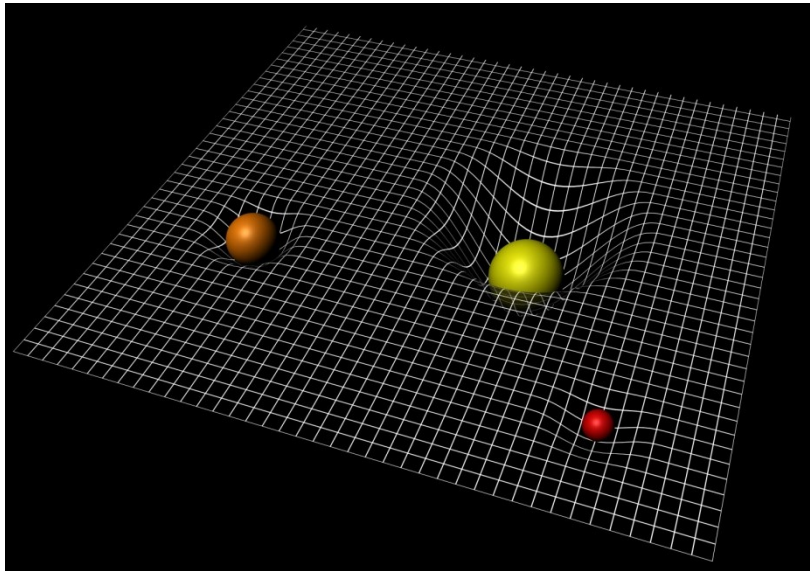
Aquesta teoria aplica la Teoria de la Relativitat Especial tenint en compte la gravetat, i reformula el terme de gravetat. Einstein va proposar que l'Univers estava format per tres dimensions d'espai (x , y , z) i una dimensió de temps. Les dimensions formen un "teixit" anomenat *espai temps*: aquest teixit no és estàtic, sinó que és dinàmic.

¹ Qualsevol entitat que pot mesurar magnituds físiques d'un sistema físic.

² El temps es ralentix a mesura que la velocitat augmenta. Vegeu Annex 10.1.

³ La longitud d'un cos es contrau en la direcció del moviment quan augmenta la velocitat. Vegeu Annex 10.1.

La *gravetat* és una deformació de l'espai-temps per la quantitat i tipus d'energia que es troba atrapada en ell. La deformació d'aquest teixit afecta a la manera en què l'energia flueix per l'espai-temps, per tant, com més pronunciada és la curvatura de l'espai-temps, més atracció senten altres cossos cap a aquell punt.

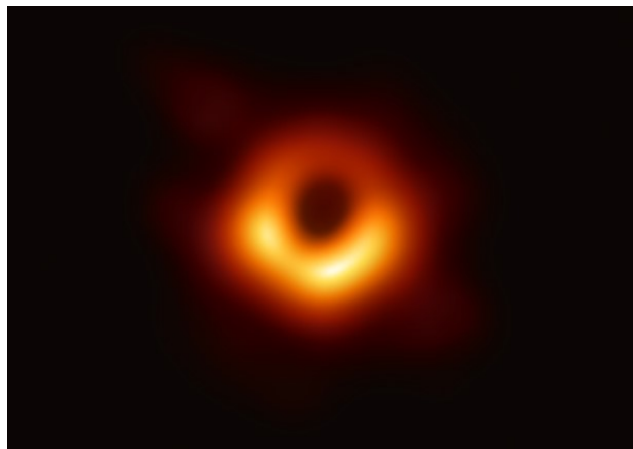


Imatge 2. Representació visual de l'espai-temps sent deformat per 3 cossos.

3. Què són els forats negres?

3.1. El forat negre i les seves parts

Els forats negres es poden definir com a concentracions de matèria de densitat infinita, que creen un descomunal camp gravitatori, és a dir, que deformen l'espai-temps de forma infinita. Per tant, es tracta d'una massa molt gran condensada en un cos de radi molt petit (en proporció a la massa). Res que porti informació, ni tan sols els fotons⁴, pot escapar dels forats negres, cosa que podem explicar gràcies al que estipulen les teories relativistes.



Imatge 3. Primera imatge real d'un forat negre. Està situat a la galàxia M87.

El primer en predir l'existència d'aquest fenomen va ser John Michell (1724-1793) l'any 1784. En aparèixer la Relativitat General d'Einstein es va acabar de definir la idea del forat negre, gràcies també al treball de molts altres físics com Stephen Hawking (1942-2018), Schwarzschild (1873-1916), Oppenheimer (1904-1967), etc.

A continuació es detallen algunes de les parts dels forats negres.

L'horitzó d'esdeveniments

L'horitzó d'esdeveniments és un punt de no retorn: un cop travessat l'horitzó d'esdeveniments d'un forat negre ja no es pot tornar enrere i s'està destinat a caure en la singularitat.

⁴ Partícula elemental que constitueix la llum.

El forat negre, ja que genera un camp gravitatori tan intens, provoca que la velocitat d'escapament⁵ del cos celeste sigui superior a la de la llum. En aquest cas, com ja sabem que la velocitat de la llum és insuperable, res pot escapar d'un forat negre un cop creuat l'horitzó d'esdeveniments, ni tan sols la llum.

La singularitat gravitatòria

La singularitat es pot definir com un punt de densitat infinita i volum diminut que es troba a l'interior del forat negre. Quan un cos entra en un forat negre acaba caient en la singularitat d'aquest, i és destruït en arribar-hi.

Les equacions d'Einstein deixen de tenir sentit en les singularitats. Aquest és un dels grans misteris actuals de la física, ja que encara no se sap del cert com funcionen o què són. Per a poder entendre què és la singularitat necessitem una teoria que unifiqui la relativitat i la mecànica quàntica, ja que és un lloc de gravetat descomunal i dimensions diminutes.

El disc d'acreció

El disc d'acreció és un disc de matèria que gira al voltant del forat negre. Aquesta matèria es troba en estat de plasma⁶, i acabarà caient dins el forat negre, alimentant així la seva massa. El disc d'acreció genera una radiació molt energètica que actualment pot ser detectada per aparells, i ens ajuda a detectar els forats negres (punt 6).

Els quàsars

Els quàsars són fonts d'energia electromagnètica que provenen dels forats negres supermassius (vegeu punt 3.2.). S'originen quan un forat negre supermassiu situat al centre d'una galàxia comença a alimentar-se dels astres del seu voltant, fet que emet una radiació molt intensa.

⁵ Velocitat mínima necessària per a poder escapar del camp gravitatori d'un cos.

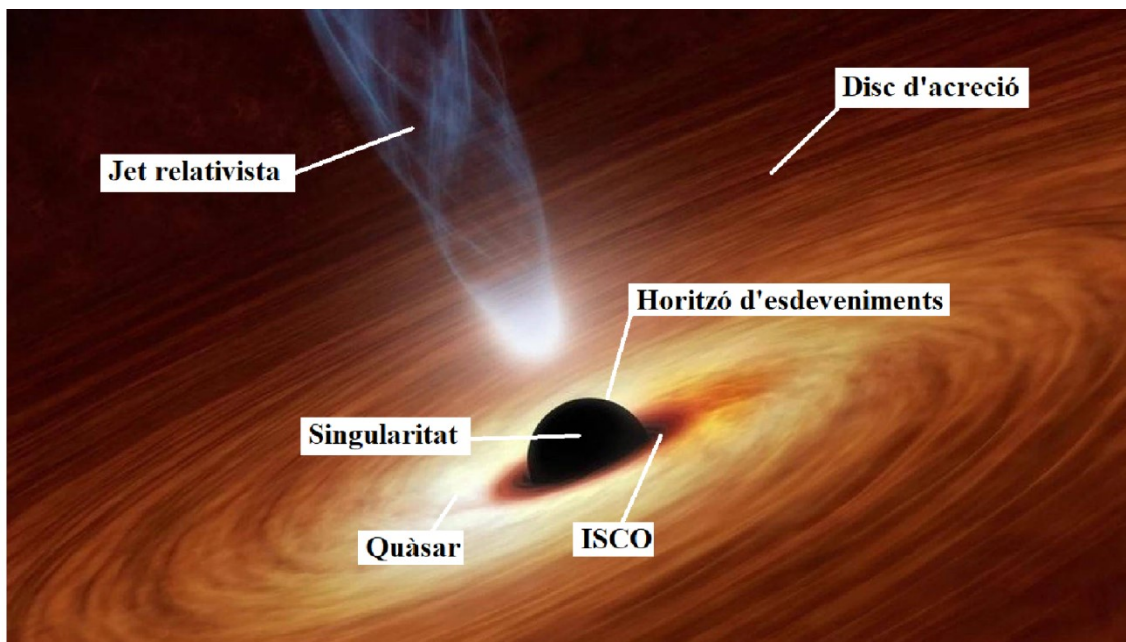
⁶ El plasma és un estat de la matèria que es dona sota condicions extremes, en les quals els àtoms del cos perden els seus electrons.

El jet relativista

El disc d'acreció del forat negre està en estat de plasma, així que es crea un camp magnètic molt intens. Pels dos pols (nord i sud) d'aquest camp magnètic s'escapen partícules, tot formant un feix a cada pol (el jet). La radiació que produeixen aquests feixos de partícules és llum de sincrotró⁷.

ISCO (Innermost Stable Circular Orbit)

És una zona a prop de l'horitzó d'esdeveniments on les partícules poden orbitar el forat negre sense haver de travessar necessàriament l'horitzó d'esdeveniments.



Imatge 4. Representació d'un forat negre amb les seves parts senyalitzades.

3.2. Tipus de forats negres

Els forats negres venen definits per tres paràmetres: la massa, la càrrega i el seu moment angular. Apartat ampliat a l'annex 10.2.

⁷ És una radiació que es dona quan hi ha un camp magnètic molt intens. Els electrons que hi ha emeten llum que pot ser detectada.

Segons la massa:

- **Forats negres estel·lars:** la seva massa és de més de 3 masses solars⁸.
- **Forats negres de massa intermèdia:** la seva massa es troba entre 100 i un milió de masses solars.
- **Forats negres supermassius:** equivalen a diversos milions de masses solars. Es trobarien al centre de moltes galàxies.
- **Forats negres primordials:** són hipotètics i més petits que els estel·lars.

Segons la seva càrrega i moment angular:

Els forats negres es poden classificar segons si tenen càrrega i si tenen rotació.

	Sense rotació	Amb rotació
Sense càrrega	Schwarzschild	Kerr
Amb càrrega	Reissner-Nordström	Kerr Newman

3.3. Els forats negres i la mecànica quàntica

La mecànica quàntica és la branca de la ciència que estudia el comportament de la matèria i la llum a escala microscòpica.

Els forats negres avui dia segueixen sent un objecte d'estudi: res està del tot clar. Stephen Hawking (1942-2018), va ser un dels físics més emblemàtics del segle XX, que va dedicar bona part de la seva vida a l'estudi dels forats negres i va intentar unificar les dues teories més importants per tal d'explicar l'Univers: la *mecànica quàntica* i la *relativitat*.



Imatge 5. Stephen Hawking (1942-2018).

⁸ Unitat de massa que coincideix amb la massa del Sol. 1 massa solar = $1,989 \cdot 10^{30}$ kg

Aquestes dues teories es contradiuen en molts aspectes, i és per aquest motiu que es fa molt difícil unificar-les. Els forats negres són el millor fenomen a observar per tal d'unificar aquestes dues teories, ja que és on es poden observar clarament les contradiccions entre elles; els forats negres tenen una gravetat molt intensa, i la matèria està concentrada en un punt molt petit (singularitat).

L'evaporació dels forats negres (radiació de Hawking)

Hawking va concloure que els forats negres s'evaporen. La mecànica quàntica explica que, en realitat, al buit⁹ sí que hi ha matèria: tot l'Univers està ple de partícules amb una corresponent antipartícula. Cada partícula té la seva parella antipartícula, però aquestes es destrueixen entre elles instantàniament i per tant no es poden propagar lliurement: es diu que són *virtuals*.

Quan una parella de partícules apareix molt a prop d'un forat negre pot passar que només una d'elles creui l'horitzó d'esdeveniments d'aquest. Aleshores, aquesta ja no pot tornar enrere i cau a la singularitat. Això provoca que la seva partícula complementària, que es troba a l'exterior del forat negre, pugui propagar-se lliurement ja que ja no es pot destruir amb la seva parella. Aleshores aquesta partícula s'ha tornat *real*.

El conjunt de partícules reals que s'han creat mitjançant aquest mecanisme s'anomena *Radiació de Hawking*. Aquesta radiació que s'emet comporta un alliberament d'energia que prové del propi forat negre. Així doncs, l'energia del forat negre va disminuint, i segons la Teoria de la Relativitat, la seva massa també. Finalment, el forat negre s'acabaria evaporant.

Els forats negres i la paradoxa de la informació

Com ja s'ha explicat en punts anteriors, la Teoria de la Relativitat permet afirmar que res pot escapar d'un forat negre un cop creuat l'horitzó d'esdeveniments. No obstant això, aquesta afirmació entra en controvèrsia amb la mecànica quàntica.

⁹ Espai sense matèria, tot i que les teories actuals diuen que el buit no es correspon amb el no-res.

Segons la mecànica quàntica, la informació mai es destrueix: es pot transformar, però mai desaparèixer.

En realitat, el que provoca aquesta contradicció amb la física quàntica és *el principi de localitat*: res pot viatjar més ràpid que la llum al buit. Si la informació hagués d'escapar d'un forat negre ho hauria de fer a velocitats superiors a la de la llum, violant aquest principi de localitat.

Actualment encara no s'ha donat una resposta clara a aquesta paradoxa. Stephen Hawking va dedicar els seus últims anys de vida a desenvolupar una teoria que resoldria dita paradoxa: segons ell, l'horitzó d'esdeveniments quedaria pertorbat cada cop que alguna cosa el creués, i per tant la informació quedaria emmagatzemada en aquestes pertorbacions. No obstant, aquesta teoria encara no ha estat aprovada.

Els forats negres primordials

Hawking va proposar l'existència d'uns forats negres que remunten el seu origen al Big Bang¹⁰. Serien molt petits: es calcula que la massa d'aquests seria d'entre 10^{11} i 10^{12} kg i el seu horitzó d'esdeveniments tindria la mida d'un àtom. En cas d'existir aquests forats negres resoldrien dos grans misteris de la física actual. En primer lloc, la matèria fosca¹¹ per fi seria explicada, ja que és possible que una part d'aquesta estigui formada per aquests forats negres primordials. No seria l'únic misteri resolt: des de fa temps que es van detectant emissions de raigs gamma¹² puntuals, que podrien ser els forats negres primordials que s'evaporen.

¹⁰ El Big Bang va ser una explosió d'un punt de matèria concentrada amb una densitat infinita que va donar lloc a l'Univers.

¹¹ És un tipus de matèria hipotètica que no interacciona amb cap radiació i que explicaria fenòmens gravitatoris que es donen a l'Univers.

¹² Ones electromagnètiques de màxima energia.

4. Formació dels forats negres

4.1. Formació de forats negres estel·lars i de massa intermèdia

Formació estel·lar

Les estrelles són esferes de gas a una alta temperatura, i provenen de núvols situats a les galàxies. Quan aquests núvols pateixen una pertorbació, s'inestabilitzen i es comencen a contraure. Aquesta matèria va passant per diferents processos fins que es forma l'estrella.

Les estrelles es troben en estat de plasma, i per les condicions que hi ha, es donen les *reaccions de fusió termonuclear*: en una primera etapa, els nuclis atòmics de l'hidrogen es comencen a fusionar entre ells per formar heli. Una part de la massa, en fusionar-se, es converteix en energia i equilibra el propi pes de l'estrella evitant, d'aquesta manera, que col·lapsi sobre si mateixa. Hi ha dos tipus de reaccions termonuclears per les quals les estrelles converteixen hidrogen en heli, la *cadena protó-protó* i el *cicle CNO*¹³. Aquesta etapa acaba quan el nucli de l'estrella se satura d'heli, i això passa quan l'heli ocupa el 12% de la massa de l'estrella.

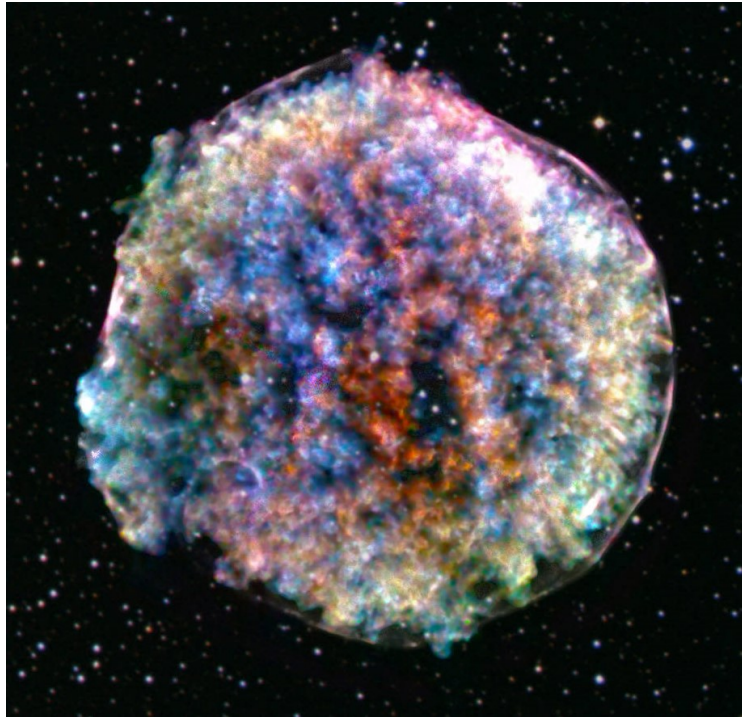
Evolució de les estrelles d'entre 30 i 100 masses solars

Quan s'ha arribat al punt de saturació per heli, la gravetat comença a contraure l'estrella, fent que es comenci a escalfar encara més. El nucli de l'estrella comença a fer la fusió termonuclear de l'heli produït prèviament: el *procés triple alfa*. Es formen partícules d'oxigen i carboni en la mateixa proporció.

Quan aquest nou procés de fusió finalitza, l'estrella torna a contraure's i augmenta la seva temperatura. El següent pas és la fusió del carboni amb el qual s'obté, bàsicament, carboni tot i que també es pot transformar en neó. Un cop acabat el carboni, comença la fusió de l'oxigen, que origina elements com el silici i el fòsfor. Així va continuant el cicle de fusió dels elements, fins que arriba un punt en el qual s'acaba formant ferro,

¹³ Carboni - nitrogen - oxigen.

l'element més estable de la natura. Aquest és l'últim element al qual poden arribar les estrelles ja que cap estrella fusiona també el ferro. Aleshores l'estrella provoca una gran explosió, anomenada *supernova*.



Imatge 6. Imatge real de la supernova de Tycho

En aquest punt cal introduir un nou concepte: el *límit de Tolman-Oppenheimer-Volkoff*, que determina en què deriva l'estrella en morir: si el nucli de ferro supera les 2,5-3 masses solars, deriva en un forat negre. Si es troba entre 1,4 i 2,5-3, es converteix en una estrella de neutrons¹⁴.

La gravetat comença a comprimir tant la massa que els àtoms comencen a aixafar-se descomunalment, i els protons i electrons comencen a fusionar-se entre ells, donant lloc a neutrons i neutrins¹⁵. En augmentar tant la densitat, la gravetat comença a actuar encara més intensament. S'ha format un forat negre.

També pot passar que una estrella exploti en forma d'*hipernova*, una explosió 50 vegades més energètica que la de la supernova. El nucli d'aquesta hipernova pot ser tan pesat i dens que formi directament un forat negre.

¹⁴ Estrella degenerada composta de neutrons a densitats altíssimes.

¹⁵ Partícula elemental de massa mínima i sense càrrega. És difícil de detectar perquè travessa la matèria.

Formació de forats negres estel·lars

Els forats negres estel·lars tenen una massa d'unes 2,5-3 masses solars, i es formen a partir d'estrelles d'entre 30 i 100 masses solars. A la Via Làctia¹⁶ n'hi ha bastants repartits per tota la galàxia. Aquests es formen a partir de tots els processos explicats anteriorment.

També hi ha una altra possibilitat de formar un forat negre estel·lar. Com s'ha mencionat, si el nucli de ferro no arriba a les 2,5-3 masses solars, l'estrella es converteix en una estrella de neutrons. La fusió de dues estrelles de neutrons podria donar lloc a un forat negre estel·lar, ja que les seves masses se sumarien i podrien superar el límit de Tolman-Oppenheimer-Volkoff. Tot i que és una situació molt excepcional, també podria passar que un sistema de dues estrelles molt massives donés lloc a dos forats negres, un forat negre i una estrella de neutrons o dues estrelles de neutrons.

Formació de forats negres de massa intermèdia

Els forats negres de massa intermèdia tenen una massa d'entre 100 i un milió de masses solars, i no està clar si existeixen.

Es formarien pel procés explicat anteriorment. La diferència amb els forats negres estel·lars és que fa molts anys les estrelles de l'Univers tenien una massa molt més gran que les actuals, així que en aquest cas el nucli de l'estrella degenerada seria molt més massiu, donant lloc a uns forats negres més massius que els estel·lars.

4.2. Formació de forats negres supermassius

Els forats negres supermassius són aquells que es troben al centre de la majoria de les galàxies, i tenen masses superiors a un milió de masses solars.

Es van detectar forats negres supermassius molt antics, però el problema era que per tal que un forat negre estel·lar assolís la massa d'un forat negre supermassiu hauria de

¹⁶ La Via Làctia és el nom de la galàxia en la que es troba la Terra.

guanyar massa superant el límit d'Eddington¹⁷. Encara no està del tot clar com es formen: hi ha dues teories al respecte.

En primer lloc, es creu que podrien haver-se format a partir de la fusió de dos forats negres de massa intermèdia. Si els dos forats en qüestió arribessin a sumar una massa total molt gran, podrien arribar a formar un forat negre supermassiu. El problema d'aquesta teoria és que l'existència de forats negres de massa intermèdia encara no està demostrada.

En segon lloc, es va proposar l'existència d'un gas que formava l'Univers primitiu, que va formar estrelles i galàxies, però es creu que també existeix la possibilitat de que aquest gas col·lapsés i formés directament un forat negre. Tot i que podria ser viable (però molt complicat), encara no hi ha evidències que ho demostrin.

4.3. Formació de forats negres primordials

Els forats negres primordials tenen unes dimensions i una massa molt petita, i encara no s'ha demostrat la seva existència. Aquests s'haurien format durant el Big Bang. Es creu que van aparèixer a partir de les condicions extremes del Big Bang, on la densitat, la pressió i la temperatura eren altíssimes. En aquest escenari, certa matèria d'alta densitat podria haver creat forats negres molt petits, els primordials.

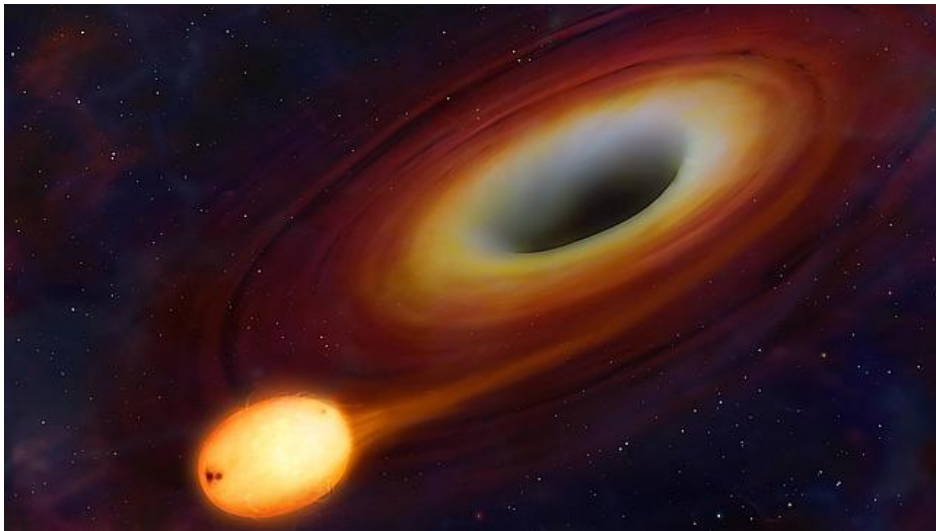
¹⁷ És un ritme de creixement màxim que determina la velocitat màxima a la qual un forat negre pot guanyar massa.

5. Impacte dels forats negres sobre la resta de l'Univers

5.1. Impacte dels forats negres envers altres astres

Els forats negres i l'EDM

Els forats negres poden provocar el que es coneix com a *esdeveniment de disrupció de marea* (EDM). Aquest fenomen es dona quan una estrella s'apropa massa a l'horitzó d'esdeveniments d'un forat negre. El forat negre supera per complet la gravetat de la pròpia estrella i el seu camp gravitatori comença a dominar cada partícula d'aquesta. Això acaba provocant l'esquinçament de l'estrella, creant així un jet de radiació i partícules. Una part del material de l'estrella destruïda es queda orbitant al voltant del forat negre, formant el que coneixem com a disc d'acreció.



Imatge 7. Representació d'una estrella sent absorbida per un forat negre. Es produeix l'EDM.

Els forats negres en els centres galàctics

Tot i que encara no està completament demostrat, els científics creuen correcte afirmar que a cada galàxia hi ha un forat negre supermassiu situat al centre. Ja s'ha confirmat definitivament que al centre de la nostra galàxia, la Via Làctia, hi ha un forat negre supermassiu: el *Sagitari A**. Aquests forats negres donen forma a les galàxies, les mantenen al seu voltant gràcies al fort camp gravitatori que generen.

Els sistemes dobles tancats de forats negres

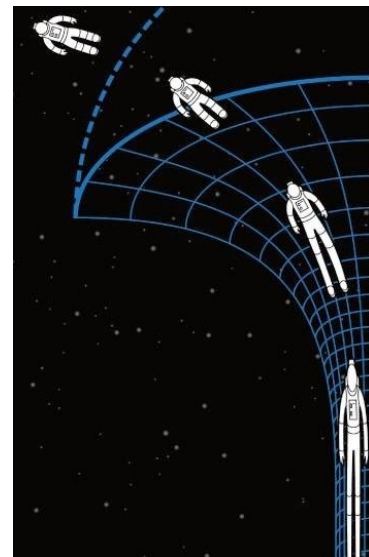
Un sistema doble tancat consisteix en dos cossos celestes que orbiten l'un al voltant de l'altre. Hi ha diferents possibilitats de sistemes dobles tancats, però que incloguin forats negres podem trobar dos forats negres binaris o un forat negre i una estrella de neutrons. En ambdós casos hi ha una primera fase en què es troben a una distància prudencial en la què simplement orbiten junts. A mida que passa el temps l'òrbita es va reduint, agafant cada cop més velocitat. En el cas dels dos forats negres, s'acaben fusionant en un únic forat negre supermassiu, emetent fortes ones gravitacionals (explicat al punt 6.4). En l'altre cas també es forma un forat negre supermassiu, tot i que les ones gravitacionals no arriben a ser tan intenses.

5.2. Efectes del forat negre sobre un cos que hi cau en ell

Com a un efecte de la gravetat, apareix el que es coneix com a forces de marea. Quan dos cossos estan a una certa distància, hi ha una part del cos que rep una força d'atracció més intensa cap a l'altre. Aleshores, hi ha una diferència en la força de gravetat entre les diferents parts d'un cos.

Efectes quan l'observador és intern

L'efecte de les forces de marea sobre un cos s'anomena *espaguetització*. Si una persona entra dins un forat negre, la part del cos que entra primer sent una força de gravetat immensa, i la diferència entre les forces de gravetat entre els dos extrems del cos es torna descomunal. En aquesta situació el cos es comença a estirar a mida que va entrant al forat negre, i acaba per ser una simple filera d'àtoms. S'ha produït l'espaguetització. Als forats negres supermassius l'espaguetització es produeix molt més endins del forat negre, triga més en produir-se.



Imatge 8. Dibuix d'una persona experimentant l'espaguetització.

Efectes quan l'observador és extern

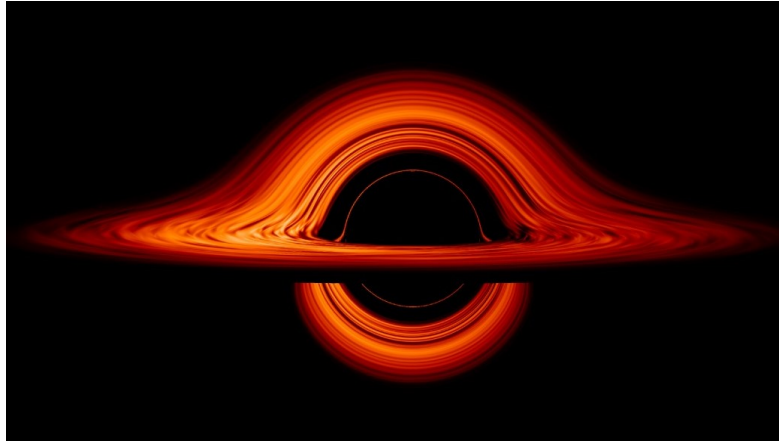
Un observador que no cau dins el forat negre veu com un cos s'apropa a aquest, i veu que totes les ones que emet el cos, com el so o la llum, cada cop tenen freqüències¹⁸ més baixes. Un cop el cos ha arribat a l'horitzó d'esdeveniments, aquest es queda aturat i es torna vermell i fins al punt en el què es desintegra.

La velocitat de la llum és la velocitat màxima, aleshores succeeixen fenòmens com la dilatació del temps: el temps es ralentitja a mida que s'augmenta la velocitat. Quan un cos assoleix la velocitat de la llum el temps s'atura per a aquell cos. Com hem dit, un cop creuat l'horitzó d'esdeveniments ja no es pot tornar enrere, ja que la velocitat necessària per a fer-ho és superior a la de la llum. Per això l'observador extern veu com s'atura el cos al creuar l'horitzó: el temps s'ha aturat per a ell des del punt de vista de l'observador extern.

¹⁸ La freqüència d'ona és el nombre d'oscil·lacions que fa una ona en una unitat de temps, normalment segons. Unitat = Hertz (Hz).

6. Detecció dels forats negres

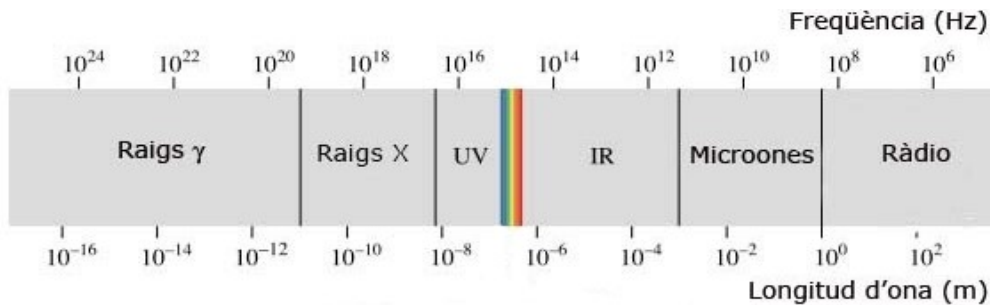
Els forats negres no poden ser observats a simple vista pel fet que no emeten cap tipus de llum. En tot cas podríem veure com la llum dels astres que envolten el forat negre es distorsiona, per l'extrema deformació de l'espai-temps. No obstant, actualment no és possible observar-los d'aquesta manera, ja que no disposem d'aparells prou potents.



Imatge 9. Representació de com es veuria la llum distorsionada al voltant d'un forat negre.

6.1. Radiacions electromagnètiques

L'anàlisi de les radiacions electromagnètiques emeses pel forat negre és el mètode més eficaç per a detectar-los. Les *ones electromagnètiques* es poden propagar pel buit, i quan un cos emet ones electromagnètiques es diu que aquest emet radiació. Es poden classificar totes les ones electromagnètiques segons la freqüència i longitud d'ona¹⁹ de cadascuna, i el conjunt de totes les ones electromagnètiques s'anomena *espectre electromagnètic*. A mesura que la longitud d'ona disminueix, l'ona és cada cop més energètica.



Imatge 10. Esquema de l'espectre electromagnètic

¹⁹ Distància entre el principi i el final d'una ona completa.

6.2. Detecció de forats negres gràcies al disc d'acreció

Com s'ha explicat a l'apartat 3.1, els forats negres tenen un disc d'acreció. Aquesta estructura és una mena de cúmul de gas i pols que gira al voltant d'un centre de masses molt gran. La matèria que forma aquest disc assoleix velocitats molt altes, fet que fa augmentar la temperatura d'aquest. Això provoca l'emissió de grans quantitats d'ones electromagnètiques, com raigs X o llum ultraviolada. Aquesta emissió de llum quan cau matèria a un forat negre és el que coneixem com a quàsar (o altres derivats, com un blàzar), i pot ser detectat actualment amb diferents aparells, com els telescopis. La part pràctica d'aquest treball consisteix en la detecció d'un blàzar.

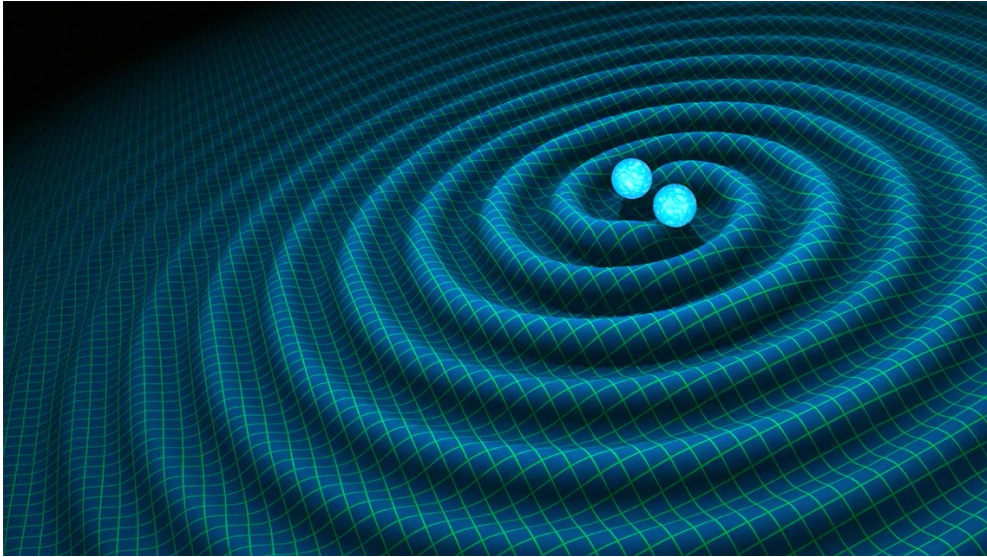
6.3. Detecció de forats negres per EDM

Una altra manera de detectar els forats negres és quan es produeix l'esdeveniment de disrupció de marea. Aquest fenomen ocorre quan una estrella s'apropa molt a un forat negre supermassiu i acaba sent destruïda per aquest a causa de les forces de marea (vegeu punt 5.2.) creant així un jet relativista (vegeu punt 3.1.). Aquesta radiació pot ser detectada actualment.

6.4. Detecció de forats negres binaris (ones gravitacionals)

Les ones gravitacionals són deformacions de l'espai-temps en forma d'ona, provocades per una pertorbació en l'espai-temps d'un cos massiu i accelerat. El 14 de setembre de 2015 l'observatori LIGO va detectar per primer cop unes fortes ones gravitacionals, i el 3 de setembre de 2020 es van detectar les ones gravitacionals més potents fins ara. Ambdues van ser provocades per la col·lisió de dos forats negres.

Aquestes ones ens poden ajudar a detectar els forats negres, les més potents es donen quan hi ha una col·lisió entre dos forats negres. En un sistema binari dos forats negres estan orbitant l'un al voltant de l'altre. Quan finalment es troben suficientment a prop es fusionen alliberant grans quantitats d'energia que es transmeten en forma d'ones gravitacionals.



Imatge 11. Representació visual de dos cossos orbitant l'un al voltant de l'altre i emetent ones gravitacionals que deformen l'espai-temps.

6.5. Detecció de forats negres pels esclats de raigs gamma (GRB)

Els raigs gamma són les ones electromagnètiques més energètiques. Quan un forat negre supermassiu interacciona amb una estrella, el forat comença a engolir-la, produint una emissió de raigs gamma. També pot passar que una estrella de neutrons i un forat negre es fusionin, alliberant de la mateixa manera grans quantitats de raigs gamma. Una altra possibilitat és que dues estrelles de neutrons es fusionin i formin un forat negre, alliberant raigs gamma.

Una altra forma de poder detectar un forat negre a partir dels raigs gamma és durant la seva formació. En el col·lapse final de l'estrella es desprèn una gran quantitat d'energia, el cos irradia raigs gamma.

Stephen Hawking, com hem dit, va predir que els forats negres s'acabaven evaporant. En el moment en el què es produeix l'evaporació, el forat negre esclataria emetent llum molt energètica, en concret raigs gamma. El procés d'evaporació d'un forat negre és molt lent, i per tant encara no hem pogut observar cap forat negre explotar. No obstant, com hem dit, hem detectat GRB puntuals que podrien provenir de forats negres primordials.

6.6. Detecció de forats negres per mesura de l'efecte Doppler

Una altra forma d'evidenciar la presència d'un forat negre és gràcies a l'efecte Doppler. Aquest fenomen consisteix en que l'observador percep les ones amb una longitud d'ona més curta a mida que l'emissor s'apropa. Partint d'això, com més ràpid s'allunya un cos que emet ones electromagnètiques, les ones tendeixen a allargar-se, per tant *tendeixen al vermell*. Quan l'objecte que irradia s'apropa a l'observador, les ones *tendeixen al blau*. Els forats negres, a causa del seu descomunal camp gravitatori, distorsionen les ones de llum del seu voltant, de manera que la llum que s'allunya des de la nostra perspectiva presentarà un corriment al vermell, mentre que la que s'apropa el presentarà cap al blau i, per tant, amb més brillantor, fent que s'aprecii una estructura asimètrica al voltant del forat negre.

7. Part pràctica

7.1. Introducció

Per realitzar la part pràctica d'aquest treball he participat al campus organitzat per l'Agrupació Astronòmica de Sabadell, dedicat a l'estudi dels forats negres. Aquest campus es va realitzar des del 6 fins el 10 de juliol, amb una durada de 4 hores al dia. Es dedicaven 2 hores a l'explicació de teoria sobre els forats negres i 2 hores a la pràctica.

La part pràctica se centrarà en la detecció i anàlisi d'un blàzar, que ens dona evidència de la presència d'un forat negre supermassiu. En concret, explicaré totes les passes que he seguit per a poder obtenir i analitzar fotos del blàzar Markàrian 421 (Mrk 421). S'explicarà tot el procediment per a realitzar una observació amb el telescopi, així com el pretractament de les imatges realitzades amb la càmera CCD (dispositiu de càrrega acoblada). També s'explicaran aspectes clau dins el camp de l'astronomia, donant a veure com treballen els astrònoms arreu del món. Finalment, es realitzaran diversos càlculs sobre diferents dades físiques del forat negre, tot partint de la imatge prèviament realitzada i analitzada del blàzar.

En primer lloc, faré una introducció a diversos conceptes necessaris per a poder entendre com es realitzen les observacions i el pretractament de les imatges.



Imatge 12. Instal·lacions on treballa l'Agrupació Astronòmica de Sabadell.

7.2. Els quàsars i els blàzars

Tot i que està explicat al punt 3.1., aquí s'amplia la informació, ja que són l'objecte d'estudi d'aquesta part pràctica. Els quàsars són fonts d'energia electromagnètica (vegeu punt 6.1.) que provenen dels forats negres supermassius (vegeu punt 3.2.). Els quàsars s'originen quan un forat negre supermassiu situat al centre d'una galàxia comença a alimentar-se de la matèria del seu voltant. Degut a això, el disc d'acreció del forat negre comença a assolir velocitats de rotació molt altes, fet que allibera una immensa quantitat d'energia en forma d'ones electromagnètiques.

Els quàsars són els objectes coneguts més lluminosos de l'Univers, i presenten una variació freqüent en la lluminositat, es creu que depenent del seu entorn. Sabem que els quàsars estan situats a molta distància de la Terra, ja que presenten molt corriment al vermell (vegeu punt 6.6.). És per això que sabem que els quàsars, en la seva majoria, són uns fenòmens molt primitius: la llum que ens arriba ha hagut de recórrer molts anys llum per a arribar a nosaltres. Els quàsars poden ser detectats i ens donen evidència de la presència d'un forat negre supermassiu.

Els blàzars són també quàsars, però la diferència és que emeten un jet de llum que apunta en direcció a la Terra. Això provoca que puguem veure un objecte molt lluminós a la vegada que variant, ja que el jet va girant.



Imatge 13. Representació artística del quàsar 3C 279.

7.3. El telescopi i la càmera CCD

A l'Astronòmica de Sabadell disposaven d'un telescopi i una càmera CCD. Els telescopis són aparells que ens permeten veure objectes que es troben a grans distàncies. El telescopi de l'Astronòmica tenia un objectiu²⁰ amb un diàmetre de 0,5 m.

La càmera CCD és una càmera especial que serveix per a fer fotos del que capta el telescopi. Aquesta està incorporada al telescopi, i quan es connecta, la llum que entra a l'objectiu passa directament a la càmera CCD. Les càmeres CCD necessiten un temps d'exposició per a fer les fotos: permet captar més llum. En el cas del telescopi de Sabadell, podies fer fotos amb un temps d'exposició de 30 segons o de 60 segons.



Imatge 14. Telescopi de l'Astronòmica de Sabadell.

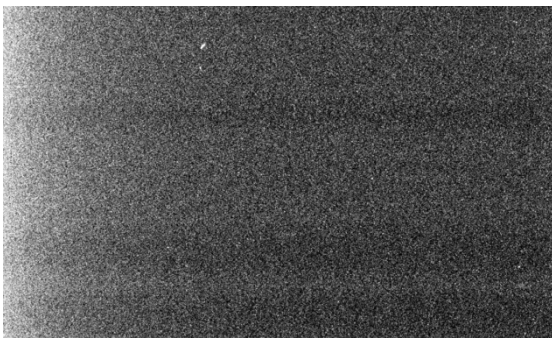
7.4. Flats i darks

Les imatges que obtenim amb la càmera CCD encara no poden ser analitzades, ja que necessiten ser pretractades per a poder veure tots els detalls. Per a pretractar les imatges cal fer *flats* i *darks*.

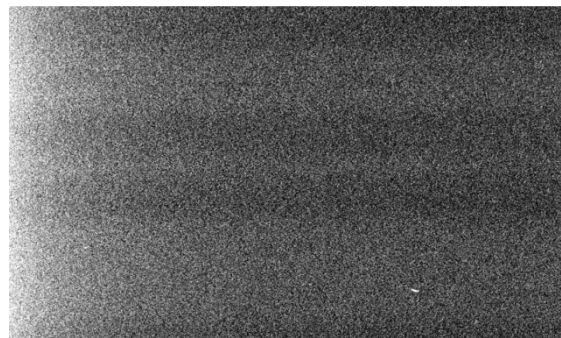
²⁰ Lent gran del telescopi per on entra la llum de l'exterior.

Els *flats* són unes imatges que es fan apuntant a una superfície llisa, es posa una llum i es fa la foto. Aquestes fotos serveixen per eliminar les taques de pols del telescopi que apareixen a la foto de l'espai, i es resten a la foto mitjançant un programa d'ordinador.

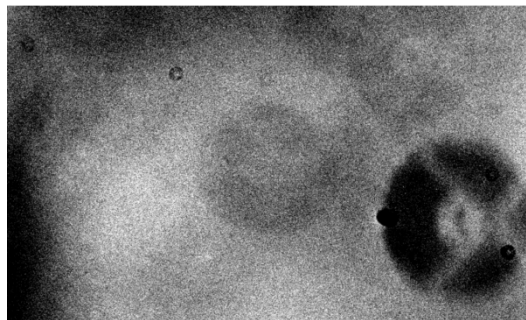
Els *darks* són fotos fetes amb la tapa posada al telescopi, són totalment fosques. Serveixen per a eliminar el soroll de fons que podem trobar a les fotos que fem, i d'aquesta manera queden unes imatges més nítides i més fàcils d'analitzar. Hi ha *darks* que corregeixen les fotos de l'espai i *darks* que corregeixen els *flats*.



Imatge 15. *Dark* que corregeix la foto del quàsar.



Imatge 16. *Dark* que corregeix al *flat*.



Imatge 17. *Flat* que corregeix la foto del quàsar.

7.5. El temps universal i el temps julià

En astronomia, observatoris d'arreu del món s'estan comunicant constantment. Per tal de no tenir problemes a l'hora de datar una imatge, es va establir el que es coneix com a temps universal i temps julià. El temps universal es correspon a 2 hores menys que l'hora catalana a l'estiu i 1 hora menys a l'hivern, és l'hora al meridià de Greenwich. El temps julià és una manera de donar la data, s'expressa en un número i els seus decimals²¹.

²¹ Convertidor a temps Julià: <https://bit.ly/2ZO1fL1>

7.6. Magnitud aparent i magnitud absoluta

Les magnituds en astronomia defineixen la brillantor dels astres. Existeix una escala que dona un valor a la brillantor de l'astre: quant més petit és el número, més brillant és l'astre. Quant més gran és el número, menys brillant és l'astre.

Es poden mesurar diferents magnituds, l'aparent i l'absoluta. La magnitud aparent (m) és la que es pot observar des de la Terra, com amb el nostre telescopi o a simple vista. L'ull humà pot captar les brillantor que arriben fins al 6, a partir d'aquí la llum és massa dèbil com per a poder-la captar. La magnitud absoluta (M) és la brillantor que tindrien els astres si els poséssim tots a la mateixa distància (10 pc^{22}).

Per al pretractament de les imatges que explicaré al punt 7.8. també és necessari saber que són els ADUs. Les càmeres CCD capten llum, i a causa de l'efecte fotoelèctric²³ aquesta es transforma en electrons. Quanta més llum es capta, més electrons. L'ordinador converteix aquests electrons captats en ADUs, per tant els ADUs són les unitats digitals dels fotons. És una forma de saber la quantitat de llum que hi ha en una imatge.

7.7. Coordenades equatorials: ascensió recta i declinació

En astronomia es fan servir les coordenades equatorials, definides per l'ascensió recta i la declinació.

L'ascensió recta és la ubicació de l'astre respecte el pla equatorial de la Terra. Es mesura en hores, minuts i segons, i és el punt que es troba més a prop de l'astre començant des d'un punt fix anomenat punt àries i anant en direcció cap al sud.

Per a mesurar la declinació es fa des del punt en què hem mesurat l'ascensió recta fins a l'astre, es mesura en graus.

²² El pàrsec (pc) és una unitat de mesura utilitzada en astronomia. $1 \text{ pc} = 3,08 \cdot 10^{16} \text{ m}$.

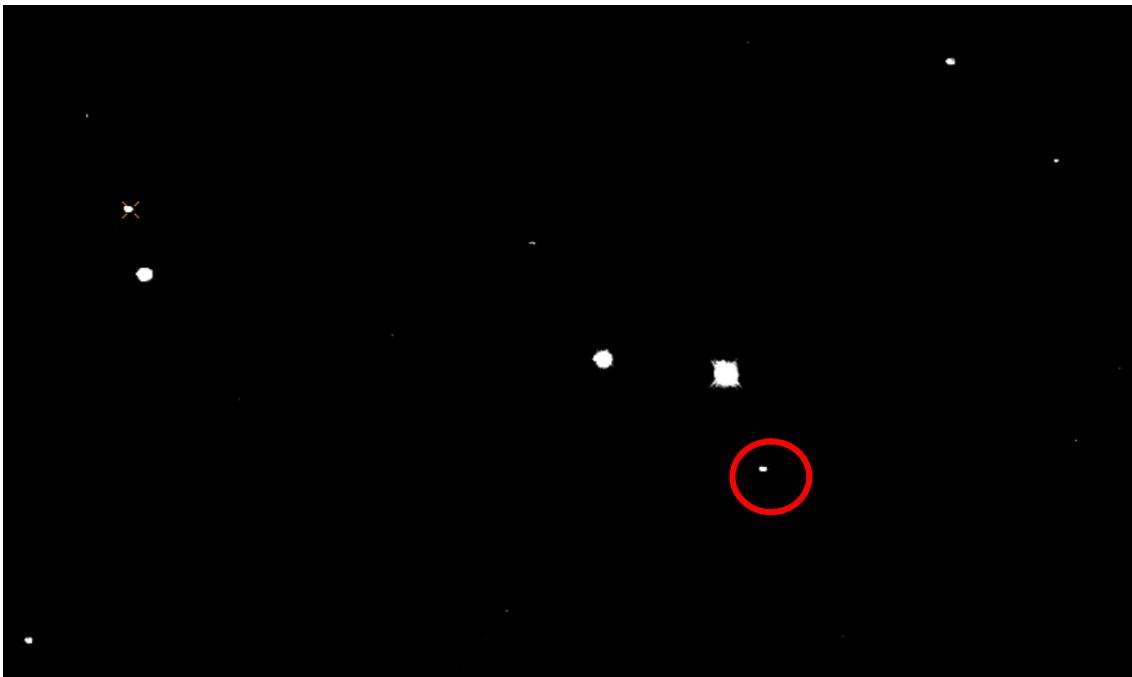
²³ És la capacitat de la llum per a alliberar electrons d'un metall.

7.8. Obtenció i anàlisi d'imatges del blàzar Markàrian 421

Tots els punts previs d'aquesta part pràctica han sigut breus explicacions teòriques sobre conceptes necessaris per a poder realitzar el procés d'obtenció d'imatges d'un blàzar. Durant el campus que he realitzat a l'Agrupació Astronòmica de Sabadell he après tot el procés necessari per a poder obtenir imatges de quàsars i blàzars, després analitzar-les i fer càlculs. Com he explicat, aquests quàsars i blàzars ens donen l'evidència de la presència d'un forat negre supermassiu, així que durant aquest campus he pogut detectar un forat negre supermassiu.

En aquest cas hem fotografiat el blàzar Markàrian 421 (abreviat Mrk 421), situat a uns 397-434 milions d'anys llum.

Tot i que jo m'he centrat en aquest blàzar en concret, en realitat aquest procés es fa servir per a observar diferents tipus d'astres.



Imatge 16. Imatge del blàzar Markàrian 421 (senyalitzat), realitzada a l'Astronòmica de Sabadell.

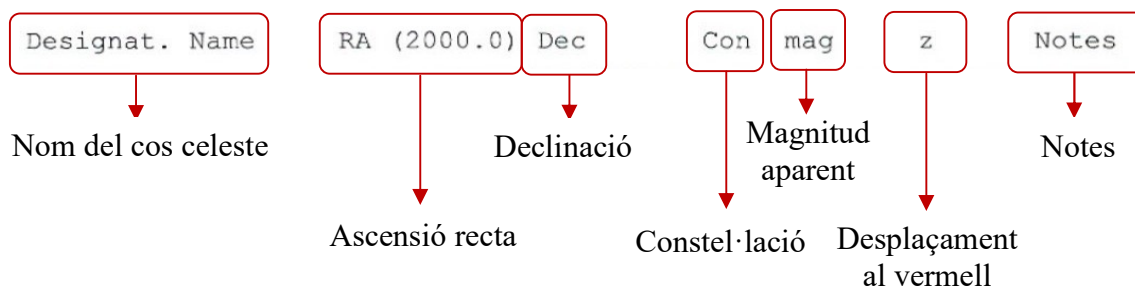
Buscar el quàsar o blàzar que volem observar al catàleg

Per a observar un quàsar o un blàzar primer és necessari saber quin volem observar. Existeixen molts catàlegs²⁴ realitzats per astrònoms i astrònomes en els quals es mostren quàsars, blàzars i altres astres, així com característiques d'aquests.

Designat.	Name	RA (2000.0)	Dec	Con	mag	z	Notes
0026+129	PG	00:29:13.7	+13:16:04	Psc	14.78	0.142	
0405-123	PKS	04:07:48.4	-12:11:37	Eri	14.82v	0.574	
0521-365	PKS	05:22:57.9	-36:27:31	Col	14.62v	0.061	BL
0537-441	PKS	05:38:49.8	-44:05:09	Pic	16:48v	0.894	br 12.1
0735+178	OI 158	07:38:07.4	+17:42:21	Gem	14.85v	0.424	BL
0754+100	OI 090.4	07:57:06.7	+09:56:34	Cnc	14.5v		BL
0754+394	1E	07:57:59.9	+39:20:27	Lyn	14.36	0.096	
0851+202	OJ 287	08:54:48.9	+20:06:32	Cnc	14.0v	0.306?	BL
1101+384	<u>Mrk 421</u>	11:04:27.3	+38:12:32	UMa	13.5v	0.031	BL br 12.0
1133+704	<u>Mrk 180</u>	11:36:26.8	+70:09:24	Dra	14.49v	0.046	BL
1219+755	Mrk 205	12:21:44.1	+75:18:37	Dra	14.5	0.070	
1226+023	<u>3C 273</u>	12:29:06.8	+02:03:07	Vir	12.86v	0.158	br 11.7
1253-055	3C 279	12:56:11.2	-05:47:21	Vir	17.75v	0.538	br 11.0
1351+640	PG	13:53:15.8	+63:45:45	Dra	14.84	0.088	
1510-089	PKS	15:12:50.6	-09:06:00	Lib	16.52v	0.361	br 11.6
1514-241	AP Lib	15:17:41.8	-24:22:19	Lib	14.8v	0.049	BL
1634+706	PG	16:34:29.0	+70:31:32	Dra	14.90p	1.334	
1652+398	Mrk 501	16:53:52.2	+39:45:37	Her	13.88v	0.034	BL
2155-304	PKS	21:58:51.9	-30:13:30	PsA	13.09v	0.17	BL
2200+420	BL Lac	22:02:43.3	+42:16:40	Lac	14.72v	0.07	BL

Imatge 17. Exemple d'un catàleg, en aquest cas hi figuren els quàsars i blàzars més brillants. El blàzar Mrk 421 està subratllat (també el quàsar 3C 273).

Per a passar al següent pas és important saber quines són les coordenades de l'astre que volem observar. A continuació, es mostra un petit esquema on s'indica a què es correspon cada columna del catàleg.



Esquema 1. Significat dels apartats d'un catàleg d'astres.

²⁴ Exemple de catàleg: <https://bit.ly/2ZTfIwI>.

Comprovar si podem observar el blàzar des d'on estem

Hi ha molts objectes que podem observar a l'Univers, però no tots es poden veure des de cada part del món en un moment concret. En aquest cas, vam haver de comprovar si podíem veure l'Mrk 421 el dia 10 de juliol a les 23:00 h aproximadament des de l'observatori de Sabadell. Per a això, es fa servir la pàgina web Staralt²⁵, on es posen les coordenades del telescopi i les coordenades del blàzar. Si resulta que el blàzar es troba a una altura inferior a 30° no el podem veure bé, ja que com més a l'horitzó apunta el telescopi, més atmosfera i contaminació es troba. També haurem de veure que no es trobi molt a prop de la Lluna, ja que aquesta podria molestar a l'observació del blàzar.

The screenshot shows the 'Object Visibility – STARALT' web page. It includes a descriptive paragraph about the program's capabilities and a form with the following sections:

- Mode:** A dropdown menu set to 'Staralt'.
- Night:** Fields for month (July), day (15), and year (2020), with a note: 'or date when the local night starts. Staralt, Startrack only.'
- Observatory:** A dropdown menu set to 'Roque de los Muchachos Observatory (La Palma, Spain)'. Below it, instructions to 'Select one above or specify your own site with this format: Longitude(°E) Latitude(°N) Altitude(metres) UT-offset(hours)' and an example: 'Ex.: 289.2767 -30.2283 2725 -4'.
- Coordinates:** A text area with instructions on coordinate formats: 'name hh mm ss ±dd mm ss', 'name hh:mm:ss ±dd:mm:ss', and 'name ddd.ddd dd.ddd'. It also states: 'name must be a single word with no dots, avoid using single numbers. Every entry must be in the same format, do not use different formats with different entries. We recommend a maximum of 100 targets per submission.' Below the text area, there is a note: 'Alternatively, you can upload a file with coordinates. You can use the same format as in the TCS catalog. Target names must be single words with no dots.' and a file selection button labeled 'Seleccionar archivo' with the status 'No se eligió archivo'.

Imatge 18. Pàgina web Staralt.

També haurem de comprovar el temps que fa el dia de l'observació, ja que en cas de que hi hagi mal temps, l'observació es tornarà més complicada o impossible. Per això, anem a la pàgina web Meteoblue²⁶, en la que hi ha un apartat dedicat a l'observació d'astres. Per a arribar-hi seguim les següents passes: outdoor & sports > astronomical seeing. Aleshores, al botó on posa "location search" escrivim Sabadell (en aquest cas).

²⁵ Enllaç Staralt: <https://bit.ly/3kxJqFl>

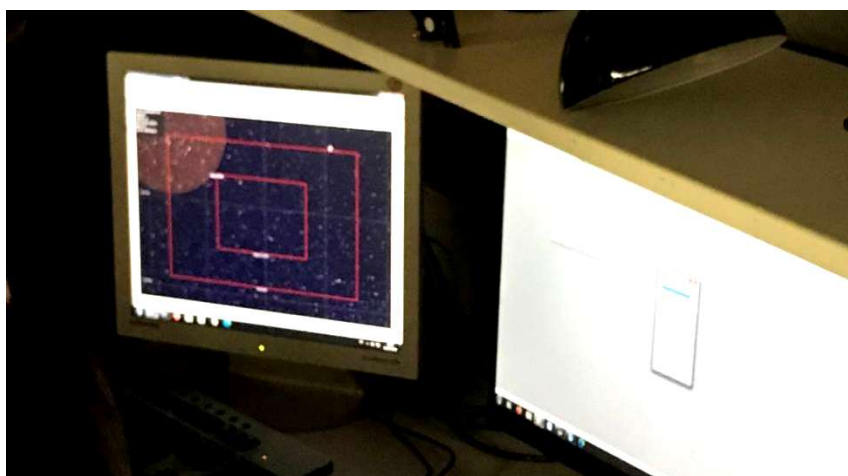
²⁶ Enllaç "astronomical seeing, meteoblue" a Sabadell: <https://bit.ly/2FC5kZu>



Imatge 19. Pàgina web Meteoblue - astronomical seeing d'un dia concret a Sabadell.

Ajust i preparació del telescopi

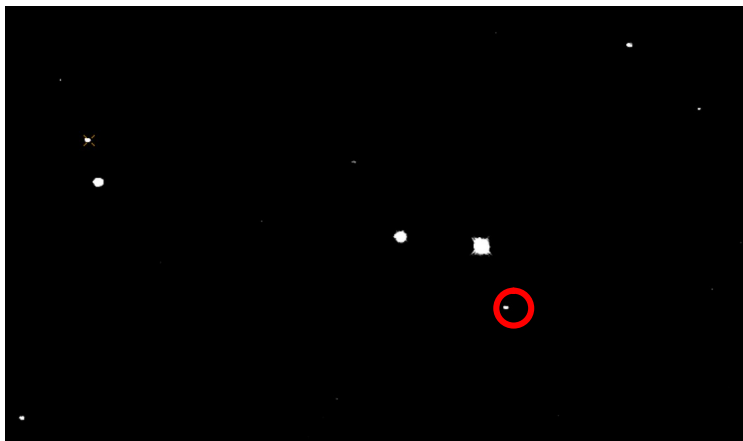
Ara que ja tenim la informació necessària per a fer les fotos del blàzar Mrk 421, hem de configurar el telescopi. Per a aquesta part del treball, vaig pujar a l'última planta de l'edifici de l'observatori, on es troba el telescopi. Un cop allà, vam apagar les llums i vam encendre els ordinadors. Primer de tot hem d'obrir la cúpula que rodeja el telescopi per a que aquest pugui apuntar a l'espai. Aleshores, vam anar als ordinadors de la sala i vam connectar el telescopi a l'ordinador. Mitjançant un programa que ja tenien instal·lat els de l'observatori, vam introduir les coordenades corresponents al blàzar Mrk 421. El telescopi es va començar a moure apuntant cap a on havíem indicat, i un cop ubicat, li vam donar l'ordre de fer una foto. Aquesta foto ens serviria per a veure cap a on apunta exactament el telescopi i poder ajustar-lo per a que el blàzar quedi centrat.



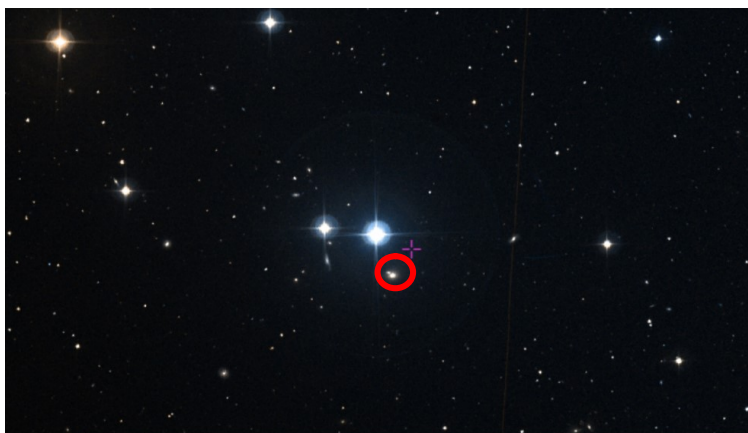
Imatge 20. A l'ordinador de l'esquerra veiem el que veu el telescopi.

Identificació del blàzar i ajust de la imatge

Ara ja tenim una imatge, però a la foto no només veurem el blàzar, sinó que també veurem altres astres. Per a saber quin d'ells és el nostre blàzar farem servir la pàgina web Aladin²⁷. Aquesta web és un catàleg d'una gran quantitat d'astres, amb un mapa de l'espai per el qual ens podem desplaçar. Si cliquem sobre un astre ens donarà informació sobre quin és, les seves coordenades, la seva magnitud... Primer el que hem de fer és introduir al cercador el nom del nostre blàzar, l'Mrk 421. Ens portarà directament a la seva ubicació, i per tant el podrem veure indicat al mapa. Ara hem de comparar la imatge que hem fet amb el telescopi amb la imatge del blàzar a l'Aladin. Hem de buscar les similituds per a poder saber quin és el blàzar a la nostra foto, pot ser que haguem de rotar la imatge que hem fet. Un cop hem identificat el nostre blàzar a la foto, hem d'ajustar el telescopi per a que el blàzar quedi centrat.



Imatge 21. Imatge de l'Mrk421 feta amb el telescopi de Sabadell. Blàzar senyalitzat.



Imatge 22. Imatge de l'Mrk421 a la pàgina web Aladin. Blàzar senyalitzat.

²⁷ Enllaç Aladin: <https://bit.ly/2HUNt0v>

Realització de les imatges del blàzar, més els *flats* i els *darks*

Ara que ja tenim el blàzar centrat, comencem a fer les fotos d'aquest. Fem unes quantes fotos, nosaltres en vam fer 10. Aquestes s'han de fer amb un temps d'exposició de 60 segons perquè siguin més detallades. També haurem de fer *flats* i *darks*, en concret 10 de cada. Un cop fetes totes les fotos, els posem nom:

- Imatges del blàzar: (QSR o BL)_(nom de l'astre)_R_(temps d'exposició)_(número de la imatge).
Exemple: BL_Mrk421_R_60s_001
- *Flats*: FFF_5s_R_(número de la imatge).
Exemple: FFF_5s_R_001
- *Darks* de la imatge del blàzar: CDO_60s_(número de la imatge)
Exemple: CDO_60s_001
- *Darks* dels *flats*: CDO_5s_(número de la imatge)
Exemple: CDO_5s_001

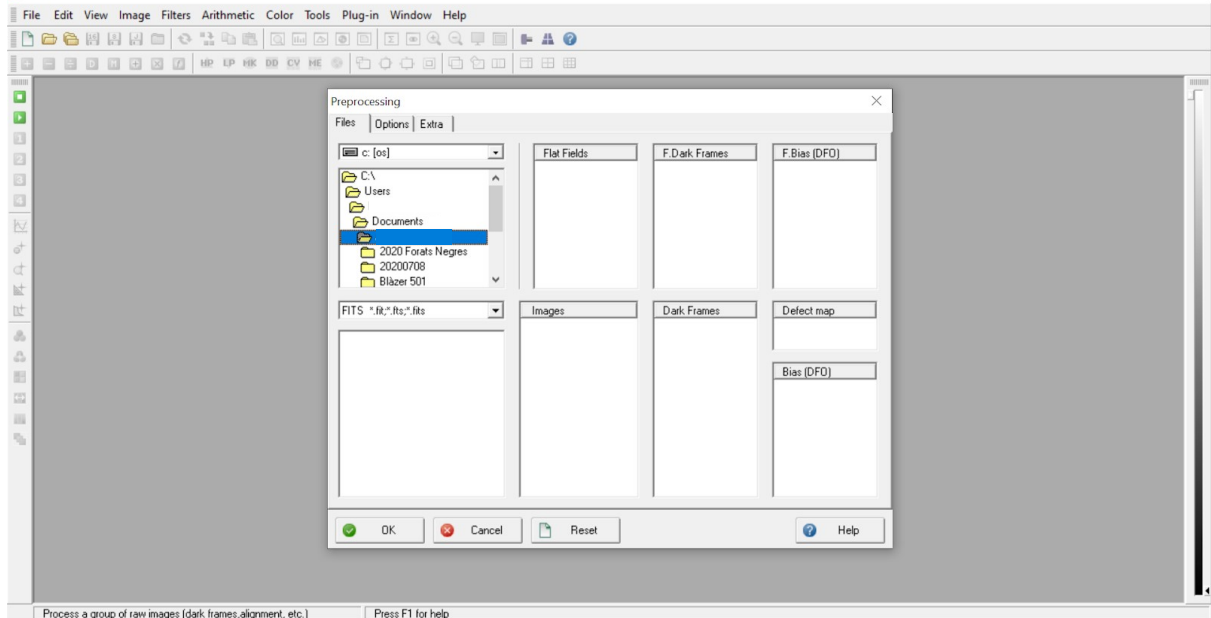
Totes les imatges tenen el format .fit, que només es pot obrir amb l'aplicació Astroart.



Imatge 23. Imatge de l'Mrk 421 realitzada amb el telescopi i la càmera CCD (a Sabadell) sense pretractar.

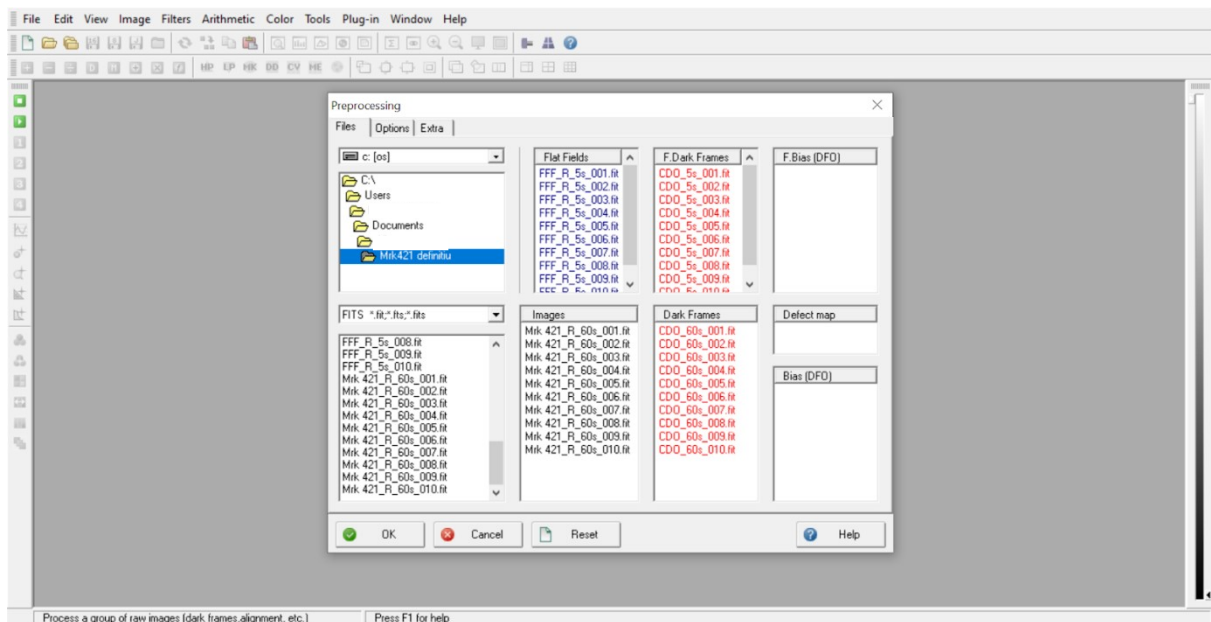
Pretractament de les imatges

Tenim les fotos fetes, però ara hem d'ajuntar-les amb els *flats* i els *darks* per a obtenir imatges nítides. Per a realitzar-ho, anirem a l'aplicació Astroart. Clicarem en una icona en la que hi figura una carpeta, i ens apareixerà la següent pestanya.



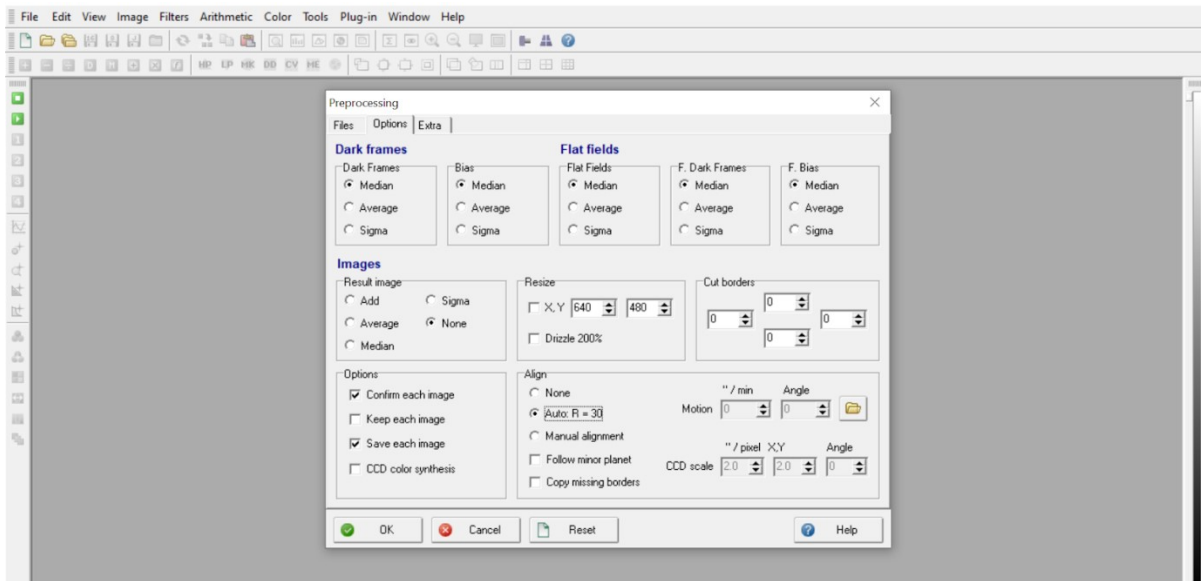
Imatge 24. Astroart. Seleccionem la carpeta on tenim les imatges.

Obrirem la carpeta on tenim les imatges del telescopi, inclosos *darks* i *flats*. Col·locarem els arxius de la següent manera:



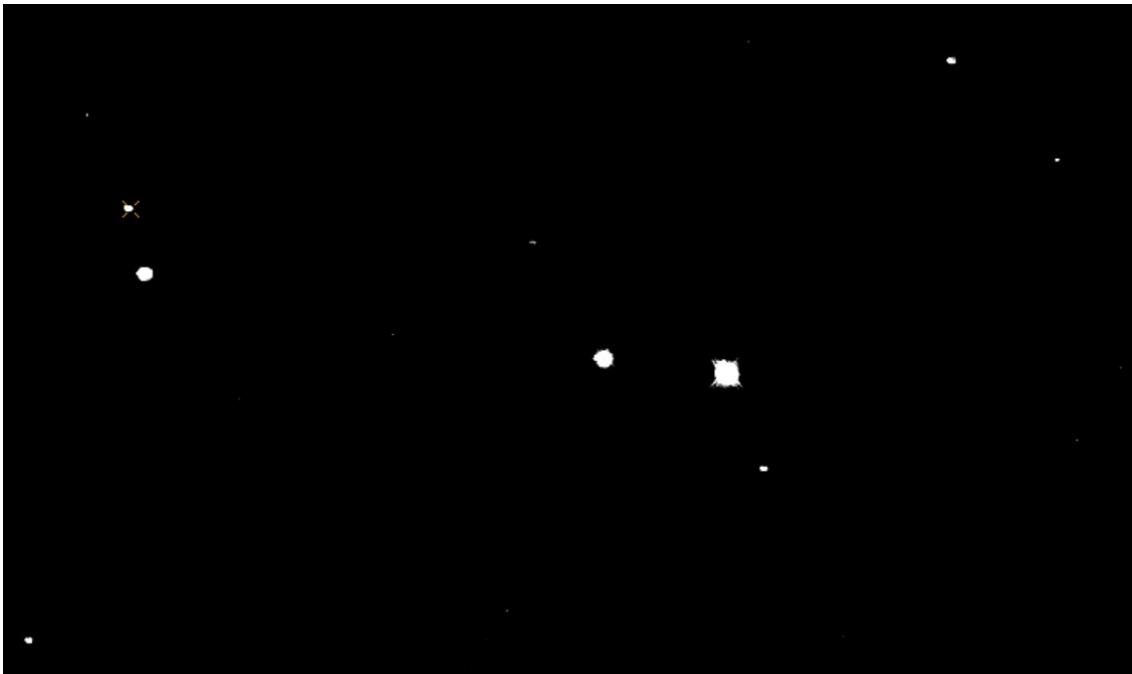
Imatge 25. Astroart. Col·loquem els arxius a la casella corresponent.

Anem a la pestanya on posa “options” i ho configurem de la següent manera:



Imatge 26. Astroart. Configurem tal com s'indica

Finalment, li donem a “OK” i ens pretractarà totes les fotos. Les imatges ja pretractades, és a dir, més nítides i sense soroll de fons, se'ns guardaran a l'ordinador en format .fit i amb una “_P” al final del nom de l'arxiu.



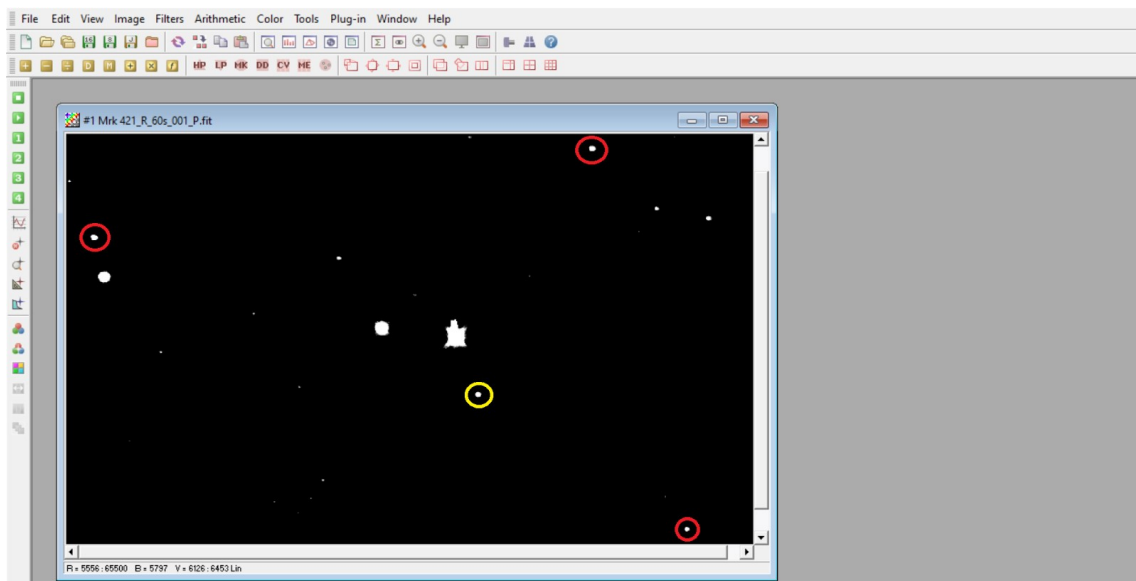
Imatge 27. Imatge de l'Mrk421 realitzada amb el telescopi i càmera CCD (a Sabadell) ja pretractada.

Càlcul de la magnitud aparent del blàzar

Ja sabem quin és el nostre blàzar a la imatge, però ara volem calcular la seva magnitud aparent, és a dir, la seva brillantor. Per a fer-ho, primer hem d'entrar a l'Aladin i anar on es troba el nostre blàzar. A continuació, haurem de triar 3 estrelles que apareguin a la imatge que hem pretractat que tinguin una brillantor semblant a la del nostre blàzar. Un cop triades, les seleccionem a l'Aladin i apuntem la magnitud aparent de cadascuna.



Imatge 28. Imatge de l'Mrk421 estreta d'Aladin amb les 3 estrelles senyalitzades en vermell i el blàzar en groc.



Imatge 29. Imatge de l'Mrk421 feta a Sabadell. L'arxiu està obert a l'Astroart. Les 3 estrelles es senyalitzen en vermell i el blàzar en groc.

Per fer els càlculs necessitarem obrir un full de càlcul i col·locar les següents caselles :

REDUCCIO FOTOMETRICA									
Mag Estels de comparació					Omplir només taules en blau Resultats al full següent				
Estel 1									
Estel 2									
Estel 3									
Data juliana		ADU 0	ADU C1	ADU C2	ADU C3				
Estel	Mag Catàleg	Mag mesurada	Diferència C-M	Dev Est Cs	#DIV/0!				
C1	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	Coeff correl	#VALOR!				
C2	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!						
C3	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!						
m 0	m 1	m 2	m 3	Offset 1	Offset 2	Offset 3	Offset promig	m 1 av	#DIV/0!
								m 2 av	#DIV/0!
								m 3 av	#DIV/0!

Imatge 30. Full de càlcul per a calcular la magnitud aparent de l'Mrk421.

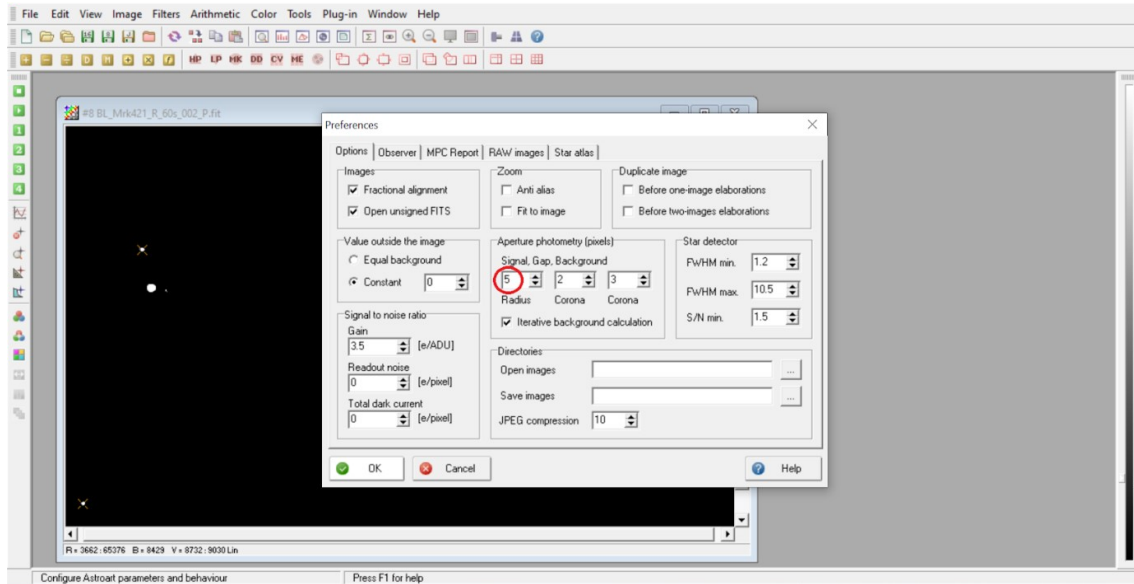
Les úniques caselles que haurem d'omplir amb els nostres valors són les que estan amb un color blau. Les altres caselles ja estan preparades pel propi campus de l'observatori amb els càlculs necessaris per a conèixer la magnitud del blàzar. Ara omplirem les caselles on posa "Mag. Estels de comparació" amb les magnituds dels estels que hem apuntat des de l'Aladin.

A la casella on posa "data juliana" haurem de posar la data juliana a la què es va fer la foto del blàzar. A l'Astroart haurem d'entrar on posa "Heather FITS" i després copiar el número que apareix a la fila JD. Enganxarem aquest mateix número a la casella.

Header #1 Mrk 421_R_60s_001_P.fit	
SIMPLE	= T
BITPIX	= 16
NAXIS	= 2
NAXIS1	= 768
NAXIS2	= 512
BZERO	= 32768.0
EXPOSURE	= 60.0
TEMPERAT	= -14.901000000000000
DATE-OBS	= '2020-07-10T21:27:50.8' / UT
JD	= 2459041.39433900000
DATE-LOC	= '2020-07-10T23:27:50.8' / LT
FILTER	= 'R'

Imatge 31. Astroart. Data juliana senyalitzada.

Finalment, anirem a l'Astroart i seleccionarem les 3 estrelles de comparació i el blàzar. Un cop seleccionades, anirem a la pestanya de l'Astroart on posa "files". Aleshores cliquem on posa "preferences" i posarem el número 4 o 5^{28} on posa "radius".



Imatge 32. Configuram l'Astroart com s'indica a la imatge.

Ara el que necessitem saber són els ADUs de les 3 estrelles i el blàzar, i això ho podem mirar a l'Astroart, clicant a la icona que posa "stars". Ens fixem en la columna que posa ADU.

N#	Xc	Yc	ADU	A	P	R.A.°	DEC.°
1	31.17	363.33	85904				
2	576.19	460.95	58183				
3	680.64	43.05	25754				
4	451.68	191.05	41184				

Imatge 33. Taula de l'Astroart on s'indiquen diferents dades. Ens fixem en la columna que posa ADU.

²⁸ Depèn de quan la corba de creixement s'estabilitza. Per a mirar-ho, anem a Tools > Growth curve.

Posem els ADUs de les 3 estrelles i el blàzar a les caselles blaves que posen ADU 0, ADU 1, etc. A l'ADU 0 posarem els ADUs del blàzar, en aquest cas, com ha sigut l'últim que he seleccionat a l'Astroart, és l'última fila de la taula d'ADUs que hem vist abans. A l'ADU 1 posarem la primera estrella que hem seleccionat, a l'ADU 2 la segona, etc. Finalment, ens hauria de quedar el full de càlcul d'aquesta manera:

REDUCCIÓ FOTOMÈTRICA									
Mag Estels de comparació					Omplir només taules en blau Resultats al full següent				
Estel 1	11,107								
Estel 2	12,301								
Estel 3	11,034								
Data juliana					ADU 0	ADU C1	ADU C2	ADU C3	
2459041,39434					41184	85904	58183	25754	
Estel	Mag Catàleg	Mag mesurada	Diferència C-M		Dev Est Cs	1,09025230503			
C1	11,11	10,904	0,203		Coef correl	-0,24976961417			
C2	12,30	11,327	0,974						
C3	11,03	12,212	-1,178						
m0	m1	m2	m3	Offset 1	Offset 2	Offset 3	Offset promig	m1 av	-12,335
-11,537	-12,335	-11,912	-11,027	23,44	24,21	22,06	23,24	m2 av	-11,912
								m3 av	-11,027

Imatge 34. Omplim les caselles del full de càlcul.

Repetirem aquest mateix procés amb unes 5 fotos que hem pretractat anteriorment del blàzar per tal d'obtenir un resultat més fiable.

REDUCCIÓ FOTOMÈTRICA									
Mag Estels de comparació					Omplir només taules en blau Resultats al full següent				
Estel 1	11,107								
Estel 2	12,301								
Estel 3	11,034								
Data juliana					ADU 0	ADU C1	ADU C2	ADU C3	
2459041,39434					41184	85904	58183	25754	
2459041,39505					41528	84857	57741	25416	
2459041,39576					42332	87131	59172	25229	
2459041,39648					42035	79194	58648	26092	
2459041,39720					42753	80098	59567	25784	
Estel	Mag Catàleg	Mag mesurada	Diferència C-M		Dev Est Cs	0,92472020202			
C1	11,11	10,927	0,180		Coef correl	-0,27648931086			
C2	12,30	11,309	0,992						
C3	11,03	12,207	-1,173						
m0	m1	m2	m3	Offset 1	Offset 2	Offset 3	Offset promig	m1 av	-12,303
-11,537	-12,335	-11,912	-11,027	23,44	24,21	22,06	23,24	m2 av	-11,921
-11,546	-12,322	-11,904	-11,013	23,43	24,20	22,05	23,23	m3 av	-11,023
-11,567	-12,350	-11,930	-11,005	23,46	24,23	22,04	23,24		
-11,559	-12,247	-11,921	-11,041	23,35	24,22	22,08	23,22		
-11,577	-12,259	-11,938	-11,028	23,37	24,24	22,06	23,22		

Imatge 35. Omplim les caselles del full de càlcul.

Finalment, anem a la pestanya del full de càlcul on posa “Resultats”. Si hi anem, veurem quin és el resultat final de la magnitud del blàzar, junt amb l’error que pot haver tingut el seu càlcul.

Dia Julià	Magnitud	Error est	Mitjana
2459041,39434	11,702	0,005	11,672
2459041,39505	11,681	0,005	
2459041,39576	11,676	0,005	
2459041,39648	11,658	0,005	
2459041,39720	11,645	0,005	

Imatge 36. Resultat del càlcul.

Com podem veure, els càlculs que he realitzat m’han donat com a resultat que la magnitud aparent del blàzar Mrk 421 és **11,672**, amb un error de 0,005. Anirem a l’Aladin i comprovarem quina és la seva magnitud en realitat.

En aquest cas, la seva magnitud en realitat és de 12,004. Hi ha hagut un petit error, però més o menys hem pogut estimar la magnitud aparent del blàzar Mrk 421 a partir d’una imatge feta amb el telescopi.

7.9. Càlcul de dades físiques del blàzar

- *Càlcul de la magnitud absoluta del blàzar i la distància a la que es troba*

La fórmula de la magnitud absoluta d'un astre tenint en compte la distància i la magnitud aparent és la següent:

$$M = m - 5 \log d + 5$$

On **M** és la magnitud absoluta, **m** és la magnitud aparent i **d** la distància.

Anem a la web Aladin i seleccionem el nostre blàzar, l'Mrk 421. Mirem a quina distància es troba (128.000.000 pc), i a partir d'aquí calculem la magnitud absoluta. El resultat dona **-23,86**. Com veiem, l'astre en realitat és molt brillant però veiem la llum més dèbil perquè es troba molt lluny de nosaltres.

En cas de que volguéssim calcular la distància a la que es troba el blàzar hauríem de saber la magnitud aparent i absoluta de l'astre, aïllaríem la distància i ens quedaria la següent fórmula:

$$d = 10^{\frac{5+m-M}{5}}$$

- *Càlcul de la lluminositat del blàzar*

És la quantitat d'energia emesa per un astre en un període de temps, la unitat és el Watt (W). La fórmula que farem servir és la següent:

$$L = 10^{\frac{M-M_s}{-2,5}} \cdot L_s$$

On **L** és la lluminositat de l'astre, **M** és la magnitud absoluta de l'astre, **M_s** és la magnitud absoluta del Sol i **L_s** és la lluminositat del Sol.

Com a dades tenim que $M_s=4,8$ i que $L_s=3,846 \cdot 10^{26}$ W, i com ja ho hem calculat abans sabem que $M=-23,86$. Quan ho calculem veiem que la lluminositat de l'Mrk421 és de **$1,119 \cdot 10^{38}$ W**, aproximadament $2,9 \cdot 10^{11}$ vegades més lluminós que el Sol.

- *Càlcul de la massa mínima del forat negre*

Per últim, farem una estimació de la massa mínima que pot tenir el forat negre que origina el blàzar, el que es coneix com a massa d'Eddington. La fórmula és la següent:

$$M_{ed} = 0,3 \cdot 10^{-4} \cdot L$$

On M_{ed} és la massa d'Eddington i L és la lluminositat del blàzar expressada en lluminositats solars ($L_s = 3,846 \cdot 10^{26}$ W).

Com ja sabem que la lluminositat del blàzar és $2,9 \cdot 10^{11}$ vegades més gran que la del Sol, sabem que $L = 2,9 \cdot 10^{11} L_s$. Realitzem els càlculs i ens dona que la massa mínima del forat negre és aproximadament de **8.700.000 masses solars**²⁹. Com podem comprovar, es tracta d'un forat negre supermassiu.

- *Càlcul del radi d'Schwarzschild*³⁰

El definim com el radi en el qual hauria d'estar comprimida una massa per a que la seva velocitat d'escapament sigui superior a la de la llum, és a dir, per a que esdevingui un forat negre. Per tant, ens diu la distància que hi ha des del centre del forat negre (singularitat) fins a l'horitzó d'esdeveniments. Aquest radi té la següent fórmula:

$$R_s = \frac{2Gm}{c^2}$$

On R_s és el radi d'Schwarzschild, G és la constant de gravitació universal, m és la massa de l'objecte i c és la velocitat de la llum.

Fent servir la massa que hem calculat anteriorment, 8.700.000 masses solars, és a dir, $1,74 \cdot 10^{37}$ kg, calcularem el radi d'Schwarzschild. Aquest ens dona aproximadament **$2,58 \cdot 10^{10}$ m**, per tant, l'horitzó d'esdeveniments d'aquest forat negre supermassiu mesura aproximadament $2,58 \cdot 10^{10}$ m de radi, com a mínim.

²⁹ Equivalència a quilograms: $1,74 \cdot 10^{37}$ kg

³⁰ Aquest càlcul és aplicable a forats negres d'Schwarzschild. En aquest cas, estem suposant que el forat negre que estem fent servir per a fer els càlculs és d'Schwarzschild, tot i que és poc probable.

8. Conclusions

Al llarg d'aquest treball he anat assolint cadascun dels objectius que m'he proposat, i finalment he pogut extreure les següents conclusions.

Com a principal objectiu d'aquest treball m'he plantejat la següent hipòtesi: puc detectar un forat negre amb un telescopi i realitzar fotografies d'aquest? Finalment, ha resultat que **he pogut detectar un forat negre supermassiu** amb un telescopi. A més, tot i no poder fotografiar el forat negre directament, **he pogut fotografiar el blàzar que aquest emet**.

Durant el campus a l'Astronòmica de Sabadell vaig poder detectar i localitzar un forat negre supermassiu gràcies al blàzar que aquest emet, i he pogut realitzar fotografies del blàzar Markàrian 421. Vaig aprendre tots els preparatius que s'havien de fer previs a la presa de la fotografia, així com el pretractament per a que puguin ser analitzades. Aquest objectiu l'he pogut assolir a mitges, ja que tot i no poder fotografiar el forat negre, he pogut localitzar-lo gràcies al blàzar que emet i realitzar fotografies del blàzar.

Un objectiu important d'aquest treball és el d'explicar els forats negres de forma entenedora. Aquest ha estat un objectiu difícil d'assolir, ja que els forats negres és un tema que té un cert grau de complexitat ja que s'expliquen a través de teories bastant actuals i difícils d'entendre per una persona amb uns coneixements limitats de física. No obstant, he fet el possible per a que el lector pugui acabar entenent els forats negres sense tenir coneixements previs sobre aquests. Considero que he sigut capaç d'assolir aquest objectiu, ja que he pogut explicar la informació utilitzant un registre amè, evitant l'ús excessiu de tecnicismes, cosa que pot ajudar al lector a entendre millor la informació. A més, he pogut sintetitzar la informació de forma que al treball només hi figuri allò més important, evitant incloure detalls innecessaris.

Com a tercer objectiu m'he proposat obtenir nous coneixements sobre les dues teories que són objecte d'estudi actualment: la Teoria de la Relativitat i la mecànica quàntica. Com he explicat durant el treball, la relativitat i la quàntica són dues teories molt importants actualment, són bastant recents, i per tant encara no estan del tot

perfeccionades. Entre elles es contradiuen, per tant un objectiu molt important actualment per a la comunitat científica és la formulació d'una teoria que unifiqui aquestes dues, i d'aquesta manera, poder entendre millor l'Univers. El forat negre és un fenomen amb el qual es pot observar molt clarament la contradicció entre la quàntica i la relativitat, per això és important desxifrar-lo. Puc afirmar que he après molt sobre aquest tema, i sento que després d'haver realitzat aquest treball entenc molt millor l'Univers i el seu funcionament.

El quart objectiu que m'he proposat és el de poder aprendre com treballen les científiques i científics que es dediquen a l'astronomia i les seves branques. Gràcies al campus al qual vaig assistir, he après quins procediments s'han de seguir per tal de fer una observació o un seguiment d'un astre. He après que hi ha unes normes comunes entre tots els observatoris astronòmics d'arreu del món, com per exemple el temps Universal i la data juliana. També he après com es prepara l'observació d'un fenomen del cosmos. He pogut assolir aquest objectiu, sobretot gràcies a la part pràctica que vaig realitzar a l'Astronòmica de Sabadell, ja que vaig poder viure en primera persona la feina que realitzen astrònoms i astrònomes arreu del món. Puc concloure que l'observació del cosmos té molta feina al darrera, ja que s'ha de fer molta recerca abans de començar una sessió d'observació.

Finalment, el cinquè i últim objectiu consisteix en poder calcular matemàticament diversos paràmetres que defineixen un forat negre. Es podien fer diferents càlculs, però primer va ser necessari calcular la magnitud aparent a partir de les fotografies de l'Mrk 421. Aquest és un procés molt llarg en el qual s'han de mesurar diverses característiques de la imatge. Una vegada calculada la magnitud aparent ja es poden calcular moltes característiques del forat negre i el seu blàzar. S'ha de dir que tots els càlculs realitzats són estimacions, però em va sorprendre la quantitat de paràmetres que es poden calcular d'un objecte tan llunyà a partir d'una sola imatge.

Realitzar el meu treball de recerca sobre els forats negres ha sigut molt bo per mi i la meva indecisió de cara al meu futur acadèmic. Abans del treball no tenia clar cap a quina branca de les ciències m'anava a decantar, però al llarg del treball he començat a veure més clar que la física és de les meves ciències preferides. A més, també m'he adonat de com m'apassiona l'Univers, i al llarg de 2n suposo que acabaré de decidir

quina carrera m'agradaria fer, però gràcies a aquest treball ja tinc les meves opcions més concretades. Personalment, el tema dels forats negres m'ha semblat fascinant, més del que em pensava. Tant la part pràctica com la teòrica les he trobat molt interessants i a més he après moltes altres coses sobre temes d'astronomia o de física.

9. Fonts documentals

Llibres

- CATALÀ, Joan Anton. *100 qüestions sobre l'Univers*. Valls: Cossetània Edicions, 2018.
- GALFARD, Christophe. *El Universo en tu mano*. Barcelona: Blackie books, 2016.
- HAWKING, Stephen. *Agujeros negros*. Barcelona: Crítica, 2017.
- ORTEGA, Juan Carlos. *El Universo para Ulises*. Barcelona: Planeta, 2013.

Revistes

- GIDDINGS, Steven B., “Cómo fugarse de un agujero negro”. *Investigación y ciencia*, núm. 521, (febrer 2020), p. 18-25.
- PRIYAMVADA, Natarajan., “Los primeros agujeros negros supermasivos”. *Investigación y ciencia*, núm. 499, (abril 2018), p. 18-23.
- RUIZ, Manuel., “Cazadores de agujeros negros”. *Muy interesante*, núm. 472, (agost 2020), p. 86-93.

Pàgines web

- Desconegut. *Reacciones nucleares*.
http://atenea.pntic.mec.es/Antares/modulo3/m3_u303.html [Consulta: 29 de juny del 2020]
- GEFTER, Amanda. *El extraño destino que enfrentarías si cayeras en un agujero negro*.
https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/06/150531_vert_earth_que_pasa_si_caes_agujero_negro_yv [Consulta: 11 de juliol de 2020]
- GIDDINGS, Steven B. *¿Qué es el espaciotiempo?*.
<https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/la-historia-secreta-del-sol-742/qu-es-el-espaciotiempo-16623> [Consulta: 10 de maig de 2020]
- HERAS, Antonio. *La evaporación de los agujeros negros*.
https://antonioheras.com/el_universo/evaporacion-de-los-agujeros-negros.htm
[Consulta: 13 de juny del 2020]

- Redacció de National Geographic. *Agujeros negros*.
<https://www.nationalgeographic.es/espacio/agujeros-negros> [Consulta: 23 de maig de 2020]
- Redacció de la NASA. *¿Qué son los agujeros negros?*.
https://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/black_hole_description.html
[Consulta: 30 de maig del 2020]
- Redacció de National Geographic. *Supernova*.
<https://www.nationalgeographic.es/espacio/supernova> [Consulta: 27 de juny del 2020]
- VILLATORO, Francis. *La espaguetització cerca de un agujero negro*.
<https://culturacientifica.com/2017/12/22/la-espaguetizacion-cerca-agujero-negro/>
[Consulta: 11 de juliol del 2020]

A més, l'Astronòmica de Sabadell em va proporcionar uns documents redactats per ells dels quals he pogut extreure informació per al meu treball.

A part d'aquestes fonts, també he afegit molta informació que vaig aprendre durant la meva estada al campus de l'Astronòmica de Sabadell. Allà vaig assistir a unes classes de teoria sobre els forats negres (principalment), cosa que em va aportar molta nova informació per a incloure al treball. A més, la font principal de la part pràctica d'aquest treball és l'Astronòmica de Sabadell, on se'm van explicar tot el procés d'obtenció i anàlisi d'imatges que conforma la part pràctica.

9.1. Font de les imatges

- Imatges 1, 12, 18 i 41. Font: Viquipèdia.
- Imatge 2. Font: ESA (European Space Agency).
- Imatges 3, 6 i 9. Font: NASA.
- Imatge 4. Font: Astronomy (revista) i elaboració pròpia.
- Imatge 5. Font: Biography.
- Imatge 7. Font: ABC.
- Imatge 8. Font: Icarus Noticias.
- Imatge 10. Font: desconeguda i elaboració pròpia.

- Imatge 11. Font: Muy interesante (revista).
- Imatge 13. Font: ESO (European Southern Observatory).
- Imatges 14, 15, 16, 17, 19, 20, 24, 26 i 30. Font: elaboració pròpia (Astronòmica de Sabadell).
- Imatge 18. Font: captura de pantalla (elaboració pròpia) de la pàgina web Staralt.
- Imatge 19. Font: captura de pantalla (elaboració pròpia) de la pàgina web Meteoblue.
- Imatges 23 i 40. Font: elaboració pròpia.
- Imatges 25 i 31. Font: captura de pantalla (elaboració pròpia) de la pàgina web Aladin.
- Imatges 27, 28, 29, 32, 34, 35 i 36. Font: captura de pantalla (elaboració pròpia) del programa Astroart.
- Imatges 33, 37, 38 i 39. Font: captura de pantalla (elaboració pròpia) del full de càlcul.

10. Annex

Aquest treball consta d'un Annex en el qual s'inclou una ampliació d'alguns punts del treball. Aquest Annex serveix per a complementar els punts que s'han explicat prèviament.

10.1. Teories relativistes (ampliació)

Al segle XX, el físic teòric Albert Einstein (1879-1955) va revolucionar la física tal i com la coneixem. Einstein va guanyar el Premi Nobel de Física l'any 1921 per les seves aportacions sobre física teòrica i sobretot pel descobriment de l'efecte fotoelèctric.

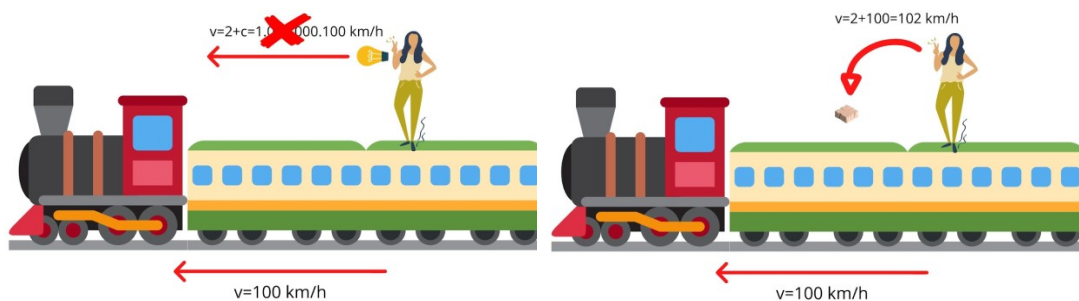
Va publicar dues teories relacionades entre si que van aconseguir explicar molts fenòmens físics i van obrir una nova porta a la forma de veure l'Univers. La primera teoria que va publicar va ser la *Teoria de la Relativitat Especial*, l'any 1905. Deu anys més tard, el 1915, va publicar la *Teoria de la Relativitat General*, amb la qual va reformular tot el concepte de la gravetat. Aquestes dues teories tenen en comú el *principi de relativitat* que estipula que totes les lleis físiques són iguals per a tots els espectadors. No vol dir que tots els espectadors facin les mateixes mesures, sinó que les equacions per a mesurar-les són iguals en qualsevol sistema de referència.

Teoria de la Relativitat Especial

Elaborada per Albert Einstein i publicada l'any 1905. Aquesta teoria és aplicable a un cas particular en el que la curvatura de l'espai-temps provocada per la gravetat és irrellevant. Aquesta teoria la podríem dividir en 4 punts molt importants:

- Només existeix una magnitud absoluta: la velocitat de la llum en el buit. Einstein va afirmar que la velocitat de la llum (300.000 km/s): és una constant universal, mai canvia. Quan no parlem de llum, la velocitat sempre depèn del punt de vista de l'observador. En canvi, la velocitat de la llum sempre és la mateixa per a tots els observadors i tots els punts de vista. És la màxima velocitat possible: *res que transporti informació pot viatjar més ràpid que la llum*.

Posem un exemple: una persona viatja en un tren i se situa al sostre d'aquest. Hi ha una altra persona que l'està observant en repòs des de fora del tren. El tren viatja a 100 km/h, i la persona de dalt del tren llança una pedra davant seu. Per a ell, aquesta ha viatjat a una velocitat de 2 km/h, però per al observador de fora la pedra ha viatjat a 102 km/h: les dues velocitats s'han sumat. Ara la persona del tren encén una llanterna, i veu que la llum d'aquesta viatja a 1.080.000.000 km/h. L'observador de fora hauria de veure que la llum es mou a 1.080.000.100 km/h, però no és així. L'observador de fora el tren també veu que la llum viatja a 1.080.000.000 km/h: degut a que és una magnitud absoluta la seva velocitat no varia independentment de l'observador.



Imatge 37. Il·lustració de l'exemple explicat recentment.

- L'espai i el temps no són magnituds absolutes: És a dir, que tant l'espai com el temps varien en funció de l'observador.

Apareix el concepte de la *dilatació del temps*: és una diferència del temps que ha transcorregut mesurat per dos observadors, que pot ser deguda a una diferència de velocitat entre els dos observadors. Quan un cos no està en repòs, o sigui que viatja a una certa velocitat, el temps es dilata proporcionalment a la velocitat. Per a un observador en un marc de referència inercial, si hi ha un rellotge que es mou a més velocitat en relació a ell, per a aquest rellotge passarà el temps més lent que no pas si aquest estigués en repòs. O sigui, si el cos es mou a més velocitat, major és la dilatació del temps entre ells, és a dir, que el temps passa més lent per al cos amb velocitat. El temps s'atura quan s'arriba a la velocitat de la llum. Per aquest motiu ens apareix el concepte de *temps propi*, que ens diu que per a cada cos passa un temps diferent dependent de les velocitats a les que han viatjat.

L'espai també varia, i s'explica gràcies a la *contracció de Lorentz*. És un fenomen que consisteix en què la longitud d'un cos es contrau en la direcció del moviment a mesura que el cos s'apropa a la velocitat de la llum. La mida d'un cos en moviment sempre és més curta que la seva longitud pròpia³¹, i el cos només es contrau en la direcció a la que viatja el cos. Els efectes d'aquesta contracció només són apreciables a velocitats pròximes a les de la llum.

- La massa d'un cos és energia concentrada: la massa d'un cos és la mesura del seu contingut energètic. Einstein va establir una relació entre l'energia i la massa a partir de les deduccions que estableixen la teoria de la relativitat especial. El fet de que la velocitat de la llum sigui una magnitud universal va provocar un canvi en la forma en que entenem l'energia: la massa ja no és constant, sinó que depèn de la velocitat. En termes matemàtics, s'introduiria un nou terme anomenat gamma relativista:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

On v és la velocitat de l'objecte i c és la velocitat de la llum.

Al desenvolupar la fórmula de l'energia tenint en compte aquest factor, arribem a la fórmula $E = mc^2$, que relaciona la massa i l'energia d'un cos en repòs. Abans de la relativitat es creia que un cos només tenia energia quan estava en moviment (energia cinètica), o per la seva posició en l'espai i deformació (energia potencial). La fórmula d'Einstein diu que tots els cossos, pel simple fet de tenir massa, ja tenen una determinada energia, tot i que es trobin en repòs. Quan el cos es troba en moviment, a la fórmula se li afegeix el factor de quantitat de moviment ($p=m \cdot v$).

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

On E és l'energia, m la massa del cos, p la quantitat de moviment, i c la velocitat de la llum.

³¹ És la longitud del cos quan aquest està en repòs.

- La massa d'un cos augmenta amb la velocitat: com hem dit, la massa d'un cos ja no és constant, aquesta depèn de la velocitat. Explicat d'una forma senzilla, podríem dir que com no es pot superar o igualar la velocitat de la llum, t'ha de ser més difícil accelerar. Per tant cada cop has de fer més força, seguint la llei fonamental de la dinàmica, $F=m \cdot a$. Aleshores la teva massa augmenta a mesura que augmentes la velocitat. A partir d'això i de la fórmula de l'energia, deduïm que un cos amb massa no pot assolir la velocitat de la llum. A una velocitat molt alta, pròxima a la de la llum, la massa es torna infinita. Seguint la fórmula d'equivalència entre massa i energia, veiem que, com a conseqüència, l'energia es torna infinita. És impossible tenir energia infinita, per tant els cossos amb massa no poden assolir la velocitat de la llum.

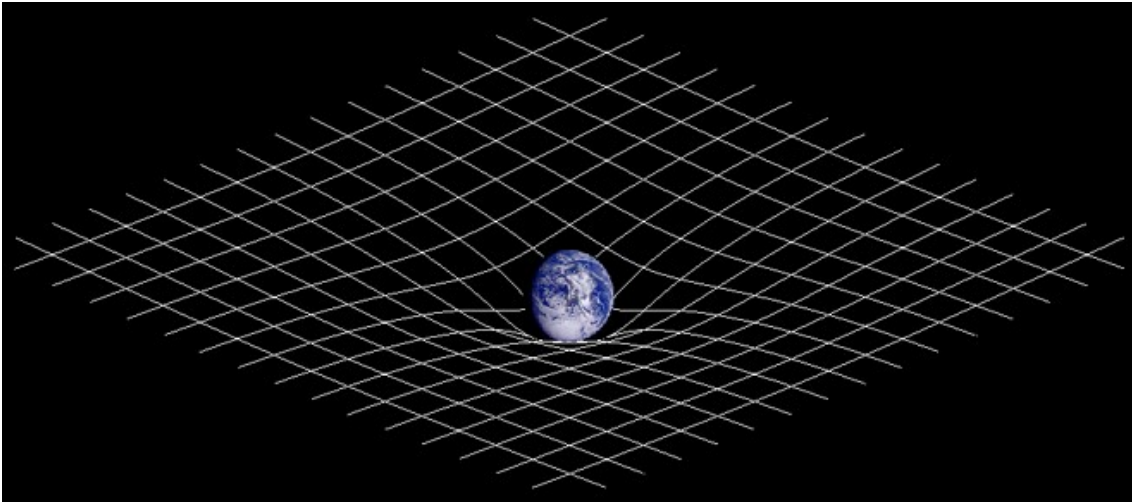
Teoria de la Relativitat General

Realitzada per Albert Einstein i publicada l'any 1915. En aquest cas, aquesta teoria aplica la teoria de la relativitat especial tenint en compte la gravetat, i reformula aquest terme de gravetat.

Einstein va proposar amb aquesta teoria que l'Univers no estava format per 3 dimensions (x, y, z) com es creia, sinó que estava format per 4: les 3 dimensions d'espai (x, y, z) i una dimensió de temps. Aquest plantejament el va obtenir com a conseqüència de tot el que hem explicat en la teoria de la relativitat especial, i va replantejar la teoria newtoniana sobre la gravetat. Les dimensions formen un "teixit" anomenat espaitemps: aquest teixit no és estàtic, sinó que és dinàmic: es pot contraure, estirar i retorçar. Aquestes quatre dimensions ho representen tot, o sigui, tots els esdeveniments físics es donen en l'espaitemps.

Cada espectador contempla de forma diferent l'espaitemps, sempre depenent del seu moviment. Tot això costa molt de visualitzar, però expliquem-ho de forma més gràfica; imaginem que l'espaitemps és com un pastís, de moltes capes. Cada capa ens ensenya una foto de l'espai a diferents moments, i el que ens diu Einstein és que aquest pastís el podem tallar de moltes maneres. El podem tallar horitzontal, però un altre espectador pot tallar-lo amb un cert angle d'inclinació respecte a nosaltres. Aquest angle és proporcional a la velocitat a la que viatja.

Aleshores, què és la gravetat? Einstein va acabar amb les idees primitives que establien que la gravetat era una força: la gravetat *no* és una força. Aquest fenomen el podríem definir com una *deformació de l'espai-temps per la quantitat i tipus d'energia que es troba atrapada en ell*. Com hem explicat, la massa és energia, per tant també podríem dir que la deformació de l'espai-temps es deu a la massa, i aquesta deformació és directament proporcional a ella. Però què vol dir la deformació de l'espai? Vol dir que l'espai adopta una geometria diferent de la que estem habituats (espai euclidià). En un espai no-euclidià passen coses molt diferents de les normals, com per exemple que la línia més curta entre dos punts sigui una corba o que dues línies paral·leles es tallin en un o infinits punts.



Imatge 38. Representació de l'espai-temps deformat pel planeta Terra, creant un camp gravitatori.

La deformació d'aquest teixit afecta a la manera en què l'energia flueix per l'espai-temps, per tant podem observar que com més pronunciada és la curvatura de l'espai-temps, més atracció senten altres cossos cap a aquell punt. La corba, com hem dit, es pronuncia proporcionalment a l'energia (o sigui, massa) d'un cos. Qualsevol cos amb massa deforma l'espai-temps, però aquestes deformacions són molt dèbils, i només són apreciables a escales molt grans. Això ho podem observar en primera persona: el Sol és l'astre amb més massa del sistema solar ($2 \cdot 10^{30}$ kg) i per exemple, la Terra, té una massa de $5,9722 \cdot 10^{24}$ kg i se sent atreta cap al Sol per la deformació que aquest provoca en comparació a la de la Terra. Tot i així, la Terra també provoca certa deformació en l'espai-temps, i per això la Lluna orbita al seu voltant. Si ara et quedessis completament sol a l'espai al costat d'una sabata, la sabata aniria apropant-se a tu, per la deformació que provoca la nostra massa respecte la seva.

Ara que ja hem explicat el concepte de gravetat, hem d'aclarir el que passa amb el temps quan l'espai i el temps es deforma. El temps també es deforma en presència de massa: com més deformat està, més es dilata, per tant transcorre més lent. Com més a prop es troba un cos d'una massa, més lent passa el temps per a ell en comparació a un cos que es troba més allunyat de la massa, i això es pot comprovar experimentalment. Si poséssim un rellotge a la superfície de la Terra i un a un satèl·lit que orbita el planeta, el temps passaria més lent per al de la superfície de la Terra, ja que la gravetat en aquell punt és major.

10.2. Tipus de forats negres (ampliació)

Els forats negres venen definits per tres paràmetres: la massa, la càrrega i el seu moment angular.

Segons la massa:

- **Forats negres supermassius:** equivalen a diversos milions de masses solars. Es trobarien en el centre de moltes galàxies.
- **Forats negres de massa intermitja:** la seva massa es troba entre 100 i un milió de masses solars.
- **Forats negres de massa estel·lar:** Tenen un pes de més de 3 masses solars, i el seu nucli es troba concentrat en un volum molt petit.
- **Forats negres primordials:** són hipotètics i més petits que els estel·lars. Si són prou petits es poden arribar a evaporar en un curt període. Aquests podrien ser possibles en alguns enfocaments de la gravetat quàntica.

Segons la seva càrrega i moment angular:

	Sense rotació	Amb rotació
Sense càrrega	Schwarzschild	Kerr
Amb càrrega	Reissner-Nordström	Kerr Newman

- **Forat negre d'Schwarzschild:** aquest forat negre ve definit per un sol paràmetre, la seva massa, ja que no té ni rotació ni càrrega, per tant és el forat negre més simple de definir: és estàtic i simètric. Aquest forat negre és una regió de l'espai-temps delimitada per l'horitzó d'esdeveniments, en el centre del qual hi ha la singularitat. El radi d'aquest tipus de forat negre es diu *radi d'Schwarzschild*. Aquests forats negres tenen un horitzó d'esdeveniments

esfèric. La massa d'un cos i el seu radi d'Schwarzschild són directament proporcionals. Es creu que aquests forats no són gaire comuns, ja que són descrits en una situació ideal, de fet els més comuns deuen ser els de Kerr. Aquest forat negre va ser la primera solució exacta que es va trobar de les equacions d'Einstein, però no ens endinsarem en l'explicació dels forats negres matemàticament per la seva complexitat.

- **Forat negre de Kerr:** aquest és un forat negre sense càrrega però amb rotació, a diferència del d'Schwarzschild. El forat negre de Kerr té un horitzó d'esdeveniments en forma d'el·lipsoide, i consta d'ergosfera, cosa que no tenia el forat negre d'Schwarzschild, que és una regió de la que sí que es pot escapar del forat negre. Aquest tipus de forat negre pot arribar a presentar fins a 3 singularitats.. Com aquests són els casos més comuns, es creu que aquests forats negres són els més abundants
- **Forat negre de Reissner-Nordström:** aquest forat negre és estàtic i té una càrrega, per tant només ve definit pels paràmetres massa i càrrega. El forat negre de Reissner-Nordström és una zona isòtropa: vol dir que la direcció en la que es fa una mesura és irrellevant, les seves propietats físiques no depenen de la direcció en la que s'observen. Aquest forat consta de dos horitzons d'esdeveniments: el més extern es diu horitzó d'esdeveniments, i el més intern s'anomena horitzó de Cauchy. Els seus horitzons d'esdeveniments formen una esfera perfecta.
- **Forat negre de Kerr Newman:** aquest últim forat negre ve definit per tots els 3 paràmetres: massa, moment angular i càrrega. Aquest forat negre, a diferència del de Reissner-Nordström, no és isòtrop. Està delimitat per dos horitzons d'esdeveniments, l'horitzó d'esdeveniments extern i l'horitzó de Cauchy. També té una ergosfera, com el forat negre de Kerr. Totes aquestes tres zones en conjunt tenen una forma d'el·lipsoide. A l'interior del forat negre de Kerr-Newman trobem una singularitat en forma d'anell, amb un volum gairebé 0. Quan la velocitat d'aquest forat negre augmenta molt, els fotons s'emeten en forma de radiació de raigs gamma. Els forats de Kerr Newman també emeten camps magnètics molt intensos i corrents de gas ionitzat.