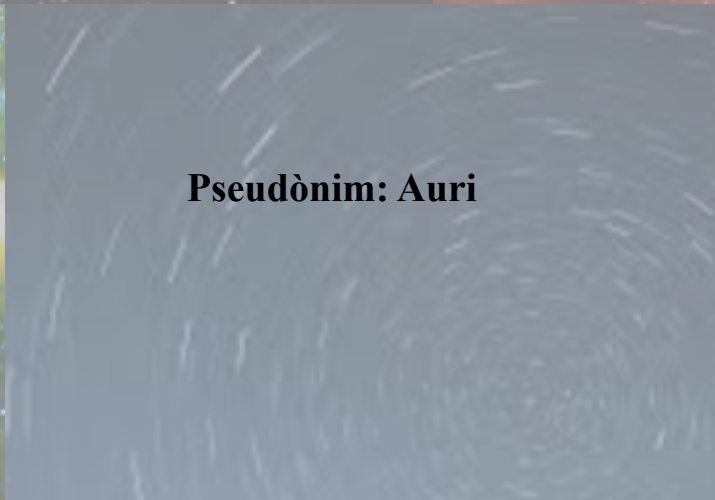
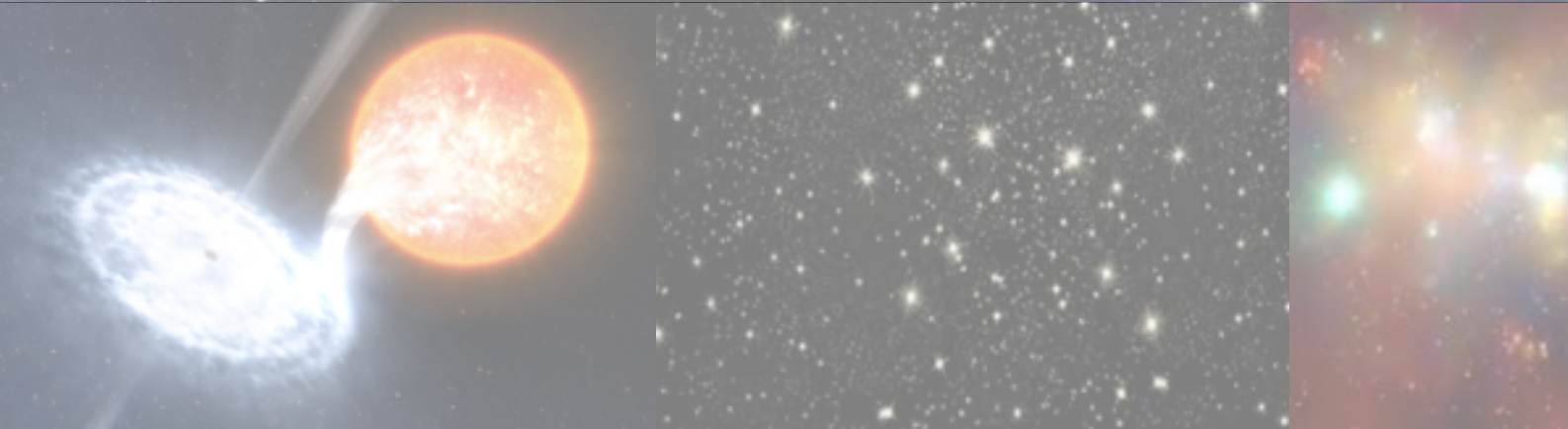


Forats Negres



Pseudònim: Auri

“Cuando crees conocer todas las respuestas,
llega el Universo y te cambia todas las
preguntas”
Albert Espinosa

ÍNDIX

1 Introducció	2
1.1 Objectius.....	3
1.2 Metodologia.....	3
2 L'Origen de la idea	4
2.1 Com va nèixer la seva hipòtesi?.....	5
2.2 Què passaria si..?.....	6
2.3 Qué és un forat negre?.....	6
3 Origen i evolució de l'Univers	8
4 Classificació de forats negres	13
4.1 Final de les estrelles massives.....	13
4.2 Sthephen Hawking i Roger Penrose.....	16
4.3 De què depén l'estat final d'un forat negre?.....	18
4.4 "Un forat negre no té pé!".....	19
4.5 Classificació de forats negres segons el seu origen.....	20
4.5.1 Forats negres estel·lars.....	20
4.5.1.1 Què és una estrella?.....	20
a) Parts d'una estrella.....	21
4.5.1.2 Cicle de vida d'una estrella.....	22
a) Espectre electromagnètic i estrelles.....	22
b) Principi d'Exclusió de Pauli.....	28
c) Reaccions nuclears.....	28
4.5.1.3 Com deriva un forat negre a partir d'una estrella.....	29
4.5.2 Forats negres supermassius.....	32
4.5.2.1 Quan i com es van formar.....	33
4.5.3 Forats negres intermedis.....	34
4.5.4 Forats negres primordials.....	34
4.5.5 Estructura.....	34
4.6 Classificació dels forats negres segons les propietats físiques.....	35
4.6.1 Què vol dir que un forat negre té velocitat de rotació i càrrega?.....	35
4.6.2 Estructura.....	36
5 Relativitat General: Llei de la gravitació universal	37
5.1 Origen de la Relativitat General.....	37

5.2	Desenvolupament de la teoria.....	40
5.2.1	Teoria de la relativitat especial.....	40
5.2.2	Teoria de la relativitat general.....	42
5.3	Forats negres segons la relativitat general.....	46
5.4	Ones gravitacionals.....	48
6	Com es detecten els forats negres?.....	51
6.1	Demostració de l'existència dels forats negres.....	51
6.2	Detecció de forats negres.....	52
6.3	Estimació de la massa del cos invisible d'un sistema binari.....	53
6.4	Radiació emesa.....	54
6.5	Efectes de lents gravitacionals.....	56
6.5.1	Com funcionen les lents gravitacionals?.....	56
6.5.2	Exemples observats.....	58
7	Qüestions interessants.....	59
7.1	Forats blancs.....	59
7.1.1	Visió personal.....	62
7.2	És possible que visquem dins d'un forat negre?.....	62
7.2.1	La possible explicació.....	62
7.2.2	Visió personal.....	63
8	Part pràctica.....	65
8.1	Entrevista a Roberto Emparan.....	65
a)	Conclusió de l'entrevista.....	75
8.2	Conferència.....	76
8.3	Entrevista a Sonia Fernández Vidal.....	77
a)	Conclusió de l'entrevista.....	82
8.4	Maqueta: Ones gravitacionals.....	83
a)	Materials.....	83
b)	Procediment.....	86
c)	Explicació.....	88
9	Conclusió.....	89

10 Agraïments	90
11 Glossari	91
12 Bibliografia, Webgrafia	93
13 Fonts d'imatge	95

1 Introducció

Quan pensem en la paraula Univers és probable que el primer que ens passi pel cap sigui la paraula misteri, i es que en aquesta àrea ens queden encara moltíssimes coses per entendre i resoldre. D'entre tots aquests misteris, potser el més desconegut és el dels forats negres perquè el seu descobriment és, relativament, molt recent (L'any 1783 es va plantejar la possibilitat de la seva existència encara que no el denominaven forat negre). A més a més en els darrers temps s'ha incrementat l'interès per ells, ja que si descobrim el seu funcionament i el perquè de la seva existència podem aclarir altres incògnites com l'origen del nostre Univers i d'altres universos.

He escollit aquest tema per investigar, ja que tot el que té a veure amb l'Univers i les seves incògnites m'interessa moltíssim i m'apassiona. Jo em caracteritzo per ser una persona bastant curiosa i actualment un dels temes més desconeguts és el dels forats negres (deixant de costat el suposat inici i final de l'Univers). A més a més, està relacionat amb el que em vull dedicar en un futur i a casa sempre hem parlat d'aquestes qüestions, el que ha fet que a mesura que he anat creixent m'interessés cada cop més per elles. Un altre motiu que ha incrementat la meua curiositat ha estat la lectura dels llibres de Sonia Fernández-Vidal, una escriptora i divulgadora científica barcelonina.

Sonia Fernández Vidal (Barcelona, 1978) és doctora en física y especialista en Òptica Quàntica. Ha treballat com a científica en centres de gran importància com al CERN, al Laboratori Nacional de Los Álamos a l'Institut de Ciències Fotòniques... Va publicar el 2011 el seu famós llibre "La porta dels tres panys" i el 2012 "Quantic Love, els dos de temàtica juvenil on la ciència està molt present.



Fig. 1 Sonia Fernández Vidal

1.1 Objectius

- ❖ Introduir nous conceptes sobre l'Univers.
- ❖ Descobrir què és un forat negre
- ❖ Exposar els tipus de forats negres que hi ha i com s'han format i evolucionat al llarg del temps.
- ❖ Explicar què passa un cop es traspassa l'horitzó d'esdeveniments.
- ❖ Conèixer com es detecten i s'estudien els forats negres.
- ❖ Fer entrevistes a professionals relacionats amb el tema per poder entendre millor els punts del treball.
- ❖ Fer una maqueta que mostri el comportament de les ones gravitacionals de manera gràfica.
- ❖ Aprendre a fer recerca.
- ❖ Realitzar correctament un Treball de Recerca.

1.2 Metodologia

El treball de recerca està dividit en dues parts: la teòrica i la pràctica.

Per realitzar la part teòrica he utilitzat pàgines web i llibres sobre aquesta matèria juntament amb la informació que m'han proporcionat professors i professionals convenientment corroborada.

Quant a la part pràctica, tot i la dificultat del tema, he fet una entrevista a un investigador dedicat a la comprensió de l'espai-temps per mitjà dels forats negres i a una especialista en òptica quàntica. També he construït una maqueta que ajuda a entendre més gràficament el comportament de les ones gravitacionals i l'espai-temps.

2 L'origen de la idea

El terme forat negre té un origen molt recent. Va ser utilitzat el 1969 pel científic nord-americà John Wheeler com el resultat d'una idea que va ser formulada, com a mínim, 200 anys enrere, a una època on hi havia dues teories sobre la llum: una que suposava que la llum estava composta per partícules (Teoria corpuscular de la llum) i l'altre que deia que la llum estava formada per ones (Teoria ondulatoria). De la unificació de les dues teories (Teoria ona-corpúscle¹, 1924) sorgeix una idea molt rudimentària però semblant a la de forats negres: les estrelles obscures.



Fig. 2 John Wheeler



Fig. 3 Exemple de com la llum es comporta com una ona: cubeta d'ones

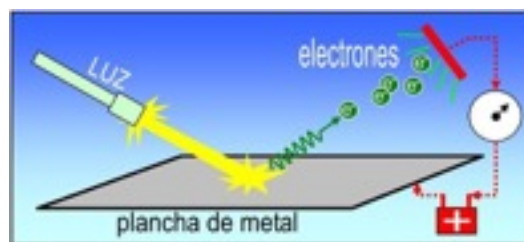


Fig. 4 Exemple de com la llum es comporta com una partícula

Abans que es formulés aquesta teoria de la dualitat ona-partícula, no es tenia clar com afectaria la gravetat a la llum, ja que si aquesta es comportava com una ona (és a dir, que no tingué massa) la gravetat no la podria afectar.

La gravetat tampoc podria afectar la llum si aquesta viatgés a una velocitat infinita, com es pensava abans que Roemer descobrís que la velocitat de la llum era finita (300.000 km/s, mesurada per James Bradley), el 1676.



Fig. 5 Ole Christensen Rømer

Ara bé, si la comunitat científica d'aquell temps es plantejava que la llum tenia massa i una velocitat finita podrien arribar fàcilment a la conclusió que aquesta sí que es veia afectada per la gravetat. John Mitchel va portar més enllà aquesta hipòtesi. Va escriure un article el 1783 al *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* en el que exposava que una estrella suficientment massiva i compacta tindria una força d'atracció tan intensa que ni tan sols la llum podria escapar: la llum emesa des de la superfície de l'estrella seria arrossegada al centre per l'atracció gravitatòria de l'estrella. Aquesta va ser una descripció simple però aproximada dels forats negres i el primer pas per començar a assimilar la seva existència.

2.1 Com va nèixer la seva hipòtesi?

Michell es disposava a trobar la distància entre el Sol i l'estrella Sirio (constel·lació Canis Major) coneixent la velocitat de la llum.



Fig. 6 Situació de l'estrella Sirio

Aquesta havia estat determinada per James Bradley el 1725, obtenint un valor de 300.000 km/s. John Mitchell partia de la hipòtesi de l'existència d'agrupacions estel·lars que s'atreïen gravitacionalment (estrelles dobles). Les observacions d'aquests sistemes dobles li proporcionaven un mètode per trobar la massa i la distància estel·lar. Així s'adonà que la llum en apropar-se al sol, perd velocitat. Aquest fet el va portar a considerar que la llum en sortir d'una estrella s'ha de comportar com una pedra que

llances des de la Terra, per exemple. Havia descobert la velocitat d'escapament (la qual explicarem més endavant de manera detallada).



Fig. 7 James Bradley

2.2. Què passaria si..?

Mitchel es formula la següent pregunta: Què passaria si la velocitat d'escapament fos més gran que la velocitat de la llum? La resposta va ser evident, la llum cauria cap a l'estrella un altre cop. Tot i que aquestes estrelles serien invisibles perquè la seva llum no ens arribaria, sí la podríem detectar a causa de l'atracció gravitatòria que exerciria sobre els cossos del seu voltant. Aquests objectes són els que avui dia anomenem forats negres. Un suggeriment similar fou realitzat pel francès Laplace al seu llibre *El Sistema del Món* tot i que només ho va incloure en la primera i segona edició d'aquest, ja que era una hipòtesi no molt acceptada en aquella època.

De fet, no és realment fidel tractar a la llum com una bala (que és el que feien Mitchell i Laplace) a la teoria de la gravetat de Newton, perquè la velocitat de la llum és fixa i per contra, una bala que es disparés des de la superfície de la Terra finalment es pararia i cauria perquè s'aniria frenant. Un fotó⁷ no té massa i per tant, continuaria cap amunt a una velocitat constant. Doncs, ¿Com pot afectar la gravetat a la llum? Això no va semblar possible fins que Einstein proposà la relativitat general, el 1915 (que més endavant explicaré). I, tot i això, va haver de passar molt de temps abans que es compregués la seva implicació a les estrelles massives.

Aquesta hipòtesi de John Mitchell va ser un gran avenç per l'astronomia de l'època però deixava sense explicar molts conceptes, com per exemple el que passaria si una estrella massiva es quedés sense combustible.

2.3 Què és un forat negre?

Un forat negre és una regió de l'espai on la força de la gravetat és tan forta que ni tan sols la llum pot escapar. Això passa perquè una gran quantitat de matèria ha estat comprimida en un espai molt petit. Aquesta compressió pot ser provocada per moltes causes que exposaré en aquest treball.

A causa que ni la llum pot escapar, els forats negres són invisibles. De tota manera, hi ha telescopis especials que ajuden a trobar-los. Els telescopis poden observar el comportament dels materials i les estrelles que estan molt a prop dels forats negres. Al punt sis d'aquest treball podrem veure els diferents tipus de telescopi que s'utilitzen per a la seva investigació i detecció.

Els forats negres s'engloben dins de quatre categories, que vénen determinats per la massa i la mida: els primordials, els estel·lars, els intermedis i els supermassius.

Els primordials són els més petits. Els científics creuen que aquests tipus són tan menuts com un àtom amb la massa d'una gran muntanya.

Els més comuns són els mitjans, que es diuen estel·lars. La massa d'aquests forats negres pot ser 20 vegades més gran que la del sol ($1,989 \cdot 10^{30}$) comprimida en una pilota de 10 milles (uns 16 kilòmetres) de diàmetre. Dotzenes de forats negres estel·lars poden existir a la Via Làctia.

Els forats negres estel·lars es formen quan el centre d'una estrella molt massiva col·lapsa sobre si mateix. Degut aquest col·lapse es produeix (ocasionalment) una supernova, o estrella en explosió, que llença part de l'estrella cap a l'espai, el que explicaré concretament més endavant.

Els forats negres més grans s'anomenen supermassius. Aquests tenen masses més grans que la d'un milió de Sols dins d'un espai del diàmetre d'un de sol. Els científics tenen evidències que al centre de cada gran galàxia hi ha un forat negre supermassiu. El forat negre supermassiu de la Via Làctia es diu Sagittarius A*. La seva massa aproximada equival a quatre milions de sols comprimits en una bola del diàmetre del sol (1,39 milions de km).

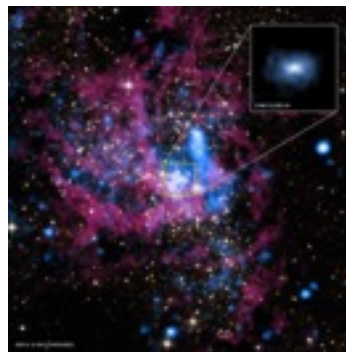


Fig. 8 Imatge de *Sagittarius A** captada des de l'observatori Chandra ($1,39 \cdot 10^5$ km sobre la superfície de la Terra) de Raig X.

Els científics creuen que els forats negres supermassius es formen al mateix temps que la galàxia on es troben, i que la seva mida i massa estan relacionades amb aquesta.

3 Origen i evolució de l'Univers

Per entendre els forats negres hem de tenir present a partir de que es formen i l'origen d'aquests cossos inicials, és a dir, saber l'origen de l'Univers.

La teoria de la relativitat d'Einstein va predir que l'espai-temps començà a la singularitat* del Big Bang i que acabaria bé, en un Big Crunch, és a dir, que es col·lapsaria sobre si mateix o bé que es transformaria en un forat negre. Segons el model de Friedman, al mateix moment del Big Bang, l'Univers tenia una mida nul·la, densitat infinita i, per tant, també una temperatura infinita. A mesura que aquest s'expandeix, la temperatura es redueix (per exemple, si duplica la seva mida, la temperatura es reduirà a la meitat). Quan la temperatura és tan alta, les partícules (electrons, fotons², protons, neutrons, neutrins) tenen tanta energia que quan col·lidissin produirien molts parells de partícula/antipartícula.

Una antipartícula és la menys freqüent en un parell de partícules amb la mateixa massa i les mateixes càrregues elèctriques de signes oposats, a més d'altres característiques oposades (això és el que imita, per exemple, un accelerador de partícules). Els acceleradors de partícules acceleren les partícules fins a velocitats properes a la de la llum ($3 \cdot 10^8$ Km/s) que xoquen entre elles i formen noves partícules molt inestables i amb poquíssim temps de vida però que permet als científics estudiar el comportament de les partícules en aquest moment de l'Univers).



Fig. 9 Accelerador de partícules

*Singularitat: Basant-nos en la teoria de la relativitat, una singularitat és un punt teòric amb volum zero i densitat infinita.



Fig. 10 Accelerador de partícules del CERN

Aquestes s'aniquilarien en xocar unes amb les altres, però el ritme de producció seria més elevat que el d'aniquilació(a causa de les elevades temperatures).

Un segon després del Big Bang, la temperatura s'hauria reduït 10.000.000.000 graus. En aquest moment, l'Univers hauria contingut principalment fotons, electrons, neutrins (partícules molt dèbils que es veurien afectades únicament per la gravetat i la força dèbil³) i les seves antipartícules junt amb alguns protons i neutrons. A mesura que l'Univers s'expandeix i la temperatura disminueix, el ritme dels parells electró/antielectró que es produïen pels xocs era menor que el ritme al qual s'aniquilaven. Doncs es van aniquilar molts electrons per formar fotons i van quedar pocs dels primers. Els neutrins no s'haurien aniquilat, ja que les interaccions entre ells o amb altres partícules són molt dèbils i encara haurien d'existir. Alguns científics han proposat que, si aquests existissin i tinguessin massa, podrien ser el que es diu matèria fosca, exercint la suficient atracció gravitatòria perquè l'Univers col·lapsés de nou. Això no ha estat comprovat encara.

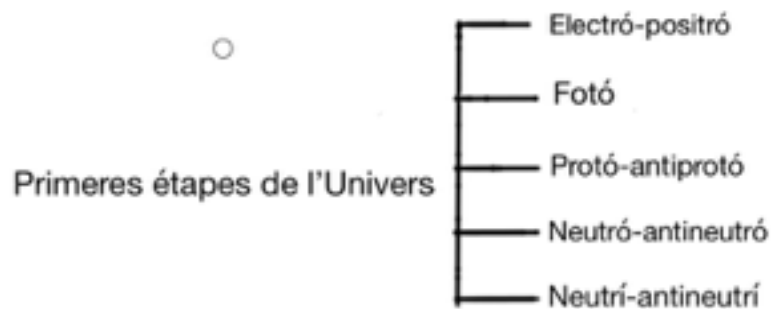


Fig. 11 Partícules existents a les primeres etapes de l'Univers

Més o menys 100 segons després que l'Univers s'hagués format, la temperatura era de 1.000.000.000 graus, la que hi ha actualment a l'interior de les estrelles més calentes. A aquesta temperatura els protons i els neutrons ja no tindrien l'energia suficient per superar l'atracció de la *interacció nuclear forta*⁴ i haurien començat a combinar-se per formar els nuclis de deuteri (hidrogen pesat: el seu nucli conté un protó i un neutró mentre que l'hidrogen comú només conté un protó al seu nucli.). Aquests també s'haurien

combinat amb més protons i neutrons per formar nuclis d'heli (dos protons i dos neutrons) i elements més pesats com el Liti i el Beril·li.

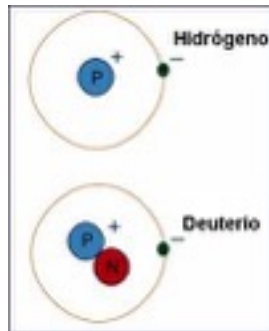


Fig. 12 Estructura de l'hidrogen i del deuteri

Al voltant d'una quarta part de protons i neutrons s'haurien convertit en nuclis d'heli juntament amb una petita quantitat de deuteri i altres elements. Els neutrons restants s'haurien desintegrat en protons, que són el nucli de l'hidrogen comú. Això es proposà per primer cop el 1948 a un article de George Gamow i del seu alumne Ralph Alpher.



Fig. 13 Estructura de l'heli

Unes hores més tard que es produís el Big Bang, la producció d'heli i altres elements s'hauria detingut i, durant el milió d'anys següent, l'Univers només es va dedicar a expandir-se.

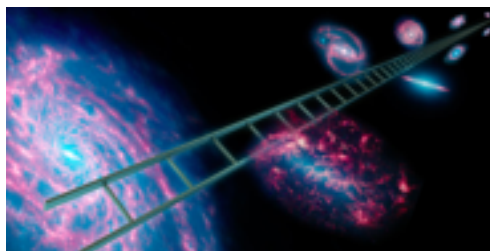


Fig. 14 Imatge il·lustrativa de l'expansió de l'Univers

Quan la temperatura va disminuir a uns pocs milions de graus, els electrons i els nuclis ja no tenien l'energia suficient per vèncer l'atracció electromagnètica entre ells i haurien començat a combinar-se per formar àtoms. L'Univers hauria continuat expandint-se i refredant-se però en regions que eren més denses que la resta, l'atracció hauria estat retardada a causa de l'atracció gravitatòria extra. Aquesta hauria detingut totalment

l'expansió en algunes regions i hauria provocat que es comencessin a col·lapsar de nou. A mesura s'estigués col·lapsant, l'impuls gravitatori que exercís la matèria externa faria que aquestes regions comencessin a girar lentament. A mesura que la regió col·lapsant es fes més petita, faria voltes sobre si mateixa més ràpidament (per exemple com una patinadora, quan encongeix els braços gira més ràpidament). Quan una regió es fes suficientment petita, giraria a la velocitat necessària per compensar l'atracció gravitatòria i d'aquesta forma van néixer les galàxies en forma de disc. Altres regions que, per atzar no haguessin adquirit rotació, es convertirien en galàxies el·líptiques. En aquestes, la regió hauria deixat de col·lapsar-se perquè parts individuals de la galàxia estarien girant de forma estable al voltant del centre.



Fig. 15 Galàxia M81, en espiral



Fig. 16 Galaxia Andròmeda, el·líptica

A mesura que passés el temps, el gas hidrogen i heli de les galàxies es disgregaria en núvols més petits que començarien a col·lapsar-se sota la seva pròpia gravetat. A mesura que es contraguessin i els àtoms dintre d'elles col·lidissin els uns amb els altres, la temperatura del gas augmentaria fins que estigués suficientment calent com per iniciar les reaccions de fusió nuclear. Aquestes reaccions transformarien l'hidrogen en més heli i la calor després faria que la pressió augmentés, el que impediria que la contracció continués. Aquests núvols romandrien estables durant molt de temps, com estrelles del tipus del nostre Sol, cremant hidrogen per produir heli i irradiant energia en forma de calor i llum.

Les estrelles amb una massa més gran necessiten estar a més temperatura per compensar l'atracció gravitatòria, el que fa que les reaccions nuclears es produeixin d'una forma més ràpida i consumeixin el seu hidrogen en un temps relativament curt (100 milions d'anys).

Després les estrelles s'escalfarien de forma lleugera i progressiva i l'heli es començaria a transformar en elements més pesats com el carboni i l'oxigen.

Les regions externes de l'estrella podrien sortir disparades al gas de la galàxia, en una explosió nomenada supernova (que també explicaré extensament més endavant).



Fig. 17 Imatge il·lustrativa d'una supernova

Alguns d'aquests elements seran la matèria primera per formar altres estrelles. Per exemple, el Sol té al voltant d'un 2% d'aquests elements més pesats, per tant forma part de la segona o tercera generació d'estrelles. Una part de la resta del núvol giratori que contenia els elements per formar el Sol es va acumular per formar els cossos que giren al voltant d'aquest (com la Terra, per exemple).

Encara que aquesta teoria és la més acceptada, d'ella deriven molts interrogants sense resposta, entre els quals estan el perquè de l'elevada temperatura de l'Univers primitiu, perquè l'Univers sembla el mateix des de tots els punts de l'espai i en totes les direccions, etc.

4 Classificació de forats negres

4.1 Final de les estrelles massives

El 1928, un estudiant graduat d'Índia, Subrahmanyan Chandrasekhar, es va dirigir a Anglaterra per estudiar a Cambridge amb l'astrònom britànic sir Arthur Eddington, un expert en la relativitat general [segons algunes fonts, un periodista li digué a Eddington que havia sentit que només tres persones al món entenien la relativitat general (a més a més d'Einstein). Eddington va contestar: "Estic pensant qui és la tercera persona" (referint-se a ell mateix i al seu alumne Subrahmanyan)]



Fig. 18 Subrahmanyan Chandrasekhar

Durant el seu viatge des d'Índia, Chandrasekhar va calcular la mida a la qual podia arribar una estrella que fos capaç de suportar la seva pròpia gravetat, un cop hagués gastat el seu combustible. La idea era la següent: quan l'estrella es redueix en mida, les partícules del material estan molt properes les unes a les altres i, així, d'acord amb el principi d'exclusió de Pauli tenen velocitats molt diferents. Això fa que s'allunyin unes de les altres, per tant l'estrella s'expandeix. Una estrella pot, per tant, mantenir el seu radi constant, a causa de l'equilibri que es produeix entre l'atracció de la gravetat i la repulsió que sorgeix del principi d'exclusió. Chandrasekhar s'adonà que existeix un límit a la repulsió que el principi pot proporcionar. La teoria de la relativitat limita la diferència màxima entre les velocitats de les partícules materials de l'estrella a la velocitat de la llum. Això significa que quan l'estrella fos prou densa, la repulsió deguda al principi seria menor que l'atracció de la gravetat. A aquesta massa se la coneix avui dia com límit de Chandrasekhar. Tot això té unes implicacions al destí final de les estrelles, que poden acabar la seva vida com una gegant vermella, com una nana blanca o com un forat negre. Landau va senyalar un altre possible final per la vida de les estrelles, que seria una estrella de neutrons.



Fig. 19 Gegant vermella

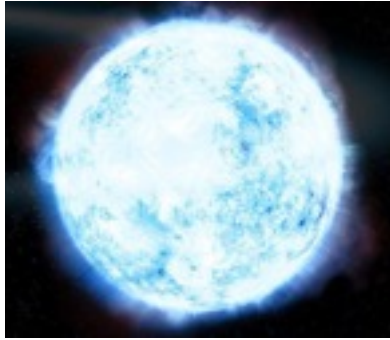


Fig. 20 Nana blanca

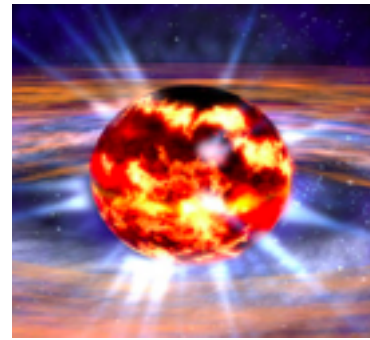


Fig. 21 Estrella de Neutrons

Einstein, Eddington i la majoria dels científics no van creure els estudis de Chandrasekhar, ja que era impossible de creure que una estrella pogués arribar a tenir una mida nul·la (és a dir col·lapsar-se fins a formar un forat negre). Però tot i això, el 1983 li van atorgar el Nobel a Chandrasekhar per aquests primers treballs sobre la massa límit de les estrelles fredes, a més a més d'altres treballs posteriors.

Chandrasekhar havia demostrat que el principi d'exclusió no podia parar el col·lapse d'una estrella més massiva que el límit de Chandrasekhar, però el problema era entendre que era el que passaria a aquesta estrella d'acord amb la relativitat general i això va ser resolt pel jove nord-americà Robert Oppenheimer el 1939. Malauradament, els resultats dels seus treballs no es podien comprobar amb els telescopis de l'època. Després va començar la Segona Guerra Mundial i Oppenheimer es va veure involucrat en el projecte de la bomba atòmica. Després de la guerra, el problema del col·lapse gravitatori es va oblidar, ja que la majoria dels científics es van interessar pels estudis a escala atòmica i nuclear. Als anys setanta, però, l'interès pels problemes a gran escala de l'astronomia i la cosmologia va ressuscitar a causa de l'augment del número de les observacions astronòmiques, ocasionada per l'aplicació de la tecnologia moderna. El treball d'Oppenheimer va ser redescobert.



Fig. 22 Robert Oppenheimer

La imatge que tenim d'aquest treball (de forma simplificada) és aquesta: el camp gravitatori de les estrelles canvia els camins dels raigs de llum en l'espai-temps respecte com serien si l'estrella no hagués estat. Això s'explica amb els cons de llum.

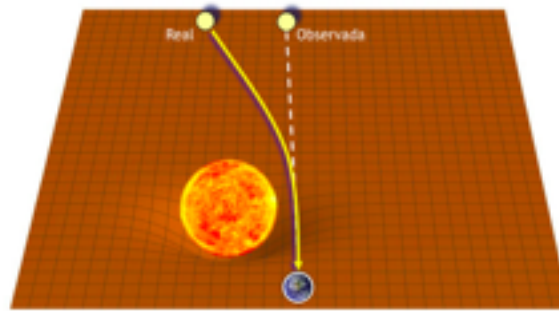


Fig. 23 Desviació de la llum

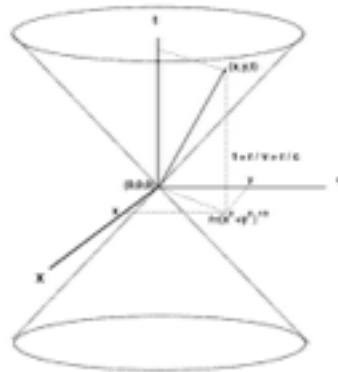


Fig. 24 Con de llum

Un con de llum funciona de la següent manera: posem d'exemple l'esdeveniment O a la figura 12 amb coordenades $O(0,0,0)$, és a dir, passa al present ($t=0$) i és el centre del con de llum. Posem que O és, per exemple, el naixement d'una estrella. Dins del con inferior es troben tots els esdeveniments que influeixen a l'esdeveniment O , com és en aquest cas, l'acumulació d'hidrogen a l'espai interestel·lar que més endavant ocasionarà el naixement de l'estrella en qüestió. El con superior és el que està constituït per tots els esdeveniments que són influïts per l'esdeveniment O , i un bon exemple del cas que estem tractant serien les zones de l'espai que s'anessin il·luminant a mesura que els arriba la llum de l'estrella acabada de formar. Si la velocitat dels esdeveniments és la de la llum, la trajectòria d'aquests es trobarà a la superfície del con, si la velocitat és més baixa, la trajectòria s'anirà acostant a l'eix temporal d' O .

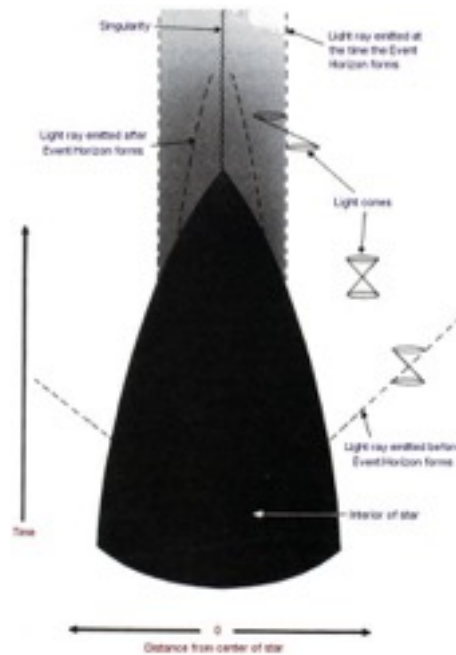


Fig. 25 Con de llum d'Oppenheimer

Els cons de llum dels resultats d'Oppenheimer indiquen els camins dels raigs de llum en l'espai-temps. Aquests s'inclinen lleugerament cap a dins quan estan a prop de la superfície d'una estrella. Això es pot comprovar des de la Terra a la desviació de llum provinent d'estrelles llunyanes a un eclipsi solar. Quan una estrella es contrau, el camp gravitatori a la superfície és més intens i els cons de llum s'inclinen encara més cap a dins. Això fa més difícil que la llum de l'estrella escapi i aquesta es mostra més dèbil i més vermella, per tant, per un observador llunyà. Finalment, quan una estrella s'ha reduït fins a un cert radi, el camp gravitatori arriba a ser tan intens que els cons de llum s'inclinen tan cap endins que la llum ja no pot escapar, com podem observar a la figura 27. (Aquesta explicació és només un petit resum del que explicaré molt millor a l'apartat de la relativitat general).

4.2 Stephen Hawking i Roger Penrose

Stephen Hawking i Roger Penrose (sobretot Hawking) han estat uns científics de la nostra era que han fet grans descobriments en relació amb els forats negres (i l'Univers en general) i que explicarem en aquest apartat.

Stephen Hawking va néixer el 8 de gener de 1942 (just 300 anys després de la mort de Galileo) a Oxford, Anglaterra. Quan tenia 8 anys, es va mudar amb els seus pares a St. Albans, un poble que està a 32 Km de Londres. Als 11 anys, Stephen va anar a l'escola St. Albans i després a l'University College a Oxford, l'escola on va anar el seu pare. Stephen volia estudiar matemàtiques encara que el seu pare hagués preferit medicina. La carrera de matemàtiques no es podia fer a l'University college així que va escollir la carrera de Física. Després de tres anys, i sense esforçar-se molt, es va graduar com el

primer de la seva promoció. Després de graduar-se, va anar a Cambridge per treballar en Cosmologia, ja que a Oxford no s'investigava. Va obtenir el seu doctorat en investigació i es va incorporar a l'equip d'investigació del Goneville and Caius College. Després de deixar l'Institut d'Astronomia el 1973, Stephen exerceix com a professor de matemàtiques al Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics des del 1979 fins al 2009. Stephen encara participa amb la Cambridge University.

Stephen Hawking ha treballat amb les lleis bàsiques que governen l'Univers. Juntament amb Roger Penrose han demostrat com la teoria de la relativitat general d'Einstein mostra que l'espai-temps té el seu inici al Big Bang i el seu final als forats negres. Aquests resultats van revelar que necessitàvem unificar la Teoria de la Relativitat General amb la Teoria Quàntica, l'altre gran descobriment de la primera meitat del segle XX.



Fig. 26 Stephen Hawking



Fig. 27 Roger Penrose

El treball de Stephen Hawking i Roger Penrose va ser el següent (1965-1970): d'acord amb la relativitat general, havia d'haver-hi una singularitat⁵ de densitat i curvatura de l'espai temps infinites dins d'un forat negre (una situació semblant a la del Big Bang al principi del temps). A aquesta singularitat tant les lleis de la ciència com la nostra capacitat de predir el futur basant-nos en esdeveniments passats fallaria, no obstant això, qualsevol observador que romangués fora del forat negre no es veuria afectat per aquest error de predicció, ja que ni la llum ni, per tant, qualsevol altre senyal arribarien fins a ell. Aquest fet va portar a Roger Penrose a proposar la hipòtesi dèbil de la censura còsmica. La hipòtesi dèbil de la censura còsmica diu que les singularitats produïdes per col·lapses gravitatoris queden ocultes (en el cas dels forats negres per un horitzó d'esdeveniments) per protegir als observadors de la crisi de predicció que succeeix a la singularitat (aquesta hipòtesi tindria una excepció que seria la singularitat que va succeir al Big Bang, que seria una singularitat nua, és a dir, una singularitat observable).

L'horitzó d'esdeveniments és el camí de l'espai-temps de la llum que està intentant escapar del forat negre. Per tant, l'horitzó d'esdeveniments actua com una membrana

unidireccional, els objectes poden caure al forat negre a través de l'horitzó per res pot escapar a través d'ell.

4.3 De què depèn l'estat final d'un forat negre?

De què depèn l'estat final d'un forat negre? Podria semblar que depèn de les característiques de l'estrella a partir de la qual s'ha format, però, si fos així i els forats negres fossin tan complicats com els objectes que es col·lapsen per formar-los, hauria de ser molt difícil fer una predicció sobre els forats negres en general.

El 1967, l'estudi dels forats negres va ser revolucionat per Werner Israel que va demostrar que els forats negres sense rotació haurien de ser molt simples, que eren perfectament esfèrics i que només dependrien de la seva massa, és a dir, dos forats negres amb la mateixa massa eren idèntics.

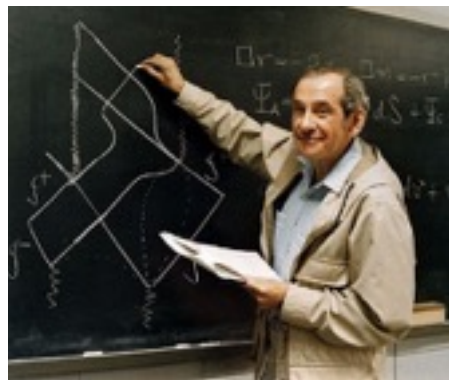


Fig. 28 Werner Israel

De fet podrien ser descrits per una solució de les equacions d'Einstein, solució coneguda des de 1917, descoberta gràcies a Karl Schwarzschild al cap de poc temps del descobriment de la relativitat general.



Fig. 29 Karl Schwarzschild

Al principi molta gent, Israel inclòs, van argumentar que, ja que els forats negres havien de ser perfectament esfèrics només podrien formar-se a partir del col·lapse d'un objecte perfectament esfèric. Va haver-hi, tot i això, una interpretació diferent del resultat d'Israel, defensada principalment per Roger Penrose i John Wheeler. Ells van argumentar que els ràpids moviments involucrats al col·lapse d'una estrella implicaria que les ones gravitatòries que desprendués la faria sempre esfèrica i que quan s'hagués parat a un estat estacionari seria perfectament esfèrica. D'acord amb aquesta hipòtesi, qualsevol estrella sense rotació, independentment de la complicació de la seva forma i estructura interna, acabaria després d'un col·lapse gravitatori sent un forat negre perfectament esfèric i la seva mida dependria exclusivament de la seva massa. Càlculs posteriors van donar suport a aquest punt de vista que va ser adoptat de manera general.

4.4 “ Un forat negre no té pèl”

Els resultats d'Israel només s'aplicava a forats negres formats a partir de cossos sense rotació. El 1963, Roy Kerr va deduir un conjunt d'equacions de la relativitat general que descrivien a forats negres en rotació. Aquests forats de "Kerr" giren a un ritme constant i el seu mida i la seva forma només depenen de la massa i de la velocitat de rotació.



Fig. 30 Roy Kerr

Si la rotació és nul·la, el forat és totalment rodó i la solució és idèntica a la de Schwarzschild (que descriu forats negres sense rotació ni càrrega). Si la rotació és diferent zero, el forat negre es deforma cap a fora a l'equador igual que la Terra s'aixafa als pols, i com més ràpid gira més es deforma. D'aquesta forma, es va formular la hipòtesi que qualsevol cos en rotació que col·lapsés i formés un forat negre arribaria a l'estat de moviment descrit per la solució de Kerr.

El 1970, Brandon Carter donà el primer pas per demostrar aquesta hipòtesi. Va comprovar que si el forat negre té un eix de simetria, el seu tamany i forma només dependria de la seva massa i velocitat de rotació.

El 1971, Stephen Hawking va demostrar que qualsevol forat negre que roti de manera estacionària (és a dir, sobre si mateix) sempre tindria un eix de simetria.

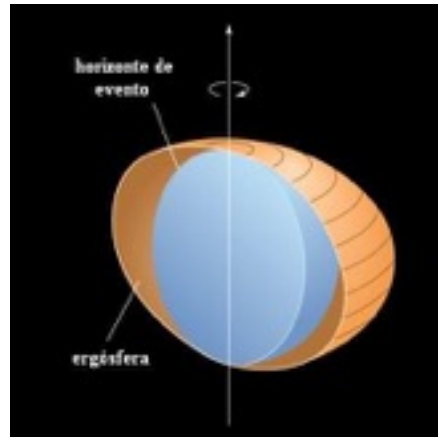


Fig. 31 Estructura d'un forat negre amb rotació (moment angular)

Finalment, el 1973, David Robinson va utilitzar els dos resultats per demostrar que la hipòtesi inicial era correcta.

Així, després d'un col·lapse gravitatori, un forat negre ha de quedar-se en un estat en el qual pot rotar però no pot tenir pulsacions (és a dir, augments i disminucions de la seva mida). A més a més, la seva mida i forma només dependrien de la seva massa i velocitat de rotació i no de la naturalesa del cos que l'ha generat a partir del seu col·lapse.

Aquest resultat es va donar a conèixer amb la frase "Un forat negre no té pel" i té una gran importància pràctica perquè redueix enormement els diferents tipus possibles de forats negres. Aquest teorema també implica que una gran quantitat d'informació es deu perdre quan es forma el forat negre, perquè després d'això, l'únic que es pot mesurar del cos és la massa, la rotació (moment angular⁶) i la càrrega.

4.5 Clasificacions dels forats negres segons el seu origen

4.5.1 Forats Negres estel·lars

Ara que ja sabem quin ha estat l'origen (suposadament) de les estrelles, podem explicar el tipus de forat negre que més es coneix, el forat negre estel·lar. Com el seu nom indica, es formen a partir del col·lapse d'estrelles. Anem a veure el que aquests cossos celestes són exactament.

4.5.1.1 Què és una estrella?

Les estrelles són motors d'energia còsmica que produeixen calor, llum, raigs ultraviolats, raigs X i altres formes de radiació. Estan compostes, gairebé totalment, per gas i plasma (el plasma és un estat de la matèria que es forma sota temperatures i pressions extremadament altes, fent que els impactes entre els electrons siguin molt violents i que se separi el nucli dels elements deixant només àtoms dispersos. El plasma, per tant, és

una barreja de nuclis positius i electrons lliures que tenen la capacitat de conduir l'electricitat. Un exemple de plasma present en el nostre Univers és el Sol o el medi interplanetari)

Ningú sap quantes estrelles existeixen, però podrien arribar un número extraordinari. El nostre Univers podria contenir més d'1.000.000 milions de galàxies i cada una d'aquestes podria tenir més de 100.000 milions d'estrelles.

Tot i 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.



Fig. 32 Sistema binari Sirio (Sirio A [gran] i Sirio B [petita])

El color d'una estrella ens dóna la mesura de la temperatura de la seva superfície. Les més calentes tenen una brillantor blanca o blavenca, mentre que les més fredes tenen un color vermell o ataronjat apagat. Al mateix temps, la temperatura indica quanta energia per segon irradia una àrea determinada de la superfície de l'estrella. Si ho multipliquem per l'àrea total de la superfície de l'estrella, obtenim la lluminositat de l'estrella (la mesura de quanta energia irradia a l'espai cada segon).

a) Parts d'una estrella

- *Nucli*

El nucli d'una estrella és la seva part més interna. És la zona més densa i més calenta. El nucli del Sol té una densitat de 160,000 kg/m³ i una temperatura de 15 milions de graus Kelvin, per exemple. En un nucli estel·lar, les reaccions de fusió creen energia que produeixen els raigs gamma i neutrins.

- *Zones radioactives i convectives*

Després del nucli ve la zona radiativa en la qual l'energia és transportada per radiació.

- *Fotosfera*

A continuació de les zones radioactives està la fotosfera estel·lar, en la qual s'emet la llum visible. En el cas del Sol, aquesta llum es pot observar a ull nuu, però en el cas d'una estrella distant es necessitaria un telescopi. La informació sobre la temperatura, pressió i composició de la fotosfera d'una estrella és detectada a partir de l'espectre de llum.

- *Cromosfera*

Seguidament, es troba la cromosfera. Al sol, la cromosfera és de gas hidrogen. Les flamarades solars es disparen a través d'aquesta.

- *Corona*

La part exterior d'una estrella és la corona. S'estén milions de quilòmetres a l'espai. La corona del Sol només pot ser visualitzada durant un eclipsi solar. Núvols de gas enormes surten de la cromosfera a través de la corona.

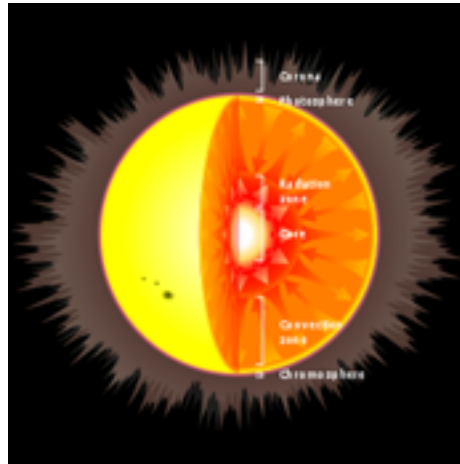


Fig. 33 Parts d'una estrella

4.5.1.2 Cicle de la vida d'una estrella

Abans d'explicar el cicle de vida d'una estrella, és necessari conèixer uns conceptes bàsics:

a) *Espectre electromagnètic i estrelles*

S'anomena espectre electromagnètic a la distribució energètica del conjunt de les ones electromagnètiques. Està format pels camps elèctric i magnètic i la radiació (les ones) provoca vibracions en aquests camps. En relació a una substància, s'anomena espectre electromagnètic a la radiació electromagnètica que emet (espectre d'emissió) o absorbeix (espectre d'absorció). Aquesta radiació serveix per identificar la substància, actua com una empremta d'aquesta.

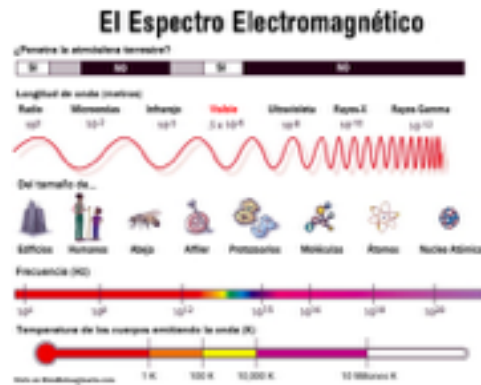


Fig. 34 Longituds, tamanys i freqüències de l'espectre electromagnètic.

Els espectres es poden contemplar mitjançant espectroscopis que, a més de permetre observar l'espectre, permeten realitzar mesures sobre el mateix, com són la longitud d'ona (distància que recorre la pertorbació per unitat de temps), la freqüència (el nombre d'oscil·lacions per unitat de temps) i la intensitat de la radiació.

L'espectre electromagnètic s'estén des de la radiació de menor longitud d'ona, com els raigs gamma i els raigs X, passant per la llum ultraviolada, la llum visible i els raigs infrarojos, fins a les ones electromagnètiques de major longitud d'ona, com són les ones de ràdio. Les partícules que corresponen a aquestes ones són els fotons:

Aquesta és la partícula portadora de totes les formes de radiació electromagnètica, incloent als raigs gamma, els raigs X, la llum ultraviolada, la llum visible, la llum infraroja, les microones, i les ones de ràdio. El fotó té massa zero i viatja en el buit amb una velocitat constant c ($3 \cdot 10^8$ Km/s). Presenta tant propietats corpusculars com ondulatories ("dualitat ona-corpúscle"). Es comporta com una ona en alguns fenòmens com la refracció que té lloc en una lent, o com una partícula quan interacciona amb la matèria per transferir energia. El concepte de fotó ha portat a avenços molt importants en física teòrica i experimental, com ara la teoria quàntica de camps i a invents com el làser. D'acord amb el model estàndard de física de partícules els fotons són els responsables de produir tots els camps elèctrics i magnètics i, al seu torn, són el resultat que les lleis físiques tinguin simetria en tots els punts de l'espai-temps.

Tornant al comportament del fotó com a ona, es creu que el límit per a la longitud d'ona més petita possible és la longitud de Planck, per sota de la qual els resultats que podem mesurar no són fiables perquè la mecànica quàntica (part de la física que s'ocupa dels fenòmens físics a escales microscòpiques) influiria.

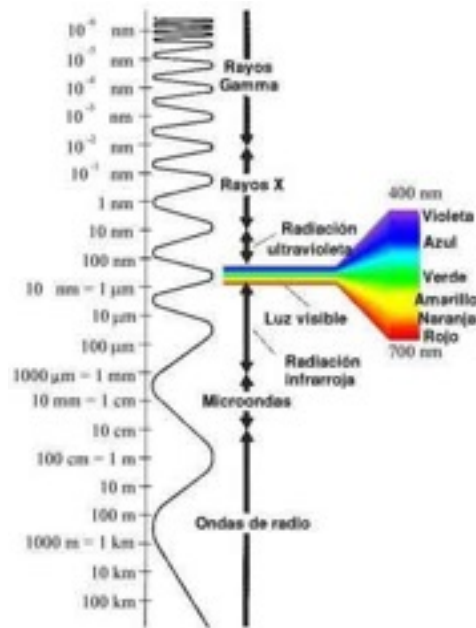


Fig. 35 Espectre electromagnètic, es pot veure la franja de llum visible

Per al seu estudi, l'espectre electromagnètic es divideix en segments o bandes. Es pot obtenir molta informació sobre les propietats físiques d'un objecte a través de l'estudi del seu espectre electromagnètic, sigui per la llum emesa o absorbida per ell. Per a això s'analitzen els espectres d'emissió i absorció.

L'espectre d'emissió atòmica d'un element és un conjunt de freqüències de les ones electromagnètiques (forma que adopta l'energia segons la teoria ondulatoria) emeses per àtoms d'aquest element, en estat gasós, quan se li comunica energia. L'espectre d'emissió de cada element és únic.

L'espectre d'absorció d'un material mostra la fracció de la radiació electromagnètica (ones electromagnètiques) que es propaguen a l'espai que un material absorbeix dins d'un rang de freqüències. Cada element químic posseeix línies d'absorció en algunes longituds d'ona, fet que està associat a les diferències d'energia dels seus orbitals atòmics (línies de Fraunhofer). De fet, s'empra l'espectre d'absorció per identificar els elements components d'algunes mostres, com líquids i gasos.

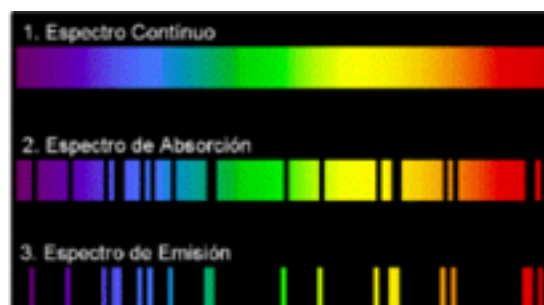


Fig. 36 Exemple d'espectres

En dispersar la llum provinent d'una estrella (quan la llum passa per un prisme) es pot obtenir el seu espectre. Les característiques de cada espectre depenen de la temperatura de les capes superficials de l'estrella.

Cada element químic té un espectre electromagnètic corresponent i per tant la composició de l'atmosfera estel·lar obtenint l'espectre de l'estrella.

Les línies fosques que s'obtenen són el resultat de l'absorció de part de l'energia de l'estrella per part d'un element químic, per tant, es diuen línies d'absorció i es produeixen quan la radiació procedent el nucli de l'estrella travessa una zona més freda (més superficial).

A vegades, en certs espectres són visibles línies que, al contrari que les línies d'absorció, brillen més que la resta de l'espectre. Aquestes són les nomenades línies d'emissió, produïdes per un gas escalfat a certa temperatura. Això sol observar-se en estrelles que es troben rodejades per un gas a alta temperatura.

Els tipus espectrals són classificats per lletres, des de la major a la menor temperatura de la següent manera:

O, B, A, F, G, K, M, L, T, C y S

Tipus Espectral	Temperatura (graus Kelvin)	Característiques
O	20000 a 35000	Estrelles blaves. Poques línies espectrals i dèbils. Mostren àtoms ionitzats, especialment He III, C III, N III, O III, Si V.
B	15000	Estrelles blanques o blavenques. Són observables línies de O II, Si II, Mg II i He I.
A	9000	Estrelles blanques. La línia del H I domina l'espectre. Comença a aparèixer les línies dels metalls neutres.
F	7000	Estrelles blanques i groguenques. Les línies dels metalls ionitzats augmenten.
G	5500	Estrelles grogues. La intensitat de les línies dels metalls neutres augmenten.
K	4000	Estrelles groguenques i ataronjades. L'espectre està dominat per les línies dels metalls.
M	3000	Estrelles vermelles. No es pot observar un espectre continu.
L	1200 a 2000	Conté les nanes vermelles més fredes i les marrons més calentes, que es mantenen degut a la fusió de deuteri i la contracció gravitatoria. Les nanes marrons presenten línies d'absorció de liti. Les línies dels metalls alcalins, especialment la del Potassi, es fan molt fortes a mesura que baixa la temperatura.

T	750 a 1200	Només visible al infraroig. L' espectre es ric en metà i molècules d' aigua i hidruro de Ferro (FeH).
C	5500 a 3000	Estrelles de carboni (molt vermelles ja que els compostos d'aquest element absorbeixen les longituds d' ona blaves).
S	3000	Estrelles gegants vermelles

A la taula apareixen molts elements amb números romans, aquests indiquen l'estat d'ionització⁷ dels mateixos seguint I l'element neutre, II l'ionitzat un cop, III ionitzat dos vegades, etc.

Els diferents tipus d'estrelles (classificant-les segons el seu espectre) formen una banda al diagrama de temperatura-lluminositat conegut com a diagrama de Hertzsprung-Russell. El diagrama de Hertzsprung-Russell, ideat per E. Hertzsprung i H. N Russell entre 1905 i 1913, és un diagrama estadístic en què les estrelles estan classificades en relació amb la seva temperatura i lluminositat.

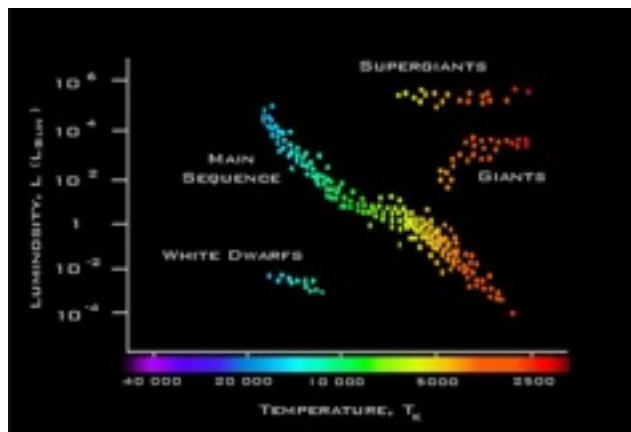


Fig. 37 Diagrama de Hertzsprung-Russell

La representació està feta sobre un pla de coordenades cartesianes en les quals la temperatura superficial de les estrelles es disposa sobre l'eix horitzontal, en sentit decreixent d'esquerra a dreta i la lluminositat sobre l'eix vertical, en sentit creixent de baix a dalt.

D'aquesta manera veiem que la major part de les estrelles ocupen una diagonal del diagrama que ha estat definida com a seqüència principal. En la diagonal, les estrelles blaves de gran massa i lluminositat es troben a dalt a l'esquerra; Les estrelles grogues de mida mitjana i lluminositat mitjana, com el Sol, es troben al centre; les vermelles i petites, es troben a baix a la dreta.

A més de la seqüència principal, el diagrama està caracteritzat per una altra branca, a dalt a la dreta, en la qual hi ha una major densitat de les estrelles gegants i súper gegants vermelles de baixa lluminositat. Per últim, a baix a la dreta hi ha una major densitat de nanes blanques de gran lluminositat.

La seqüència principal està ocupada per estrelles arribades a la maduresa, com el nostre Sol. Representa també l'estadi evolutiu en el qual l'estrella transcorre la major part de la seva existència.

b) Principi d'exclusió de Pauli

El principi d'exclusió de Pauli estableix que no hi pot haver dues partícules d'espín semi enter [per exemple, electrons que tenen un spin (moment angular de les partícules que tenen rotació) $\frac{1}{2}$] que tinguin els seus quatre nombres quàntics iguals. Aquest principi té un paper molt important en molts fenòmens físics però ens centrarem en el paper que juga en l'estabilitat de la matèria a gran escala a les nanes blanques i a les estrelles de neutrons.

El principi funciona de la següent manera: les molècules no es poden aproximar arbitràriament entre elles, perquè els electrons lligats a cada molècula no poden entrar en el mateix estat que els electrons de les molècules veïnes. Els constituents de les nanes blanques o les estrelles de neutrons només se sustenten per la "pressió de degeneració" (que els prohibeix estar en un mateix estat quàntic). Aquest estat de la matèria es coneix com a matèria degenerada. En les nanes blanques, els àtoms es mantenen apartats per la pressió de degeneració dels electrons. A les estrelles de neutrons, que presenten forces gravitacionals encara més grans, els electrons s'han fusionat amb els protons per produir neutrons, que tenen una pressió de degeneració major.

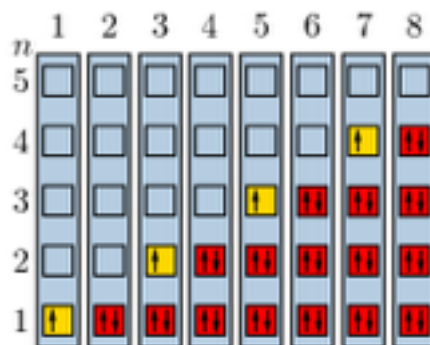


Fig. 38 Exemple del principi d'exclusió de Pauli (Kr)

c) Reaccions nuclears

Una reacció nuclear és un procediment que té com a resultat modificar els nuclis dels àtoms i les partícules subatòmiques. A través d'aquests procediments, els nuclis poden

combinar-se o fragmentar-se, absorbint o alliberant partícules i energia depenent del cas. Són la causa de la formació dels diferents elements de la taula periòdica. Si els nuclis es fragmenten, es produirà una reacció de fissió nuclear i si s'uneixen, es parla de fusió nuclear (que és la més rellevant en relació amb el tema que estem tractant, ja que és la que es produeix a l'interior de les estrelles).

Reacció de fissió nuclear

És un tipus de reacció nuclear que es produeix quan un nucli pesant es divideix en dos o més nuclis lleugers. Va ser descoberta per O. Hahn i F. Strassmann el 1939.

Reacció de fusió nuclear

La fusió nuclear és un procés on dos o més nuclis es combinen per formar un element amb un nombre atòmic més gran. És inversa a la fissió nuclear i és la que succeeix a l'interior de les estrelles i els proporciona l'energia que necessiten, ja que aquesta reacció allibera energia.

Perquè es doni aquesta reacció és necessari que els nuclis estiguin molt junts l'un de l'altre perquè la força nuclear faci efecte i es puguin atreure. La distància entre els dos nuclis ha de ser mínima, ja que la força nuclear¹ ha de contrarestar les forces electrostàtiques (els nuclis tenen la mateixa càrrega per tant es repelen) i per aquest motiu també, les fusions succeeixen amb més facilitat en un ambient de gran densitat i temperatura.

A la Terra, només s'ha aconseguit portar a terme un procés de fusió nuclear amb la bomba d'hidrogen, que és una bomba atòmica que en comptes de fer reaccions de fissió, en fa de fusió.

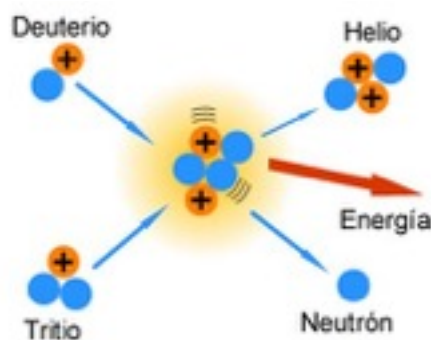


Fig. 39 Exemple de fusió nuclear

4.5.1.3 Com deriva un forat negre a partir d'una estrella

Un cop assimilats els conceptes anteriors, ja podem entendre aquest procés que comença amb una estrella i acaba amb un forat negre.

L'hidrogen és una part fonamental de les estrelles. El gas circula per l'espai en núvols de pols còsmic anomenats nebuloses. Amb el temps, la gravetat fa que els núvols es condensin i es col·lapsin. A mesura que es fan més petits, els núvols giren més ràpids en espiral a causa de la conservació del moviment angular. L'acumulació de la pressió provoca un augment de la temperatura a l'interior d'una estrella naixent, i la fusió nuclear de l'hidrogen comença quan la temperatura del nucli d'una estrella jove en desenvolupament arriba fins als 15 milions de graus Celsius.

Les estrelles joves es diuen, en aquesta etapa, protoestels. A mesura que es desenvolupen, acumulen massa dels núvols que la rodegen i creixen com a estrelles de la seqüència principal (que ja hem explicat abans). Les estrelles en la seqüència principal, com el Sol, existeixen en un estat de fusió nuclear durant el qual emetran energia durant milions d'anys convertint l'hidrogen en heli.

Les estrelles evolucionen durant molts d'anys. Quan finalitza la seva fase de seqüència principal passen a través d'altres estats d'existència en funció de la seva mida i altres característiques. Com més gran sigui l'estrella, menor serà el seu interval de vida, ja que si l'estrella és més massiva, ha d'estar a una temperatura més alta per contrarestar la seva atracció gravitatòria i per tant cremaran el seu combustible en menys temps. Les estrelles poden tenir moltes mides, que es classifiquen en un rang de nanes a súper gegants. Les súper gegants poden tenir radis mil vegades més grans que el Sol.

A mesura que les estrelles arriben al final de la seva vida, l'hidrogen s'haurà convertit en heli.

L'heli s'enfonsa al nucli de l'estrella augmentant la seva temperatura i provocant l'expansió de la seva capa exterior. Aquestes estrelles gegants i inflades es coneixen com a gegants vermelles i a causa d'aquest despreniment de la capa exterior, no superen el límit de Chandrasekhar (que explicarem en els següents paràgrafs) i no col·lapsen per formar un forat negre.

Quan una estrella s'allibera de la coberta exterior explotant com a nova o supernova, torna al medi estel·lar elements més pesats que l'hidrogen que ha sintetitzat al seu interior.

Si continua brillant, la temperatura del nucli ha de pujar suficientment com per produir la fusió dels nuclis d'heli. Durant aquest procés és probable que l'estrella es faci molt més petita i, per tant, més densa i es converteix en una nana blanca. Com la seva massa no supera el límit de Chandrasekhar, no es col·lapsa i s'estabilitza, ja que hi ha un equilibri entre la repulsió del Principi d'exclusió de Pauli (que es produeix, en aquest cas, entre electrons) i l'atracció de la gravetat.

Les nanes blanques es refreden durant milions d'anys, fins que finalment s'apaguen i deixen de produir energia. En aquest punt, el qual els científics no han pogut observar encara, aquestes estrelles passen a ser conegudes com a nanes negres.

Només unes poques estrelles eviten aquest camí evolutiu i sorgeixen mitjançant una forta detonació com a supernoves, ja mencionades anteriorment. Aquestes explosions deixen un petit nucli que pot convertir-se en una estrella de neutrons (que s'estabilitza a causa de l'equilibri entre la repulsió deguda al Principi d'exclusió de Pauli, entre neutrons en aquest cas, i l'atracció de la gravetat). Això és possible, com sempre, perquè la massa de l'estrella no supera el límit de Chandrasekhar.

Una supernova és una explosió còsmica massiva que llença material a l'espai a uns 15.000-40.000 quilòmetres per segon i que emet més llum que tota la resta d'estrelles de la galàxia juntes. Com a mitjana, centenars de mils de supernoves exploten al dia en el nostre Univers i normalment un cop per segle en cada galàxia. Aquestes explosions produeixen una gran part de la matèria primera del nostre Univers, incloent-hi elements com el ferro que conforma el nostre planeta i inclús a nosaltres mateixos. Poques estrelles exploten en supernoves. Moltes es refreden i acaben els seus dies com nanes blanques. Una supernova pot derivar de dues situacions:

- Estrelles massives, bastants vegades més grans que el nostre Sol, poden crear supernova quan el seu procés de fusió del nucli acaba el combustible, amb l'objectiu de reduir la seva massa per no superar el límit de Chandrasekhar i no col·lapsar.
- Les supernoves també poden formar-se a partir d'un sistema solar binari. Estrelles més petites, amb una massa superior a la del nostre Sol fins a vuit vegades, solen evolucionar en nanes blanques. Una estrella d'aquesta mida és molt densa i, tot i així, té la suficient força gravitatòria per a rebre matèria de la segona estrella del sistema si estan suficientment a prop. Si la nana blanca supera el límit de Chandrasekhar, la pressió del nucli serà tan gran que es fusionarà i es produirà en una gran explosió termonuclear (supernova).

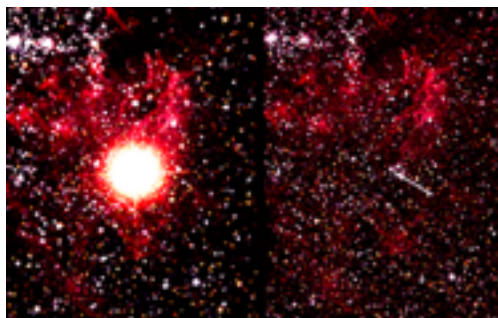


Fig. 40 Explosió de la supernova 1987A

El límit de Chandrasekhar és la màxima massa possible que ha de tenir una estrella per què s'estabilitzi i no es col·lapsi quan esgoti el seu combustible. Si se supera aquest límit, l'estrella col·lapsarà per convertir-se en un forat negre o explotarà en una supernova per tal de reduir la seva massa.

Les generacions futures d'estrelles formades a partir d'aquest material començaran la seva vida amb un sortit més ric d'elements pesats que les generacions anteriors. Les estrelles que es desfan de les seves capes exteriors d'una forma no explosiva es converteixen en nebuloses planetàries, estrelles velles rodejades per esferes de gas que irradien múltiples longituds d'ona.

La teoria sobre l'evolució de les estrelles es basen en proves obtingudes dels estudis dels espectres relacionats amb la lluminositat.



Fig. 41 Cicle de vida d'una estrella

4.5.2 Forats Negres súpermassius

Els forats negres estel·lars són els més coneguts però també existeixen uns forats negres d'un altre tipus, anomenats supermassius. Aquest són milions o bilions de vegades més massius que el sol però tenen un radi similar a ell. Existeixen, suposadament, al centre de totes galàxies, inclosa la nostra, la Via Làctia (Sagittarius A*).



Fig. 42 Sagittarius A *

4.5.2.1 Quan i com es van formar

El problema dels forats negres supermassius és com s'han pogut formar, ja que no han pogut fer a partir d'una estrella, com els anteriors, perquè no existeixen estrelles amb una massa tan gran com la que tenen aquests forats (el límit teòric de la massa d'una estrella és d'unes 150-200 vegades el nostre Sol).

Una de les possibilitats que plantejava la comunitat científica és que aquests forats fossin inicialment estel·lars i, amb el pas del temps, a l'estar situats en regions amb una alta concentració d'estrelles i gas, hagin anat absorbint massa fins a arribar a ser tan massius.

Però aquesta teoria tenia interrogants sense resoldre, per exemple, les primeres galàxies que es van formar a l'Univers primitiu, ja contenien forats negres supermassius, que no podien ser inicialment forats negres típics, ja que no els hauria donat temps d'absorbir una quantitat tan alta de matèria, a mesura que un forat negre absorbeix matèria, es forma un disc al voltant que es calenta i brilla, desprenent una energia (normalment energia lluminosa en forma de raig X) que fa que la matèria atreta pel forat negre es dirigeixi cap a ell més lentament, el que fa més difícil que el forat creixi.

No obstant això, els treballs que va realitzar Lucio Mayor del Institute for Theoretical Physics in Switzerland publicats a la prestigiosa revista científica Nature el 2010 indiquen que la resposta més probable a l'interrogant de com es van formar aquests forats és considerar els xocs entre dues galàxies originals, quelcom freqüent a l'Univers primitiu, que contenien molt més gas que les actuals. Mentre les dues galàxies col·lidien, el seu gas va ser arrossegat cap al centre mitjançant forces de marea, com quan l'aigua de la Terra es atreta per la Lluna, formant un núvol dens i massiu que podria haver col·lapsat ràpidament en un forat negre, sense passar per la fase d'estrella.

Per confirmar aquesta teoria, els científics havien de plantejar com emetia llum un forat negre d'aquest tipus i a partir d'aquesta hipòtesi, observar galàxies llunyanes, ja que com més llunyà estigui un objecte de nosaltres, més primitiu serà, amb els telescopis Hubble i Spitzer (que observen l'espectre de llum a l'infraroig).



Fig. 43 Telescopi Hubble

4.5.3 Forats Negres intermedis

Amb aquests telescopis tenim la possibilitat d'observar galàxies tan llunyanes a nosaltres, que encara les veiem quan estaven formant-se. Van aconseguir unes 2000 galàxies candidates que estaven en el moment en què aquests forats negres supermassius s'estaven formant. El següent pas va ser buscar l'emissió de raig X d'aquests objectes. Amb l'ajuda de l'observatori de Raig X Chandra van trobar dos d'entre totes les galàxies candidates que emetien els raig x de la manera que havien predit. Sembla un resultat molt petit com per tenir-lo en compte, però és suficient per a demostrar que els científics no estan tan desencaminats.

El telescopi James Webb, que serà llençat el 2018, serà més sensible que els seus predecessors, podrà captar l'emissió de més galàxies, i es podrà estudiar amb més exactitud aquest fenomen.

Els científics creien que només existien els forats negres estel·lars i els supermassius, però les últimes investigacions han revelat la possible existència d'uns forats negres intermedis (IMBHs). Aquests cossos es podrien formar a partir de la col·lisió en cadena de diverses estrelles. Es baralla la possibilitat que a partir d'aquest, s'hagin format els supermassius, ja que moltes reaccions d'aquest tipus en una mateixa regió de l'Univers podrien haver estat les causants d'aquests forats.

Les evidències de la seva existència són les emissions de raig X molt brillants, diferents de les emissions dels forats negres estel·lars i els supermassius, que s'emeten quan la matèria cau a l'interior del forat negre. Moltes pistes de la seva existència provenen dels cúmuls globulars, que consisteixen en agrupacions denses de milers d'estrelles. L'òrbita d'aquestes estrelles fa pensar que tenen un IMBHs al seu centre.

4.5.4 Forats Negres primordials

És un tipus de forat negre que es forma per l'extrema densitat de la matèria durant els primers temps de l'expansió de l'Univers.

Segons el model del Big Bang, durant els primers moments després de la gran explosió, la pressió i la temperatura eren extremadament altes. Sota aquestes condicions, una simple oscil·lació o canvi de la densitat de la matèria podria donar lloc a regions amb prou densitat per a crear forats negres. Encara que la majoria d'aquestes regions d'alta densitat es dispersarien ràpidament per l'expansió de l'Univers, un forat negre podria ser estable, i perdurar fins al present. En algunes teories, seria possible la recreació d'aquestes condicions inicials en acceleradors de partícules i es podria recrear petites versions de micro forats negres. La seva massa pot variar.

4.5.5 Estructura

L'estructura dels forats negres és molt senzilla. Tot i que hi ha forats negres de mides i masses molt diferents, les seves estructures són iguals. Tota la massa d'un forat negre

està concentrada en un punt infinitament petit i dens anomenat singularitat. La singularitat és el punt on la matèria es comprimeix tant que cap altre força natural pot igualar-la. Aquest punt està rodejat pel que s'anomena horitzó d'esdeveniments o successos, una superfície imaginària de forma esfèrica en la qual la velocitat necessària d'escapament (és a dir, la velocitat que ha d'adquirir un cos per escapar de l'atracció gravitatòria) equival a la velocitat de la llum o major.

En la singularitat, la gravetat és d'una força gairebé infinita. A mesura que disminueix la distància entre un cos i la singularitat, la influència gravitatòria del forat negre augmenta. Per contra, quan augmenta la distància entre un cos i la singularitat, la influència gravitatòria disminueix.

4.6 Classificació dels forats negres segons les propietats físiques

- *Forat negre d'Schwarzschild*: forat negre més senzill el que té menys massa, no té càrrega ni moviment de rotació.
- *Forat negre de Reissner-Nordstorm*: no gira però té càrrega elèctrica.
- *Forat negre de Kerr*: té un moviment de rotació però no té càrrega.
- *Forat negre de Kerr-Newman*: té un moviment de rotació i càrrega.

4.6.1 Què vol dir que un forat negre té velocitat de rotació i càrrega?

En l'apartat que ve a continuació, veurem que l'espai-temps és dinàmic (per exemple, pot vibrar → ones gravitacionals). Per tant, quan diem que un forat negre té rotació volem dir que és l'espai-temps el que rota i això té una conseqüència en la matèria que cau al forat negre. Aquest es comporta com un desguàs: la matèria cau dins del forat negre en forma d'espiral. Aquests forats negres que tenen rotació es formen pel col·lapse d'una estrella massiva en rotació o el col·lapse d'un conjunt d'estrelles o gas amb un moment angular diferent de 0 [$L(\text{moment angular}) = I(\text{moment inercial}) \cdot \omega(\text{velocitat angular}) \neq 0$]

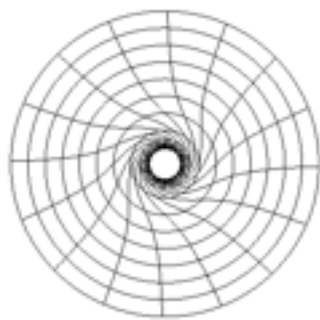


Fig. 44 Rotació de l'espai-temps



Fig. 45 Rotació d'un forat negre

Per parlar de la càrrega d'un forat negre hem de conèixer la Llei de la conservació de la Càrrega: "És impossible produir o destruir una càrrega positiva sense produir o destruir (respectivament) al mateix una càrrega negativa d'igual magnitud, per tant, la càrrega elèctrica total de l'Univers és una magnitud constant, no es crea ni es destrueix."

Si relacionem aquesta teoria amb els forats negres, ens porta a una conclusió una mica abstracta però de la qual la comunitat científica està gairebé segura: partint d'aquest principi, un forat negre pot estar format a partir de matèria carregada, com electrons per exemple, i aquesta matèria pot desaparèixer al formar la singularitat (ben bé no se sap el que li passa a la matèria un cop es forma la singularitat) però els efectes de la seva càrrega no, ja que aquesta és una constant en l'Univers segons el principi.

4.6.2 Estructura

Un forat negre en rotació (forat negre de Kerr) té la mateixa estructura que un forat negre sense rotació. Es mou per la zona anomenada ergosfera, que actuaria com un segon horitzó d'esdeveniments, ja que aquí, la velocitat angular (velocitat de rotació) de l'astre és igual a la velocitat de la llum, per tant la llum o qualsevol objecte es veurien obligats a seguir aquesta rotació.

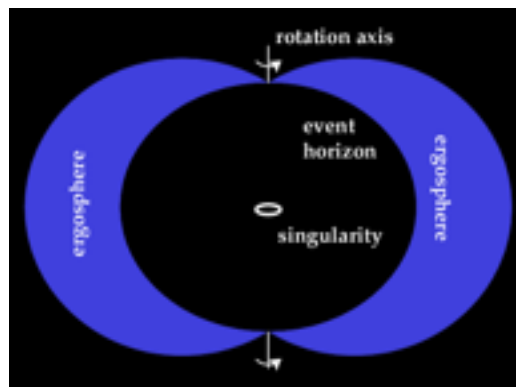


Fig. 46 Estructura d'un forat negre

5 Relativitat general: Llei de la gravitació universal

5.1 Origen de la Relativitat General

Parlem ara de la relativitat general que és una teoria molt important que porta implícita l'existència dels forats negres. Una de les prediccions de la relativitat general és que els objectes pesants en moviment produiran l'emissió d'ones gravitatòries, rínxols a la curvatura de l'espai-temps⁸ que viatgen a la velocitat de la llum.



Fig. 47 Ones gravitacionals

Aquestes ones són molt difícils de detectar i s'emporten amb elles energia dels objectes que les emeten. És d'esperar, per tant, que un sistema d'objectes massius s'estabilitzés finalment en un estat estacionari (sense moviment), ja que l'energia de qualsevol moviment es perdria a l'emissió d'ones gravitatòries (és semblant a tirar un tap de suro a l'aigua, al principi es mouria bruscament cap amunt i cap avall però quan les ones s'emportessin la seva energia es quedaria finalment a un estat estacionari).



Fig. 48 Ones a l'aigua

Per exemple, el moviment de la Terra al voltant del Sol produeix ones gravitatòries. L'efecte d'aquesta pèrdua d'energia serà canviar l'òrbita de la Terra de manera que s'anirà apropant cada cop més al Sol fins que, finalment, col·lideixi amb ell. La pèrdua d'energia al cas de la Terra i el Sol és molt lenta, passaran encara mil bilions de bilions d'anys abans que xoquin. De tota manera, els científics han detectat aquest mateix efecte a un sistema anomenat PSR 1913 +16 (PSR vol dir púlsar, que és un tipus especial d'estrella

de neutrons que emet ones de ràdio). Aquest sistema conté dues estrelles de neutrons girant una al voltant de l'altre. L'energia que estan perdent, a causa de l'emissió d'ones gravitatòries les fa girar entre si en forma d'espiral. Aquesta confirmació de la relativitat general els va valdre a J. H. Taylor i a R. H. Hulse el premi Nobel el 1993.

Durant el col·lapse gravitatori d'una estrella per formar un forat negre, els moviments serien molt més ràpids i per tant augmentaria també el ritme d'emissió d'energia. Per tant, no trigaria a arribar a un estat estacionari.

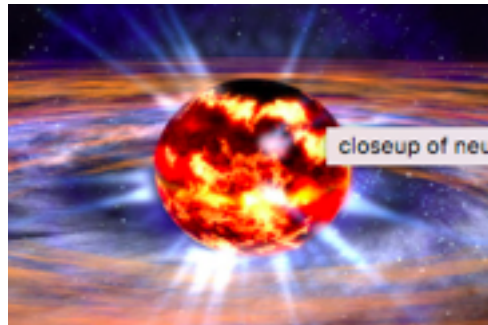


Fig. 49 Estrella de neutrons

Basant-nos en la teoria de la relativitat, res pot viatjar més de pressa que la llum, per tant, si la llum no pot escapar, tampoc ho pot fer qualsevol altre objecte. S'obté una regió de l'espai-temps, un conjunt d'esdeveniments des d'on res pot escapar i arribar a un observador. Aquesta regió és el que avui dia anomenem forat negre.

Dos científics que han aportat hipòtesis molt importants en aquest camp són Stephen Hawking i Roger Penrose.

Els forats negres van ser una predicció de les equacions de la relativitat general. Per tant, per entendre'ls (com a mínim parcialment) cal que sapiguem que va aquesta teoria.

La relativitat general és una teoria de la gravitació desenvolupada per Albert Einstein entre els anys 1907 i 1915. Unifica la relativitat especial i la llei de la Gravitació Universal d'Isaac Newton i ens dóna una descripció de la gravetat com una propietat geomètrica de l'espai-temps. Concretament, la curvatura de l'espai-temps està directament relacionada amb l'energia i la quantitat de moviment ($p=mv$) de qualsevol matèria i radiació que hi hagi presents. Presentem a Albert Einstein:



Fig. 50 Curvatura de l'espai-temps descoberta per Einstein

Albert Einstein va ser un físic i jueu alemany (va néixer el 14 de març de 1879 i va morir el 18 d'abril de 1955) conegut principalment pel desenvolupament de la teoria de la relativitat (especial i general) i l'explicació teòrica del moviment brownià i l'efecte fotoelèctric.

Va néixer a la ciutat alemanya d'Ulm, però a l'any de vida la seva família es va mudar a Munic, on viuria fins als 15 anys. Amb 17 va ingressar a l'Escola Politècnica Federal de Zurich per estudiar matemàtiques i física. Cinc anys més tard, ja graduat, va aconseguir la nacionalitat suïssa i el 1902 va començar a treballar a l'Oficina Federal de la Propietat Intel·lectual de Suïssa, ocupació que va compaginar fins als 30 anys amb les seves investigacions científiques.

El 1905 va ser el seu any més fructífer, resultat de la publicació de quatre articles científics sobre l'efecte fotoelèctric, el moviment brownià, la teoria de la relativitat especial i l'equivalència massa-energia ($E = mc^2$). El primer li va valer el Premi Nobel de Física de l'any 1921, el segon el grau de doctor i els dos últims li consagrarien, amb el temps, com el major científic del segle XX.

El 1908 va començar a exercir com a professor de física a la universitat de Berna, càrrec que continuaria anys posteriors a Praga i finalment a Berlín, ciutat en què va viure fins que l'ascens del règim nazi li fes abandonar Alemanya i mudar-se als Estats Units (1932). Allà va impartir docència a l'Institut d'Estudis Avançats de Princeton, es va nacionalitzar nord-americà (obtenint la doble nacionalitat suïssa-americana) i va passar la resta de la seva vida intentant integrar les lleis físiques de la gravitació i l'electromagnetisme així com divulgant valors pacifistes i socialistes.

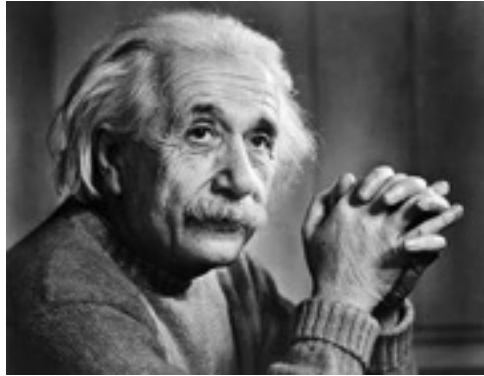


Fig. 51 Albert Einstein

5.2 Desenvolupament de la teoria

Amb la teoria de la relativitat especial d'Einstein en 1905, la qual postulava que cap informació podia viatjar més ràpid que la llum (300.000 km/s), la teoria de la gravitació de Newton, en la que una força d'atracció actuava entre dues masses de forma instantània, va quedar desbancada.

La relativitat general va sorgir com una evolució de la relativitat especial, ja que introdueix el concepte de camp gravitatori.

5.2.1 Teoria de la relativitat especial

La teoria de la relativitat especial formula la transformació de les lleis de la física respecte als observadors i s'aplica a casos de sistemes en els quals no es tenen en compte els camps gravitatoris⁹.

Aquesta llei formula dos postulats:

- Les lleis que regeixen els fenòmens físics són idèntiques en tots els sistemes de referència inercials, és a dir, sistemes constants sobre els quals no actua cap força.
- La velocitat de la llum al buit és una constant universal, independent del moviment relatiu de la font i l'observador.

Einstein va formular aquesta teoria per conciliar les lleis de Newton amb l'electromagnetisme (interacció entre partícules amb càrregues elèctriques). Fins aleshores, els físics pensaven que la mecànica clàssica d'Isaac Newton, basada en l'anomenada relativitat de Galileu, descrivia els conceptes de velocitat i força per a tots els observadors, o sistemes de referència. No obstant això, Hendrik Lorentz i altres, havien comprovat que les equacions de Maxwell, que governen l'electromagnetisme, no es comportaven d'acord amb aquesta condició; per exemple, quan es considera el mateix

problema físic des del punt de vista de dos observadors que es mouen l'un respecte de l'altre.

Aquest fet presenta un problema fonamental. Una càrrega elèctrica en moviment crea un camp magnètic⁴. Però si un observador es mou conjuntament amb la càrrega, o bé no observa cap camp magnètic (perquè per a ell la càrrega no es mou), o bé la llei del camp magnètic provocat per el corrent no és la mateixa depenent de la velocitat de l'observador.

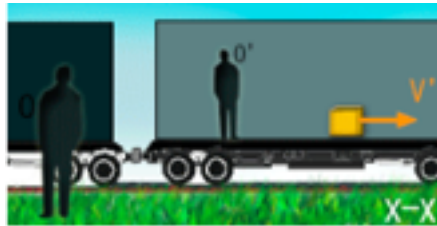


Fig. 52 Velocitat segons el sistema de referència

Aplicant el concepte de què les lleis de la física són les mateixes per a tots els observadors, la teoria de la relativitat especial dedueix que altres magnituds físiques com la massa, la quantitat de moviment i la força també s'han de transformar en ser mesurades per observadors que es mouen a velocitats diferents entre ells.

Posem un altre exemple. El descobriment que la velocitat de la llum fos fixa no es podia conciliar amb les lleis de Newton, ja que si no existeix un patró absolut de repòs, no es pot fixar la velocitat absoluta d'un objecte, aquesta canviaria segons el sistema de referència. Si llencem una pilota dins d'un tren que va a 100 km/h, un observador que estigués dins del tren mesuraria que la pilota va a una velocitat x (per exemple 10km/h) i en canvi un observador que estigués a l'andana, veuria la pilota amb una velocitat de 100 km/h més els 10 km/h.

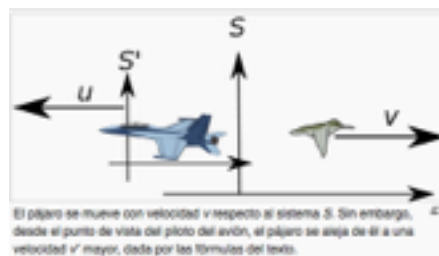


Fig 53. Canvi de velocitat segons el sistema de referència

En canvi, el que passa amb la llum és diferent perquè la seva velocitat es fixa independentment del sistema de referència. Els observadors de l'andana i del tren estarien d'acord en la velocitat de la llum però no en la distància que aquesta ha

recorregut ni en el temps en què ha recorregut aquesta distància. La relativitat especial ens obliga a abandonar la idea d'un temps absolut i universal, i ens mostra que el temps es combina l'espai per formar una entitat anomenada espai-temps⁵.

Un altre resultat de la relativitat especial és que les ones electromagnètiques exerceixen una pressió sobre els cossos que les emeten o les absorbeixen. Basant-se en aquest fet, Einstein extreu la seva famosa fórmula $E=mc^2$.

5.2.2 Teoria de la relativitat general

La teoria d'Einstein de la relativitat general està basada en la suggeriment revolucionària que la gravetat no és una força com les altres, sinó que és una conseqüència que l'espai-temps no és pla, a diferència del que havien suposat fins aleshores. A la relativitat general, la geometria l'espai-temps està deformat a causa de la distribució de massa i energia que conté.

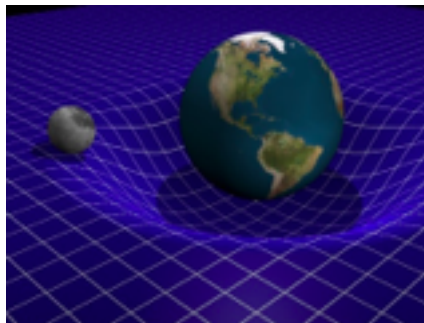


Fig. 54 Curvatura de l'espai-temps

Els objectes com la Terra no es mouen en òrbites corbades a causa d'una força anomenada gravetat, sinó perquè és la trajectòria més recta possible en un espai corbat, el que diem geodèsica, el camí més curt entre dos punts. Per exemple, la superfície de la Terra és un espai corbat bidimensional, on les seves geodèsiques són els cercles màxims, com per exemple l'equador o qualsevol cercle que passi pel centre de la Terra.

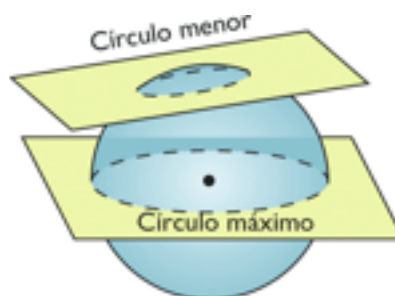


Fig. 55 Exemple de cercle màxim de la Terra

A la relativitat general, els cossos sempre segueixen les geodèsiques a l'espai-temps quadridimensional. En absència de matèria, les geodèsiques de l'espai-temps són línies rectes. En presència de matèria, l'espai quadridimensional queda deformat, fent que les trajectòries dels cossos es corbin (d'una manera que a la teoria newtoniana de la gravetat s'explicava pels efectes de l'atracció gravitatòria).

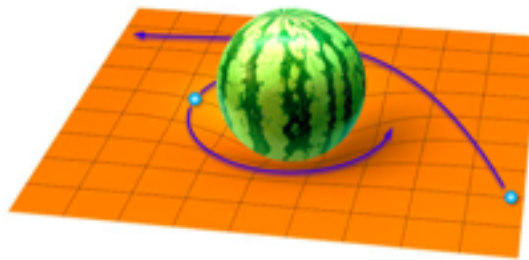


Fig. 56 Exemple de com una gran massa deforma l'espai-temps i la trajectòria dels cossos

Les òrbites dels planetes calculades per mitjà de la teoria de la gravetat de Newton o per mitjà de la relativitat general no difereixen molt, però s'ha comprovat que les òrbites dels planetes del sistema solar són exactament com es calculen amb la relativitat general.

També la llum segueix les geodèsiques a l'espai-temps. Això es pot comprovar, ja que la llum de les estrelles es corba en passar a prop del sol i això provoca que des de la Terra veiem que la mateixa estrella canvia la seva posició aparent respecte d'altres estrelles a mesura que el planeta gira al voltant del sol.

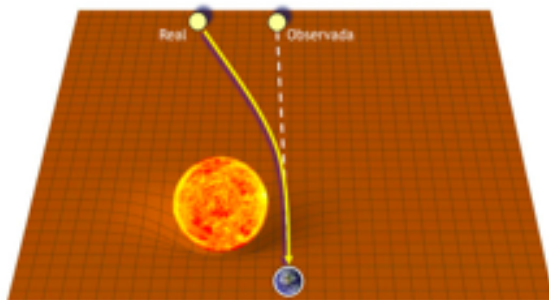


Fig. 57 Desviació de la llum

Una altra predicció de la relativitat general és que el temps semblaria més lent a les proximitats d'una gran massa, ja que aquesta teoria ha de seguir un dels postulats fonamentals de la relativitat especial: les lleis de la ciència han de ser les mateixes per tots els observadors que es mouen lliurement, a qualsevol velocitat. El principi d'equivalència expandeix aquesta idea als observadors que no es mouen lliurement, sinó als que estan sota la influència d'un camp gravitatori. El principi d'equivalència sosté que, en regions suficientment petites de l'espai, és impossible afirmar si estem en repòs en un

camp gravitatori o uniformement accelerats en l'espai buit. Posem un exemple: si ens imaginem que estem en un ascensor en un espai buit, sense gravetat. No hi ha "dalt" ni "avall", flotem lliurement. De cop i volta, l'ascensor es comença a moure amb una acceleració constant. Subtilment ens veiem atrets cap a una banda de l'ascensor, que es converteix en el terra. De fet, ara que estem accelerant, tot el que passa a l'interior de l'ascensor succeeix igual que si aquest estigués en repòs en un camp gravitatori.



Fig. 58 Està accelerant o sota la influència d'un camp gravitatori?

Ara que coneixem el principi d'equivalència, podem seguir amb la demostració del perquè el temps es veu afectat per la gravetat. Imaginem que una nau que està a l'espai és tan llarga que la llum triga un segon a recórrer-la de dalt a baix. Imaginem que, a més a més, que hi ha un observador al sostre de la nau i l'altre a terra, cadascun amb rellotges idèntics que marquen cada segon.

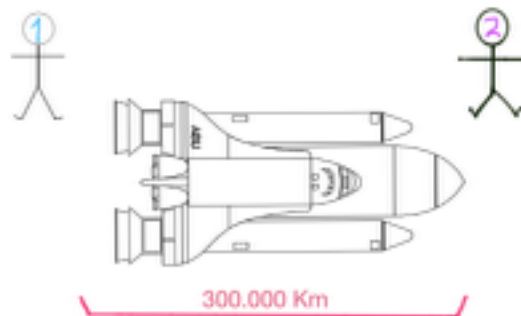


Fig. 59 Exemple

Suposem que l'observador del sostre espera una pulsació de rellotge i immediatament envia un senyal lluminós a l'observador que està a terra. L'observador del sostre repeteix aquesta operació a cada pulsació del seu rellotge. Segons el procediment, cada senyal viatja durant un segon, després del qual és rebuda per l'observador del terra. Així, l'observador del sostre envia dos senyals separats per un segon i l'observador rep dos senyals separats també per un segon.

¿Com canviaria aquesta situació si la nau estigués en repòs a la terra sota la influència de la gravetat, en comptes de flotar lliurement per l'espai? Segons la teoria newtoniana de la gravetat aquesta no tindria cap efecte sobre el temps. Però el principi d'equivalència

fa una predicció diferent. Suposem que la nau espacial està accelerant (això en el principi d'equivalència és el mateix que si la nau estigués sota els efectes d'un camp gravitatori, com ja he explicat abans) però suaument, sense arribar a la velocitat de la llum. Com la nau espacial està accelerant cap adalt, el primer senyal hi haurà de recórrer menys distància que a la situació que hem explicat anteriorment, per lo tant arribarà a terra en menys d'un segon.

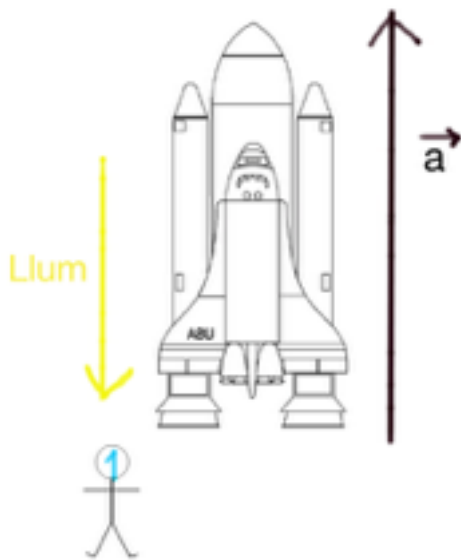


Fig. 60 Exemple 2

Si la nau s'estigués movent a una velocitat constant, el segon senyal trigaria a arribar el mateix temps que la primera i per lo tant, l'interval entre els dos senyals seguiria sent un segon. Però a causa de l'acceleració, la nau es mou més ràpida quan és enviat el segon senyal que quan va ser enviat el primer, per aquest motiu trigarà menys temps en arribar al sòl de la nau. L'observador situat al sòl per lo tant, mesurarà un interval inferior a un segon entre els dos senyals i discreparà amb el del sostre que afirmarà que les ha enviat amb un segon de diferència.

El cas que acabo d'explicar no resulta tan difícil d'imaginar, ja que té una explicació lògica i raonada, però el principi d'equivalència sosté que passaria el mateix en una nau quieta que estigués sota la influència d'un camp gravitatori i això és el sorprenent. D'aquesta forma, així com la relativitat especial ens afirma que el temps transcorre diferent per observadors en moviments relatius, la relativitat general afirma que el temps transcorre diferent per observadors que estiguin en camps gravitatoris diferents. Segons la relativitat general, l'observador del sòl mesura un interval de temps més curt perquè el temps passa més lentament a prop de la Terra on la gravetat és més intensa. Com més intens és el camp gravitatori, major és aquest efecte. Aquesta predicció va ser comprovada el 1962, col·locant dos rellotges, un a dalt d'una torre i l'altra a la seva base. El rellotge de la base, que era el que estava més proper a la Terra, avançava més lentament! En aquest cas, aquest efecte és minúscul, ja que per exemple la diferència entre un rellotge a la Terra i un en la superfície del sol, seria únicament d'un minut.

Veient aquest exemple ens adonem que la teoria de la relativitat general es diferencia de les anteriors perquè converteix a l'espai i el temps en magnituds dinàmiques: quan un cos es mou o una força actua, afecten la curvatura de l'espai-temps i, a la vegada, l'estructura de l'espai-temps afecta la manera en què els cossos es mouen i actuen les forces.

Tot i que Albert Einstein va ser qui va formular aquesta teoria, el problema d'entendre el que passaria segons aquesta teoria en una estrella de gran massa va ser resolt per un jove nord-americà, Robert Oppenheimer, el 1939.

5.3 Els forats negres segons la relativitat general

Els forats negres són els objectes més senzills i bàsics en els quals es posa de manifest els aspectes més rellevants de la teoria d'Einstein.

Si definim aquests objectes segons la teoria de la gravetat d'Einstein, podem dir que un forat negre és únicament espai-temps buit distorsionat fins al seu límit el que provoca que ni tan sols la llum pugui escapar.



Fig. 61 Distorsió de l'espai-temps segons la massa i intensitat de la llum

Exemple: Una estrella com més compacte és, més distorsiona l'espai-temps. Arriba un moment en que la gravetat és tan forta que res pot detenir el colapse d'aquesta estrella i aquesta s'aniquila en una singularitat. El que queda al final és espai-temps buit, distorsionat fins al límit.

Aquests són una predicció de la teoria de la relativitat que va trigar temps a acceptar-se, de fet, el mateix Einstein la va negar en un principi. Per aquest motiu, Robert Oppenheimer va ser l'encarregat de deduir la seva existència segons la teoria de la relativitat general.

El treball d'Oppenheimer és el següent:

El camp gravitatori d'una estrella modifica la trajectòria dels raigs de llum a l'espai-temps respecte a les que haguessin tingut en absència de l'estrella, com ja he explicat abans. A mesura que l'estrella es contrau, es fa més densa i, per tant, el camp gravitatori de la seva superfície es fa més intens. La intensitat més gran del camp gravitatori, fa que les trajectòries de la llum pròximes a la superfície es corbin més. Al final, quan l'estrella s'ha encongit per sota del radi crític, el camp gravitatòri de la superfície és tan intens que les trajectòries de la llum es corben tant que aquesta no pot escapar.

Segons la teoria de la relativitat, res no pot viatjar més ràpid que la llum, per tant, si aquesta no pot escapar, res ho podrà fer. L'estrella col·lapsada ha format una regió de l'espai temps de la qual es impossible escapar cap a un observador distant. Aquesta regió és el forat negre i la seva frontera exterior es denomina horitzó d'esdeveniments.

Per entendre el que veuríem si veïssim com una estrella de gran massa col·lapsés per formar un forat negre, hem de recordar que en la teoria de la relativitat no existeix un temps absolut, sinó que cada observador té la seva mesura de temps. El pas del temps a la superfície de l'estrella serà diferent de la d'algú distant a ella, ja que el camp gravitatori és més intens a la superfície de l'estrella.

Posaré un exemple: suposem que un astronauta es posa sobre la superfície de l'estrella i roman en ella a mesura que es va col·lapsant.

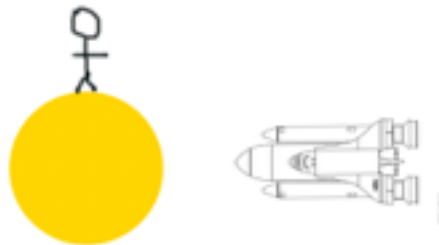


Fig. 62 Exemple

En algun moment del seu rellotge, suposem a les 11:00, l'estrella s'encongeix per sota del radi crític en el qual el seu camp gravitatori és tan intens que res pot escapar d'ella. Suposem que l'astronauta té indicacions d'enviar un senyal cada segon que marqui el seu rellotge a una nau espacial que orbita a una distància fixa al voltant de l'estrella. Comença a transmetre a les 10:59:58. Què detectaran els seus companys a la nau?

Hem après, que la gravetat fa que el temps passi més lent i que com més intensa és, major resulta l'efecte. Per tant, un segon per l'astronauta serà més d'un segon pels seus companys. A mesura que l'estrella col·lapsa, l'interval del senyal que envia l'astronauta, serà cada cop més llarg pels seus companys, que es quedaran esperant indefinidament el senyal de les 11:00. Tot el que succeeix a la superfície de l'estrella entre les 10:59:59 y les 11:00 (segons el rellotge de l'astronauta) s'espargiria en un interval infinit de temps, segons la nau espacial.

El mateix passa amb la llum. A mesura que s'apropin les 11:00, l'interval temporal entre l'arribada de les crestes i valls de llum procedent de l'estrella seria cada cop més llarg. Com la freqüència de la llum expressa el nombre de crestes i valls per segon, aquesta freqüència semblaria cada cop més baixa i per lo tant la llum semblaria cada cop més vermella i més débil pels tripulants de la nau. Al final, l'estrella seria tan poc lluminosa que la nau espacial no podria veure-la però seguiria sentint els efectes gravitatoris.

5.4 Ones gravitacionals

Un resultat de la teoria de la relativitat general van ser les ones gravitacionals, les quals van ser predites per Albert Einstein el 1916. Aquestes són ones al teixit de l'espai-temps produïdes pels processos més violents i energètics de l'Univers. Les fórmules matemàtiques d'Einstein mostraven que els objectes massius que estaven accelerats (com per exemple estrelles de neutrons o forats negres orbitant l'un al voltant de l'altre) provocarien pertorbacions a l'espai-temps. A més a més, aquestes ones viatgen per l'Univers a la velocitat de la llum, portant amb elles la informació sobre el cataclisme original, per tant son unes pistes importantíssimes sobre la naturalesa de la gravetat.

Les ones gravitacionals més fortes són produïdes per esdeveniments catastròfics com la col·lisió de forats negres, per les explosions en supernoves, la radiació creada al naixement de l'Univers, etc.

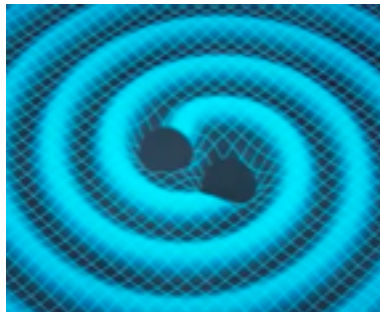


Fig. 63 Dibuix d'ones gravitacionals

Encara que aquestes ones van ser predites el 1916, no van ser provades fins al 1974, 20 anys després de la mort d'Einstein. En aquest any, es va descobrir un púlsar binari (dues estrelles molt grans i denses que estaven orbitant l'una al voltant de l'altre) a l'Arecibo Radio Observatory a Puerto Rico. Aquest era exactament el tipus de sistema que, d'acord amb la relativitat general, hauria d'emetre ones gravitacionals. Conscients que aquesta podria ser una prova crucial per comprovar les prediccions d'Einstein, els astrònoms d'aquest observatori van començar a mesurar com canviaven les òrbites d'aquestes estrelles a mesura que passava el temps, ja que si emetien ones gravitacionals, haurien d'anar perdent energia progressivament, ja que aquestes ones funcionen com les electromagnètiques (que estan explicades a l'apartat anterior de la teoria de la relativitat especial) i per tant la seva òrbita hauria de variar. Després de vuit anys d'observació, van percebre que les estrelles s'estaven apropant entre si tal com havia mesurat i predit Einstein en les seves equacions. Aquest sistema ha estat observat durant quaranta anys i s'ha detectat que els canvis en la seva òrbita són com els que havia predit Einstein i no hi ha dubte que aquest està emetent ones gravitacionals.

Des d'allò molts astrònoms han estat estudiant diferents púlsars i han trobat efectes similars en les seves òrbites. Malauradament, aquestes confirmacions només s'havien

percebut indirectament o per mitjà de formules matemàtiques, mai han comprovat per l'observació directa d'aquest fenomen.

Aquest era el cas fins al 14 de setembre de 2015, quan LIGO va percebre per primera vegada aquesta distorsió de l'espai-temps causada per les ones gravitacionals generades per la col·lisió de dos forats negres fa 1,3 bilions d'anys!

Per sort, encara que les ones gravitacionals són extremadament violentes, quan van arribar a la Terra eren milions de vegades més petites.

Qualsevol objecte amb massa que estigui accelerat (que en ciència vol dir que canvia de posició a un ritme variable, incloent els cossos que giren o orbiten) produeixen ones gravitacionals, fins i tot un avió o nosaltres mateixos les produïm però són molt petites per detectar-les. Malauradament, no hem pogut crear una màquina que acceleri els cossos fins a un punt que les ones que emeti siguin detectables.

L'única forma que tenim per estudiar aquestes ones gravitacionals és quan són produïdes de manera natural en alguna part de l'Univers, ja que aquest està ple d'objectes molt massius que s'acceleren ràpidament. Amb l'objectiu de classificar i entendre els diferents tipus d'ones gravitacionals, els científics de LIGO les han dividit en quatre categories definides per les diferents vibracions característiques que percep l'interferòmetre de LIGO:

Continuous Gravitational Waves

Aquestes estan produïdes per un sol cos massiu en rotació, per exemple una estrella de neutrons molt densa. Si l'estrella rota amb una acceleració constant produirà aquest tipus d'ona gravitacional. Això vol dir que la freqüència i l'amplitud de l'ona es la mateixa contínuament, d'aquí el seu nom.

Compact Binary Inspiral Gravitational Waves

Aquest és el tipus següent d'ones gravitacionals. Aquestes són produïdes per un parella d'objectes molt massius i densos (d'aquí ve el seu nom "compacte") com per exemple forats negres, etc. Hi ha tres tipus de sistemes binaris(coneguts) compactes que generen aquest tipus d'ones:

- Sistema binari d'estrelles de neutrons o BNS
- Sistema binari de forats negres o BBH
- Sistema binar amb una estrella de neutrons i un forat negre o NSBH

Cadascun d'aquests sistemes produeixen diferents ones però el mecanisme d'emissió és el mateix, el mètode que s'anomena Inspiral. Inspiral succeeix arran de que aquests cossos densos orbiten un al voltant de l'altre. Al orbitar, emeten ones gravitacionals que fan que la seva òrbita canviï i farà que col·lideixin en un futur. A mesura que passa el temps, els cossos van orbitant i van perdent energia a causa de les ones i es van

apropant cada cop més. Que es vagin apropant provoca que orbitin cada cop més ràpid i per tant emeten ones gravitacionals més fortes que causen una major pèrdua d'energia que causa que els dos cossos s'apropin més, etc. El procés d'emissió d'ones acaba, com he dit abans, quan les dues masses col·lisionen, causant un dels esdeveniments més catastròfics de l'Univers.

Les Compact Binary Inspiral Gravitational waves solen durar poc (des d'uns segons a menys d'un) i la seva freqüència augmenta a mesura que els cossos orbiten amb més velocitat.

Afortunadament, els astrònoms no hauran d'esperar massa per saber com sonen aquestes ones. El 14 de setembre del 2015, LIGO va fer un descobriment històric detectant per primer cop les ones gravitacionals, que eren d'aquest darrer tipus. Aquest ha estat un descobriment espectacular i importantíssim: aquestes ones es van produir en l'última fracció de segon de la fusió de dos forats negres amb masses de 29 i 36 vegades el nostre Sol que estaven a 1,3 bilions d'anys llum del nostre planeta. Aquest tipus de col·lisió mai havia estat observada.

Stochastic Gravitational Waves

Els astrònoms han predit que hi ha moltes fonts que poden produir els dos tipus d'ones que ja he explicat, però no estan preocupats per la possibilitat que passi per la Terra més d'una a la vegada confonent als detectors. Tot i així, saben que hi ha moltes més gravitacionals petites que van passen per l'Univers constantment. Aquestes ones que vénen de qualsevol direcció, les anomenem Stochastic Gravitational Waves. Aquestes són les ones més petites i més difícils de detectar però és possible una mínima part d'aquestes ones hagin estat produïdes al Big Bang i, si les aconseguim detectar, ens podem proporcionar molta informació sobre l'origen del nostre Univers.

Burst Gravitational Waves

La recerca d'aquestes ones és una cerca indefinida, ja que mai s'han percebut evidències de la seva existència abans i són tan desconegudes que no es poden concretar les seves característiques. Potser és que encara no sabem suficient sobre els diferents cossos que produeixen ones gravitacionals, ja que podrien haver-hi fins i tot cossos a l'Univers que no s'han descobert encara. Per buscar aquest tipus d'ona no podem assumir que tenen unes propietats o unes altres, ja que això limitaria la recerca. Els científics han d'analitzar qualsevol senyal que els arribi encara que no l'hagin predit. Això ens obre a la possibilitat de descobrir aspectes de l'Univers dels quals no ens havíem plantejat la seva existència.

6 Com es detecten els forats negres?

6.1 Demostració de l'existència d'un forat negre

Els forats negres són un cas el qual la teoria es desenvolupa en gran part com un model matemàtic sense tenir evidències observables que aquesta és correcte. Tot i així, sí que hi ha hagut algunes conseqüències observables que s'han pogut produir a causa de l'existència dels forats negres.

El 1963, per exemple, Maarten Schmidt va mesurar el desplaçament cap al vermell (augment de la radiació) d'un objecte que semblava una estrella, situat a la direcció de la font d'ones de ràdio 3C273 (la font número 273 del tercer catàleg de Cambridge de les fonts de ràdio).



Fig. 64 3C273, captada pel telescopi Hubble

Va trobar que el desplaçament era massa gran per ser causat per la distorsió d'un objecte molt massiu a l'espai temps (aquesta explicació s'entendrà millor llegint el capítol de la relativitat general). A causa d'això, Maarten va pensar que aquest desplaçament cap al vermell estava produït, en comptes de per la gravetat, per l'expansió de l'Univers i això implicava que l'objecte estava a una posició molt llunyana. Per ser visible a aquesta distància havia d'emetre una quantitat enorme d'energia. L'únic mecanisme que es podia pensar que produís tals quantitats d'energia semblava ser un col·lapse gravitatori, no d'una estrella, sinó de tota una regió central d'una galàxia.

Nous estímuls de l'existència de forats negres van arribar al 1967 amb el descobriment d'un estudiant, Jocelyn Bell, d'objectes que emetien polsos regulars d'ones de ràdio. Aquests objectes se'ls va donar el nom de púlsars, i eren de fet estrelles de neutrons en rotació que emetien polsos d'ones de ràdio a causa de la complicada interacció entre els seus camps magnètics i la matèria del seu voltant. Va ser la primera evidència que les estrelles de neutrons existien. Una estrella de neutrons posseeix un radi d'uns 16 kilòmetres, només una petita quantitat de vegades el radi crític a partir del qual una estrella es transforma en forat negre. Si una estrella pot col·lapsar-se fins a radis tan petits, és lògic pensar que altres ho podien fer fins a radis menors.

6.2 Detecció de forats negres

Com podem esperar que es detecti un forat negre si per definició no emet cap llum i per tant no el podem veure? Afortunadament hi ha una manera. Com John Michell va senyalar a un article pioner el 1783, un forat negre continua exercint una força gravitatòria sobre els objectes propers. Els astrònoms han observat molts sistemes en què dues estrelles giren en òrbita una al voltant de l'altre, atretes entre si per la gravetat. També s'han observat sistemes en els quals una sola estrella visible gira al voltant d'un company invisible, el suposat forat negre. És suposat ja que no es pot arribar a la conclusió que aquest cos invisible per nosaltres sigui un forat negre, ja que simplement podria ser una altra estrella la llum de la qual sigui massa dèbil. Tot i així, hi ha sistemes com el *Cygnus X-1* que també són fonts intenses de raigs X. La millor explicació a aquest fenomen és que la massa de l'estrella visible està sent atreta pel forat negre:



Fig. 65 *Cygnus X-1*

Quan aquesta matèria cau cap al company invisible ho fa en forma d'espiral i adquireix una temperatura elevada emeten raigs X. L'objecte estelar que atrau la matèria podria ser una nana blanca que emeteixi una llum tan dèbil que no la poguèssim observar, una estrella de neutrons amb les mateixes condicions o un forat negre. Com deduem que pot ser un forat negre? A partir de l'òrbita observada de l'estrella visible, es pot determinar la massa més petita possible de l'objecte invisible. En el cas de *Cygnus X-1*, aquesta massa és de sis vegades el sol el que, d'acord amb els resultats de Chandrasekhar, és massa gran perquè l'objecte invisible sigui una nana blanca. També és una massa molt gran per ser una estrella de neutrons, per tant els científics han arribat a la conclusió que l'objecte és un forat negre.

En l'actualitat hi ha evidències d'altres forats negres com *Cygnus X-1* a la nostra galàxia i com per exemple a dues galàxies veïnes anomenades Núvols de Magallanes. El nombre de forats negres és, segurament, molt més elevat, ja que a la història de l'Univers moltes estrelles han hagut de consumir tot el seu combustible i han hagut de col·lapsar, podria ser més gran, fins i tot, que el nombre d'estrelles visibles.

L'atracció gravitatòria extra que exerciria un número tan gran de forats negres podria explicar perquè la nostra galàxia gira a la velocitat a la qual ho fa, la massa de les estrelles visibles és insuficient per explicar-ho. També tenim evidències de l'existència

d'un forat negre supermassiu al centre de la nostra galàxia amb una massa de cent mil vegades el sol.

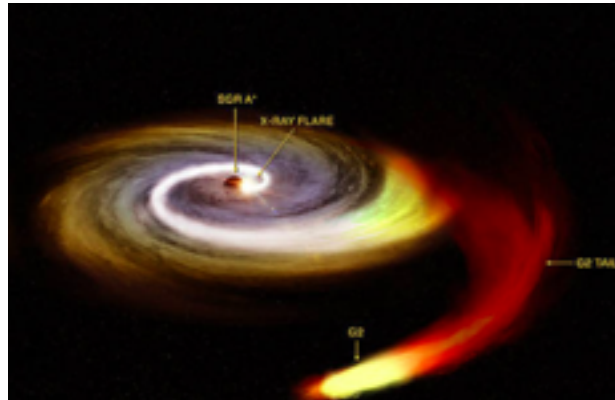


Fig. 66 *Sagittarius A**, forat negre supermassiu de la Via Làctea emetent raig X

Les estrelles de la nostra galàxia que s'aproximin al forat negre, es trencaran per la diferència de gravetat i les seves restes cauran al forat negre en forma d'espiral i s'escalfarà emetent radiació electromagnètica (com en el cas de *Cygnus X-1*). Aquesta podria ser l'explicació de la font d'ones de ràdio i raigs infrarojos que s'observa al centre de la galàxia.

John Wheeler també va contemplar la possibilitat d'uns forats negres de poca massa, que no superarien el límit de Chandrasekhar, però que s'haurien format a causa de les altes temperatures i pressions a una fase molt inicial de l'Univers. Si poguéssim determinar quants forats negres d'aquest tipus hi ha, podríem saber moltes coses de les primeres etapes de l'Univers, ja que el número d'aquests forats primitius depèn, clarament, de les condicions de l'Univers primitiu.

Encara que no podem veure forats negres, podem detectar o endevinar la presència d'un mesurant els seus efectes sobre els objectes que l'envolten. Es poden utilitzar els següents efectes:

6.3 Estimació de la massa del cos invisible d'un sistema binari

Tal com hem descrit un forat negre mai podríem observar un d'ells, ja que no reflectirien ni emetrien cap tipus de radiació ni de partícula. Però hi ha certs efectes que sí que poden ser detectats. Un d'aquests efectes és l'efecte gravitatori en les estrelles veïnes.

Suposem un sistema binari d'estrelles (dues estrelles molt properes girant l'una al voltant de l'altra) en el qual una de les estrelles és visible i podem calcular la seva distància a la Terra i la seva massa. Aquesta estrella visible realitzarà uns moviments oscil·latoris en l'espai a causa de l'atracció gravitatòria de l'estrella invisible. A partir d'aquests moviments es pot calcular la massa de l'estrella invisible.

Si aquesta estrella invisible supera una massa d'unes 2'5 vegades la massa del nostre sol, haurem de suposar que es tracta d'un forat negre.

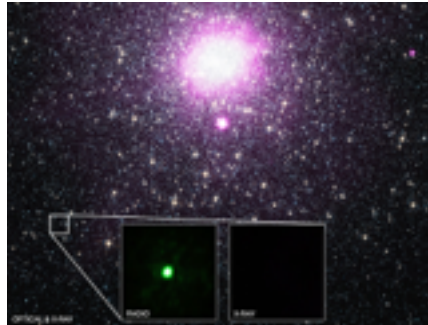


Fig. 67 Sistema binari, format per una estrella i un forat negre, que emet ones de ràdio

6.4 Radiació emesa

Quan el material d'una estrella propera a un forat negre és absorbit per aquest, s'escalfa a milions de graus Kelvin i s'accelera. Els materials sobreescalfats emeten raigs X, que poden ser detectats per telescopis de raigs X, com l'observatori de raigs X de Chandra en òrbita.

Un exemple d'objecte detectat que compleix les dues condicions que hem exposat és l'estrella binària anomenada Cignus-X1. La matèria de l'estrella acompanyant, HDE 226.868, és atreta pel forat negre. Aquest sistema és una font de raigs X molt intensa formada per un estel visible i un estel invisible amb una massa calculada que supera 2,5 vegades la massa solar. També s'han detectat objectes de milers de masses solars en els centres de galàxies, candidats a forats negres supermassius.



Fig. 68 Cignus-X1

El disc d'acreció que es pot formar al voltant d'un forat negre també pot emetre un gran volum de raigs X. El procés d'acreció és la transferència de matèria d'una estrella a una altra o, en aquest cas, d'una estrella a un forat negre. Sabem que els gasos són molt compressibles, és a dir, podem reduir molt l'espai que ocupen. La seva compressibilitat augmenta en disminuir la seva temperatura. En els sistemes binaris, el gas en accreció es refreda fàcilment, de manera que en comptes de tenir un remolí en tres dimensions,

aquest es comprimeix al llarg d'un eix fins a semblar un disc (és per això que es diuen discos d'acreció). Aquest disc no gira rígidament com ho faria un disc compacte. Les parts internes del disc giren més ràpidament que les parts externes, ja que la força d'atracció gravitacional és més forta al centre (així com la Terra gira més ràpidament al voltant del Sol que Júpiter, que està més allunyat). Per això, les parts internes del disc "freguen" amb les parts externes causa de la diferència de velocitats. Aquest fenomen s'anomena rotació diferencial. Aquest frec, com quan estirem d'una corda amb les mans, fa que el gas s'escalfi a temperatures altíssimes, i es converteixi l'energia cinètica en energia tèrmica. El resultat és que d'una banda el gas emet una radiació molt intensa (s'escalfa més com més ràpid gira, és a dir, com més a prop de l'objecte compacte es troba), i d'altra és que perd moment angular (és a dir, velocitat de rotació) . Això últim fa que es vagi movent lentament cap a dins, en forma d'espiral, apropant-se cada vegada més al forat negre, en aquest cas.

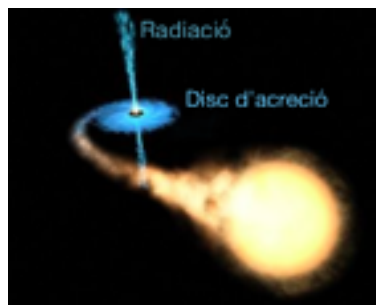


Fig. 69 Disc d'acreció que es forma quan un forat negre atrau la matèria i la radiació que aquesta emet.

A més a més, també cal tenir en compte que S. Hawking va deduir que un forat negre produiria partícules subatòmiques en les seves proximitats, perdent massa i irradiant aquestes partícules, la qual cosa seria una altra manera de detecció, tot i que encara no hem pogut detectar aquestes partícules directament, ja que seria una radiació massa feble per a la nostra tecnologia actual però si s'han detectat fent una simulació al laboratori.

Podem llegir en Forats negres i Petits Universos de Stephen Hawking, en la seva conferència "El Futur de l'Univers" dient:

"El principi d'indeterminació de la mecànica quàntica indica que les partícules no poden tenir simultàniament definides la posició i la velocitat. Com més gran sigui la precisió amb què es defineixi la posició d'una partícula, menor serà l'exactitud amb què es determini la seva velocitat i viceversa. Si una partícula es troba en un forat negre, la seva posició està molt definida allà, el que significa que la seva velocitat no pot ser exactament definida. És possible que la velocitat de la partícula sigui superior a la de la llum, d'aquesta manera podria escapar del forat negre. "

Però no hem de pensar que el forat perdria massa, ja que un forat negre d'unes poques masses solars emetria una radiació inferior a la radiació de fons de l'univers¹⁰, amb la qual cosa rebria més energia de la que emetria, i per tant augmentaria la seva massa.

6.5 Efectes de lents gravitacionals

A més de per l'observació del moviment dels estels per detectar companys veïns invisibles de gran massa que puguin ser forats negres, o per la radiació emesa pels discos d'acreció o la matèria accelerada, també podem tenir pistes de forats negres per l'efecte de lent gravitatòria, ja que un forat negre desviaria la llum d'una nebulosa que es trobés darrere de manera que es produirien unes figures en forma d'arc o cercle.

La Teoria General de la Relativitat d'Einstein va predir que la distribució de massa i energia podria canviar la geometria de l'espai, com ja hem vist en l'apartat anterior, corbant-lo. La llum sempre segueix el camí més curt possible entre dos punts. Com l'espai-temps es corba en presència d'una massa, seria lògic pensar que la llum segueix trajectòries corbes per l'espai. Això va ser confirmat en 1919 per Arthur Eddington durant un eclipsi solar quan es va mesurar la posició d'una estrella abans, durant i després de l'eclipsi.



Fig. 70 Arthur Eddington

La posició de l'estrella va canviar perquè la llum d'aquesta estava doblegada per la gravetat del sol. Per tant, un objecte amb una immensa gravetat (com una galàxia o un forat negre) entre la Terra i un objecte llunyà podria doblar la llum de l'objecte distant, igual que ho fa una lent convexa ordinària.

6.5.1 Com funcionen aquestes lents gravitacionals?

Quan la llum arriba a una lent gravitacional, la que està més pròxima la vora és desviada menys que la que està a prop del centre. La lent enfoca la llum en una recta i no en un punt concret, com ho faria una lent convexa ordinària. Aquest fet introdueix diverses distorsions en la percepció que tenim de les estrelles situades al darrere d'aquestes lents:



Fig. 71 Diferència entre una lent convexa i una lent gravitacional

a) Canvi de posició: La desviació dóna lloc a localització diferent de l'estrella, galàxia o quàsar¹¹ que la que tindria sense la presència de la lent.

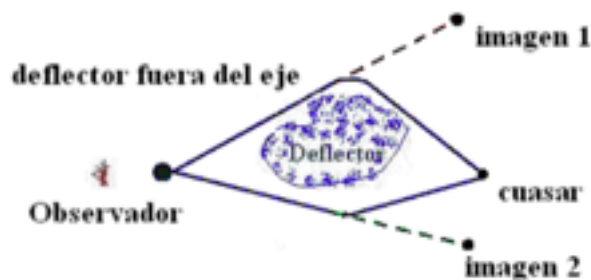


Fig. 72 Exemple

b) Magnificació: Per una lent normal, la desviació dels raigs de llum afecta la brillantor aparent de l'estrella o del quàsar del fons de cel (i per tant veiem al cos celeste d'una grandària diferent del que realment té). Alguns observadors han mesurat ampliacions de més de 100 vegades. Realment la lent gravitacional (o deflector) actua com una lent normal.

c) Deformació: Si la llum del cos desviat és un cúmulo d'estrelles o un altre objecte no puntual, les imatges obtingudes són un conjunt dels arcs de la brillantor que semblen quasicercles amb més o menys el mateix centre. Si el sistema de lent és perfectament simètric, els rajos convergeixen i la imatge resultant és un anell. Si la llum del cos desviat és una estrella o una font puntual, les imatges obtingudes semblen punts.

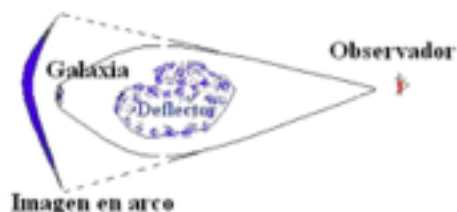


Fig. 73 Exemple

d) Multiplicació: Quan les lents gravitacionals no són perfectes, les més fortes poden produir imatges múltiples.

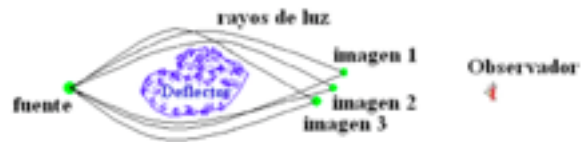


Fig. 74 Exemple

6.5.2 Exemples observats

a) Anells d'Einstein: Quan la galàxia que actua de lent és esfèricament simètrica, es redistribueix la llum d'un quàsar o una galàxia del fons en un cercle complet. El diàmetre de l'anell és proporcional a l'arrel quadrada de la massa de deflector. Aquest és un nou mètode possible per determinar la massa de la galàxia que actua de lent. En el cas de la foto x, l'alineació és tan precisa que la galàxia llunyana és distorsionada en un anell gegantí gairebé perfecte al voltant de la galàxia pròxima, una formació coneguda com un anell d'Einstein.



Fig. 75 Exemple d'un anell d'Einstein

b) Arcs lluminosos gegants. Si la lent no és una galàxia sinó un grup sencer de galàxies, la imatge pot ser un calidoscopi d'arcs i fragments d'arcs totalment distorsionats. El grup és tan massiu i tan compacte que corba i enfoca la llum de galàxies estan darrere. Com a resultat, múltiples imatges d'aquestes galàxies del fons són distorsionades en febles segments d'arcs. Basat en aquestes imatges, els astrònoms procuren reconstruir la distribució massiva dins del cúmulo. Els resultats impliquen que els cúmuls estan dominats per matèria fosca¹² no detectada.



Fig. 76 Exemple

7 Qüestions Interessants

Actualment, podem dir que la física és un dels àmbits amb més incerteses de la ciència moderna, ja que totes les deduccions de més d'un segle (o, a vegades, de gairebé un mil·lenni com va ser el Geocentrisme) es basen en una teoria (o unes poques) que al final poden ser falses, la qual cosa comporta que els resultats obtinguts a partir d'aquestes teories també ho siguin. Al segle XX es van formular les dues teories en les quals es basa la física actual: la Teoria de la Relativitat General (de la qual hem estat parlant en aquest treball) i la Teoria de la Mecànica Quàntica. La Teoria de la Relativitat, òbviament, té més relació directa amb els forats negres, ja que és una teoria de la gravetat. La Mecànica Quàntica també té relació amb els forats negres però el poc que es coneix és complicat d'explicar. Com aquestes dues teories són relativament recents, encara ens queda molt per conèixer sobre l'Univers (o universos, qui sap?) i sobre les partícules que ho habiten. A causa d'aquesta incertesa (i al fet que els físics som imaginatius i creatius per naturalesa) es generen diverses hipòtesis que, malgrat no estar corroborades al cent per cent en el sentit físic, sí que poden tenir una base teòrica i lògica i, fins i tot, matemàtica. Qui sap si en un futur es podran corroborar? En aquest apartat plasmaré algunes d'aquestes hipòtesis que em semblen tan interessants juntament amb el que pensen alguns científics i jo mateixa sobre elles.

7.1 Forats Blancs

Forat blanc és el terme proposat per definir una solució de les equacions del camp gravitatori d'Einstein, l'existència del qual es creia impossible a causa de les condicions tan especials que requereix.



Fig. 77 Il·lustració d'un forat blanc

Es tracta d'una regió finita de l'espai-temps, visible com a objecte celeste amb una densitat que deforma l'espai, però que, a diferència del forat negre, deixa escapar matèria i energia en lloc d'absorbir-la. De fet, cap objecte pot romandre en el seu interior durant un temps infinit. Es defineix forat blanc com el revers temporal d'un forat negre: el forat

negre absorbeix la matèria cap al seu interior i el forat blanc l'expulsa. Fins on sabem, no hi ha forats blancs a la natura.

Tot el que s'empassa un forat negre acaba en un lloc anomenat singularitat. Un punt de curvatura infinita on l'espai i el temps tal com els coneixem acaben. Una versió oposada a això, implicaria que la matèria apareixeria espontàniament a velocitat més gran que la de la llum des d'una singularitat. Malgrat que la principal teoria de l'origen de l'Univers, la Teoria del Big Bang, és similar, l'Univers és pla i sense centre, a diferència dels forats blancs que haurien de tenir centre.

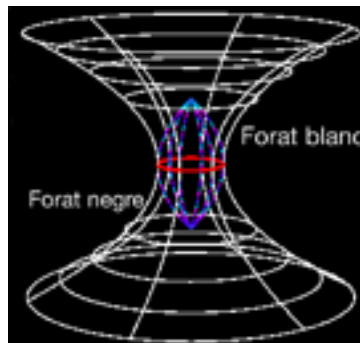


Fig. 78 Simulació d'un forat blanc

Els avenços més importants en aquesta teoria són deguts als treballs dels matemàtics Ígor Nóvikov i Yuval Ne'eman en la dècada de 1960, basats en la solució de Kruskal-Schwarzschild de la relativitat general.

El forat negre de Schwarzschild és descrit com una singularitat en la qual la geodèsica (qualsevol cos o partícula que es mogui per l'espai-temps) només pot ingressar en el forat, tal tipus de forat negre inclou dos tipus d'horitzó: un horitzó futur, és a dir, una regió de la qual no es pot sortir un cop s'ha ingressat en ella i en la qual l'espai-temps és corbat cap al futur i un horitzó passat, una regió on és impossible l'estada i de la qual només es pot sortir, l'horitzó futur llavors ja correspondria a un forat blanc.

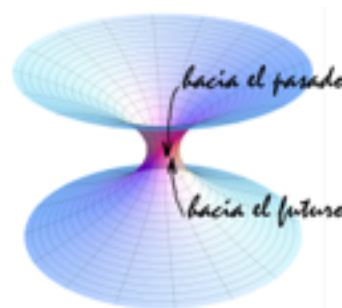


Fig. 79 Els dos horitzons, futur i passat

En el cas del forat negre de Reissner-Nordstrøm, el forat blanc passa a ser la sortida d'un forat negre en un altre univers, és a dir, una regió plana similar a la regió de la qual procedeix l'objecte emergent per aquest tipus de forat. La càrrega elèctrica del forat de Reissner-Nordstrøm proporciona un mecanisme físic més raonable per construir possibles forats blancs.

També podríem pensar de forma intuïtiva, que tot el que entra ha de sortir d'algun costat. No obstant això, aquest pensament no té cap suport en la física. Tot el que entra en un forat negre acaba suposadament en una singularitat, d'on mai surt.

No hi ha un procés clar que expliqui la formació de forats blancs, encara que sí que hi ha algunes hipòtesis respecte a la seva funció:

En principi, s'han proposat els forats blancs com una espècia de sortida als forats negres, ambdós tipus de singularitats estarien connectades per un forat de cuc (que com amb els forats negres, encara no s'han trobat evidències de la seva existència ni tampoc són molt probables en l'aspecte físic).

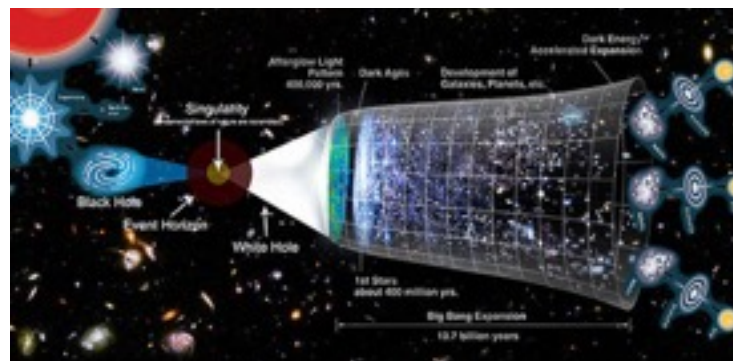


Fig. 80 Univers a partir d'un forat blanc

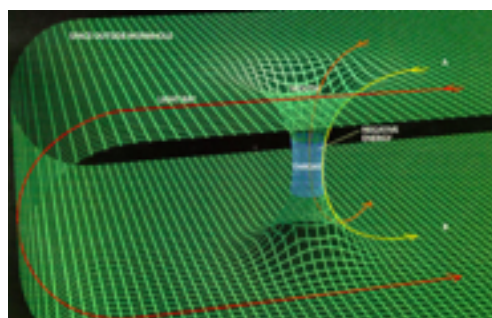


Fig. 81 Forat de cuc

Una altra hipòtesi d'actualitat és que els forats blancs serien molt inestables, durarien molt poc temps i fins i tot després de formar podrien col·lapsar i transformar-se en forats

negres. També s'ha arribat a proposar que la singularitat del Big Bang va ser un forat blanc en els seus moments inicials.

7.1.1 Visió personal

Personalment, després de fer aquest treball i documentar-me sobre els forats negres, l'espai-temps i l'Univers en general, penso que sí que els forats blancs existeixen, sobretot per una raó principal: són una solució matemàtica. Per a mi les matemàtiques són un coneixement universal. Tenim molt clar que dos més dos han estat, són i seran sempre quatre, doncs, Perquè ens resulta tan difícil d'acceptar el resultat d'una equació matemàtica més complicada?

Potser en l'aspecte físic encara no hem trobat evidències de la seva existència, ni tenim ni idea de com s'han pogut formar, però els nostres coneixements tant astrofísics com tecnològics estan encara per desenvolupar i, a més a més, les teories físiques mai són definitives, com he dit a la introducció d'aquest punt. Potser amb les teories en què es basa actualment la física no puguem explicar un forat blanc. La física pot fallar, com altres vegades a la història, però mai ho faran les matemàtiques, per tant hem de confiar en elles. Finalment, cal dir que quan es va proposar la idea de forat negre, pocs creien en ella, ni tan sols Einstein, qui havia formulat la teoria de la relativitat i les seves equacions, acceptava la seva existència. Qui sap si passarà el mateix amb els forats blancs i altres hipòtesis modernes. Ens queda molt per descobrir del nostre Univers i, perquè no, d'altres possibles universos.

7.2 És possible que visquem dins d'un forat negre?

Un article publicat a la revista 'National Geographic', assenyala que aquesta teoria hauria estat formulada per diversos científics que assenyalen que un moment abans del Big Bang (el suposat origen de tot el que coneixem) tota la matèria i energia de l'Univers (que va emergir d'aquesta explosió) estava compactada en una partícula finita increïblement densa. Els científics anomenen aquesta partícula 'La Llavor del Nou Univers'.

Aquesta llavor seria milers de milions de vegades més petita que qualsevol partícula que l'ésser humà hagi pogut observar. I no obstant això, després del Big Bang, aquesta partícula va desencadenar la producció de totes les altres partícules, de cada galàxia, del sistema solar, dels planetes, les persones i de tot el que coneixem. Llavors, com es crea una llavor d'aquest tipus?

7.2.1 La possible explicació

La idea defensada per Nikodem Poplawski, investigador de la Universitat de New Haven, Connecticut (EUA), és que la 'llavor' del nostre univers va ser forjada en un "forat

definitiu", probablement l'ambient més extrem en tota la naturalesa: l'interior d'un forat negre.

A partir d'una detallada anàlisi del moviment de les partícules que entren en un forat negre, Poplawski va arribar a la conclusió que, en realitat, existeix tot un univers dins de cada forat negre. *"Podria ser que els grans forats negres que hi ha al centre de la Via Làctica i d'altres galàxies siguin, en realitat, ponts cap a altres universos"*, va explicar el científic.



Fig. 82 Multiversos

Segons les teories d'Einstein, a l'interior de cada forat negre existeix una "singularitat", una regió d'espai en la qual la densitat de la matèria tendeix a l'infinit. L'enorme força de gravetat d'aquest 'condensat hiperdens de matèria' és tal, que ni tan sols la llum pot escapar d'ell. Per això, aquests objectes són "negres" per a nosaltres, perquè no emeten llum i no podem veure'ls, ni obtenir, en principi, cap informació de què hi ha en el seu interior.

Però, com podem saber si efectivament estem o no vivint dins d'un forat negre? Si Poplawski tingués raó, cap de nosaltres estaria vivint dins del que considerem "el nostre" univers, sinó a l'interior d'un forat negre que estaria, al seu torn, en "un altre univers" diferent.

7.2.2 Visió personal

Aquest aspecte és una mica més teòric i abstracte que l'anterior. Se m'ocorren molts arguments en contra d'aquesta idea. Una de les raons principals per creure que cada forat negre ha estat l'inici d'un univers és que el nostre Univers va néixer, segons la teoria del Big Bang, d'una singularitat (dins dels forats negres també hi ha, suposadament, una). Per a mi aquest argument no té una base molt sòlida, ja que ni tan sols sabem el que és exactament una singularitat, ni si són totes iguals o si tenen els mateixos efectes ...

Després, els forats negres són, per definició, regions on espai-temps arriba a la seva fi. Podríem plantejar-nos que a partir del forat negre i la seva singularitat, es forma un forat blanc per on és expulsada la matèria que formarà el nou univers, però com hem dit abans, els forats blancs tenen un centre i el nostre univers no.

No obstant això, l'argument d'una partícula inicial única, anomenada "llavor del nou univers" forjada a l'interior del forat negre no està gens malament, és fins i tot lògica si partim de la idea que aquesta llavor està feta amb la matèria que absorbeix el forat negre i que al seu torn servirà per crear altres universos. Per aquest raonament només tinc una objecció: És possible que hi hagi tal quantitat d'universos? Si comptem que ja en el nostre propi Univers hi ha més forats negres que estrelles visibles (que sapiguem), imagineu-vos quants universos han de partir només del nostre propi, que al seu torn contindrien més universos dins dels seus forats negres i així successivament ...

8 Part pràctica

8.1 Entrevista a Roberto Emparan

Fer una part pràctica del tema que estic tractant no és gens fàcil, per aquest motiu vaig començar per l'opció més assequible, que és fer una entrevista. Vaig anar a Lleida el 4 d'octubre a fer-li una l'entrevista a l'eminent físic internacional Roberto Emparan, ja que havia llegit alguna cosa del seu treball i em semblava molt interessant i, a més a més, vaig poder assistir a una conferència seva aquell mateix dia que també es feia a Lleida i que explicaré després de l'entrevista. A partir d'aquesta entrevista em van sorgir moltes idees més per completar la part pràctica a més de la gran ajuda que em va proporcionar Roberto Emparan per completar el treball.

El físic teòric Roberto Emparan (Bilbao, 1967) és professor d'investigació ICREA del Departament de Física Quàntica i Astrofísica i de l'Institut de Ciències del Cosmos de la UB (ICCUB). El seu camp de recerca és la gravitació i la cosmologia, en el marc tracta d'entendre la naturalesa de l'espai-temps en el seu nivell més fonamental. En concret, Emparan estudia els aspectes clàssics i quàntics de la gravetat, així com els seus objectes més bàsics: els forats negres. Emparan ha obtingut recentment una *Advanced Grant* del Consell Europeu de Recerca (ERC) per un projecte per buscar noves estratègies amb què abordar la gravetat i els forats negres.

Els forats negres juguen un paper central en la teoria de la relativitat d'Einstein. No obstant això, les seves equacions són extremadament difícils de resoldre. El projecte dirigit per Emparan té com a objectiu desenvolupar un nou enfocament per solucionar la física que regeix aquests objectes astronòmics.



Fig. 83 Roberto Emparan

¿Quina és la teva formació professional?

Yo soy de Bilbao, así que estudié en la Universidad del País Vasco e hice allí mi doctorado. También pasé una temporada en el CERN haciéndolo. Tengo una formación en física gravitatoria y en física de altas energías. Hice mi doctorado sobre aspectos

cuánticos de los agujeros negros. Luego, como todos los investigador prácticamente, tuve que irme al extranjero: estuve un tiempo en Santa Bàrbara, California, después en Reino Unido en Durham del Norte, Inglaterra, después estuve dos años en el CERN y bueno estuve un año en la Universidad del País Vasco con una cosa que no acabó de salir. Cuando estaba en el CERN, un grupo de aquí de barcelona me dijo que había una cosa nueva que empezaba en Catalunya que era el programa ICREA , un intento de fomentar la investigación, daban puestos de investigación que estaban muy bien y dije “vamos a probar”. Me vine en 2003 y desde entonces.

Tengo un puesto de profesor de investigación de ICREA asociado a la Ub en el departamento que hasta hace poco se llamaba el departament de Física Fonamental, ahora se llama departamento de Física Cuàntica i Astrofísica. Me dedico esencialmente a la investigación, doy un curso de master avanzado sobre Relatividad General avanzada que es bàsicamente un curso de relatividad de los agujeros negros.

Y después vivo la vida del físico teòrico: reunirse con colegas, hacer cálculos, viajar y pasárselo bien. Eso es lo esencial de este trabajo, si no lo disfrutas no lo haces. Si trabajas en lo que quieres no te cuesta.

¿Vas viatjar per seguir noves línies d'investigació?

Viajé para seguir formándome, seguir aprendiendo...Básicamente, cuando uno se dedica a la investigación cada uno hace lo que quiere. Osea, lo que se le ocurre y lo que es interesante, no es que alguien te diga en qué tienes que trabajar. Tienes que ir desarrollando por ti mismo lo que vas a hacer. Pero si que fui a sitios donde estudiaban las cosas que a mi me interesaban (propiedades teóricas de los agujeros negros, física cuántica, gravedad cuántica y teoría de cuerdas) y uno de los mejores sitios del mundo está en Santa Barbara que además es fantástico para vivir. Y después en Durham del Norte también hay un grupo de gravedad fuerte, importante. Siempre vas también al sitio donde te ofrecen. En el CERN hay una división de física teórica muy grande, entonces ahí se puede trabajar también en altas energías, gravedad cuántica, incluso cosmología...

¿Quina va ser la principal motivació per dedicarte a l'estudi de la gravetat?

Pues que siempre me había gustado. A ver, yo creo que hay gente que desde niño le llama la atención, tiene curiosidad por el Universo, descubres que la ciencia es una manera de aprender cosas serias sobre el Universo. La física, una cosa buena que tiene es que es difícil y por lo tanto es un reto porque las cosas que son más fáciles pues te suponen menos reto, entonces si eres alguien que tienen facilidad para las matemáticas y te gustan, también te gustan las cosas del Universo, descubres que hay cosas como la teoría de la relatividad o la mecánica cuántica que suenan interesantes y difíciles pero

también son importantes si quieres entender cómo son las cosas y bueno es básicamente esa curiosidad.

¿Desde ben petit has tingut aquesta curiositat?

Sí, creo que desde niño. Bueno, recuerdo una vez con ocho o nueve años ver en un libro de texto el dibujo de una galaxia y mencionaba la ley de la Gravedad de Newton: los cuerpos se atraen con una fuerza proporcional al producto de las masas inversamente proporcional al cuadrado de las distancias. No entendí nada, pero eso, primero me parecía que era una cosa que sonaba bastante impresionante pero además sonaba precisa, además salía una galaxia que era como que controlaba lo que el Universo hacía... Entonces pues bueno, intentar entender qué era eso de la gravedad, de hecho todavía estoy en ello, pero igual, el momento que recuerdo es la foto esa y el enunciado de la ley de Gravedad de Newton. Yo creo que entonces tenía menos de diez años y no entendía nada pero dije "wow parece chulo". Yo creo que hay niños que naturalmente ya les gusta y tienen esa capacidad.

Entrant en matèria, m'agradaria que expliqués el que és exactament un forat negre, ja que és un concepte bastant complicat d'entendre.

A ver, los agujeros negros es una idea que es difícil de aceptar y entender, de hecho llevó muchos años, Einstein mismo nunca llegó a aceptar la idea de agujero negro, es algo que voy a citar después en la charla, él se negó a aceptar lo que sus ecuaciones le estaban diciendo. Un agujero negro es básicamente espacio y tiempo retorcidos hasta el límite, en cierto sentido son, dentro de lo que sería la teoría de la gravedad de Einstein, los objetos más sencillos y más importantes en esta teoría, que es una teoría sobre cómo la gravedad curva la estructura del espacio-tiempo, y allí donde el espacio tiempo está distorsionado en su forma más extrema, es un agujero negro. Un agujero negro te aparece cuando tú tienes, por lo menos una forma en la que se forman, el colapso de una estrella. Una estrella cuanto más compacta es, más distorsiona la geometría del espacio tiempo a su alrededor. Llega un momento en que esta distorsión es tan fuerte que nada puede parar el colapso de esta estrella, esta estrella colapsa sin parar hasta que se aniquila en algo que se llama singularidad, aún no entendemos muy bien lo que es una singularidad, entonces lo que te queda simplemente después es espacio-tiempo muy distorsionado y una región del espacio-tiempo de la que no puede escapar nada. No escapa ni la luz. Como la velocidad de la luz es la velocidad máxima en el Universo, si la luz no puede escapar, ninguna otra cosa puede hacerlo. Entonces es básicamente eso. Hay un colega mío que los describe un poco como cicatrices del espacio-tiempo, las cicatrices que quedan en el espacio-tiempo después del colapso de una estrella. Entonces se te forma ahí la cicatriz, que sería la singularidad y espacio-tiempo vacío y retorcido y distorsionado de tal forma que de ahí no sale nada. Se puede explicar con un

poco más de detalle pero esta es la versión de un minuto o dos minutos. Después explicaré algo más en la charla.

Ara m'agradaria saber més sobre aquestes ones que van percebre recentment. Que són les ones gravitacionals?

Estábamos diciendo que en la teoría de Einstein la gravedad es curvatura, la explicación más sencilla que tenemos es la siguiente: imagínate que tenemos una cama elástica, entonces en una cama elástica si tu tiras canicas pues estas van en línea recta, pero ahora imagínate que en la cama elástica pones un cuerpo pesado, por ejemplo una sandía, y esta distorsiona la cama elástica y si tu ahora tiras canicas, estas canicas no van a seguir trayectorias rectas sino que van a seguir trayectorias curvas incluso pueden seguir órbitas en torno a la sandía. Vale, entonces esta es la manera en la que la curvatura del espacio-tiempo puede reproducir un efecto como el de la gravedad, aquí lo que tu tienes es curvatura y las canicas se están moviendo porque la cama elástica está curvada. Entonces esta es una manera aproximada de entender como Einstein describe la gravedad como un efecto de curvatura. Ahora supón que tu tienes esta cama elástica y lo que haces es cojes y le pegas un pellizco y la cama elástica comienza a vibrar. Supón que en esta cama elástica (es una cama elástica muy grande), en una esquina de esta cama elástica, hay unas hormigas inteligentes y que para ellas su mundo es solo la cama elástica. Estas hormigas han construido un aparatito con el que pueden detectar estas vibraciones de la cama elástica, eso es lo que hemos hecho nosotros ahora, lo que se ha conseguido recientemente. Nosotros somos como estas hormigas que han detectado estas vibraciones de la cama elástica (en nuestro caso, del espacio-tiempo). Estas ondas que percibimos son las ondas gravitatorias. Las ondas se pueden producir, a ver esto de dar un pellizco parece una intervención sobrenatural, pero también se pueden producir, si tu lo que haces es cojes dos bolas muy pesadas y las lanzas una contra otra estas van a hacer que la cama elástica vibre, y estas vibraciones se van a propagar a distancia, cuanto más lejana sea la distancia las vibraciones van a llegar más débiles, pero las vibraciones en principio si tu tienes aparatos suficientemente sensibles las vas a poder detectar. Entonces las ondas gravitatorias hacen que todo se mueva, son vibraciones del espacio tiempo producidas cuando hay algún suceso especialmente violento.

És cert que nosaltres també produïm ones gravitacionals?

Todo lo que tenga energía o masa (y eso es todo) produce ondas gravitatorias cuando se mueve de forma adecuada. Yo al mover el brazo también produzco ondas gravitatorias lo que pasa es que las ondas gravitatorias son muy difíciles de producir, la gravedad en realidad es una fuerza muy débil porque date cuenta que para que nosotros notemos la gravedad de la tierra, la tierra tiene que ser enorme pero por ejemplo, a mi otra cosa no me atrae gravitatoriamente porque la gravedad es muy débil, en cambio las otras fuerzas

como la fuerza eléctrica si que la notamos o la magnética. Con un imán puedo levantar una bolita y con eso estoy venciendo la fuerza de gravedad de toda la Tierra. La fuerza magnética es mucho más intensa que la fuerza gravitatoria. La fuerza gravitatoria es muy débil, lo que quiere decir que es muy difícil conseguir estas vibraciones y también es muy difícil detectarlas. Entonces es por eso, porque la gravedad es muy débil, es muy difícil producirla en forma suficientemente fuerte y detectarla.

Entonces todo lo que se mueve está interaccionando con el espacio tiempo y haciendo que este vibre. Pero las vibraciones son muy pequeñas, en la charla pondré algunos números para que veas eso: si por ejemplo en vez de dos agujeros negros tienes a unos niños en un carrusel, que potencia en vatios produce esto en transmisión de energía, creo que son un cero seguido de 50 ceros y después un número (10^{-51}), esto es absolutamente indetectable.

He estat llegint sobre la teva investigació en ICREA i m'ha semblat molt interessant, de que tracta exactament?

Esto es una cosa un poco más específica, es una cosa un poco técnica. Esto se refiere a un proyecto de investigación europeo que me han dado recientemente y que está bastante bien. Aquí la idea es: queremos estudiar las propiedades de los agujeros negros porque los agujeros negros es espacio y tiempo retorcidos pero este espacio y tiempo pueden vibrar y pueden distorsionarse. Si tu tiras algo a un agujero negro pues esto lo que hace es que el espacio y el tiempo vibren y lo que produce son ondas gravitatorias y esto es algo que interesa resolverlo, analizarlo, analizar qué es lo que te dice la teoría, la teoría de Einstein que te describe esta dinámica del espacio tiempo y estos agujeros negros que te dice que predicciones puede haber para estas vibraciones. Esto es complicado de hacer, las ecuaciones de Einstein son muy difíciles de resolver en general, son unas ecuaciones que en muchos casos lo que se hace es que se resuelven en un superordenador que lo tienes que tener funcionando durante un mes para que a veces te reproduzca aspectos de que es lo que sucede cuando dos agujeros negros colisionan. Pero claro, a veces poner las cosas en un ordenador, puede estar muy bien, pero a veces es como meterlo en una caja negra en la que metes una cosa y obtienes una respuesta y no sabes muy bien qué es lo que ha pasado ahí. A veces hay que desarrollar aproximaciones o métodos para resolver las ecuaciones que sean más sencillos pero donde veas mejor que es lo que está pasando, porque cuando uno resuelve las ecuaciones a mano de forma más sencilla y que puede entender "A de aquí me viene esto, si cambio este parámetro aquí me varía otra cosa en otro sitio", entonces siempre todo lo que sea simplificar el análisis en física es importante. En cierto sentido la física es el arte de hacer aproximaciones y simplificaciones, simplificar los problemas, entonces aquí, la idea que tuvimos hace unos pocos años es una manera de simplificar lo que es la dinámica de agujeros negros, como vibran los agujeros negros. Y lo que vimos fue lo

siguiente: en principio, la teoría es que el Universo nuestro tiene unas dimensiones que son, tres dimensiones espaciales y una temporal, pero también podemos imaginarnos, podemos describir las situaciones poniendo que hay un número de dimensiones diferente. Podemos también resolver las ecuaciones y analizarlas suponiendo que tiene tres dimensiones espaciales, cuatro, cinco, seis, siete, ocho, las que quieras. Lo que vimos es que si el número de dimensiones es muy grande, entonces las ecuaciones se simplifican muchísimo, entonces el límite de los agujeros negros, las ecuaciones que describen los agujeros negros, se comportan como las ecuaciones de las pompas de jabón. Es algo que nos resultó un poco sorprendente, las ecuaciones que describen las pompas de jabón pueden ser más o menos complicadas pero son mucho más sencillas que las de los agujeros negros. También las pompas de jabón vibran, etc. Entonces dijimos, oye pues quizás esto puede llegar a ser útil. El Universo no tiene este número infinito de dimensiones, pero si tomamos esto como primera aproximación, en física, muchas veces tomar una primera aproximación que no sea totalmente la que nos describe la realidad te puede servir para hacer luego pequeñas correcciones, por ejemplo cuando se describe la trayectoria de proyectiles habitualmente se desprecia el efecto del aire. Entonces en primera aproximación, un proyectil te describe una parábola, si tienes en cuenta la resistencia del aire, ya no va ser una parábola pero la primera aproximación que has tenido que te ha permitido resolver las cosas de forma exacta a la que después haces pequeñas correcciones y te vas acercando a la cosa real. Resolver el problema de golpe pues alomejor no puedes hacerlo, pero si encuentras una primera aproximación en la que puedes resolver las cosas y que quizás no es una aproximación tan mala pues empiezas entonces a simplificar el problema y a poder hacer el proceso. Y eso es lo que parece que este método consigue. Hacemos esta suposición rara de que el Universo tiene un número de dimensiones infinito, que yo no me creo que el Universo tenga un número infinito de dimensiones, pero nos permite simplificar mucho las ecuaciones y después podemos empezar a incluir correcciones que nos permitan aproximarnos a la cosa real. Y esto era una cosa, una idea que era nueva, que vimos que funcionaba muy bien y que estamos ahora trabajando en desarrollarlo con colaboradores que tengo en diferentes lugares del mundo.

En definitiva, la finalitat de la investigació és..?

La finalidad de la investigación es simplificar la dinámica de los agujeros negros, como vibran los agujeros negros.

I si s'enten aquest concepte, que es pot aconseguir?

Bueno, primero entendemos que es lo que puede hacer el espacio-tiempo, que es una cosa bastante básica e importante. De qué cosas es capaz el espacio tiempo, como vibra, que propiedades le puedes atribuir, porque por ejemplo, una cosa que podemos

hacer estudiando cómo vibran los agujeros negros es decir que el espacio-tiempo en cierto sentido se comporta como un tipo de fluido, que tiene una viscosidad, hace unos años calculamos la viscosidad del espacio tiempo. Porque tú tiras cosas al agujero negro, las cosas vibran pero después van vibrando y se van amortiguando estas vibraciones. Si tu tienes un líquido viscoso, la viscosidad es la que hace que las vibraciones, las olas vayan un poco atenuándose. Pues el espacio tiempo se comporta un poco así y hemos calculado las propiedades que bueno, por las que el espacio tiempo se comporta como una especie de fluido, como una pompa de jabón, podemos calcular como es la tensión superficial de la pompa de jabón que describe un agujero negro. Entonces esto son formas de entender mejor qué es lo que puede hacer el espacio-tiempo, porque hay muchas otras cosas del espacio tiempo, sobretodo cuando vemos después el régimen cuántico, que entendemos mucho menos. Entonces empezar a entender mejor cuales son las posibilidades dinámicas del espacio tiempo, eso es uno de los principales objetivos. Después si uno además puede calcular números que luego después puedes hacer corresponder con cosas que se observen en experimentos pues también bien. Pero de momento lo que queremos es entender, la física ante todo es entender, entender el universo mejor y en este caso queremos entender de que es capaz el espacio-tiempo. Esto es complicado, pero por ese motivo es interesante.

Quina seria la funció que tindrien els forats negres a l'Univers?

Los agujeros negros primero están ahí y es el espacio-tiempo retorcido hasta el límite. Qué hacen ahí? Esa es una pregunta buena. Sí que tienen importancia astrofísica, hoy en día en astrofísica son objetos muy importantes. Hay muy buena evidencia que la mayoría de galaxias tienen agujeros negro supermasivos en su núcleo. Estos son agujeros negros que tienen una masa muy grande, por ejemplo en el centro de nuestra galaxia hay un agujero negro de unos 4 millones de veces la masa del sol, en otras galaxias los hay que pueden tener una masa de miles de millones de veces la masa del Sol. Parece mucho, pero dentro del tamaño de una galaxia, esto es muy pequeño. Sin embargo, este agujero negro parece que controla los procesos energéticos alrededor del agujero porque en este agujero negro está constantemente cayendo energía y emiten una cantidad de energía, todo lo que cae ahí al caer se acelera muchísimo, empieza a emitir chorros con una energía enorme, todo esto parece que controla la dinámica de toda la galaxia. El agujero negro, que es una cosa relativamente muy pequeña, aunque pueda tener un tamaño tan grande como el sistema solar pero el sistema solar dentro de una galaxia es muy pequeño, entonces esa masa concentrada ahí en un región tan pequeña puede emitir tanta energía como el resto de la galaxia, depende si es una galaxia activa o no, pero básicamente puede estar controlando la dinámica de toda la galaxia. Esto es algo que se está estudiando mucho hoy en día y que no se entiende todavía muy bien: si primero se formó el agujero negro y luego la galaxia a su alrededor o

si está la galaxia y se va formando el agujero negro, osea si es primero el huevo o la gallina o si los dos son al mismo tiempo. Esto todavía no se sabe y es una cosa muy importante, por ejemplo agujeros negros, sus implicaciones astrofísicas.

Después los agujeros negros teóricamente son muy importantes porque como digo son los objetos más importantes y más sencillos de la teoría de la gravedad entonces para entender qué es lo que puede hacer el espacio-tiempo dentro de la teoría de Einstein o incluso ir más allá de la teoría de Einstein, las propiedades cuánticas de los agujeros negros, nos dan las mejores pistas para lo que va a ser una Teoría Cuántica de la Gravedad. Los descubrimientos de Stephen Hawking sobre si los agujeros negros emiten radiación, casi todo lo que sabemos sobre la forma de unificar gravedad y mecánica cuántica, las cosas que mejor entendemos es por haberlas estudiado en los agujeros negros. Si uno quiere entender lo que es gravedad, espacio y tiempo y la estructura fundamental del Universo uno tiene que entender los agujeros negros. ¿Qué es lo que hacen los agujeros negros en el Universo? A ver, se pueden formar y todo lo que puede estar aparece, tienen importancia en la evolución galáctica lo que pasa es que todavía hay muchas cosas que no entendemos. Ahora a cuenta de la detección de ondas gravitatorias y todo lo que ahora se abre se va a aprender mucho más. Ahora mismo es un momento buenísimo para empezar a trabajar en física gravitatoria, a mi me da pena porque yo ya tengo casi 50 años y hay muchas cosas que me voy a perder, hay experimentos que lleva mucho tiempo desarrollarlos.

Nunca vamos a descubrirlo todo sobre el Universo yo creo, pero mejor, porque así sigue habiendo trabajo y cosas por descubrir.

Parlant de Stephen Hawking i de trobar una teoria unificadora...Que opina sobre la radiació de Hawking?

Este es el principal descubrimiento de Hawking aquí, que es que los agujeros negros emiten radiación por efectos cuánticos, eso es un calculo que yo creo que todo el mundo lo acepta , está bien aceptado, es una predicción teórica bien fundamentada basada en física que conocemos bien, basada en la teoría de Einstein, y después basada en mecánica cuántica en un régimen en el que la entendemos bien. Osea eso creemos que sí. Lo que pasa que es muy difícil observar, estamos aquí hablando de efectos cuánticos en un objeto, los agujeros negros astrofísicos tienen el tamaño de unos kilómetros o más grandes. La mecánica cuántica es una teoría que en principio, a ver se aplica a todo , pero los efectos cuánticos son aplicables a escala atómica, son importantes a escalas muy, muy pequeñas. La mecánica cuántica actúa también sobre todo lo demás, sobre mi, sobre ti, pero los efectos cuánticos importantes solamente son visibles a escalas muy pequeñas. Entonces estamos aquí hablando de efectos cuánticos en un agujero negro de un radio de kilómetros, que aunque a escala astrofísica es muy pequeño, a escala cuántica es grandísimo, entonces por eso los efectos cuánticos en los agujeros negros

astrofísicos son indetectables básicamente. Estos efectos serían importantes si hubieran agujeros negros microscópicos, que se hubiesen podido formar en el Universo primitivo, en ese caso sí, ahí los efectos cuánticos pueden ser importantes, lo que pasa es que en lo que sabemos del Universo primitivo, hay muchas más incertidumbres, no sabemos realmente qué efectos realmente podemos observar o no, se han buscado pero no se ha detectado todavía nada. El efecto es algo que creemos que debe estar porque se ha estudiado mucho, hace más de 40 años que él hizo su cálculo. Parece que está todo bien, que no hay ningún motivo por el que tengamos que pensar que eso que este mal, a ver hay ciertas incertidumbres, en los últimos años sobretodo, este descubrimiento de la radiación de Hawking lleva a otros problemas fundamentales de mecánica cuántica donde estamos muy confusos, pero el cálculo de Hawking es una de las cosas firmes en las creemos sobre los efectos cuánticos en presencia de gravedad.

Que són els forats blancs? Existeixen?

Agujeros blancos es el inverso de un agujero negro, si el agujero negro es un sitio en el que las cosas pueden entrar pero no salir, un agujero blanco es al revés, es algo de lo que puedes salir pero no volver a entrar. Entonces es blanco porque de ahí podría salir luz pero no podría entrar nada. Esto es algo que en principio las matemáticas lo permiten pero no parece que físicamente sea posible ya que llevan a más problemas que ha soluciones. Entonces en general, no sabemos por ejemplo como se podrían formar, es algo que surge de vez en cuando porque bueno, cuando uno se dedica a estas cosas está continuamente inventando cosas y la inventiva de la gente no la puedes parar, pero no parece... a ver, tengo colegas que trabajan en este campo y que ellos igual te darían una opinión diferente, en mi opinión no existen. Es una posibilidad matemática que te dan las ecuaciones pero no creo que existan en la realidad, puede que me equivoque pero si yo ahora tuviera que apostar, apostaría que no, que no existen los agujeros blancos. Sobretodo porque no sabemos por qué mecanismo se pueden formar o los mecanismos que alguna gente propone para su formación a mi me parecen demasiado especulativos y que no están bien fundamentados.

S'especula que com dins dels forats negres hi ha una singularitat i el nostre Univers ha nascut d'una singularitat, dins de cada forat negre podria haver un Univers. Podria ser cert aixó?

A ver lo que sucede en el interior del agujero negro es el inverso del Big Bang, el Big Crunch. Si tu te lanzas a un agujero negro, ahí dentro se esta acabando el Universo, es como una especie de Big Crunch privado. En el exterior no se nota nada pero si tu tienes un agujero negro con una masa de unas pocas veces la masa del Sol por ejemplo, ahí en cuestión de milisegundos el Universo ahí se acaba. Mientras tanto el resto del Universo fuera ni se entera, pero dentro en milisegundos se acaba. Si es un agujero negro

supermasivo puede que tarde minutos o horas en acabarse pero básicamente lo que tiene es eso, un Big Crunch, básicamente todo colapsa y acaba en una singularidad, que no sabemos bien qué es lo que sucede ahí, y todo se aniquila. Entonces se especula, como ahí no sabemos muy bien lo que pasa, lo que podría pasar es que se acaba el Universo, colapsa pero después vuelve a surgir quizás en otro sitio. Uno puede jugar con estas ideas, no están muy bien fundamentadas pero es divertido jugar con ellas. No tenemos control sobre la teoría ni los experimentos para saber si eso sucede o no. Si eso pasase la salida sería un agujero blanco. En cierto sentido, el Big Bang que es una singularidad que esta en nuestro pasado y no en nuestro futuro, se puede ver también como que estás saliendo de un agujero blanco, no es exactamente lo mismo pero es un poco similar. La singularidad del Big Bang ocurre en el pasado mientras que si tu te tiras a un agujero negro la singularidad estará en tu futuro. Entendemos algunas cosas sobre como se podría resolver la singularidad del Big Bang o por lo menos parte de él pero la resolución seguramente será diferente de lo que puede ocurrir en un agujero negro. Pero sí, podría ser, el interior de un agujero negro, lo describimos como una especie de cosmología un poco particular porque es un poco diferente a la del resto del Universo y más pequeña. La forma en la que distorsiona el espacio-tiempo es un poco diferente en la que se distorsiona en el Universo Primitivo pero sí que son cosas que están relacionadas. Cabe la posibilidad, es posible que pueda pasar eso, que después de un colapso se forme un Universo. Uno puede jugar un poco con eso, que los agujeros negros son la forma que tiene de reproducirse el Universo. Hay gente incluso que especula con la idea de que puede haber evolución, porque si tu tienes un mecanismo de reproducción donde hay un poco de aleatoriedad puedes empezar a hablar de evolución Darwiniana de los Universos. Estos son ideas más especulativas que otra cosa, no hay un control suficientemente preciso sobre ello pero no son simples elucubraciones. Quizás en algun momento pueden ser más sólidas.

Hi ha diferent tipus de singularitat, cert? Que és un forat de cuc?

Las singularidades vestidas son las que están en el interior de los agujeros negros de una forma que al estar dentro de un agujero negro, como de el agujero negro no sale nada pues esa singularidad no la puedes ver, acabarias en la singularidad si te tiras en el agujero negro, pero si estas fuera, estas a salvo. Una singularidad es un sitio donde realmente no sabes lo que ocurre. Es un sitio o un instante, porque hay singularidades de los dos tipos, unas que corresponden a algo que está en un sitio, y otra es la que hay en el interior de un agujero negro que no está en un sitio, si tu te tiras a un agujero negro la singularidad está por ejemplo mañana o dentro de dos días o de un segundo, etc. Hay muchos tipos de singularidades, algunas las entendemos mejor que otras, es todo un mundo, es poco lo que se puede decir que sea sencillo, sistemático y claro, es una historia bastante compleja. Los agujeros de gusano son otro tema. Uno puede construir

geometrías en el espacio tiempo donde tu tienes agujeros de gusano que te conectan una parte del espacio con otro, sería una especie de bola en la que tu te metes en esa y apareces en otra región. Es algo que alguien puede construir matemáticamente, físicamente es otro tema. Cuando uno estudia las propiedades de estos agujeros de gusano lo que encuentra son dificultades. Lo primero que estos agujeros están hechos de una materia que llamamos materia exótica, esta materia no es un material que podamos conseguir en el laboratorio. Es algo que no está hecho de la materia que conocemos. Nosotros estamos hechos de protones, neutrones, quarks, gluones y demás, los agujeros de gusanos no se pueden construir con ese tipo de materia y es algo que no sabemos si se puede encontrar al Universo. Ahora supongamos que tenemos ese material: este agujero es inestable, es decir que ante cualquier perturbación el agujero tiende a colapsar en un agujero negro y formarte una singularidad, eso es uno de los motivos por el cual pensamos que los agujeros de gusano no pueden existir. Pero no está totalmente descartada. Como vemos en la película Interestelar, si en el futuro hay civilizaciones más avanzadas que nosotros, pues quien sabe lo que podrán lograr.

Conclusió de l'entrevista

L'entrevista a Roberto Emparan ha estat una de les coses que més m'ha agradat fer del treball. A més a més d'explicar-me molts conceptes que jo no entenia del tot o mostrar-me com podia explicar jo aquests conceptes per què es comprenguessin millor, va satisfer la meva curiositat personal sobre molts aspectes d'aquest tema que m'interessa tant. Roberto Emparan explica conceptes complicats d'una manera molt senzilla i amb exemples reals, és a dir, que nosaltres podem veure i això és molt important quan estem tractant un tema tan abstracte i teòric. Les preguntes d'aquesta entrevista estaven encarades als aspectes més grans i més notables dels forats negres, només hi ha una pregunta sobre l'aspecte més quàntic d'aquests, la de la radiació de Hawking. L'objectiu per a la meva pròxima entrevista és entrar més en l'aspecte quàntic dels forats negres, ja que és molt important per trobar una teoria que englobi la Relativitat General i la Mecànica quàntica.



Fig. 84

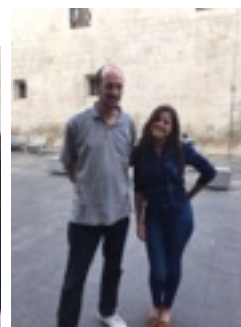


Fig. 85

8.2 Conferència: Agujeros negros y ondas gravitacionales, la oscuridad sonora del Universo

La conferència a la qual vaig assistir va ser donada per Roberto Emparan, després de l'entrevista que li vaig fer. La conferència tenia com a tema principal els forats negres i les ones gravitacionals, tot i que se'n va donar més protagonisme a les ones gravitacionals, ja que és un tema de molta actualitat. Haig de dir que l'entrevista em va resultar molt més útil que la conferència posterior, ja que aquesta estava encarada a un públic amb uns coneixements molt bàsics de forats negres i moltes coses de les quals va explicar jo ja les havia introduït al meu TDR. De tota manera, sí que em va resultar molt útil per aprendre més sobre les ones gravitacionals i la seva utilitat pels humans i el coneixement de l'Univers.

Roberto emparan va començar explicant com la Teoria de la Relativitat de Newton va quedar substituïda per la Relativitat General d'Albert Einstein i com aquest introduïa un nou concepte, l'espai-temps. Va explicar com la gravetat era resultat que la matèria afectava la geometria d'aquest espai-temps i va posar l'exemple del comportament d'una síndria a un matalàs.

Un resultat d'aquesta teoria de la relativitat van ser els forats negres, en els quals Einstein no creia. Oppenheimer sí, i va realitzar una seria de treballs per comprovar-ho, ja que les equacions de la Relativitat General li donaven la raó.

L'existència dels forats negres va ser acceptada finalment, encara que no sabien ven bé quin nom posar aquests nous objectes. Inicialment es deien "objectes totalment col·lapsats gravitatoriament" però una dona que va assistir a la conferència de John Wheeler va suggerir aquest senzill però pràctic nom: forat negre (encara que aquest va rebre moltes crítiques per sonar una mica obscè).

La conferència va continuar amb l'explicació de les ones gravitacionals, les quals ens aporten molta informació sobre l'Univers i sobre els forats negres. Aquestes ones són provocades pel moviment de masses per l'espai-temps. Es va fer una introducció al que eren les ones i es van explicar per sobre les ones del so i les electromagnètiques. Es va exposar la intensitat de les ones gravitacionals, que és molt baixa, ja que la gravetat també ho és comparada amb l'electromagnetisme. Per tant, les ones gravitacionals són molt menys energètiques que les electromagnètiques, han d'estar produïdes per una massa molt gran com per què les puguem detectar (encara que el moviment de tot tipus de massa les produeixen). Aquestes ones ens obren la porta al descobriment de tot l'Univers, ja que el 96% de la matèria i energia que el constitueixen són invisibles. Qui sap el que podríem descobrir?

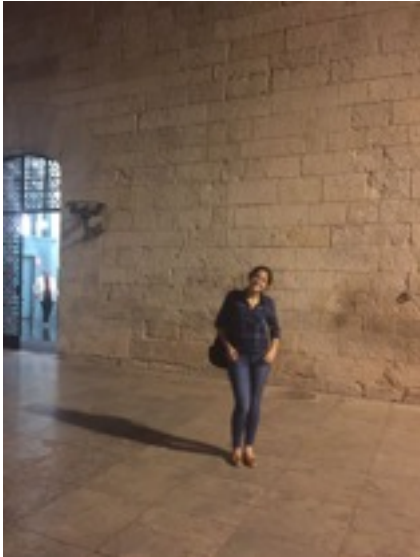


Fig. 86



Fig. 87



Fig. 88



Fig. 89

8.3 Entrevista a Sonia Fernàndez Vidal

Per completar la part pràctica i enriquir-la vaig anar a Barcelona el 12 de novembre a fer-li una entrevista a la Sònia Fernández-Vidal, una reputada divulgadora barcelonina la qual menciono a l'inci d'aquest treball ja que ha estat la meua inspiració i la culpable de que m'agradi la física. Vam quedar al seu despatx i vam estar parlant de molts temes i la veritat es que m'ha agradat molt conèixer-la personalment.

Sonia Fernández Vidal (Barcelona, 1978) és doctora en física y especialista en Òptica Quàntica. Ha treballat com a científica en centres de gran importància com al CERN, al Laboratori Nacional de Los Álamos a l'Institut de Ciències Fotòniques... Va publicar el 2011 el seu famós llibre "La porta dels tres panys" i el 2012 "Quantic Love, els dos de temàtica juvenil on la ciència està molt present.



Fig. 90 Sonia fernández Vidal

Quina ha estat la teva trajectòria?

A mi em passava com a tu, quan era petita tenia molt clar que volia ser científica, quan encara era petitona , que probablement, no sé què em va agafar, a més a més em volia anar a l'Antàrtida a investigar, nose, devia veure algun documental o devia veure alguna cosa de petita i em va quedar marcat. A mesura que vaig anar creixent vaig dir això del fred no em convenç tant però lo de científica sí que volia seguir sent i quan vaig arribar a l'institut, al final quan fas física per primera vegada, vaig dir ostres, això era el que jo volia fer, vaig tenir la sensació que, sí, que al final la física podia ser com la resposta a tot plegat, és a dir, deia: jo vull saber com funciona l'Univers. Aquestes preguntes eternes, al final que es fa tothom i pensava doncs mira, potser això em dóna la resposta. Aleshores vaig triar física a la Universitat i aleshores vaig ficar-me en la quàntica i em va passar lo que acostuma a passar, que quan creus que tens totes les respostes arriba l'Univers i et canvia totes les preguntes. I jo deia, pensava que la física tenia la resposta a tot i ara m'està dient coses raríssimes, fins aleshores jo deia, mira això que ordenat, si això estava aquí i ara allà i si després ho passes en l'àmbit cosmològic ho pots arribar a entendre tot... i després vaig veure que nanai. Però alhora també era molt estimulant dir ostres, que està passant en aquí? Em va atreure com un forat negre , vaig caure directament cap allà. Aleshores vaig fer el meu doctorat en òptica informació quàntica precisament. És el que vaig fer. Havia estat en el CERN, no com la Laila a Quàntic Love* , jo era més grandeta, tenia 23 anys, tot just acabar la carrera quasi . Després vaig començar a fer recerca, vaig tenir l'oportunitat de fer temes d'informació quàntica perquè jo al CERN havia anat perquè al principi a mi m'agradava molt la física de partícules, pensava que era el que volia fer, de fet em va anar molt bé aquell any perquè de fet va ser on vaig descobrir per mitjà d'uns investigadors visitants, tota la part d'informació quàntica i va ser quan vaig decidir fer el doctorat en informació quàntica i no en partícules.

Vas canviar de terreny doncs...

Sí, vaig dir ostres això m'interessa, m'atreia molt més la part conceptual que hi havia i vaig dir, cap allà. Per això deia que és molt interessant tocar totes les àrees, perquè pots trobar alguna cosa que encaixa molt més fins i tot amb el que tu estaves buscant. Però bueno, és un camp molt maco també.

I doncs, com m'has dit abans, vas decidir prendre aquest camí des de petita...

Sí sí, des de petita, de fet, l'últim llibre que he fet amb la Pilarín Bayés, potser la teva mare la coneix, sabeu aquests dibuixos de quan érem petits de la Galera?, Us sonen no? El llibre es diu L'Univers a la mà i és per nens més petits però hi ha coses que jo crec que ni tan sols molts adults saben però. Hi ha informació sobre la lluna, l'espectre de Fraunhofer, sobre Newton, hi ha coses bastant interessants, de fet, l'espectre de Fraunhofer s'explica a la universitat, no sé ni tan sols l'haureu fet vosaltres a batxillerat encara, doncs els nens de cinc anys si llegeixen aquest llibre ja ho sabran. Hi ha una part al llibre que parla d'Einstein, que parla sobre la relativitat i sobre els forats negres, és clar, és llenguatge per nens molt petits però et pot servir perquè tothom ho entengui. Parla també del forat negre que hi ha al centre de la galàxia, que per exemple ja molta gent que no ho sap que al centre de la Via Làctea hi ha un forat negre supermassiu, molts pares quan es llegeixen això diuen "Jo no ho sabia". Doncs els forats negres sempre s'havien vist com si fossin els monstres galàctics que s'ho empassen tot, en canvi, la gran majoria de galàxies que s'han format es veu que hi ha un forat negre supermassiu en el centre i aleshores es comença a pensar que poguessin ser precisament els directors d'orquestra que es formin les galàxies, al final imagine't, quan tot és pols galàctic, perquè es comencen a juntar en aquesta espècie d'espiral? Doncs bàsicament, la manera en què es va començar a juntar el pols interestel·lar és perquè el forat negre atreu i aleshores es començaven a agrupar, a crear-se les estrelles i a crear-se les galàxies.

Bé, què és exactament la física quàntica, que estudia?

De fet la física quàntica, bàsicament el que fa és explicar-nos com es comporten les partícules fonamentals, les partícules més petites, més petites fins i tot que els àtoms, són els quarks, els electrons, i bueno sembla que la manera en la qual es comporten és estranya, ja que a la mecànica clàssica de finals del segle XIX era tot molt ordenat. Tot perfecte. Per exemple el determinisme de Newton, si saps la posició i la velocitat d'una partícula en un moment determinat saps on estarà en un futur i on estava al passat. Per lo tant imagineu-vos, que era el que jo pensava quan era més petita, un ull que tot ho veiés, podria saber el passat i el futur de l'Univers. Determinisme, per lo tant aquí pots tenir totes les respostes a totes les preguntes, però bueno sembla que el món quàntic, el món de les partícules subatòmiques, no es comporta així, sinó que és com una olla grisa. Fa una miqueta coses extranyíssimes, les partícules poden travessar parets, poden estar

a dos llocs simultàniament, que és el principi de la superposició, es poden teleportar, per exemple, a través de l'entrellaçament, i bueno tots aquests fenòmens que semblen més de la ciència-ficció que no pas de la ciència. Però bueno, els experiments que ens estem trobant ens diuen que la natura es comporta d'aquesta manera.

Això és perquè hi ha diferents realitats?

Bueno, hi ha diferents interpretacions, hi ha diferents interpretacions de la mecànica quàntica. El que sabem és que sí que entren en això del que nosaltres sabem del que és la superposició, sabem que quan tú no estàs mirant, una partícula si ara pogués anar per la porta d'aquí o per la porta que hi ha allà, té aquestes dos possibilitats, en el món quàntic tot lo que és possible és obligatori, si pot anar per allà i per aquí, passa pels dos llocs. Però lo estrany és que quan fem una observació és a dir, per exemple quan nosaltres mirem, la partícula només pot anar per un lloc, no li agrada mostrar que pot anar pels dos llocs. Escull un i només una probabilitat sobreviu. Això és l'únic que sabem. Hi ha una interpretació que és la de Copenhague que diu que la simple mesura col·lapsa la funció d'ona, simplement és així, és a dir, no és que estigui al dos llocs simultàniament sinó que està potencialment als dos llocs i en el moment en el qual tu mires és aleshores quan la realitat es defineix. És molt estrany però es queden amb aquesta explicació. Després hi ha altres explicacions, com la de Everett dels multi versos, que diu que hi ha universos paral·lels, el que passa és que hi ha moments en els quals se superposen, perquè en un, la partícula va per un lloc i en l'altre va per l'altre i se superposen, i després en el moment en què mesures, tu et quedes només amb un univers, potser tu mateix també estàs en un altre univers veient que l'altre va per l'altre costat. És clar, això és com molt estrany perquè la visió de Copenhague, la primera que he explicat, és la que s'explica normalment a les universitats. És com una mica estranya, té el que s'anomena el problema de la mesura, que dius bueno i quan mesura qui?, perquè també pots estar tu mirant i entrar tu mateix en superposició i no saber-ho. Dius bueno, com es defineix la mesura, on s'acaba la mesura, etc. I això que les altres possibilitats s'esfumin, és una miqueta pertorbador. És clar, la de multi versos això s'estalvia però clar, és una teoria cara en universos, perquè si per cada partícula que existeix hi ha una superposició en muti versos, imagina't. És bastant, això, cara en muti versos. És veritat que a les universitats s'explica la teoria de Copenhague però si es mira des de la teoria de cordes o la teoria M que és la més nova i totes les investigacions que hi ha que defensen que vivim en més d'una dimensió, entra molt la visió dels universos paral·lels i multi versos. Al final són interpretacions, els dos models et diuen el mateix en l'àmbit científic. De moment no s'ha trobat cap experiment que un predigui una cosa diferent que l'altre, perquè aleshores podríem fer un experiment i variar una de les dues, però de moment continua sent una interpretació perquè de moment arribar a un univers paral·lel és una mica improbable científicament perquè no tenim ni idea de com fer-ho.

Tot i així, la mecànica quàntica és molt exacte, més que la relativitat fins i tot, és una de les teories que és més exacte quant a les prediccions que fa, en les prediccions que té en els resultats experimentals però és estranya.

Com es relaciona la mecànica quàntica amb els forats negres exactament? Un forat negre és cos molt gran i molt massiu i en canvi la mecànica quàntica tracta les partícules més petites...

Pensa que en la física moderna hi ha dues grans teories, una és la mecànica quàntica que tracta el petit i una altra és la relativitat, que ens explica el moviment de les galàxies, les coses més grans. En canvi, si les lleis de la física es compleixen sempre, és a dir, si les lleis de la relativitat general es compleixen sempre i les lleis de la mecànica quàntica es compleixen sempre, ens trobem que tenim dos "sempres" diferents. A la llei de la física tenim dues teories mal avingudes sota el mateix sostre. No hi ha una sola equació amb la qual puguis explicar els elements més petits fins a la cosa més gran, d'aquestes que et puguis estampar en una samarreta, allò que diguis teoria única. Aquesta teoria va ser la que Einstein va buscar tota la seva vida, intentant trobar aquesta teoria i va morir abans de ni tan sols poder trobar una direcció cap allà i avui seguim exactament igual. La teoria de cordes és una opció o la teoria de la subgravetat quàntica per exemple, o coses d'aquestes intenten conciliar les dues teories. A un forat negre que succeeix: la mecànica quàntica com dèiem descriu les coses en un regiment d'energia molt determinat, quan te'n vas a el macroscòpic segueix unes regles estranyes, encara que la relativitat també és estranya, és una mica més ordenada que la mecànica quàntica, la mecànica quàntica al buit, et surten fluctuacions i de cop i volta un festival de partícules que no saps ni d'on han sortit. Ni tan sols l'energia es conserva en uns instants de temps prou petits. Sí que hi ha un punt que és als forats negres on poden estar relacionades les dues teories, ja que als forats negres tens moltíssima massa concentrada en un punt, les lleis de la relativitat aleshores comencen a tenir rellevància perquè la massa és molt gran però està concentrada en un punt molt petit, i aquí comença el regiment de validesa de la mecànica quàntica, és clar, tens una condició que compleix la relativitat i una altra que compleix la mecànica quàntica que són dues teories que si intentes fer una línia recta per anar d'una a una altra no hi arribes, és clar, com les barrejes? Avui dia, tot i que hi ha moltes propostes no se sap el que hi ha dins d'un forat negre perquè no hi ha una teoria que ho pugui explicar, doncs aquest és un dels grans reptes. Bueno, Hawking ha fet molta feina al respecte però bueno no és determinant. Fins que no arribem a una manera en què puguem reconciliar les dues teories o fer-ne una nova que les desbanqui, probablement continuaran sent un misteri. A poc a poc, ara amb les ones gravitacionals tenim una nova manera d'estudiar-los. És clar, fins ara la única manera en què podíem detectar-los era amb les oscil·lacions de les estrelles properes, però sempre són deteccions d'alguna cosa que no podem veure perquè l'Univers, des de que Galileu va agafar el telescopi i va

enfocar el cel sempre hem utilitzat la llum en tot el seu espectre electromagnètic per estudiar l'Univers, que passa? Doncs que d'un forat negre no surt llum per lo tant no pots fer una observació directe d'un forat negre, en canvi, les ones gravitacionals és com tenir un nou sentit, ens obren una altra manera d'investigar l'Univers i és molt probable que en aquest sentit totes les investigacions de forats negres evolucioni. I vés a saber el que es descobreix.

Personalment, creus que estem més aprop de trobar una teoria quàntica de la gravetat?

Bueno, de fet, tot depèn de si la natura també es vol comportar d'aquesta manera, és a dir, nosaltres volem que hi hagi una teoria única però la natura no té per què complir això. Ho dic perquè hi ha alguns científics que estan súper panxos d'aquesta manera i diuen bueno, això ens pertorba a nosaltres, potser a la natura ja li està bé tenir per diferents regions un mapa per cada regió i no existeix una teoria única. A mi em costa molt acceptar alguna cosa així en l'àmbit personal, jo segueixo pensant que hi ha molts científics que són super pràctics però és molt inquietant, és a dir, jo apostaria perquè hi ha una teoria única però sóc molt conscient que penso això perquè a mi m'agrada pensar així no perquè tingui cap evidència, al final tot són interpretacions i al final has de renunciar a les teves estimades creences si no trobes cap evidència que les recolzi. Però sí, jo segueixo pensant igualment que hi ha una teoria única. De fet aquestes dues teories no seran les últimes, igual que es va passar de la física clàssica a la relativitat penso que un cop hàgem ampliat el cercle de coneixement ens apareixeran més preguntes i noves teories que les responguin. Al cap i a la fi, per la ciència també fa falta imaginació i tenir una ment oberta per acceptar teories per exemple com la dels multi versos o per començar una recerca. Tu estàs a llocs en els que no hi ha estat ningú abans i això no s'aconsegueix si no tens creativitat encara que també has de ser disciplinat, necessites les matemàtiques, molt d'esforç, treball, treball, treball... Jo ho comparo amb tocar el piano. Quan vols tocar el piano vols tocar una peça de jazz però primer t'has de passar anys i panys fent acords. Però has de tenir aquesta guspira d'imaginació perquè si no podràs saber els acords i tocar jazz però no crear-lo.

Conclusions de l'entrevista

M'agradat moltíssim fer aquesta entrevista, ja que em feia molta il·lusió conèixer a la Sonia. Ella ha estat una inspiració per mi des de petita i ara que l'he conegut encara la tinc més com a referent. Vam estar parlant no només del que he plasmat a l'entrevista escrita sinó d'altres temes de la física quàntica que encara que no tenen rellevància per aquest treball si em creen una curiositat personal i també d'altres temes no científics. He après molt d'aquesta entrevista encara que no hi ha molta informació de la mecànica quàntica relacionada amb els forats negres i per aquest motiu tampoc li dono gaire

importància en aquest treball. Aquesta entrevista ha estat una de les coses que més m'ha agradat fer en el procés del treball i a més a més la Sonia em va regalar dos dels seus llibres divulgatius, no puc estar més contenta!

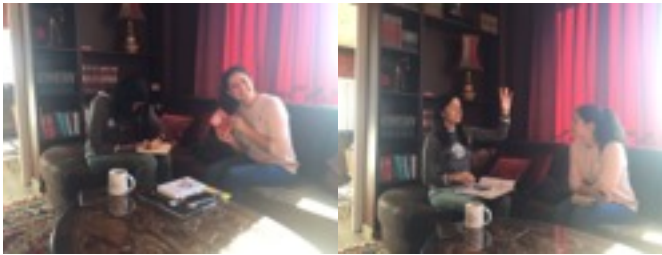


Fig. 91



Fig. 92



Fig. 93



Fig. 94



Fig. 95



Fig. 96

8.4 Maqueta: Ones gravitacionals

A més a més de les entrevistes, la meva part pràctica consta d'una maqueta que ens ajudarà a entendre molt millor que és l'espai-temps i com funciona i també el funcionament de les ones gravitacionals . Els materials que he utilitzat són els següents:

a) Materials

Per simular l'espai-temps:

- 2m de tela de licra



Fig. 97

- Pinces

Forats negres



Fig. 98

- 1 Aro gran
- Suport

Per simular les masses que canvien la geometria de l'espai-temps:

- Paper de plata
- 1 Bola de vidre
- bales

Per simular els forats negres:

- 2 Rodetes de cadira d'escriptori



Fig. 99

- 3 Platines, 5 cargols i 7 rosques



Fig. 100

Eines:

- Clau anglesa



Fig. 101

- Metro



Fig. 102

- Peu de rei



Fig. 103

- Mordassa de banc



Fig. 104

- Trepant i broques de diferent mida



Fig. 105

- Martell



Fig. 106

b) Procediment

Primer prepararem els nostres forats negres. Agafem les tres platines i les unim amb caragols. Posem dues rosques a cada caragol i amb la mordassa de banc les premem bé perquè les platines quedin rígides i no es moguin.



Fig. 107

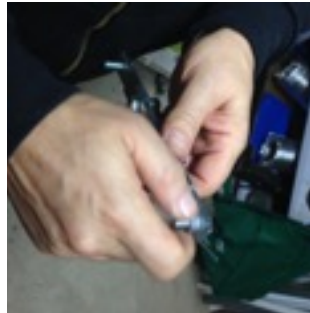


Fig. 108

Després amb el peu de rei i amb el metro, mesurem la meitat de la platina i marquem el lloc on s'haurà de fer un forat central pel caragol que haurà d'introduir-se al trepant. Situem el nostre suport a la mordassa de banc perquè ens faci de sosteniment i amb un trepant i broques de diferent mida fem el forat. El resultat serà el que podem veure a les imatges. Aquest serà suport dels nostres "forats negres".



Fig. 109



Fig. 110



Fig. 111

Seguidament introduïm un caragol a cada rodeta i així farem les marques per poder enroscar-los. Passarem dos caragols pels forats dels extrems de les platines i posarem una rosca a cadascun perquè es quedin ben fixats i així també ens assegurem que les dues rodes que faran de forats negres estiguin a la mateixa altura. Després, passarem un cargol pel forat central i també el fixarem amb una rosca. El resultat final serà aquest:



Fig. 112



Fig. 113

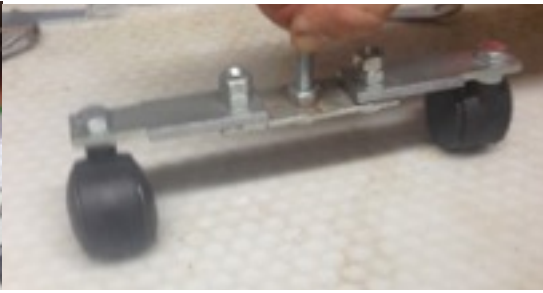


Fig. 114



Fig. 115



Fig. 116



Fig. 117

Per preparar les nostres masses, que podien representar un planeta i les llunes orbitant al seu voltant, agafem la bola de vidre i l'envoltem de paper de plata. Les bales simularàn les llunes petites que orbitaràn al voltant de la nostra gran massa.



Fig. 118

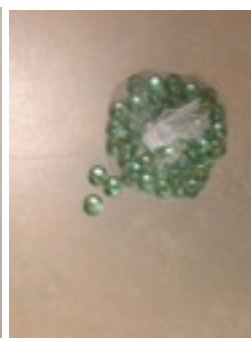


Fig. 119

Finalment, hem de preparar el nostre espai-temps. Com ja sabem, la geometria de l'espai-temps es veu afectada per la presència de masses i pertorbada pel seu moviment. Necessitem un teixit que es comporti de manera similar per simular aquest fenomen: la licra. Agafem els dos metres de tela de licra i els col·loquem envoltant l'aro. Fixem la tela amb les pinces que quedi ben tensada i col·loquem l'aro sobre del suport.



Fig. 120

Aquesta és una maqueta senzilla de fer, com acabem de veure, i que ens ajudarà moltíssim a entendre les parts més essencials del treball.

c) Explicació

Bé, el nostre aro amb la tela de licra simularia el nostre Univers i l'espai-temps del nostre Univers en una escala molt, molt, molt petita. En col·locar la bola de vidre sobre del nostre espai-temps, aquest canvia la seva geometria com veiem a la figura X. En introduir els objectes de menys massa (les boletes de paper de plata petites) al nostre petit Univers, aquests es veuen atrets per la massa gran i van orbitant al seu voltant. Ara bé, aquests cossos no són prou massius ni ràpids per produir ones gravitacionals detectables en el nostre espai-temps.

Canviem de situació, ara tenim dos forats negres (el nostre suport amb rodes) orbitant un al voltant de l'altre, dos objectes suficientment massius i orbitant a la velocitat suficient (propera a la llum, que en el nostre cas serà la velocitat del trepant) per produir ones gravitacionals que sí que podem apreciar. A causa de la velocitat del trepant, només les podrem veure a càmera lenta.

9 Conclusió

Una vegada finalitzat el treball, he de dir que estic molt orgullosa del resultat. He aconseguit complir tots els objectius que hem vaig proposar inicialment: he introduït nous conceptes sobre l'Univers, com pot ser l'espai-temps, singularitat, quàsar, que són els forats negres, altres aspectes sobre les estrelles... He investigat el que és un forat negre, com es forma, els tipus que hi ha segons l'origen i les propietats físiques, com evolucionen... També he intentat exposar el que pensa la comunitat científica sobre el que passa un cop traspasat l'horitzó d'esdeveniments, és a dir, que passa dins d'un forat negre, encara que tot són hipòtesis, ja que, de moment, no es poden comprovar. He conegut com es detecten els forats negres i, encara que jo volia visitar un lloc on s'investiguessin experimentalment, no ha sigut possible. He fet dues entrevistes que m'han ajudat a entendre el tema definitivament i que han estat el que més m'ha agradat del treball, ja que també han satisfet la meva curiositat. Finalment, he aconseguit fer una maqueta que ens ensenya, de manera gràfica el comportament de l'espai-temps i com es propaguen les ones gravitacionals a través d'ell. He après a fer recerca i a realitzar correctament un Treball de Recerca.

El treball ha estat molt útil per acabar de definir el que vull fer un cop acabat el Batxillerat i per obrir-me nous interrogants sobre l'Univers en el qual vivim. He après molts aspectes nous sobre els forats negres i el que poden aportar a la física moderna, ja que són essencials per conciliar la Teoria de la Relativitat i la de la Mecànica Quàntica, que coexisteixen en un forat negre. Encara que aquest treball sigui teòric i no matemàtic, he descobert la gran importància que tenen les matemàtiques en l'astrofísica, encara que a vegades ens pot donar resultats incoherents, ens mostra el que ens queda per descobrir del Cosmos. I, per últim, m'he adonat de la importància de la divulgació científica, ara és el moment per posar-se a investigar, ja que se'ns ha obert una porta molt gran al coneixement amb les ones gravitacionals i sense l'esforç d'aquells científics que fan arribar el coneixement a gent com jo, no hi haurien joves disposats a seguir les seves passes.

10 Agraïments

Per realitzar aquest treball he necessitat molta ajuda, sobretot al principi. Agraïixo a Valentí Bosch-Ramon, professor de la Universitat de Barcelona haver-me orientat tan bé les dues vegades que el vaig anar a veure i donar-me les pautes per començar la feina. També per passar-me el seu llibre "Forats Negres: fronteres de l'espai i el temps" que m'ha servit per completar la teoria i entendre molts conceptes.

També agraïixo a Roberto Emparan haver-me concedit una entrevista tan interessant, que s'expliqués tan bé que fins a un nen de cinc anys l'hauria entès i haver aguantat les meves preguntes curioses. També gràcies per la conferència, és un privilegi escoltar-lo i també és un exemple per a futurs científics, ja que ens inculca la importància de la divulgació.

Sonia Fernández-Vidal es mereix una menció especial. Feia molt que la volia conèixer, l'admiro molt, més des que la vaig conèixer. Moltes gràcies per acceptar la meva entrevista i contestar tan clarament a totes les meves preguntes. Li agraïixo la seva implicació i el seu tracte, personalment és un exemple a seguir, per la seva motivació i la seva forma de pensar, a més m'encanta com escriu, la seva forma de divulgació. Moltíssimes gràcies pels llibres.

Finalment, gràcies a Antonio Perea Rama que em va ajudar a fer la maqueta i sobretot, li agraïixo a la meva tutora del TDR la seva paciència i els seus consells. No és fàcil llegir-se aquest totxo, la informació és molt densa i difícil d'entendre, cal tenir molta paciència i els consells que m'ha donat sempre han estat útils i m'ha deixat molta llibertat per fer el que a mi em semblés el millor. No podria haver obtingut aquest resultat sense aquestes persones.

11 Glossari

¹: Teoria onà-corpuscle ----- és un concepte de la mecànica quàntica segons el qual no hi ha diferències fonamentals entre partícules i ones: una partícula es pot comportar com una ona i a l'inrevés. VA ser introduït per Louis-Victor de Broglie a principis al 1924. a la seva tesi doctoral, va proposar l'existència d'ones de matèria, és a dir, tota la matèria té una ona associada.

²:Un fotó és la partícula portadora de totes les formes de radiació electromagnètica. incluint els raigs gamma. raigs X, la llum ultravioleta, la llum visible, la llum infraroja, les microones i les ones de radio.

³ : La força dèbil és una de les quatre forces fonamentals de l'Univers(gravitatòria, electromagnètica, nuclear forta i nuclear dèbil) i és la que es dona en les interaccions de les partícules elementals (partícules que segons els coneixements del moment, no semblen constituïdes d'unitats menors).

⁴: La força nuclear forta (també coneguda com a força forta) és una de les quatre forces fonamentals de l'Univers. Manté units els components del nucli d'un àtom, és a dir, manté units els protons i els neutrons. A nivells d'energia normals, és la més intensa de les quatre forces.

⁵: Basant-nos en la teoria de la relativitat, una singularitat és un punt teòric amb volum zero i densitat infinita.

⁶: El moment angular és anàlog al moment lineal o la quantitat de moviment.

⁷: Que un element estigui en estat ionitzat vol dir que li han arrencat un o més electrons i que per tant és un catió, un ió positiu. Si només està ionitzat un cop, vol dir que només li han arrencat un electró, ionitzat dos cops, li han arrencat dos electrons...

⁸: L'espai-temps és un espai de quatre dimensions (las tres que corresponen a l'espai i la quarta que és el temps) necessari per situar qualsevol esdeveniment, segons la formulació de la teoria de la relativitat.

⁹: Anomenem camp gravitatòri a la pertorbació que un cos produeix a l'espai que l'envolta pel fet de tenir massa.

¹⁰: En cosmologia, la radiació de fons de microones (en anglès, cosmic microwave background o CMB) és una forma de radiació electromagnètica descoberta en 1965 que omple l'univers. És una radiació residual del Big Bang, moment en que la matèria de l'Univers estava a una temperatura extremadament alta i per tant emetia radiació electromagnètica.

¹¹: Un quàsar es un tipus de cos celeste que es caracteritza per que emet radiació en totes les freqüències i per la seva lluminositat, que ens permet observar-los encara que siguin molt llunyans a la Terra.

¹²: La matèria fosca és un tipus de matèria hipotètica, de composició desconeguda, que no emet ni reflecteix prou radiació electromagnètica perquè es pugui detectar directament, però la presència de la qual es pot deduir a partir dels efectes gravitatoris sobre la matèria visible, com estrelles i galàxies.

12 Webgrafia, Bibliografia

Webgrafia

<http://www.nationalgeographic.es/ciencia/espacio/origen-universo>
<http://www.astromia.com/universo/evolucion.htm>
<http://www.astromia.com/universo/evolestrellas.htm>
<http://www.nationalgeographic.es/ciencia/espacio/estrellas>
<http://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/what-are-galaxies/>
<http://www.nationalgeographic.es/ciencia/espacio/universe/galaxies-article>
<http://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-black-hole-58.html>
<http://www.nationalgeographic.es/ciencia/espacio/black-holes-article>
<https://www.bbvaopenmind.com/stephen-hawking-y-la-historia-de-los-agujeros-negros/>
<https://abcienciade.wordpress.com/2009/09/14/breve-historia-de-los-agujeros-negros/>
<http://bueno-saber.com/aficiones-juegos-y-juguetes/ciencia-y-naturaleza/partes-de-una-estrella.php>
http://radiouniverso.org/resources/mass/estrellas/secuencia_principal.html
<http://www.astrosurf.com/astronosur/estrellas.htm>
<http://www.astromia.com/glosario/hertzsprungrussell.htm>
<http://www.nationalgeographic.es/ciencia/espacio/supernovae-article>
<http://definicion.de/reaccion-nuclear/>
http://www.windows2universe.org/sun/Solar_interior/Nuclear_Reactions/Fusion/fusion_reactions.html&lang=sp
http://www.windows2universe.org/sun/Solar_interior/Nuclear_Reactions/Nuclear_forces/strong.html&lang=sp
<http://www.astromia.com/astronomia/fuerzasfundamentales.htm>
<http://www.astromia.com/glosario/singularidad.htm>
<http://www.ligo.org/sp/science/GW-Detecting.php>
http://www.cosmopediaonline.com/an_relatividad.html
<http://www.nouvelleage.org/astron010.pdf>
https://ca.wikipedia.org/wiki/Relativitat_general
https://es.wikipedia.org/wiki/Introducci3n_a_la_relatividad_general
<http://www.lawebdefisica.com/apuntsfis/relatividad/>
<http://www.space.com/15421-black-holes-facts-formation-discovery-sdcmp.html>
<http://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes/>
<https://universocuantico.wordpress.com/2010/08/27/formacion-de-agujeros-negros-supermasivos/>
http://www.slate.com/blogs/bad_astronomy/2016/06/07/did_supermassive_black_holes_start_out_big_or_small.html
https://ca.wikipedia.org/wiki/Principi_d%27exclusi3n_de_Pauli
http://www.ub.edu/web/ub/es/menu_eines/noticies/2016/entrevistes/roberto_emparan.html
<https://bigbang3.wikispaces.com/5.+ELS+FORATS+NEGRES>
<https://www.ligo.caltech.edu/page/what-are-gw>
<https://www.ligo.caltech.edu/page/gw-sources>
<https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes>
<http://teoria-de-la-relatividad.blogspot.com.es/2009/03/28b-los-agujeros-negros-ii.html>
http://chandra.harvard.edu/learn_bh.html
http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esofisicaquimica/4quincena11/4q11_contenidos_2c.htm
<http://astrojem.com/teorias/fuerzanuclearfuerte.html>

<http://www.enciclopedia.cat/EC-GEC-0153872.xml>
<http://www.astrofiscayfisica.com/2012/06/que-es-el-espectro-electromagnetico.html>
<http://www.relatividad.org/bhole/deteccion.html>
<http://science.howstuffworks.com/dictionary/astronomy-terms/black-hole3.htm>
<http://www.sea-astronomia.es/drupal/sites/default/files/archivos/exposiciones/Lentes%20gravitacionales%20ultima.pdf>
<http://www.astroscu.unam.mx/~wlee/OC/SSAAE/AEE/Sistemas%20Binarios/Discos%20acrecion.html>
<http://definicion.de/quasar/>
<http://www.cienciasenergeticas.com/2013/06/agujero-blanco.html> <https://actualidad.rt.com/ciencias/view/120306-cientificos-agujeros-negros-universo-einstein>
<http://news.nationalgeographic.com/news/2014/02/140218-black-hole-blast-explains-big-bang/>

Bibliografia

Hawking, Stephen W., *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*. 223 pàg.

Hawking, Stephen W.; Mlodinow, Leonard, *A Briefer History of Time*. 198 pàg.

Bosch i Ramon, Valentí, *Agujeros negros: fronteras del espacio y el tiempo*. 109 pàg.

13 Fonts d'imatge

http://www.cccb.org/rcs_gene/adaptive-images.php?file=/rcs_gene/Sonia_Fernandez-Vidal_2_.jpg **Fig. 1, 90**

http://elpais.com/diario/imagenes/2008/04/15/necrologicas/1208210402_850215_0000000000_sumario_normal.jpg **Fig. 2**

http://1.bp.blogspot.com/-wd_ruyE2nsU/UJydLiWdV7I/AAAAAAAAAEfk/h6EYtf3Xly4/s320/interferencia.jpg **Fig. 3**

https://departamentofisicaequimica.files.wordpress.com/2015/01/efecto_fotoelc3a9ctrico_2.jpg **Fig. 4**

<http://www.fisicanet.com.ar/biografias/cientificos/r/img/roemer.jpg> **Fig. 5**

<http://francis.naukas.com/files/2013/01/dibujo20130122-orion-to-sirius-to-procyon-300x264.jpg> **Fig. 6**

<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/fotos/bradley.jpg> **Fig. 7**

http://www.nasa.gov/sites/default/files/sgr_lg.jpg **Fig. 8**

<http://www.granadablogs.com/pateandoelmundo/wp-content/uploads/2016/05/Acelerador.jpg> **Fig. 9**

<http://blog.pucp.edu.pe/blog/wp-content/uploads/sites/64/2008/09/lhc1.jpg> **Fig. 10**

Font pròpia **Fig. 11**

<https://www.ecured.cu/images/2/2e/Deuterio1.jpeg> **Fig. 12**

http://www.mmfilesi.com/wp-content/uploads/2014/11/stomo_helio.png **Fig. 13**

http://www.nasa.gov/mission_pages/spitzer/news/spitzer20121003.html **Fig. 14**

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/63/Messier_81_HST.jpg/300px-Messier_81_HST.jpg **Fig. 15**

http://www.natureduca.com/images_cosmos/galaxia_andromeda.jpg **Fig. 16**

<http://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-supernova.html> **Fig. 17**

<http://www-news.uchicago.edu/releases/photos/chandra/subrahmanyam.jpg> **Fig. 18**

<http://www.pausetowonder.org/wp-content/uploads/2013/08/RedGiant.jpeg> **Fig. 19**

https://esp.rtr.com/actualidad/public_images/2016.04/article/56feeb76c46188f0458b4574.jpg **Fig. 20**

http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/science/neutron_stars.html **Fig. 21 i 49**

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/JROppenheimer-LosAlamos.jpg> **Fig. 22**

Font pròpia **Fig. 23**

Del llibre de Hawking **Fig. 24**

<http://jmacosta.galeon.com/six1.jpg> **Fig. 25**

<http://www.biografiasyvidas.com/biografia/h/fotos/hawking.jpg> **Fig. 26**

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b3/Roger_Penrose-6Nov2005.jpg/260px-Roger_Penrose-6Nov2005.jpg **Fig. 27**

<https://tce-live2.s3.amazonaws.com/media/media/149101fd-1abf-4beb-a413-b7de58e01a0f.jpg> **Fig. 28**

<http://www.astronoo.com/images/biographies/karl-schwarzschild.jpg> **Fig. 29**

<http://www.100ciaquimica.net/images/biografias/ima/kerr.jpg> **Fig. 30**

https://bowlerhatscience.files.wordpress.com/2012/11/black_hole.png **Fig. 31**

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c9/Celestia_Sirius.jpg **Fig. 32**

<http://scitech2010.weebly.com/uploads/5/9/0/0/5900151/9252574.png?324> **Fig. 33**

<http://www.astrofiscayfisica.com/2012/06/que-es-el-espectro-electromagnetico.html> **Fig. 34 i 36**

http://astrojem.com/imagenes_voltaire/ondasemlongitudes.jpg **Fig. 35**

<https://geofrikphotos.files.wordpress.com/2012/12/diagrama-hertzsprung-russell.jpg> **Fig. 37**

http://1.bp.blogspot.com/_js6wgtUcfdQ/S29KTPQ9_6I/AAAAAAAAAKiQ/Lh9IPKiwofE/s400/principio_exclusion_de_Pauli_5.PNG **Fig. 38**

<http://www.ejemplode.com/images/uploads/fusionnuclear.jpg> **Fig. 39**

<http://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-supernova.html> **Fig. 40**

<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/0e/04/1c/0e041c1c1ab7dc069ac65865ec1d943e.jpg> **Fig. 41**

http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/saga.html **Fig. 42**

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/32/Hubble_01.jpg/285px-Hubble_01.jpg **Fig. 43**

http://3.bp.blogspot.com/_js6wgtUcfdQ/SjLIGbtliTI/AAAAAAAAAGlw/Q17NGfHb9xI/s400/espacio-tiempo_en_rotacion_hacia_un_hoyo_negro.gif **Fig. 44**

http://www.wallpaper.com/wallpapers/45791_1920x1200.jpg **Fig. 45**

http://2.bp.blogspot.com/_js6wgtUcfdQ/SoxvKm69LBI/AAAAAAAAAG-Y/lgaOBKTI9Fg/s400/ergosfera.JPG **Fig. 46**

Font pròpia **Fig. 47**

<http://materialescolar.org.es/wp-content/uploads/2012/07/ondas-agua.jpg> **Fig. 48**

http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/science/neutron_stars.html **Fig. 49**

Font pròpia **Fig. 50**

<http://blog.espol.edu.ec/jmorejon/files/2011/02/albert-einstein.jpg> **Fig. 51**

http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/sistrefinancieras/images/tren_relativ_1.gif **Fig. 52**

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/26/Composition.svg> **Fig. 53**

Font pròpia **Fig. 54**

http://2.bp.blogspot.com/_D0gEf-6KRSc/TChRhmfzBI/AAAAAAAAADII/P0f0KX-qHCA/s1600/20070926klpmatgeo_500.Ges.SCO.png **Fig. 55**

Font pròpia **Fig. 56**

Font pròpia **Fig. 57**

http://3.bp.blogspot.com/-3l-KXKNedLg/TiTjKin6_cl/AAAAAAAAAZs/w8hQEJvT7cl/s1600/Ascensor.jpg **Fig. 58**

Font pròpia **Fig. 59**

Font pròpia **Fig. 60**

Font pròpia **Fig. 61**

Font pròpia **Fig. 62**

Font pròpia **Fig. 63**

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Best_image_of_bright_quasar_3C_273.jpg **Fig. 64**

http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/cygnusx1.html **Fig. 65**

http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/milky-way-s-black-hole-shows-signs-of-increased-chatter.html **Fig. 66**

<http://chandra.harvard.edu/photo/2016/vla/> **Fig. 67**

<http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2014/06/1-9WkmXJDv0gL6EI28zZxTyg.png> **Fig. 68**

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2a/Accretion_disk.jpg/300px-Accretion_disk.jpg **Fig. 69**

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/24/Arthur_Stanley_Eddington.jpg/220px-Arthur_Stanley_Eddington.jpg

Fig. 70

<http://www.sea-astronomia.es/drupal/sites/default/files/archivos/exposiciones/Lentes%20gravitacionales%20ultima.pdf> **Fig. 71, 72, 73, 74, 75, 76**

<http://www.cienciasenergeticas.com/2013/06/agujero-blanco.html> **Fig. 77, 78, 79, 81**

[https://universoparalelo14.files.wordpress.com/2014/08/multiverse-tile.jpg?](https://universoparalelo14.files.wordpress.com/2014/08/multiverse-tile.jpg?w=1038&h=501&crop=1)

Fig. 80

<https://sanzxabier.files.wordpress.com/2014/05/multiversooooooooooooooooooooo.jpg>

Fig. 82

<http://www.ub.edu/web/ub/galleries/imatges/noticies/2016/06/REmparan-9289.jpg> **Fig. 83**

Font pròpia **Fig. 84-89, 91-120**