

LA NATURALESA DE LA MATÈRIA FOSCA

RESUMEN

A lo largo de este trabajo se encuentran definiciones sobre materia, evidencias de que la materia oscura existe, propuestas de partículas que pueden formar la materia oscura y experimentos que se llevan o se han llevado a cabo para poder descubrir este tipo de materia. Además, una entrevista con un científico del laboratorio Can Franc para conocer más estos experimentos y la materia oscura.

Finalmente, la conclusión está enfocada en si podemos o no creer que la materia oscura existe, concluyendo en que sí es importante debido a las evidencias y al planteamiento del universo, que hoy en día, está en torno a la materia oscura.

ABSTRACT

In this project you can find definitions about matter, evidence that the dark matter exists, suggestions of particles that may be the ones that form the dark matter and experiments that try to discover dark matter. Also, an interview with a scientist from the laboratory Can Franc to get to know more about the experiments and the dark matter.

Finally, the conclusion is about the idea if we should or not believe that dark matter exists. The conclusion is that we should because there are a lot of evidence and the universe is thought around the idea that dark matter exists.

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ.....	5
2. PROPORCIIONS DE LA MATÈRIA I ENERGIA A L'UNIVERS.....	6
2.1. MATÈRIA ORDINÀRIA.....	6
2.2. MATÈRIA FOSCA.....	6
2.3. ENERGIA FOSCA.....	6
3. EVIDÈNCIES.....	7
3.1. CÀLCUL DE MASSES	7
3.1.1. LA TERRA I EL SOL.....	7
3.1.2. GALÀXIES A PARTIR DE LA VELOCITAT DE LES ESTRELLES.....	8
3.1.2.1. SIMULADOR DE MATÈRIA FOSCA.....	11
3.2. CÚMUL DE COMA.....	12
3.3. LA TEORIA DE LA RELATIVITAT.....	13
3.3.1. LENTS GRAVITACIONALS.....	15
3.4. CÚMULS DE GALÀXIES.....	16
3.5. RADIACIÓ DE FONTS.....	17
4. MODEL ESTÀNDARD.....	19
4.1. MECANISME DE HIGGS I SIMETRÍA DEL MODEL ESTÀNDARD.....	20
4.2. POSSIBLES PARTÍCULES.....	21
4.2.1. WIMPS.....	21
4.2.1.1. SUPERSIMETRÍA.....	22
4.2.1.2. DIMENSIONS EXTRA.....	23

4.2.2. AXONS.....	23
4.2.3. FORATS NEGRES.....	23
5. EXPERIMENTS.....	24
5.1. DETECCIÓ DIRECTA.....	24
5.1.1. ANAIS.....	25
5.1.2. LUX.....	26
5.1.3. XENONNT.....	26
5.1.4. DAMA/LIBRA.....	27
5.2. DETECCIÓ INDIRECTA.....	27
5.3. PRODUCCIÓ DE MATÈRIA FOSCA.....	28
6. PART PRÀCTICA.....	29
7. CONCLUSIONS.....	35
8. BIBLIOGRAFIA.....	36

1. INTRODUCCIÓ

El desconeixement de l'univers, sobretot per a persones ordinàries, és més aviat gran. Pot crear molt interès i és potser important entendre com funciona i com és el que ens envolta. La curiositat per saber com és l'univers, què el forma i que en sabem fins ara em va impulsar a focalitzar el meu treball de recerca amb un tema encara amb moltes incògnites: la matèria fosca.

Molta gent encara no sap el què és, o tan sols, que existeix. Hi ha persones que creuen amb molta seguretat i d'altres que tenen dubtes i objeccions a aquesta creença (i afirmació) que la matèria fosca existeix.

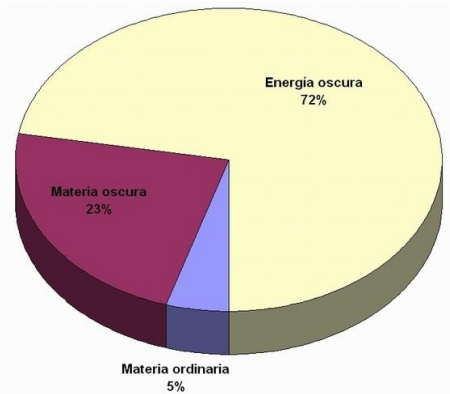
Al llarg d'aquest treball hi ha una breu definició de la matèria que hi ha a l'univers i els percentatges de totes aquestes; explicacions de mètodes experimentals duts a terme al llarg de la història per evidenciar que la matèria fosca existeix; explicació de què és el model estàndard i quins problemes comporta proposar una nova partícula per a poder explicar quina és la partícula que forma la matèria fosca, tenint en compte les propietats d'aquesta; una entrevista amb un científic del laboratori Can Franc amb un seguit de preguntes envoltades a com funcionen els experiments que es duen a terme allà, altres experiments i coneixement sobre la matèria fosca.

A la conclusió en parlem sobre si hauríem de creure o no què la matèria fosca existeix. Tenint en compte les evidències, l'entrevista amb l'Alberto i la idea que l'univers està pensat des d'un punt de vista on la matèria fosca existeix, he arribat a la conclusió que si hauríem de creure que la matèria fosca existeix.

2. PROPORCIIONS DE LA MATÈRIA I ENERGIA A L'UNIVERS

Sabem que l'univers està format per matèria. El que avui en dia sabem, gràcies a la recerca i descobriments científics, és que no tota la matèria que conforma aquest espai es pot veure o la coneixem al 100%.

Fins ara s'havia pensat que la matèria ordinària era l'única que constituïa les galàxies. Després d'anys d'investigació, podem dir que aquesta és només el 5% del total, la matèria fosca un 23% i finalment l'energia fosca el 72% restant.



GRÀFIC 1 - PERCENTATGES DE MATÈRIA I ENERGIA A L'UNIVERS

Tot i això, s'han trobat galàxies on els percentatges varien. Des de galàxies on la matèria fosca ocupa el 99% fins d'altres en les que ocupa el 80% o el 20%. Això és degut a que la majoria de la matèria ordinària no està a les galàxies sinó al gas intergalàctic que flota entre elles.

2. 1. MATÈRIA ORDINÀRIA

La matèria ordinària és tota aquella que ens forma i també forma tot allò que podem veure. Està formada per àtoms que poden estar en diferents estats com sòlid, gasós, líquid o plasma. A l'espai, la majoria de matèria ordinària es presenta en forma de plasma

2. 2. MATÈRIA FOSCA

La matèria fosca no es coneixia fins fa uns 50 anys, on es va fer la primera proposta d'aquesta. Va ser però, als anys 70, on van aparèixer les primeres proves sistemàtiques. No sabem quina és la partícula d'aquest tipus de matèria, però sí que és invisible, abundant i està repartida de manera desigual a l'espai formant núvols. Quan diem que és invisible ens referim a que no experimenta la força electromagnètica, cosa que la fa molt difícil de detectar

2. 3. ENERGIA FOSCA

L'energia fosca és una energia que omple l'univers de forma uniforme i és la que provoca l'expansió de l'univers. Avui en dia no se sap d'on prové o el perquè de la seva abundància.

3. EVIDÈNCIES

3. 1. CÀLCUL DE MASSES

3. 1. 1. LA TERRA I EL SOL

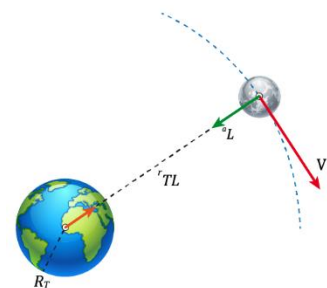
La mida de la Terra era coneguda des del segle II aC gràcies al grec Erastótenes, però en canvi no se sabia res respecte a la seva densitat. Encara amb la falta d'aquesta dada, fa més de dos cents anys es va poder conèixer la massa de la Terra i això va estar gràcies a la llei de gravitació universal de Newton: $F = G \frac{M \cdot m}{r^2}$. Aquesta afirma que dos cossos s'atrauen amb una força proporcional al producte de les seves masses i inversament proporcional al quadrat de la distància que les separa. G a la equació és una constant universal.

Aquesta llei pot ser aplicada sobre objectes prop de la superfície de la Terra i que cauen degut a l'atracció d'aquesta. Per a tots ells la massa que els atrau és la mateixa i aproximadament la distància de separació també, per tant l'acceleració ha de ser la mateixa. I és així com passa. Aquest fenomen va ser observat per Galileu mig segle abans que Newton i experimentalment se sabia que l'acceleració es $9,8 \text{ m/s}^2$. Es pot fer servir l'equació: $a = G \frac{M}{r^2}$, l'acceleració depèn només de la constant de proporcionalitat G, la massa de la Terra i el radi terrestre.

Newton sabent el radi de la Terra, podia estimar el valor de la massa perquè l'acceleració era la mateixa que l'experimental. Però li faltava quin era el valor de la constant G. Ell mateix va proposar calcular-la a partir de dues boles metàl·liques. Va ser al 1798 que Henry Cavendish ho va fer. Un cop va conèixer el valor de la constant G va calcular la massa de la Terra i va veure que aquesta era $6 \cdot 10^{21}$ kilograms.

Aquest mètode no es pot fer servir per a determinar la massa d'una galàxia o cúmuls de galàxies (que és on es pot veure la contribució de la matèria fosca en la massa total). Per a fer-ho, s'ha d'estudiar les òrbites seguides pels objectes que giren al voltant de les grans masses que volem conèixer. El mètode per a fer-ho va ser desenvolupat per Newton.

Newton va ser la primera persona en entendre que la Lluna estava en caiguda lliure, és a dir, la única força a la que està



GRÀFIC 2 - LLUNA ORBITANT AL VOLTANT DE LA TERRA

sotmesa és la gravitatòria. A més, ho va demostrar matemàticament: com que la Lluna gira, la direcció en la que la seva velocitat apunta canvia contínuament. Per tant la Lluna està experimentant l'acceleració centrípeta al estar dirigida cap al centre de la circumferència. Newton i Christian Huygens van demostrar que l'acceleració centrípeta depèn només de la velocitat del objecte que gira i el radi de la circumferència sobre la que gira. Com es sabia la velocitat de la Lluna i la distància d'aquesta fins a la Terra, va ser possible calcular la seva acceleració centrípeta.

Una acceleració és sempre causada per una força i Newton va pensar que era la força de la gravetat que feia la Terra contra la Lluna. Encara que això només és cert si la velocitat de la Lluna té un valor concret. Es pot aconseguir a l'igualar l'expressió de l'acceleració centrípeta amb la de l'acceleració gravitatòria. La velocitat de la Lluna doncs, hauria de ser: $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$. Aquesta equació és vàlida per a qualsevol objecte que orbiti al voltant d'una massa amb una distància determinada ja que és una conseqüència de la llei de gravitació universal. Si la Lluna estigués en caiguda lliure, la seva velocitat hauria de ser necessàriament la que ens indica l'equació. Newton va poder comprovar que la velocitat predita era la mateixa que l'observada, confirmant així que la seva llei de gravitació es complia més enllà de la superfície terrestre.

A partir d'aquest mateix mètode és com es va poder saber la massa del Sol: fent servir la velocitat de translació de la Terra i la distància entre totes dues. En el moment que Newton va fer el càlcul no es coneixia bé la distància i el resultat no era correcte del tot, més tard és va repetir i ara sabem amb exactitud quin és el pes del Sol.

3. 1. 2. GALÀXIES A PARTIR DE LA VELOCITAT DE LES ESTRELLES

És a partir del moment de pesar una galàxia que es va trobar una de les primeres evidències de la matèria fosca.

Fent servir aquest mètode podem arribar a determinar quina és la massa d'una galàxia sencera. Per a fer-ho, es va tenir en compte al velocitat de diferents estrelles orbitant a

diferents distàncies del centre galàctic, cosa que determina la massa envoltada per l'òrbita de cada estrella, que és la que les atrau. A més es pot entendre com està distribuïda la massa.

Aquest treball es va fer als anys setanta per Vera Rubin i Kent Ford. La idea de mesurar la velocitat d'estrelles al voltant de la galàxia per després utilitzar l'equació, sembla molt senzilla, però seguir la velocitat d'estrelles individuals i llunyanes és difícil. Encara que aquestes es moguin a grans velocitats, com que les òrbites són tant grans sembla que estiguin quietes. A més que no podem mesurar aquesta velocitat amb un telescopi com es va fer en el seu moment amb la Lluna.

Table 1
Measurements of the Circular Velocity of the Milky Way

R (kpc)	v_c (km s ⁻¹)	σ_{v_c} (km s ⁻¹)	$\sigma_{v_c}^2$ (km s ⁻¹)
5.27	226.83	1.91	1.90
5.74	230.80	1.43	1.35
6.23	231.20	1.70	1.10
6.73	229.88	1.44	1.32
7.22	229.61	1.37	1.11
7.82	229.91	0.92	0.88
8.19	228.86	0.80	0.67
8.78	226.50	1.07	0.95
9.27	226.20	0.72	0.62
9.76	225.94	0.42	0.52
10.26	225.68	0.44	0.40
10.75	224.73	0.38	0.41
11.25	224.02	0.33	0.54
11.75	223.86	0.40	0.39
12.25	222.23	0.51	0.37
12.74	220.77	0.54	0.46
13.23	220.92	0.57	0.40
13.74	217.47	0.64	0.51
14.24	217.31	0.77	0.66
14.74	217.60	0.65	0.68
15.22	217.07	1.06	0.80
15.74	217.38	0.84	1.07
16.24	216.14	1.20	1.48
16.74	212.52	1.39	1.43
17.25	216.41	1.44	1.85
17.75	213.70	2.22	1.65
18.24	207.89	1.76	1.88
18.74	209.60	2.31	2.77
19.22	206.45	2.54	2.36
19.71	201.91	2.99	2.26
20.27	199.84	3.15	2.89
20.78	198.14	3.33	3.37
21.24	195.30	5.99	6.50
21.80	213.67	15.38	12.18
22.14	176.97	28.58	18.57
22.73	193.11	27.64	19.05
23.66	176.63	18.67	16.74
24.82	198.42	6.50	6.12

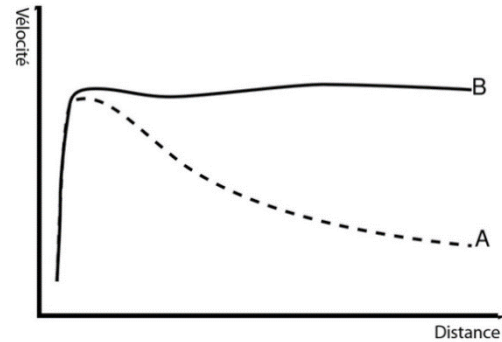
TAULA 1 – VELOCITAT DE LES ESTRELLES A LA VIA LÀCTEA

Per a aconseguir-ho van fer servir l'efecte Doppler. Aquest efecte és el canvi de freqüència d'ona quan la font emissora es troba en moviment respecte a un observador i aquest efecte té molta importància a l'astronomia i astrofísica.

La llum és una ona electromagnètica en la qual el que vibra són els camps elèctrics i magnètics. Les ones de freqüència més baixa és la llum vermella i la més alta la blava. Si un objecte emissor de llum s'apropa, la freqüència serà major, és a dir blava i si s'allunya, la freqüència serà més baixa, pel que serà vermella. Mesurant aquesta freqüència és com podem saber la velocitat amb la que estrelles s'apropen o s'allunyen. Per a fer-ho s'ha de tindre en compte llums a freqüències ja conegudes com les de l'hidrogen i altres elements.

Vera Rubin i Kent Ford van perfeccionar i sistematitzar aquesta tècnica i van ser capaços d'aplicar-la a estrelles de moltes galàxies i així determinar la massa i distribució d'aquesta en cada una. Aquest és el moment on es descobreix la matèria fosca.

Hi havia una expectativa de quina seria la massa de les galàxies. A simple vista sembla que estiguin formades per estrelles pel que es pot fer una estimació de la massa d'una galàxia segons la lluentor que emet. A part, tot i que també estan formades pel gas galàctic, també es coneix quina és la massa gràcies als raigs X que el gas emet. És aquesta matèria la major part de la massa ordinària. Com que era l'única coneguda per aquell temps, és per això que es creia tindre una idea clara de quina havia de ser la massa i la seva distribució. Com que a les distàncies més llunyanes del centre gairebé no hi ha estrelles o gas, la velocitat de les estrelles havia de disminuir ràpidament segons estiguessin més distants del centre.

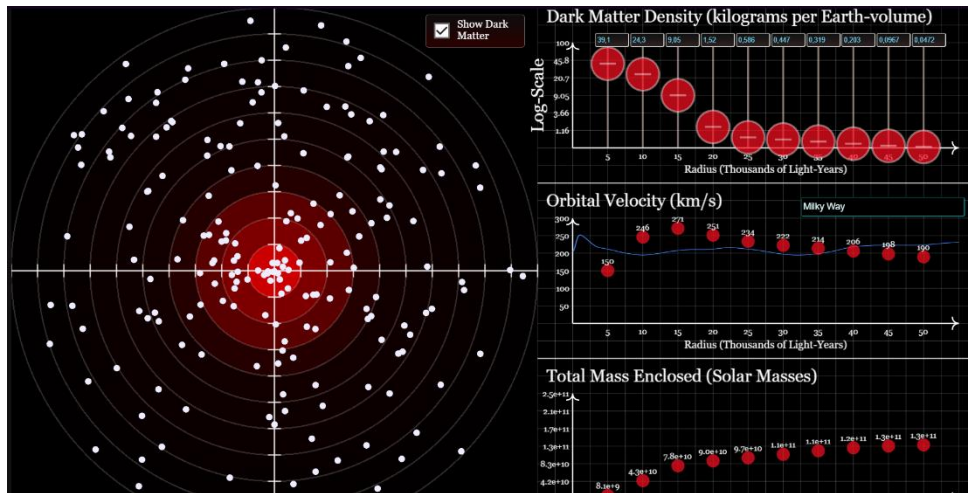


GRÀFIC 3 - VELOCITATS DE LES ESTRELLES AL VOLTANT DE LA GALÀXIA

Tornant a l'equació $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$, la massa visible seria més o menys la mateixa tant per a una estrella llunyana com a una propera. Però se suposava que a major fos la distància, menor havia de ser la velocitat. El que es van trobar, va ser que encara que les estrelles fossin llunyanes, la velocitat era aproximadament la mateixa. Al gràfic, A és la velocitat predita i B la velocitat real de les estrelles. Es va pensar que hi havia més matèria a la galàxia i que a més, no era visible. Va ser anomenada "matèria fosca".

Rubin i Ford es van trobar amb el mateix fenomen a totes i cada una de les seixanta galàxies que van estudiar. Va ser la primera evidència que van prendre en serio i que va fer que l'estudi de la matèria fosca fos una prioritat dins de les investigacions astrofísiques.

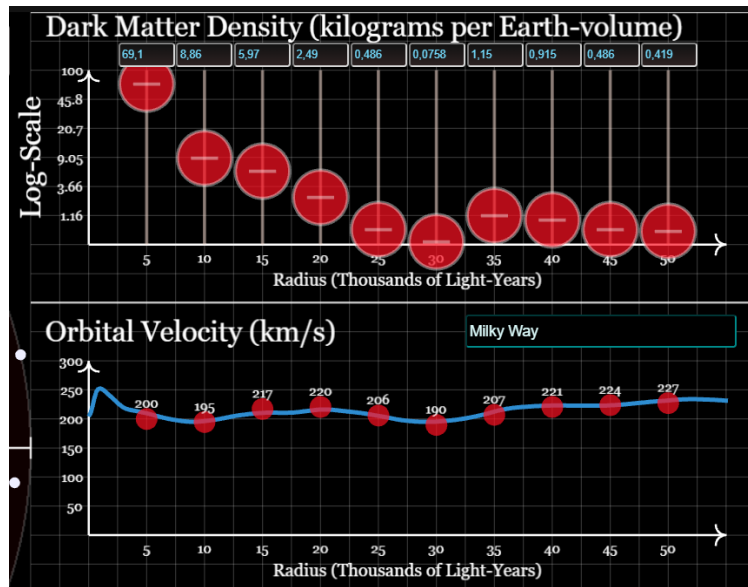
3. 1. 2. 1. SIMULADOR MATÈRIA FOSCA



IMATGE 1 – SIMULADOR DE MATÈRIA FOSCA

En aquest simulador de matèria fosca el que podem observar és com la velocitat orbital de les estrelles depèn de la densitat de matèria fosca que hi ha a l'espai. En ell podem veure que si augmentem la densitat, la velocitat de les estrelles augmenta considerablement i és en canvi si la reduïm que la velocitat és molt baixa.

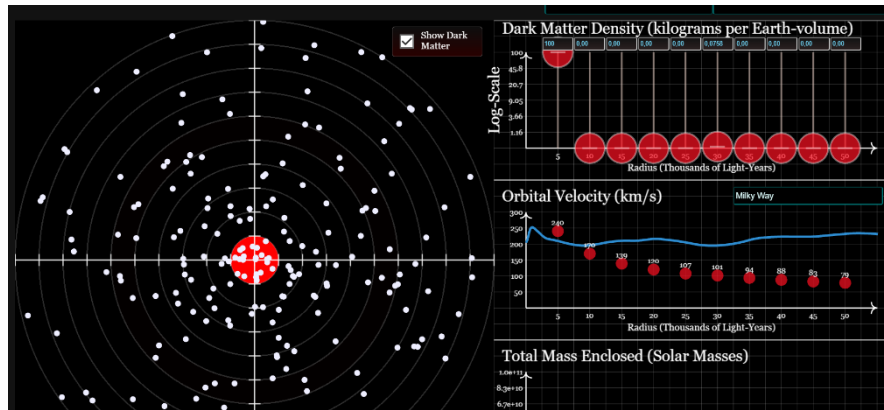
En el simulador et donen dues instruccions per estudiar el funcionament d'aquest efecte. Un d'elles és posant els valors de la densitat de matèria fosca de tal forma que els punts de la velocitat orbital encaixin amb la corba real de la galàxia. Aleshores, tenint en compte la distància de la Terra del centre de la Via



IMATGE 2 – ESTUDI DE LA DENSITAT DE MATÈRIA FOSCA A LA TERRA A PARTIR D'UN SIMULADOR

Llàctia, podem estimar la quantitat de matèria fosca que hi ha a la Terra mirant el gràfic de densitat de matèria fosca.

L'altre forma en la que es pot fer servir el simulador és tenint en compte la llei de Kepler. Si posem la primera densi-



IMATGE 3 – ESTUDI DE LA LLEI DE KEPLER

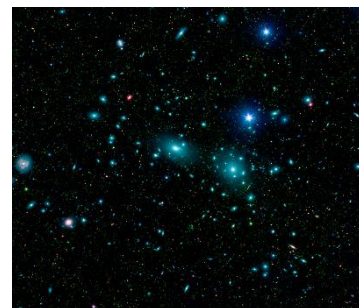
tat de matèria fosca al màxim i totes les altres a 0 serà semblant al sistema Solar, on el

centre de la gran densitat de massa seria el Sol. Aleshores es pot veure com a mesura que t'allunyes del centre, la velocitat orbital de les estrelles disminueix, concordant amb la llei de Kepler. Així era com s'esperava que la velocitat orbital de les estrelles fos, tot i això, els càlculs han demostrat el contrari.

3. 2. CÚMUL DE COMA

Normalment es considera a Fritz Zwicky el primer astrònom que va proposar el concepte de matèria fosca, a més que ho va fer quaranta anys abans que Rubin i Ford. El que va estudiar Zwicky va ser el Cúmulo de Coma, el qual està format per unes mil galàxies. El que va fer va ser pesar un cúmulo de galàxies a partir de la velocitat de les galàxies, en comptes d'estrelles. Es va trobar el mateix fenomen que Rubin i Ford: les velocitats eren més altes que les esperades, pel que havia d'haver més matèria de la que es pensava.

Encara que va sobreestimar el percentatge de matèria fosca al no tindre en compte el gas intergalàctic que representa la major part de la matèria ordinària en el cúmulo i tot i que no ho va poder fer degut a que no disposava de la tecnologia necessària. A més, va partir d'unes estimacions errònies sobre el ritme d'expansió de l'univers, paràmetre important a l'hora de determinar la posició de les galàxies llunyanes. Astrònoms i astrofísics pensaven que quan hi hagués més dades, es podria resoldre això sense haver de recórrer a l'explicació de la matèria fosca.



IMATGE 4 – CÚMUL DE COMA

L'investigació de Zwicky va estar pràcticament parada fins quaranta anys més tard amb el treball de Rubin i Ford. Fritz Zwicky no va ser gaire reconegut pel seu treball quan encara estava viu. A més de proposar que les supernoves eren explosions d'estrelles i que les galàxies podien actuar com lents gravitacionals.

Encara amb el treball de Rubin i Ford es dubtava si la matèria fosca era únicament matèria ordinària que per alguna raó no es podia detectar. També hi havia la idea que fos que la llei de Newton fallava a grans distàncies i amb ella la relació de la velocitat de les òrbites i la massa que els atrau. Aleshores s'hauria estat fent servir una equació incorrecta i la conclusió que hi ha més massa de la que es creu, seria errònia. Es va trigar anys en aclarir aquesta qüestió.

3. 3. LA TEORIA DE LA RELATIVITAT

La llei de gravitació universal de Newton no sempre és correcta. Es poden conèixer les limitacions gràcies a les teories de la relativitat d'Albert Einstein. La relativitat general, formulada al 1915 després de vuit anys de treball, descriu com un fenomen és observat per diferents observadors sigui quina sigui la seva posició, velocitat o acceleració. Aquesta teoria suposa una ampliació a la relativitat especial formulada al 1905 la qual es referia només a observadors amb velocitat constant. Aquestes teories van suposar una revolució científica. Aquestes implicaven que les nocions de temps i espai no fossin com la nostra intuïció ens diu, és a dir, magnituds intocables i inerts. Es comença a entendre l'espai-temps com un tot que es pot estirar i encongir, torçar i retorçar.

La relativitat general és a més una teoria de la gravitació. Segons la relativitat general, l'espai-temps es corba degut a la presència de massa i energia. Si no fos per aquesta corba, els objectes seguirien el seu moviment: o es quedarien en repòs o es mourien en línia recta en velocitat constant. Això és el que els hi passa a objectes aïllats, fenomen comprès per Galileu al segle XVII.

Aleshores quan un objecte passa a prop d'una gran massa, entra en una zona on l'espai-temps està corbat provocant una acceleració sobre ell i una desviació en el seu camí. Atribuïm un efecte de força la qual anomenem "força de gravetat" a aquesta acceleració experimentada, encara que és només la conseqüència que l'espai-temps estigui corbat.

Aquest concepte és impossible de visualitzar, però matemàticament es pot formular de forma precisa. Einstein va proposar una forma exacta en la que la massa i l'energia corben l'espai-temps a partir d'una equació, la principal equació de la relativitat general:

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu} = T^{\mu\nu}.$$

A l'esquerra trobem $R^{\mu\nu}$, la corbatura i $g^{\mu\nu}$ la mètrica de l'espai-temps. Aquestes variables descriuen la geometria de l'espai-temps i com està corbat en cada punt, és aquesta geometria la que determinarà els trajectories dels objectes. A la dreta trobem $T^{\mu\nu}$ que seria el tensor energia-moviment i representa la quantitat d'energia i matèria que hi ha a l'univers. Aleshores aquesta equació determina la forma precisa en la que la matèria i l'energia corben l'espai-temps. L'equació es pot aplicar en el cas que la matèria sigui una gran massa central, M . El que es dedueix de la equació és que la força gravitatòria efectiva és molt semblant a la llei de gravitació de Newton però amb petites modificacions: $F = G \frac{M \cdot m}{r^2} + f$. On f és contribució relativista a la força gravitatòria. Aquesta és una suma de termes que depenen de la distància r i de les velocitats de dues masses que s'atrauen. Suposa una contribució negativa pel que la força gravitatòria és més petita que la predita per Newton. A diferència de la llei de Newton, f disminueix amb el cub de la distància i no amb el quadrat d'aquesta. És important ja que Newton ja sabia que potser la seva llei de gravitació no era exacta. Una de les conseqüències de la llei de gravitació newtoniana era que les òrbites dels planetes havien de ser el·lipses tancades. Encara que si la força d'atracció no es exactament inversament proporcional al quadrat de la distància, sinó que té correccions, dona com a resultat òrbites que van canviant amb el temps.

Newton va proposar fer un seguiment de les òrbites dels planetes per a detectar qual-sevol desviació de la seva forma el·líptica estable, el que suposaria que la seva llei necessitava modificacions. Es va trobar que els planetes seguien òrbites tancades excepte Mercuri. Al segle XX se sabia que el punt més allunyat de l'òrbita s'anava desplaçant a cada volta. Tot i que això es devia a l'atracció gravitatòria d'altres planetes, seguia havent-hi un desacord amb les prediccions de la gravitació newtoniana. El fet que Mercuri fos l'únic planeta que no seguia la llei era degut a la correcció relativista f . Actualment aquest desplaçament ha estat mesurat en altres planetes i s'ajusta a la predicció relativista.

Es torna al dubte de si és que la llei de Newton fallés per a les estrelles llunyanes així com ho feia amb Mercuri. Però la correcció relativista no pot ser responsable de moviments estranys d'estrelles i és que a major distància, menor pes té la correcció a les equacions de Newton.

Actualment hi ha moltes evidències que les equacions no fallen. A més la teoria de la relativitat dona lloc a efectes que ens proporcionen aquestes evidències.

3. 3. 1. LENTS GRAVITACIONALS

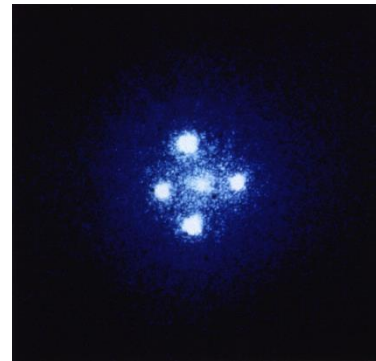
La curvatura de l'espai-temps prop d'una gran massa fa que tant objectes com raigs de llum, corbin les seves trajectòries. El fet que el rajos de llum es corbin, fa que la posició aparent d'una estrella vista des d'un observador des de la Terra, es vegi desplaçada.

Aquest fet no es pot veure degut a la gran lluminositat del Sol, encara que sí es pot fer durant un eclipsi de Sol total. Això ho va poder fer el físic britànic Arthur Eddington al 1919 quan va aprofitar un eclipsi d'aquest tipus per prendre unes fotografies. Aquestes van ser d'abans i després de l'eclipsi van demostrar que la posició aparent de les estrelles es desplaçava durant aquest. A més, una cosa important era que el desplaçament observat coincidia amb el predit per la relativitat general d'Einstein; aquesta observació va suposar un suport decisiu per a la teoria i va donar reconeixement mundial a Einstein. El fenomen, anomenat "deflexió de la llum" produïda pel Sol, ha estat observat més d'una vegada i cada vegada amb més precisió ajustant-se a les prediccions de la relativitat general.

A més, aquest mètode es pot fer servir per a determinar la massa d'un objecte celeste. Mesurant quant es corben i aplicant les equacions de la relativitat general, es pot deduir la massa del objecte. El procediment és més eficient quant major sigui la seva massa ja que la deflexió és major.

Els objectes celestes que són capaços de produir una deflexió visible s'anomenen lents gravitacionals. Encara que tots els objectes ho són, els de massa més gran causen un major efecte. Si l'objecte que provoca l'efecte està molt lluny de la Terra hi ha la possibilitat que produeixi imatges dobles o múltiples del cossos situats a gran distància darrere seu.

La creu d'Einstein és un d'aquests exemples. Podem veure una galàxia central (concretament la PGC 69457) i quatre imatges del mateix quàsar (un nucli galàctic molt actiu i brillant, que probablement tanca forats negres), el qual es pot veure a l'interior de la galàxia com un punt brillant, situat a gran distància darrere seu. L'efecte recorda al que produiria una lupa o esfera de cristalls colossals, és per això que s'anomena "lent gravitacional".



IMATGE 5- CREU D'EINSTEIN

El que és important per a nosaltres, és que a partir d'aquestes imatges, podem deduir la quantitat de massa que produeix aquest efecte i com està distribuïda aplicant les equacions de la relativitat general. A més, ens permet comprovar que les quantitats de massa que s'havien aconseguit fent servir altres mètodes eren correctes. El mètode de la lent gravitatòria ens permet saber la distribució de la massa inclòs quan no hi ha objectes orbitant al voltant. Tenint en compte la curvatura de la llum al passar pel la gran massa i la quantitat de matèria ordinària present, podem deduir la matèria "que falta" per a completar el total.

Aquest mètode ha permès comprovar que la matèria fosca a l'univers és cinc o sis vegades més abundant que la matèria ordinària, mateixa estimació que la que es va fer amb el mètode de les òrbites. A més, ha proporcionat una important evidència del fet que la matèria fosca està allà i no és cap il·lusió òptica degut a que a grans distàncies l'atracció gravitatòria funcioni diferent.

3. 4. CÚMULS DE GALÀXIES

Els cúmuls de galàxies estan formats per cents o milers de galàxies que es mantenen unides gràcies a la força gravitatòria. La major part de la matèria ordinària no es troba les galàxies sinó en el gas (format d'hidrogen i heli) que està als espais intergalàctics. És un gas de temperatura elevada (100 milions de graus) a causa de la gran velocitat de les molècules degut a la dinàmica de la gravetat. Encara que un explorador no podria

apreciar la temperatura ja que és un gas que costa detectar i es pot fer a partir de les emissions de raig X que produeix, a més, gràcies a aquestes emissions podem conèixer la seva temperatura i abundància.



IMATGE 6 - CÚMUL BALA
EN VERMELL MATÈRIA ORDINÀRIA I EN BLAU
MATÈRIA FOSCA

El cúmulo bala són dos cúmuls galàctics que estan col·lionant. De color vermell podem trobar la matèria que s'ha pogut detectar a partir dels raig X, és a dir, la matèria

ordinària. Però allunyat d'aquests dos núvols, podem veure moltes imatges de galàxies, pel que la massa més massiva no es troba al centre, sinó desplaçada. Això passa ja que al xocar-se, els núvols friccionen entre sí, mentre que les galàxies, al haver molt d'espai entre elles, s'entrevessen gairebé sense tocar-se. La matèria continguda en el gas és més abundant que a les galàxies individuals, a més, la temperatura és major que normalment degut a la fricció provocada pel xoc.

A les zones de color blau són les que produeixen més efecte de lent gravitacional, per tant, és la zona on hi ha més matèria. Amb això es pot concloure que la major part de la matèria dels cúmuls no es troba als núvols de gas.

Es considera al cúmulo bala una de les proves més impressionants i directes de la existència de la matèria fosca, a més, ens dona pistes de la seva natura: sabem que no interactua gaire ni amb la matèria ordinària ni amb si mateixa, si no, no s'hauria travessat a l'hora de fer el xoc.

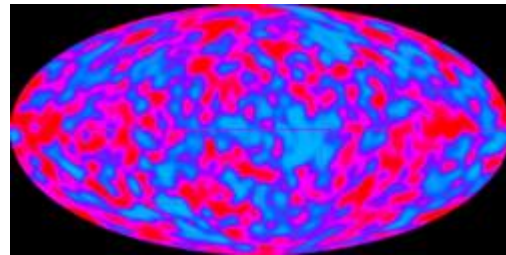
3. 5. RADIACIÓ DE FONTS DE MICROONES

Una altra gran evidència de la matèria fosca és la radiació de fons. Durant els darrers 30-40 anys ha hagut una sèrie d'experiments que han permès mesurar aquesta radiació amb molta precisió gràcies a tres satèl·lits: el satèl·lit COBE, el satèl·lit WMAP i finalment el satèl·lit Planck.

Uns 300 000 anys després del big bang, l'univers estava molt calent i era molt dens. Va ser a mesura que s'anava expandint que es va començar a refredar i es van iniciar el que s'anomena recombinació: quan els electrons, neutrons i protons es van començar a unir.

Abans de la recombinació, hi havia el que s'anomena plasma: matèria carregada (com nuclis atòmics i electrons) interaccionant amb fotons. En aquell moment l'univers era molt lluminós ja que els fotons com que són radiació electromagnètica, no paraven d'interaccionar i recórrer distàncies molt curtes. Cal dir també, que la matèria fosca i neutrins no interaccionaven gaire amb el plasma.

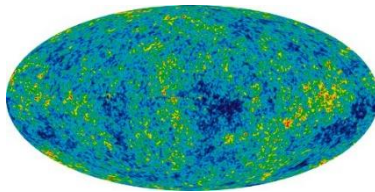
Quan es van formar els primers àtoms, els fotons van poder començar a recórrer distàncies més grans i formar el que avui anomenem radiació de fons. En el moment en el que es va alliberar tenia una temperatura molt elevada. Avui dia aquesta és molt menor ja que l'univers ha tingut temps d'expandir-se i refredar-se.



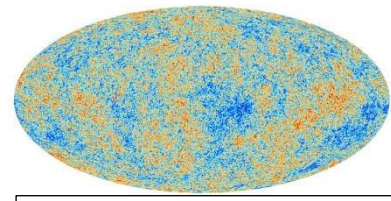
IMATGE 7 – IMATGE DEL SATÈL·LIT COBE

A la dreta, una de les primeres imatges que es van obtenir de la radiació de fons gràcies al satèl·lit COBE. Aquesta ens mostra les fluctuacions en la temperatura, encara que són molt petites en comparació amb la temperatura de la radiació de fons de microones.

Més tard a partir d'altres satèl·lits es van poder obtenir imatges més i més precises.



IMATGE 8 – IMATGE DEL SATÈL·LIT WMAP

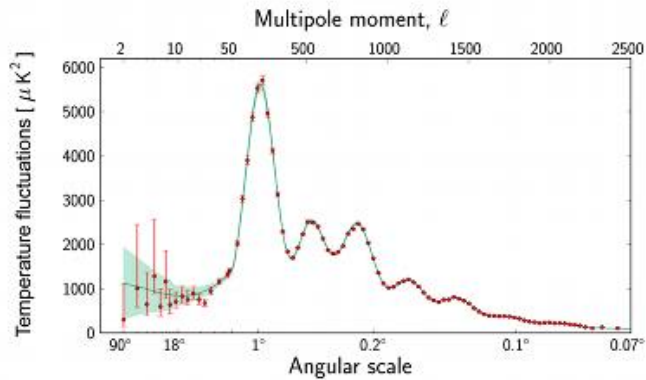


IMATGE 9 - IMATGE DEL SATÈL·LIT PLANK

Com la del satèl·lit WMAP i el satèl·lit Plank.

La radiació de fons té aproximadament -270°C i les fluctuacions són de 10^{-5} . Però si a partir d'observacions estudiem la distribució espacial de les fluctuacions és pot representar de la següent manera.

Aquest gràfic ens mostra les distàncies angulars. Si s'agafen dos punts, es pot mesurar l'angle i la temperatura dels dos punts per a fer un histograma que mostri què tan grans són aquelles fluctuacions en funció de l'angle. La recta contínua ens mostra les prediccions teòriques i els punts les observacions, es pot veure que totes dues concorden molt bé i que la precisió de les mesures és molt bona.



GRÀFIC 4 – RADIACIÓ DE FONTS

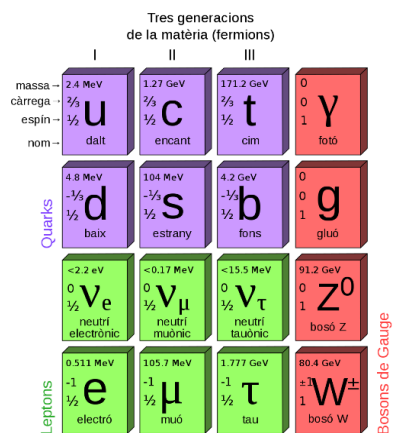
La relació que té la matèria fosca amb tot això és que l'altura dels pics de la corba depenen molt de la quantitat de matèria fosca. Com s'ha mesurat amb molta precisió la forma de la corba, ens pot donar dades molt bones de la quantitat de matèria fosca, que altra vegada, és unes cinc vegades més abundant que la matèria ordinària.

En conclusió, tenim moltes evidències del fet que la matèria fosca existeix. Ara encara tenim dubtes de quina és la partícula que forma aquesta desconeguda matèria.

4. MODEL ESTÀNDARD I SOLUCIONS O POSSIBLES PARTÍCULES A SER LA PARTÍCULA DE LA MATÈRIA FOSCA

La física de partícules està formada pel model estàndard. En aquest hi ha tres famílies de partícules: la primera és la de l'electró, la segona la del muó i la tercera la del tau. Totes tres famílies tenen dos quarks, i un neutrí on les seves interaccions sempre venen afectades per l'electró, el muó o el tau.

La primera família és la més abundant, les altres dues només podem trobar-les a rajos còsmics o formades per col·lisionadors de partícules.



GRÀFIC 5 - ESQUEMA DEL MODEL ESTÀNDARD

Encara havent-t'hi proves convincents del fet que només hi ha tres famílies, falta comprensió en la física per part de les partícules per entendre per què a cada família són més pesants i si hi ha la possibilitat de hi hagi més famílies.

A més en aquest model, estan incloses les interaccions de les partícules elementals. Aquestes són: la gravitatòria, l'electromagnètica, la forta i la dèbil. Totes elles són essencials per la vida. És important afegir que les dotze partícules senten aquestes interaccions de formes diferents. Per exemple, totes es veuen afectades per la gravitatòria i la dèbil però l'electromagnètica només per als que tenen càrrega i la forta pels quarks.

4. 1. MECANISME DE HIGGS I SIMETRÍA DEL MODEL ESTÀNDARD

Després de parlar del model estàndard, podem parlar d'uns dels problemes que trobem en aquest: el problema de la naturalitat. Per a entendre d'on apareix, hem de parlar sobre el fet que totes les dotze partícules tenen massa 0 a excepció dels bosons W i Z que son 90 i 100 vegades més pesants que un àtom.

El model estàndard pot explicar el per què d'aquest fet i amb això s'introdueix el concepte de simetria. Les lleis de la física presenten una enorme simetria, és a dir, es queden invariables sota transformacions matemàtiques. Les simetries però, presenten gairebé sempre una llei de conservació: les translacions temporals donen lloc a la conservació de l'energia; les translacions espacials, conservació del moment lineal; les rotacions, conservació del moment angular... A més, un cert grup de simetries comporten l'aparició d'interaccions mediades per partícules missatgeres. Amb això es pot explicar que les interaccions de la naturalesa són conseqüència de simetries.

El que passa amb el model estàndard és que la seva simetria no permet que les partícules que el formen tinguin massa. Aleshores semblava que si les simetries fossin exactes, cap partícula hauria de tenir massa i ja sabem que això no és veritat.

Si que és cert que no es pot renunciar a les simetries per explicar el per què algunes partícules tenen massa perquè si no, la teoria es torna inconsistent.

Per a explicar per què les partícules tenien massa sense renunciar a la simetria es va arribar al mecanisme de Higgs proposat al 1964 per R. Brout, F. Englert i Higgs. El camp de Higgs és un camp que omple tot l'espai, com si fos un líquid viscos. Si no fos per

aquest camp, les partícules no tindrien massa i no costaria res desplaçar-les. Al haver aquest camp, la partícula fricciona amb ell i s'oposa al moviment donant l'efecte exacte d'una massa. Així que la massa prové de la interacció de partícules amb el camp de Higgs

Si aquesta hipòtesi és correcte, ha d'existir una nova partícula, la qual s'anomena bosó de Higgs i que serien les ones que es produeixen en el líquid. En mecànica quàntica les ones elementals són partícules. Aleshores, els bosons de Higgs són les excitacions del camp de Higgs.

Per a produir un bosó de Higgs necessitem sacsejar el buit per accelerar partícules i fer-les xocar. Això es pot aconseguir en el LHC, que és la màquina on es va descobrir el bosó de Higgs el 2012 i està situada en el laboratori del CERN

Aquest mecanisme però, no explica el perquè el bosons tenen aquesta massa, és més, les equacions teòriques dicten que haurien de ser més pesants. Científics creuen que la resolució d'això es basa en la necessitat de nova física amb noves partícules de masses no molt més grans que les dels bosons W i Z. Tot i que hi ha models teòrics d'aquesta nova física, cap ha estat provada experimentalment.

4. 2. POSSIBLES PARTÍCULES

Quan es parla de matèria fosca, se sap quina és la seva abundància però no la partícula que la forma. Encara que coneixem algunes de les seves característiques:

- Interaccions dèbils amb la matèria ordinària: fins ara només s'ha observat la força gravitatòria que fa sobre aquesta.
- No pot estar formada de partícules ordinàries ni està carregada elèctricament: si no, hagués format part del plasma primitiu.
- Estable: l'abundància de matèria fosca des de la nucleosíntesis fins ara és aproximadament la mateixa.
- Fosca: no absorbeix ni emet llum.
- No interacciona amb sí mateixa: si ho fes, hauria creat el seu plasma. Se sap que els núvols de matèria fosca s'entravessen sense interaccionar.

- Freda: al haver ajudat amb l'agrupació de la matèria, se sap que si fos calenta això no podria haver estat possible.

4. 2. 1. WIMPS

Quan es parla de possibles partícules per a la matèria fosca, sempre es parla dels WIMPS. WIMPS és una paraula que prové de l'acrònim de l'anglès "Weakly interactive massive particle".

Són partícules que interactuen degut a la interacció nuclear dèbil, la gravetat i possiblement altres interaccions però no més fortes que la dèbil. Per la mateixa raó que no interactuen amb la força nuclear forta no poden reaccionar energèticament amb el nucli d'un àtom. A més, no es poden observar ja que no tenen interaccions electromagnètiques.

Tenen propietats semblants als neutrins amb la diferència de que serien molt més massives, per tant, més lentes. És més, la seva massa es realment elevada en comparació a les partícules del model estàndard.

Hi ha moltes partícules que podrien ser la partícula de la matèria fosca però totes elles són diferents extensions del model estàndard. Aquestes partícules no s'afegeixen soles i quan volem estendre el model estàndard per a afegir aquesta partícula, s'ha d'afegir també un nou sector de partícules.

4. 2. 1. 1. SUPERSIMETRÍA

Una de les teories més estudiades per a resoldre el problema de la naturalitat és la supersimetria. La hipòtesi consisteix en que les equacions de la física han de modificar-se de tal forma que siguin invariants sota certes transformacions matemàtiques.

En el model estàndard ja existeixen simetries, com el fet que les quatre interaccions bàsiques sorgeixin de l'intercanvi de partícules missatgeres. Però per a fer-lo supersimètric fa falta modificar-lo, afegint noves partícules: cada una de les partícules ja conegudes tindria una altra associada que seria supersimètrica. La partícula supersimètrica tindria les mateixes propietats que la partícula ordinària a la que està associada excepte que el seu espín (gir intrínsec) seria diferent.

Per a resoldre el problema de la naturalitat és necessari que les partícules supersimètriques tinguin cents de vegades més massa que un protó. En la majoria de

models de la supersimetria, la partícula supersimètrica més lleugera és el neutralí, el qual és estable, no té carrega elèctrica, només té interaccions dèbils i la seva massa és l'adequada per a que es produeixi l'abundància necessària. És a dir, les característiques perfectes d'un WIMP.

A més de la supersimetria hi ha altres models teòrics que podrien solucionar el problema de la naturalitat del model estàndard i que també donen lloc a WIMPs. Com els models de Higgs compostos, models de Higgs múltiples...

4. 2. 1. 2. DIMENSIONS EXTRA

Una altra proposta serien les dimensions extra. La hipòtesis es basa en que a més de les tres dimensions espacials habituals, existeixen una o varies dimensions extra i molt petites. Aquestes dimensions podrien passar desapercebudes. Pot ser que una partícula movent-se per aquesta dimensió extra ens semblés que està en repòs però amb molta energia, creuríem que té massa i que fos una partícula diferent.

Les dimensions extra o la supersimetria són molt habituals en models de física més enllà del model estàndard, concretament en les teories de supercordes. Aquestes teories van ser proposades amb la intenció de solucionar un problema greu del model estàndard: la falta de consistència matemàtica de les forces gravitatòries a nivell quàntic.

4. 2. 3. AXONS

El axons són unes partícules que es van proposar al 1980 per resoldre un problema teòric del model estàndard relacionat amb l'estructura de les interaccions fortes. És interessant com els axions, sense haver estat pensats teòricament per això, s'ajusten perfectament a les característiques de la matèria fosca. Són partícules molt estables, de massa molt petita i en cas d'existir es van produir molt en l'univers primitiu. Les interaccions que té amb la matèria ordinària són extremadament dèbils, pel que els mètodes per a detectar directament els WIMPs no serveixen per als axions.

4. 2. 4. FORATS NEGRES

Els forats negres són objectes molt densos i massius que no deixen tan sols escapar la llum. Tenen unes característiques molt semblants a les WIMPs, a més que no podem veure'ls i no té les interaccions normals del model estàndard. La idea més comú per a representar el naixement d'un forat negre es tracta d'una estrella adquirint matèria

d'una altra estrella fins a tornar-se suficientment massiva i col·lapsar formant el forat negre.

Als anys 70, Stephen Hawking va pensar en una altra forma en la que es poden formar els forats negres. Si un forat negre tingués la massa del Sol aquest seria de 3Km de diàmetre, però si el forat negre tingués 10^{-16} la massa del Sol, podria tindre les dimensions d'un àtom. Es consideren un candidat a la matèria fosca, el problema és explicar com es poden formar.

Una de les propostes de la formació d'aquest tipus de forats negres, anomenats primordials, és la inflació cosmològica. La inflació primordial o cosmològica és un moment en el que la mida de l'univers canvia molt ràpidament. Es creu que aquesta inflació es va produir ja que si observem el cel veiem que l'univers és molt homogeni en totes les direccions. Aquesta homogeneïtat no la podem entendre amb la teoria del Big Bang ja que hi ha regions molt separades al cel que tenen unes propietats físiques, temperatura i distribució de galàxies molt semblants. Per a que això es produeixi és necessari que aquestes regions hagin estat en contacte en el passat.

Es creu que la inflació és també la causa de les fluctuacions de la temperatura en el fons còsmic de microones i que potser per motius estadístics aquestes fluctuacions fossin més grans del que sempre es parla. Si les fluctuacions primordials fossin suficientment grans tindrien la potència suficient per formar aquests forats negres primordials.

5. EXPERIMENTS

5. 1. DETECCIÓ DIRECTA

Es té una idea bastant precisa de quina és la densitat i velocitat de les partícules de matèria fosca. Tenint en compte aquestes dues dades, podem determinar el flux de partícules de matèria fosca.

Encara que la matèria fosca no interacciona gaire amb la matèria ordinària, aleshores es poden idear experiments per a detectar-la però han de ser extremadament sensibles.

Els experiments de detecció directa intenten que una partícula de matèria fosca xoqui en un detector i produeixi un retrocés en un dels nuclis atòmics. El que s'intenta

observar és quan en un vidre s'ha desplaçat el nucli. Aquest desplaçament produeix una ionització en el centre de l'àtom. Depenent del material es pot produir llum o incrementar la temperatura.

Per a evitar que altres partícules com els raigs còsmics interfereixin en l'experiment i xoquin amb el nucli es situen en laboratoris subterranis, com per exemple, el laboratori de Can Franc.

5. 1. 1. ANAIS

Can Franc és un laboratori de física situat a Huesca a 1000m sota la superfície. En aquest laboratori es duen a terme part dels experiments de matèria fosca. En laboratoris condicionats situen materials sensibles als efectes ja mencionats.

S'ha d'assegurar-se també que l'experiment està aïllat de la resta de l'entorn envoltant-lo de materials que per exemple absorbeixen la radiació. Normalment es fa servir plom i poliuretà.

En aquest laboratori es duu a terme un experiment anomenat ANAIS (Modulación Anual con Centelladores de Yoduro de Sodio) que va començar al 2017. ANAIS utilitza detectors de iodur de sodi, un material que emet petites llampades de llum quan una partícula posa energia en ell. L'objectiu d'ANAIS és estudiar l'efecte anomenat "modulació anual" en el senyal de matèria fosca. Se sap que la matèria fosca es distribueix en halos i es troben en continu moviment aleatori. Encara que per a un detector a la Terra, les partícules no vindrien aleatòries sinó en la direcció que defineix la constel·lació del



IMATGE 10 – DETECTORS ANAIS

cigne. Això és degut a que el Sol es mou en aquella direcció seguint la seva òrbita al voltant del centre galàctic el que crea un efecte de vent de matèria fosca.

Fa dues dècades que un experiment de cerca de matèria fosca DAMA/LIBRA a Itàlia va detectar un senyal que oscil·la amb periodicitat anual, com el que s'esperaria. Tot i això, altres experiments no han pogut obtenir els mateixos resultats. L'experiment ANAIS ha fet servir els mateixos materials i mètode de detecció. Després d'un any i mig de presa

de dades, els resultats d'ANAIS són contraris amb la senyal detectada a DAMA/LIBRA, sent incompatibles amb ella amb un 95% de nivell de confiança.

5. 1. 2. LUX

Altres experiments de detecció directa de matèria fosca és LUX (Large Underground Xenon), situat als estats units, que intenta detectar matèria fosca amb xenó a -106°C . El xenó cobreix fotosensors capaços de detectar un sol fotó de llum. Els científics creuen que quan un WIMP colpeja un àtom de xenó, els electrons són atrets cap amunt per un camp elèctric i interaccionen amb una fina capa de xenó gas que es troba a la part alta del detector, deixant anar més fotons. Els fotosensors, els quals es troben tant a dalt com a baix del detector, poden detectar un sol fotó de manera que les



IMATGE 11 – DETECTOR LUX ABANS D'AFEGIR L'AIGUA AL TANC

interaccions es poden identificar en uns pocs mil·límetres. L'energia alliberada pot ser mesurada de manera precisa amb la lluentor de les senyals. En el cas de l'experiment LUX, han posat el detector dins d'un tanc de 271035.5L amb aigua pura desionitzada com a mètode de protecció dels raigs còsmics.

5. 1. 3. XENONNT

Aquest experiment és molt semblant a l'experiment LUX. S'ubica a Itàlia i en ell es fan servir 8,3 tones de xenó líquid. És actualment el detector més sensible de matèria fosca en el món. El que es científics esperen és que una partícula WIMP al xocar amb un dels àtoms de xenó causi un esclat de llum i l'emissió d'un electró el qual seria recollit pel detector de l'experiment.



IMATGE 12 – ESTRUCTURA EXTERNA DEL TANC DE XENÒ

Encara que l'experiment és més gran i sensible, detectar un WIMP segueix sent poc comú i els científics no esperen més d'una detecció a l'any en el millor dels casos.

5. 1. 4. DAMA/LIBRA

L'experiment DAMA/LIBRA situat a Itàlia, pretén trobar una modulació anual del nombre d'esdeveniments de detecció, causada per la variació de la velocitat del detector en relació amb l'halo de matèria fosca mentre la Terra orbita al voltant del Sol, a partir d'una matriu de detectors de centelleig NaI(Tl).



IMATGE 13 – DAMA/LIBRA

Aquest experiment té una gran controvèrsia: han aconseguit resultats molt interessants, però en cap moment han publicat les dades o pràctiques, a més que els seus mètodes de reducció del soroll és que aquest forma part del seu senyal modular anual. Altres experiments intentant replicar els seus resultats fent servir la mateixa metodologia no han aconseguit cap evidència de modulació anual.

5. 2. DETECCIÓ INDIRECTA

Deponent de les característiques de la matèria fosca, hi ha una probabilitat de que algunes de les seves partícules, en viatjar per l'espai, xoquin amb les seves antipartícules i s'aniquilin. En el procés es podrien produir diferents tipus de partícules ordinàries que arribarien a la Terra. Detectant aquestes partícules es pretén deduir les propietats i existència de les partícules de matèria fosca que les van originar.

Es prioritza l'estudi en zones on hi ha més densitat de matèria fosca. Si que és veritat que en el procés d'aniquilació es produeixen partícules ordinàries de molts tipus: algunes no són estables (com els muons) i altres amb càrrega elèctrica com



IMATGE 14 – SATÈL·LIT FERMI

els protons o electrons les seves trajectòries es veuen afectades per camps magnètics. Encara així, el flux global d'electrons, protons, positrons i antiprotons són objecte d'investigació ja que poden donar pistes importants sobre l'activitat de la matèria fosca. Aquests estudis són gràcies a satèl·lits com el FERMI o l'AMS.

Els fotons i neutrins viatgen en línia recta des del lloc de la seva producció fins a la Terra degut a que no tenen càrrega elèctrica. Els fotons són detectats per telescopis de raig gamma instal·lats a satèl·lits o la Terra. En canvi, la detecció de neutrins és més difícil degut a que interactuen molt poc, a més, els telescopis són molt grans i se situen sota terra protegits dels raig còsmics. Alguns dels més grans fan servir com a material de detecció grans quantitats d'aigua del mar o gel del pol Sud.

Els experiments donen resultats molt interessants i periòdicament es troben i anuncien senyals que podrien provenir de l'aniquilació de matèria fosca. Encara que la interpretació és molt difícil ja que diferents senyals afecten a la interpretació d'altres.

5. 3. PRODUCCIÓ DE MATÈRIA FOSCA

Una altre forma de detectar matèria fosca és la producció artificial a partir de col·lisions molt energètiques de partícules ordinàries. Encara que les interaccions entre la matèria fosca i la ordinària són molt petites, hi ha una possibilitat de que al xocar dues partícules ordinàries es generi una partícula de matèria fosca. Si hi haguessin moltes col·lisions hi hauria la possibilitat d'observar la producció de matèria fosca en una d'elles.

Aquestes col·lisions tenen lloc al CERN, el gran col·lisionador de protons instal·lat en el CERN. Una part molt important del programa científic del LHC és la cerca de partícules ordinàries i encara que no s'han trobat resultats fins ara, l'experiment segueix en marxa i s'espera trobar notícies en els pròxims anys les quals, tindrien molta rellevància històrica.

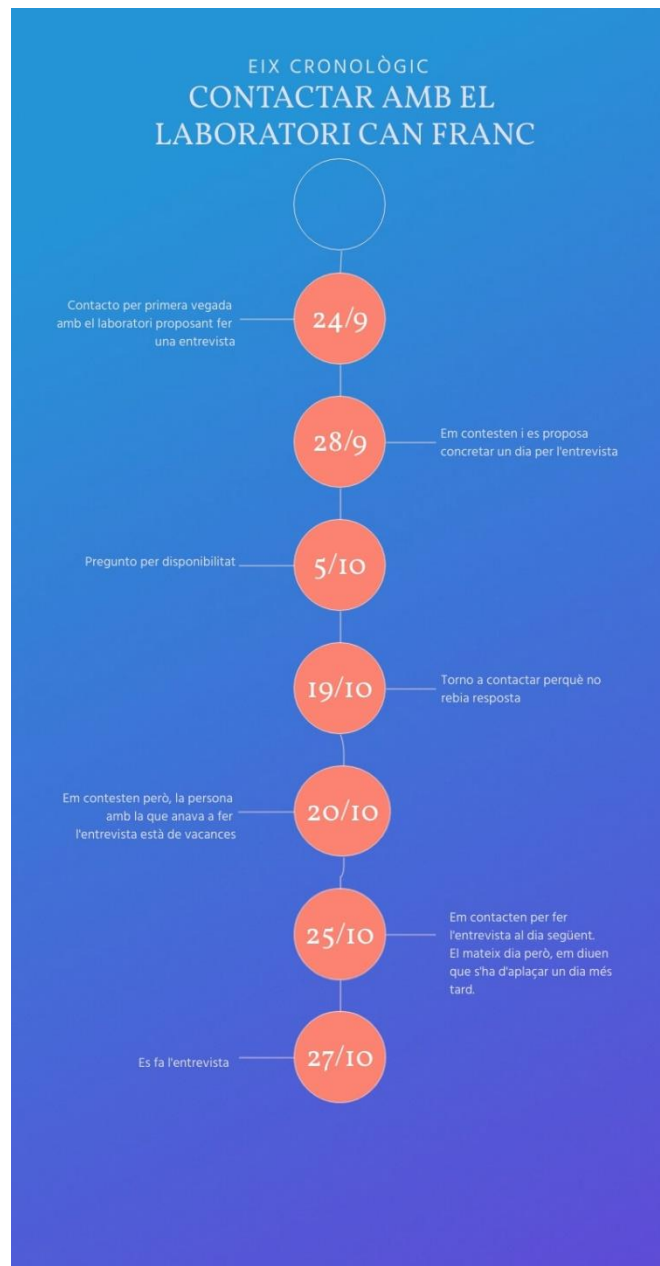
Òbviament, si en una de les col·lisions es produïssin noves partícules no voldria dir que són part de la matèria fosca però si la seva massa i interaccions amb la matèria fosca estiguessin d'acord amb el que se estima que es, podria donar un a indicació en el seu favor. Els experiments en el LHC han ajudat molt en la restricció del rang possible per a la massa i interaccions de la partícula de matèria fosca.

6. PART PRÀCTICA

Prèviament hem parlat sobre el laboratori Can Franc i l'experiment que es duu a terme allà. Com una manera d'ampliar aquest treball de recerca vaig decidir contactar amb el laboratori i proposar fer una entrevista per conèixer una mica més sobre la matèria fosca i el laboratori.

Vaig contactar amb Alberto Bayo, un treballador del laboratori especialitzat en l'experimentació amb la matèria fosca. Vaig estar enviant correus fins que vam poder coincidir i concretar un dia per poder fer una videoconferència.

Degut a que el laboratori es troba a Aragó, l'entrevista s'ha realitzat en castellà i he preferit mantenir l'idioma original d'aquesta.



¿Cuáles son las principales evidencias en favor de la existencia de materia oscura?

Lo primero que descubrió Vera Rubin i Kent Ford: lo que querían calcular fue la velocidad en la que giraban las estrellas en las galaxias espirales con respecto a los agujeros negros super masivos que hay en el centro de ellas; se aplicaban fácilmente las leyes de gravitación y de Kepler y veían como debían orbitar esas estrellas. Lo que se esperaba era que conforme las estrellas se ubicaban más lejos de esa galaxia espiral, hacia los bordes, la velocidad se viese frenada. Se encontraron que no, que realmente la velocidad es constante, se independientemente de donde esté la velocidad de la

estrella. Esta es la primera evidencia y no lo vieron solo en una galaxia sino, que lo vieron en muchas galaxias así que eso les permitió definir que hay mucha más materia en esas galaxias espirales que cambiaban estas leyes de gravitación de las estrellas.

Otra evidencia más actual es el cúmulo bala: es un choque de dos galaxias, dos clústeres de estrellas, de forma que la imagen que se ve de rayos X por el telescopio XANDRA es la parte de materia ordinaria que sufre el choque se ve en el centro de forma rosácea y luego se exteriormente más materia repartida de forma azulada. Es esa materia asociada a esas galaxias que no le importa el choque de las galaxias y sigue su viaje. Es entonces otra evidencia de que hay más materia adicional y no la vemos.

Una tercera evidencia es el efecto de lente gravitacional de Einstein. Es tal la cantidad de materia que hay (hay que tener en cuenta que del 100% de la materia que hay en el universo, el 85% es materia oscura y el 15% materia ordinaria), y como materia hace fuerza gravitacional, entonces hace la luz proveniente de galaxias muy lejanas cuando en el medio hay objetos astrofísicos se curva y nos llega luces de galaxias pese a que en medio haya otra galaxia. Es decir, esa galaxia entre medio espiral tiene mucha más materia alrededor en forma de esfera que hace tanta fuerza que curva la luz. Anillo de Einstein se le llama.

Son tres de las evidencias muy claras. Hay incluso más evidencias a nivel teórico: cómo se ha formado el universo y el estado actual no es entendible si no añadimos más materia...

Ninguna de las partículas del modelo estándar puede representar la materia oscura Se habla por ejemplo de axiones y neutrinos como candidatos que van más allá del modelo estándar. ¿Hay alguna posibilidad de tener confirmación experimental en el LHC?

Sí, tanto el acelerador de partículas de Suiza como los laboratorios subterráneos del mundo (los 10 que somos), la idea es una partícula propuesta para dar explicaciones a los fenómenos que observamos, es la materia oscura (hay otros), te falta una por nombrar y es el WIMP que es el mejor candidato en entre todos ellos (se supone, teóricamente hablando) entonces lo que se busca es la detección de esa partícula directa con la materia. Hay dos maneras: una es esperar a que te golpee como se hace

en los laboratorios subterráneos o lo que hacen en el LHC que es incrementar tanto la energía para llegar a los altos niveles de energía en los que la materia oscura interaccionaba más fácilmente con la materia y intentar observar siempre los procesos de decaimiento en los que estaría envueltos, nunca una detección directa.

¿Puede la materia oscura estar formada por más de una partícula?

Podría ser, de hecho, cuando nace la teoría de la materia oscura y se encuentran los neutrinos, unos cuantos años después, entonces se piensa que los neutrinos son estos los componentes de la materia oscura. Luego se descubre que no, que hay dos tipos de materia oscura, fría y caliente, dependiendo a qué velocidad se muevan, relativista o no. Entonces se ve que los neutrinos no pueden llegar a explicar toda esa cantidad de materia, porque serían solo menos del 1%, no ese 27% que le sacamos a la materia oscura de toda la composición del universo. Entonces sí, podrían ser diferentes tipos de partículas, incluso también se plantea diferentes tipos de candidatos podría ser que una parte fueran partículas y incluso otra pudiera ser los agujeros negros primordiales, entonces cambiase ese porcentaje y por tanto se modificase la cantidad de candidatos para explicar la materia oscura.

¿Podría describir los experimentos i que resultados han obtenido? ¿En qué se diferencia el experimento de Canfranc ANAIS? ¿Qué tipo de resultados puede aportar?

Experimentos actualmente relacionados con la búsqueda de materia oscura en Can Franc hay varios: TREX DM es una colaboración que utiliza una vasija a alta presión, aún no saben el gas que van a poner en su interior, pero sí saben que su tecnología es una llamada “micromegas del CERN”, es una tecnología que te permite aplicar un campo eléctrico muy grande en un espacio muy pequeño. Eso va a buscar partículas de materia oscura de menor energía de lo que hay. También esta tecnología y esos conocimientos se van a aplicar en el futuro BABY AXO que va hacia los axiones. El principal experimento del CERN es el CAST, el cual acaba ya su medida de medida solar y se propone este experimento para ampliarlo y seguir buscando esos axiones, entonces TREX se queda un poco entre medias, otro tipo de partículas, pero centrándonos en axiones.

ARDIEM es un prototipo, es el tanque más grande del mundo de argón, una tonelada de argón líquido y busca la detección directa del WIMP, el choque directo con los núcleos

de argón que tengan. Se utiliza argón porque es uno de los gases nobles, uno de los mejores materiales para producir la luminiscencia, es decir, la producción de luz por el choque de una partícula con energía. Entonces es muy bueno como detector el argón así que se va a construir un detector de 20 o 50 toneladas en Italia, pero el prototipo se hace aquí. El problema es que el argón que cogemos del aire no es puro, está contaminado con argón 39 producido principalmente por la interacción de los rayos cósmicos. En Estados Unidos en Colorado están extrayendo cantidades de argón del subsuelo terrestre donde no hay casi rayos cósmicos y por tanto el argón será más puro. En Cerdeña en Italia están separando los isótopos que les molesta y quedándose con un argón muy puro. Aquí medimos cuan bueno es el argón y se envía definitivamente a Italia para que hagan el experimento.

ANAIS en Zaragoza son unos cristales de ioduro de sodio que producen luz cuando la partícula de materia oscura los golpea. No es una técnica innovadora cuando se monta, sino que, en Italia hay un experimento llamado DAMA/LIBRA que dice haber visto la materia oscura. Se apoya teóricamente en que habrá un viento de materia oscura debido a la velocidad relativa de la tierra respecto al Sol. Hay un momento que es mayor esa velocidad que es junio, y hay otro momento que es diciembre que es menor. Entonces si hay un viento con el que nos llega materia oscura hay un momento que atraparemos en junio que atraparemos más materia oscura que en diciembre que atraparemos menos. Ellos dicen haber visto este efecto, pero los datos no son muy concluyentes y ningún otro experimento ha visto lo mismo. Entonces la comunidad científica le pide a la universidad de Zaragoza y a Corea que repliquen el experimento. Entonces ANAIS hace la misma técnica mejorando los cristales, mejorando las técnicas de cálculo y simulación que se hacen dentro. Lleva cuatro años de datos y se han publicado ya, y no ven lo mismo que Italia, no ven una dependencia entre junio y diciembre, les da igual el momento del año que ven lo mismo. Les falta unos tres años más de medida para que sea concluyente el resultado, pero sería una validación de que eso que vieron en Italia no era materia oscura. Los coreanos han publicado ya, creo que son dos años, pero no ven la modulación, lo que pasa es que dos años es muy poquito.

¿Existe confirmación de haber detectado galaxias sin materia oscura?

Vi un artículo hará 4 o 5 años, de que sí, la teoría inicial marcaba que todas las galaxias tenían materia ordinaria y materia oscura, pero vi un artículo sobre que se habían detectado galaxias que no se les veía asociada materia oscura. No te puedo decir más porque no indagué más en el artículo en ese momento.

¿Cómo sería el universo si no existiese la materia oscura?

La materia oscura conforme sufre después la inflación del universo, es la materia oscura la que nos ayudaría a crear un universo homogéneo con esos clústeres de materia como lo vemos hoy. Habría muchas teorías y posibilidades, primero que fuera un universo que fuera no homogéneo y anisotrópico, podría ser una posibilidad. Pero creo que es difícil imaginar, ya que todas las construcciones las hemos hecho en base a lo que vemos, en base a que la materia oscura está presente, no sabía decir a parte de esas dos propiedades que observamos del fondo de microondas que podría ocurrir con el universo sin materia oscura.

En las regiones donde se supone que existe una gran acumulación de materia oscura como el centro galáctico, ¿no deberíamos haber atisbado algún indicio claro de desintegraciones en la materia oscura que se concretarían en forma de fotones, neutrinos y antimateria?

El problema es que no sabemos exactamente cuál es la interacción de la materia oscura con la materia ordinaria. Si fuera una interacción electromagnética hubiera sido mucho más fácil de detectar, ya la tendríamos, sería visible. El problema es que no es visible, la interacción de la materia oscura con la materia ordinaria es solo débil, ósea de las cuatro fuerzas, la gravitacional si, podemos ver los efectos, pero solo nos sirve para cuantificar cuanto hay y no medirla directamente, entonces lo único que se puede esperar es una interacción débil con la materia ordinaria. A todo esto, el problema que tenemos también es que no sabemos cómo interacciona la materia oscura con ella misma.

¿Qué relación tiene la Estación Espacial Internacional con la detección de la materia oscura?

AMS es un detector que está buscando la materia oscura. Es uno de los experimentos que se implementaron para ampliar su búsqueda.

¿Es verdad que en los detectores se utiliza plomo de los antiguos pecios romanos porqué es muy puro y mucho menos radioactivo que el recién extraído? Esta característica lo convierte en un material ideal para blindar ciertos experimentos de física de partículas

La idea es que el irnos bajo tierra es para eliminar la radiación, es decir, buscar el sitio lo menos radioactivo posible. Lo primero nos metemos bajo tierra por la radiación cósmica eliminamos aquí en Can Franc (y no somos los más profundos, hay muchos más profundos que nosotros en los otros laboratorios) unas 33.000 veces la radiación cósmica, pero tenemos otro problema, nosotros, los materiales de los que está hecho el laboratorio, los materiales de los detectores, el aire... Todo es radioactivo. Así que la única forma que tenemos de aislar nuestros experimentos del entorno en el que se encuentran es poniendo capas de materiales: para las partículas alfa podríamos poner papel, no nos hace falta; para las partículas beta podríamos poner un metal como el cobre; para las partículas gamma, lo que serían fotones de luz, tendríamos que poner plomo y para los neutrones polietileno. Esto son todos los blindajes que tienen los experimentos. Ahora bien, además de que pongamos esto, cada uno de los materiales tendría que ser el mejor, es decir, el cobre el más puro que exista, el mejor plomo y un polietileno que siempre estuviese limpio en su superficie y no se cargase electrostáticamente.

¿Cuál es el problema del plomo? Lo sacamos, pero el plomo tiene un isótopo que es el 210 que está produciendo un decaimiento beta, es decir, te obliga si o si a poner el cobre en su interior. Entonces estás encareciendo tu detector porque tienes que poner grandes cantidades hasta toneladas de plomo y cobre, el peso y los problemas que pueda conllevar. Entonces una opción sería poner oro, pero claro, poner toneladas de oro haría que fuera aún más caro el detector. ¿Que se querría tener? Plomo que fuera puro, que no tuviese esa radioactividad. El problema es que ese plomo la única manera de obtenerlo es esperando todos los materiales pierden su radioactividad conforme pasa el tiempo, la vida media del plomo son 22 años y a partir de 22 y más años tenemos que esperar a que esté, no podemos hacerlo. Entonces hay plomo que lleva desactivado en el fondo del mar que son los contrapesos de las anclas de los imperios romanos. Como ese plomo está en el fondo del mar y casi no hay rayos cósmicos, lleva dos mil

años desactivándose o más. Se estuvieron sacando anclas del fondo del mar, se utilizó ese plomo que se denominó romano por la época en la que se encontró. Ese plomo romano se utiliza para aislar los experimentos, ya no necesitas cobre en el interior. El problema es que el plomo es patrimonio de la humanidad y se cortó el suministro, tenemos toneladas en los laboratorios, pero ya no podemos conseguir más.

7. CONCLUSIONS

Des dels anys trenta s'ha estat parlant de matèria fosca. Uns estan molt segurs que aquesta existeix, que hi ha una matèria invisible a l'espai que ens ajuda a explicar totes les estructures galàctiques i la forma que té l'espai. Altres, però, una mica més escèptics, avui dia encara es qüestionen si és veritat que la matèria fosca existeix o és un error en les lleis. La vertadera pregunta doncs és, hi ha raons per creure que la matèria fosca sí existeix?

Hi ha moltes evidències que hi és, des de mètodes experimentals fins a altres més teòrics. És cert, i potser cal destacar, les teories MOND i com refuten la idea de què la constant de gravitació es universal, dient que aquesta ha d'augmentar a mida que augmenta la distància, fent que els càlculs tinguessin sentit sense la necessitat del concepte de matèria fosca.

Aquestes teories perden consistència quan es parla d'altres evidències de la matèria fosca com podrien ser les lents gravitacionals. Si no hi hagués matèria fosca, l'efecte de lent gravitacional no es podria crear degut a la manca de massa per a fer-lo. Ara doncs, ells intenten trobar una explicació a aquest efecte justificant que la teoria de la relativitat no funciona a grans escales, pel que el gas de matèria ordinària seria capaç de crear una lent gravitacional.

Pensar en matèria fosca va més enllà del nostre enteniment. No sabem com és ni tampoc la podem detectar. Han passat anys intentant detectar i trobar la partícula que la forma i encara més anys des que es va descobrir per primera vegada. A més, com ja està explicat al llarg d'aquest treball, hi ha propostes de partícules que a més implica ampliar el model estàndard. Suposa menys esforç negar-ho i deixar la física com és avui dia.

Ara doncs, hauríem de creure en la matèria fosca? Hi ha moltes evidències a favor d'aquesta i molta física explicada en torn a ella. Se li ha donat més importància al fet que existeix que no pas al fet que pot no existir. Potser la matèria fosca és un dels reptes que la física troba en el seu camí cap al coneixement total de l'univers. Així que definitivament sí, crec que hem de creure que la matèria fosca existeix i intentar descobrir més a sobre d'ella.

8. BIBLIOGRAFIA

Casas, A., (2015) La materia oscura, el elemento más misterioso del universo - ed RBA, juny 2021

Ballesteros, G., (2019), El origen de la materia oscura, recuperat de: youtube, juny 2021

Cerdeño, D., (2013), Cazadores de materia oscura, recuperat de: youtube, juny 2021

Casas, A., (2012), La partícula de Higgs y el misterio de la masa, recuperat de: youtube, agost 2021

Kapust, M., (2020), Large Underground Xenon (LUX) dark matter detector, recuperat de: google, novembre 2021

Sarsa, M^a L., (2019), ¿Sopla el viento de materia oscura en el Pirineo aragonés?, recuperat de: google, agost 2021

Catanzaro, M., (2021), Will dark matter be detected at Gran Sasso?, recuperat de: google, novembre 2021

Autor desconegut, (2021), DAMA/LIBRA, recuperat de: wikipedia, novembre 2021

Autor desconegut, (desconegut), Dark matter Simulator, recuperat de: google, novembre 2021

Autor desconegut, (desconegut), Wimp, recuperat de: google, novembre 2021