



Universitat
de les Illes Balears

TREBALL DE FI DE GRAU

MATÈRIA FOSCA: EVIDÈNCIES EXPERIMENTALS I PROPOSTES TEÒRIQUES

Pau Barber Faus

Grau de: Física

Facultat de: Ciències

Any acadèmic 2021-22

MATÈRIA FOSCA: EVIDÈNCIES EXPERIMENTALS I PROPOSTES TEÒRIQUES

Pau Barber Faus

Treball de Fi de Grau

Facultat de: Ciències

Universitat de les Illes Balears

Any acadèmic 2021-22

Paraules clau del treball:

Matèria fosca, corba de rotació, lent gravitacional, nucleosíntesi, espectre de densitats, Cúmulo Bala, MACHO, forat negre primordial, WIMP, axió, MOND.

Nom del tutor / la tutora del treball: Carles Bona Garcia

Autoritz la Universitat a incloure aquest treball en el repositori institucional per consultar-lo en accés obert i difondre'l en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació

Autor/a		Tutor/a	
Sí	No	Sí	No
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Resum

Després d'un breu repàs de la història de la matèria fosca, es tracta d'un anàlisi de les evidències experimentals que donen suport a aquesta hipòtesi, tant en l'àmbit de l'astrofísica com en el de la cosmologia, i una revisió de les principals propostes teòriques i l'estat actual dels detectors.

Tras un breve repaso de la historia de la materia oscura, se trata de un análisis de las evidencias experimentales que apoyan esta hipótesis, tanto en el ámbito de la astrofísica como en el de la cosmología, y una revisión de las principales propuestas teóricas y el estado actual de los detectores.

After a brief review of the history of dark matter, this is an analysis of the experimental evidence supporting this hypothesis, both in astrophysics and cosmology, and a review of the main theoretical proposals and the current state of detectors.

Índex

1. Cronologia	5
2. Evidències	6
2.1. Corbes de rotació	6
2.2. Lents gravitacionals	9
2.3. Nucleosíntesi primitiva	11
2.4. Radiació còsmica de fons	12
2.5. Formació d'estructures	16
3. Concordança i característiques	20
4. Propostes	22
4.1. MACHOs	23
4.2. Forats negres primordials	23
4.3. Neutrins	24
4.4. WIMPs	24
4.5. Axions	25
4.6. Gravetat modificada	25
5. Taula resum	27
6. Detectores	28
6.1. Detecció directa	28
6.2. Detecció indirecta	30
6.3. Producció de matèria fosca	30
Bibliografia	31

1. Cronologia

1910s: Teoria de la relativitat i comprovació de les lents gravitacionals.

1920s: Univers en expansió i Big Bang.

1930s: L'astrònom Fritz Zwicky proposa el concepte de matèria fosca, basat en l'evidència observacional d'una massa desconeguda que influïa en el moviment de les galàxies exteriors del Cúmulo de Coma [1] [2]. Va sobreestimar el percentatge de matèria fosca degut a que es desconeixia l'existència del gas intergalàctic, el qual representa la major part de la matèria ordinària en el cúmulo. També tenia errors respecte la posició de



les galàxies degut a estimacions errònies del ritme d'expansió de l'univers. A pesar de les dades imprecises, els resultats apuntaven en la direcció que confirmarien els estudis posteriors. Zwicky també va ser el primer en proposar que els cúmuls de galàxies podien actuar com lents gravitacionals. Per desgràcia, va morir sense saber la rellevància de les seues propostes.

1940s: Primera predicció d'elements en l'univers primitiu [3] [4], enormement refinada actualment [5].

1960s: Detecció de la radiació de fons (CBR) [6].

1970s: Els astrònoms Vera Rubin i Kent Ford observen les velocitats d'estrelles de desenes de galàxies i obtenen les corbes de distribució de velocitats planes. Determinen la massa total i la distribució de massa interior de cadascuna i, de nou, hi ha molta més massa de l'esperada [7] [8]. No obstant, Rubin (com altres científics de l'època) pensava que el que passava era que la llei de Newton deixava de funcionar bé a grans distàncies.



1980s: Es proposen les partícules hipotètiques més prometedores per ser matèria fosca: WIMPs [9] i axions [10].

1990s: Expansió accelerada. Inhomogeneïtats en la radiació de fons (apart de les del moviment de la Via Làctia).

2000s: Descobriments i estudi del Cúmulo Bala [11].

2010s: Mesura i anàlisi de l'espectre primitiu de variacions de densitats ("espectre sonor" de l'univers primitiu) pel projecte Planck [12].

2. Evidències

A dia de hui hi ha moltes evidències que suggereixen l'existència de matèria fosca, tracte les cinc que considere més importants.

2.1. Corbes de rotació

Usant la poderosa segona llei de Newton per al simple sistema d'un objecte poc massiu orbitant una gran massa

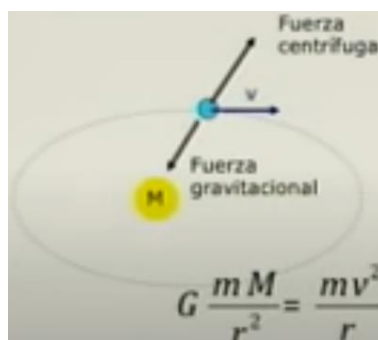


Fig. 1. Diagrama de forces d'un objecte de massa m en una òrbita tancada.

Vegem que en cada punt d'una òrbita circular (no com la el·líptica de la figura) s'igualen la força gravitacional amb la centrífuga, del que obtenim una relació entre la distància al centre de l'òrbita (r), la velocitat de l'objecte que orbita (v) i la massa que ho provoca (M)

$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}} \quad \text{Eq. 1}$$

on G és la constant gravitacional.

Per a òrbites el·líptiques l'Eq.1 no és compleix exactament (la velocitat no és constant) i es pot generalitzar. No obstant, si que es compleix en promig al llarg de l'òrbita. Per tant, si mesurem les velocitats de molts cossos orbitant al voltant d'una gran massa, fent un promig estadístic podrem seguir usant l'Eq.1 per determinar el valor d'eixa gran massa.

Podem determinar la massa d'una galàxia estudiant les velocitats d'objectes (típicament estrelles) que orbiten en ella, amb l'Eq. 1. Considerant les velocitats d'estrelles a diferents distàncies del centre galàctic, el que determinem és la quantitat de massa rodejada per l'òrbita de cada estrella, que és la que de forma efectiva l'atrau. D'esta manera podem desxifrar com està distribuïda la massa de la galàxia. No és possible mesurar la velocitat de les estrelles en galàxies llunyanes seguint el seu moviment amb un telescopi, les posicions de les estrelles en

el cel pareixen immutables. La tècnica usada és la de l'efecte Doppler, mesurant el desplaçament al roig o al blau podem deduir la velocitat.

Aparentment una galàxia està constituïda per estrelles i gas. Coneixem bé el funcionament de les estrelles i podem fer una bona estimació de la massa total d'estrelles a partir de la brillantor total de la galàxia. A més, també coneixem la massa del gas de la galàxia (fonamentalment hidrogen i heli), gràcies a l'estudi dels raigs X que emet degut a la seua alta temperatura. Per tant, a priori estudiant estes dos masses (de valor comparable) sabem com deuria ser la massa de les galàxies i com està distribuïda.

Coneixent la distribució de massa a priori, amb l'Eq. 1 podem predir com serà la funció $v(r)$. Si M i r creixen, v es pot mantindre constant; si M és constant i r creix (com a l'exterior de la galàxia), v decreix. Però si trobem està funció amb la tècnica anterior de l'efecte Doppler obtenim un resultat molt diferent.

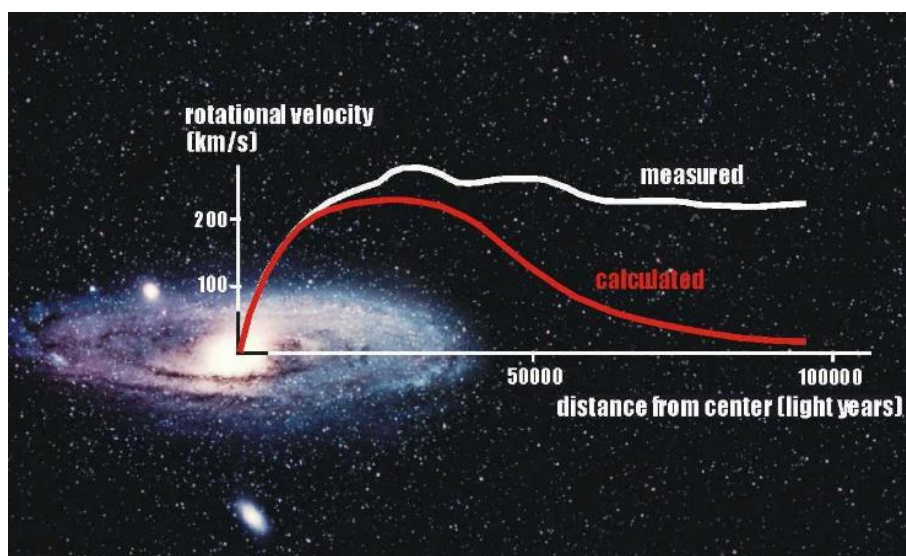


Fig. 2. Corbes de rotació de la Galàxia d'Andròmeda (M31). Les velocitats de rotació reals de les estrelles exteriors són la línia blanca, mentre que les velocitats que s'esperarien de la massa estimada de la matèria visible a la galàxia són la línia roja. [13]

Vegem que el que obtenim és que la velocitat de les estrelles distants es manté aproximadament constant.

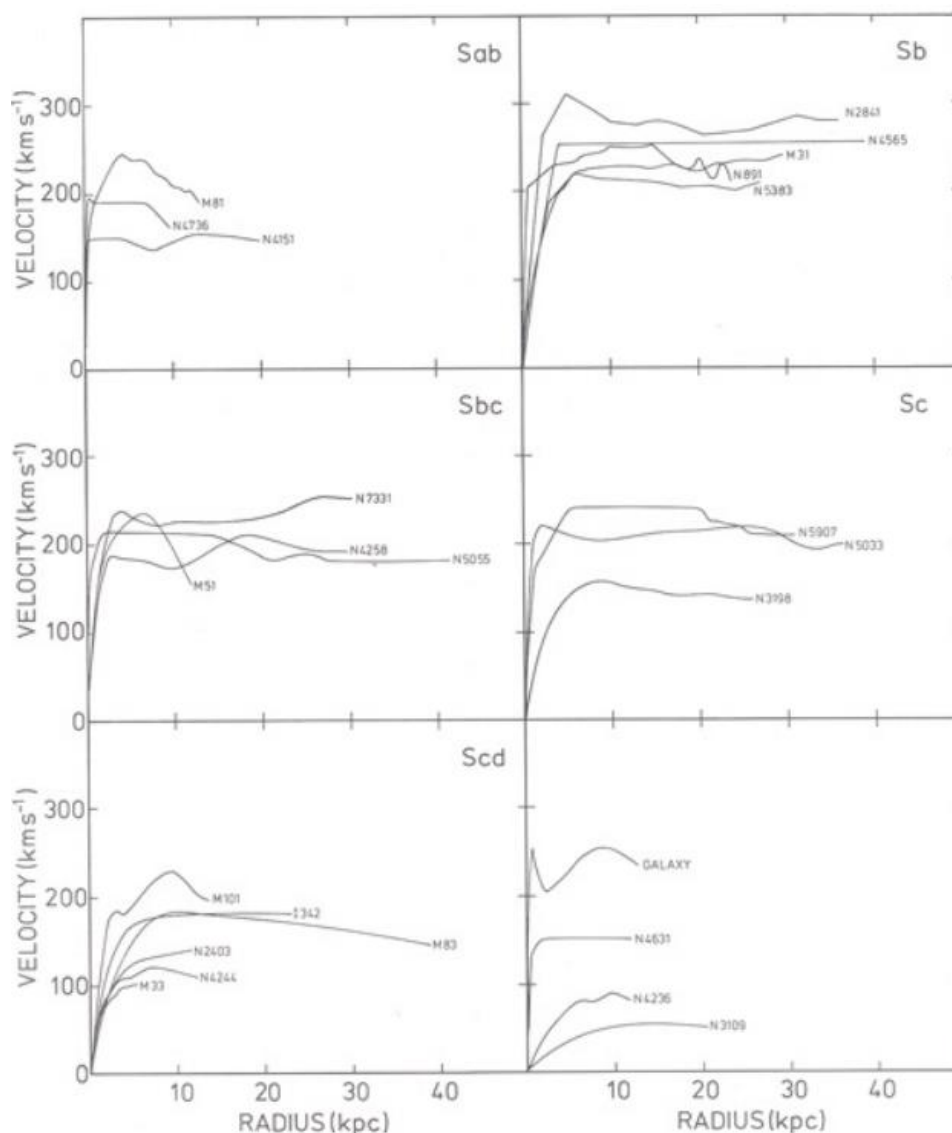


Fig. 3. Corbes de rotació de 25 galàxies [14]. Els quadres corresponen a diferents tipus de galàxies.

La primera hipòtesi que vaig intuir per resoldre esta corba de rotació plana és que una civilització galàctica ho ha imposat artificialment per tal que els anys galàctics duren igual en totes les regions, és a dir, per fer un calendari comú, com tantes vegades hem fet nosaltres. Però aquesta hipòtesi sols seria raonable si fora constant la velocitat angular per a tots els radis, en lloc de la velocitat lineal.

Parlant seriosament, l'explicació més senzilla a la corba constant (considerant correcta l'Eq. 1) és que ha eixes distàncies encara no hem eixit de la galàxia. És a dir, en eixes regions, a més de la matèria visible, existeix una altra matèria invisible, batejada com matèria fosca, que s'estén molt més enllà dels confins aparents de la galàxia, i que conté molta més massa que la primera. D'esta manera fem coincidir la $v(r)$ experimental amb l'Eq. 1.

Estos resultats, obtinguts per primera vegada per Vera Rubin i Kent Ford [7] [8], han sigut confirmats per moltes observacions independents posteriors. Típicament, la massa visible

(ordinària) d'una galàxia és de l'ordre del 10% de la mateixa; el 90% restant és matèria fosca. Algunes galàxies menudes tenen un 99% de matèria fosca. A nivell còsmic la proporció de matèria fosca és menor: entre un 80% i un 85% de la matèria total de l'univers. La raó és que la major part de la matèria ordinària de l'univers està en el gas intergalàctic.

En particular, hi ha molta matèria fosca a les afores de la galàxia, un halo deu vegades més gran. La matèria lluminosa està més concentrada a la part central de les galàxies. L'explicació és que, al contrari que la matèria fosca, la lluminosa pot perdre energia per radiació. Menys energia implica menys possibilitat d'escapar a la gravetat i caure més avall en el 'pou' de potencial gravitacional. Per això la part lluminosa és més compacta.

Esta mateixa tècnica es pot usar en Cúmuls de galàxies. Observant les velocitats de les galàxies, usem l'Eq. 1 i, sabent la massa de la matèria ordinària al cúmul, deduïm la quantitat de matèria fosca. Els resultats obtinguts són similars que per a galàxies.

Si reescrivim el diagrama de forces en termes d'energia (multiplicant als dos costats per "r"), obtenim la mateixa evidència però basada en el teorema del Virial. Este teorema estableix que en un sistema estable d'objectes mútuament lligats per la gravetat, la mitjana de l'energia cinètica total és igual a menys la meitat de la mitjana de l'energia potencial. Per tant, tenim una relació entre les velocitats dels objectes i la massa del sistema. Coneixent les velocitats podem estimar la massa necessària per complir el teorema, i comparar-la amb la massa observada.

En astrofísica podem aplicar este mètode considerant estrelles en una galàxia o galàxies en un cúmul. S'obté que es mouen molt més ràpid del que haurien de moure's. Amb algunes excepcions, les estimacions de velocitats no coincideixen amb les velocitats predites amb la distribució de massa observada. La forma més òbvia de resoldre la discrepància és, de nou, postular l'existència de matèria invisible responsable de la massa que falta. D'aquesta manera, s'obté que la quantitat de massa faltant és superior però del mateix ordre de magnitud que la quantitat de massa coneguda. Alguns exemples d'utilització del Virial són els treballs de Fritz Zwicky [1] [2] o els d'Arno Penzias [15].

2.2. Lents gravitacionals

Una de les conseqüències de la relativitat general és que la curvatura de l'espai-temps en les proximitats d'una gran massa fa que els raigs de llum que s'apropen a ella es desvien. Esta

gran massa, que es troba entre una font més llunyana i un observador, actua com una lent convergent. Això provoca que la posició aparent dels objectes siga diferent de la real.

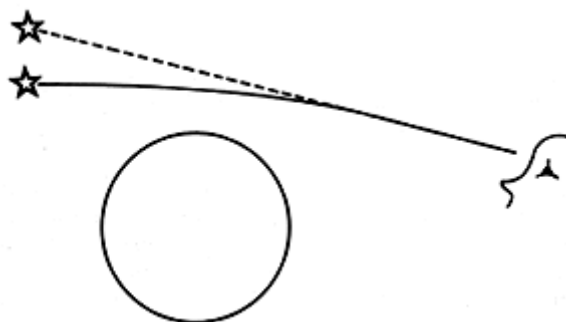


Fig. 4. Esquema simple de la deflexió gravitacional de la llum.

El fenomen, conegut com deflexió de la llum, s'ha observat al voltant de molts cúmuls llunyans, i està tan comprovat que pot usar-se com un procediment alternatiu per determinar la massa d'objectes celestes. Estudiant amb relativitat general la curvatura dels raigs de llum, es pot obtenir la massa de l'objecte intermedi.

Estes lents poden donar lloc a múltiples còpies d'una imatge. Analitzant la distribució de les múltiples còpies s'ha pogut deduir i mapar la distribució de la matèria fosca al voltant de cúmuls de galàxies (per exemple el cúmul MACS J0416.1-2403 [16]).

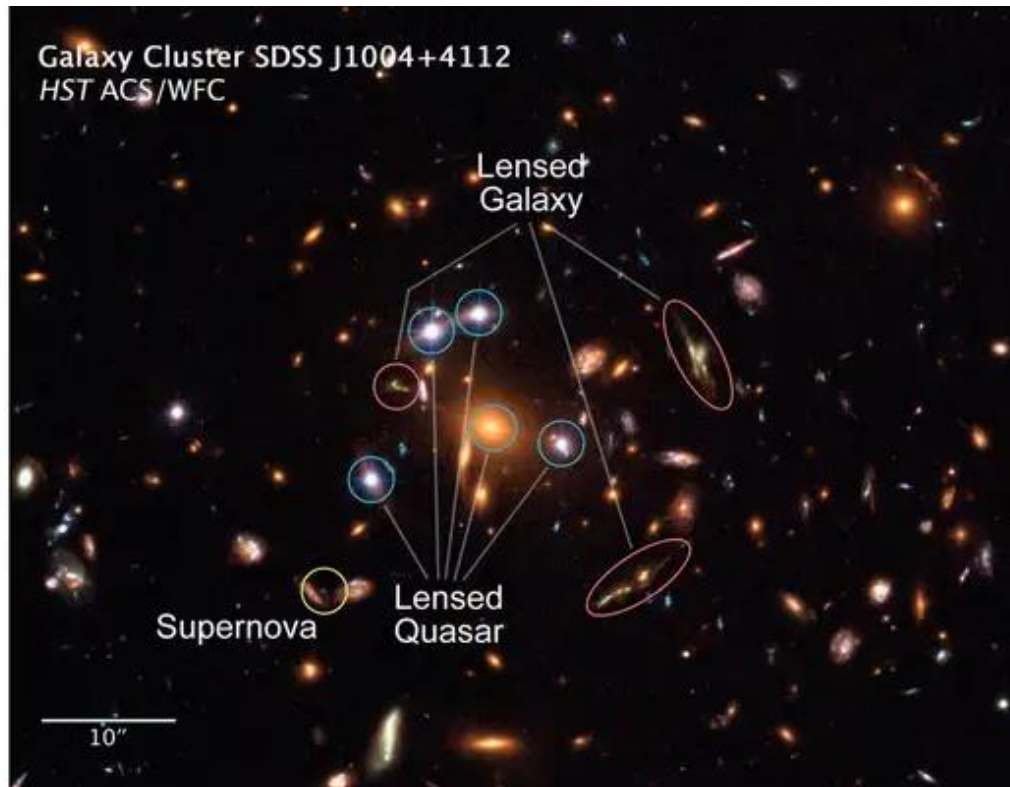


Fig. 5. La imatge d'una galàxia (assenyalada pel text "lensed galaxy") i la del quàsar J1004+4112 (assenyalat pel text "lensed quasar"), amplificada i multiplicada per la gravetat del cúmul de galàxies. [17]

També s'investiguen distorsions diminutes de les galàxies, utilitzant anàlisis estadístics d'extensos estudis de galàxies. Al examinar l'aparent deformació per cisallament de les galàxies de fons adjacents, es pot caracteritzar la distribució mitjana de la matèria fosca.

A més, l'efecte de lent gravitacional ens permet mesurar la distribució de la massa inclús en regions on no hi ha ningun objecte orbitant. En les desenes de casos en les que s'ha fet la determinació de massa de cúmuls pel mètode de lents gravitacionals i per mesures dinàmiques, les proporcions de matèria fosca obtingudes concorden. La matèria fosca (DM, per les sigles en anglès) de l'univers és 5 o 6 vegades més abundant que la matèria ordinària (OM). Els últims 30 anys s'han controlat línies de visió de milions d'estrelles diferents, donant lloc a milers de candidats a lents gravitacionals.

2.3. Nucleosíntesis primitiva

Segons la teoria del Big Bang, quan l'univers tenia pocs minuts de vida, es donaren les condicions de densitat i temperatura perquè una part dels protons i neutrons es fusionaren per a formar nuclis atòmics lleugers. Més endavant, tots estos nuclis atraparen electrons formant àtoms. Usant les equacions de la relativitat general i tot el que sabem sobre processos nuclears podem predir quin percentatge de cada nucli es va formar durant l'univers primitiu: un 25% d'Heli, de l'ordre d'un per cada cent mil de Deuteri i Heli-3, i molta menys proporció de nuclis més complexos; el 75% restant són protons i neutrons deslligats [5]. A la vegada, podem mesurar en l'univers actual l'abundància d'estos elements, es troben percentatges que concorden perfectament (dins dels errors teòrics i experimentals).

Per a fer els càlculs dels nuclis d'elements en l'univers primitiu cal usar una magnitud important, la densitat de matèria ordinària de l'univers. Esta magnitud està ben mesurada a partir de les observacions de les galàxies i el gas intergalàctic [18]. Quan s'usa eixe valor en els càlculs de la nucleosíntesi s'obtenen les abundàncies d'elements lleugers esmentades, que concorden admirablement amb les abundàncies observades. Açò vol dir que la matèria fosca (sis vegades més abundant que la ordinària) no pot ser matèria ordinària que, per algun motiu, no haguem sigut capaços de detectar; per exemple, asteroides menuts vagant per l'espai interestel·lar. Les abundàncies d'elements ens indiquen que essencialment no hi ha més matèria ordinària que la que realment es pot observar en l'univers. Per tant, la DM ha de ser "una altra cosa".

2.4. Radiació còsmica de fons

Quan l'univers tenia uns cinc minuts de vida, el procés de nucleosíntesi d'elements lleugers pràcticament havia acabat. En eixe moment en l'univers hi havia plasma, és a dir, partícules carregades (nuclis atòmics i electrons) interaccionant amb fotons, i també hi havia neutrins i DM. Estes tres coses interaccionaven molt poc o res entre elles. L'univers era lluminós perquè hi havia molts fotons, però no era transparent, ja que estos canviaven contínuament de direcció al trobar-se amb les partícules carregades.

Quan l'univers tenia 380 000 anys, la temperatura havia baixat a 3000 °C, i els electrons ja eren suficientment lents per ser capturats pels nuclis. Tot el plasma es va convertir en un gas d'àtoms. Com a conseqüència, l'univers es va fer transparent, donat que els àtoms són neutres i no interaccionen fortament amb la llum. Els fotons pogueren per fi viatjar en línia recta sense interrupcions. Aquells fotons alliberats quan l'univers tenia 380 000 anys han seguit viatjant sense parar, i actualment constitueixen l'anomenada radiació còsmica de fons (CBR, per les sigles en anglès) o fons còsmic de microones (CMB), que ens arriba hui en dia des de totes les direccions [6]. Aquella llum primitiva, que en un principi era visible, s'ha estirat fins convertir-se en una radiació de microones, degut a que l'espai s'ha anat estirant durant 13 800 milions d'anys.

La radiació de fons no és isòtropa (igual en totes les direccions) sinó que mostra una direcció "privilegiada" des de la que ens arriben fotons lleugerament desplaçats al roig, mentre que en la direcció oposada ens arriben desplaçats al blau. Este fet es deu al moviment de la nostra galàxia. Si llevem esta anisotropia de les dades, la radiació de fons pareix homogènia (mateixa temperatura), però si mires amb més detall descobreixes inhomogeneïtats (fluctuacions), gràcies a les quals s'han format les estructures que vegem en l'univers.

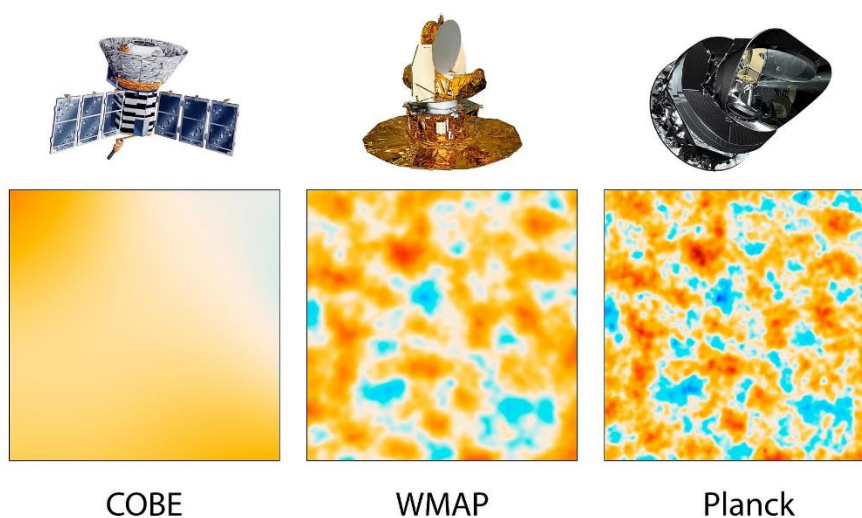


Fig. 6. Comparació dels resultats de CBR de COBE, WMAP i Planck. [19]

Estes variacions de temperatura s'han anat mirant amb més detall, primer amb el satèl·lit COBE, després amb el WMAP [20], i finalment amb el Planck [12], diferenciant variacions de temperatura de l'ordre de desenes milionèsimes de grau.

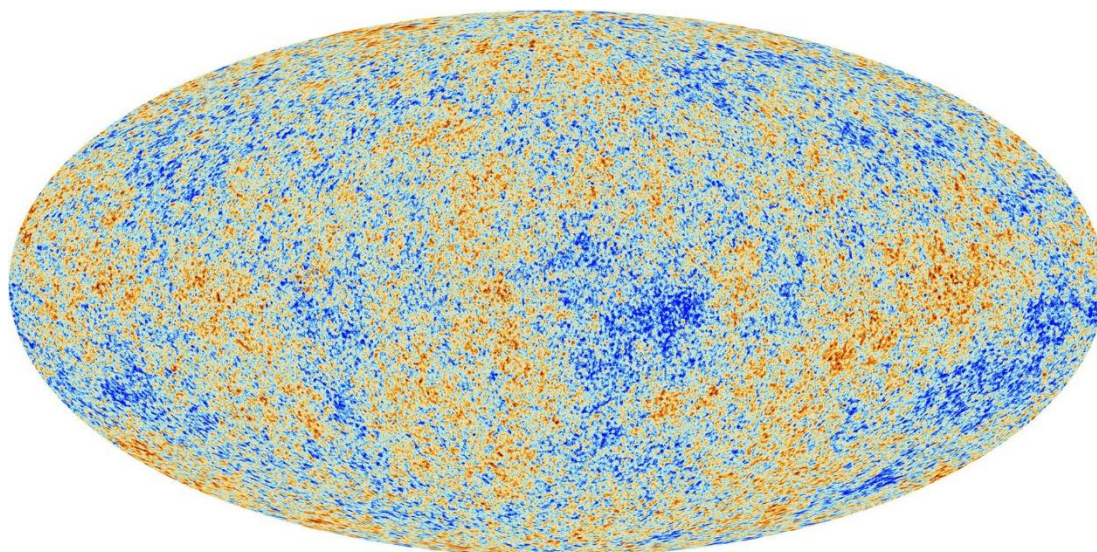


Fig. 7. La radiació còsmica de fons (CBR) vista des del satèl·lit Planck. [21]

Els fotons de la radiació de fons alliberats en el moment de la recombinació partiren d'una esfera imaginària, al centre de la qual estem nosaltres. Recorde que no per això tenim una posició privilegiada, cada punt de l'univers actual pot imaginar-se una esfera equivalent. Per tant, el mapa representa les xicotetes variacions de temperatura del plasma en eixa esfera de l'univers primitiu. En eixe plasma les zones més calentes (més energètiques) eren també les més denses, per tant és també un mapa de densitats. El mapa és una foto de l'univers amb 380 000 anys d'edat, la imatge més antiga que tenim de l'univers.

L'origen de les fluctuacions de densitat eren simplement les ones sonores que viatjaven en aquell espai primitiu. En una habitació amb so també podríem fer un mapa de densitats d'aire en un instant donat, i també trobaríem minúscules variacions de densitat degudes a les ones sonores. L'univers primitiu estava poblat per ones sonores de diferents longituds d'ona però, com si fos un instrument musical, podríem trobar un to fonamental i uns harmònics, amb un anàlisi matemàtic del mapa. Podem trobar el contingut de cada longitud d'ona en el mapa de la radiació de fons.

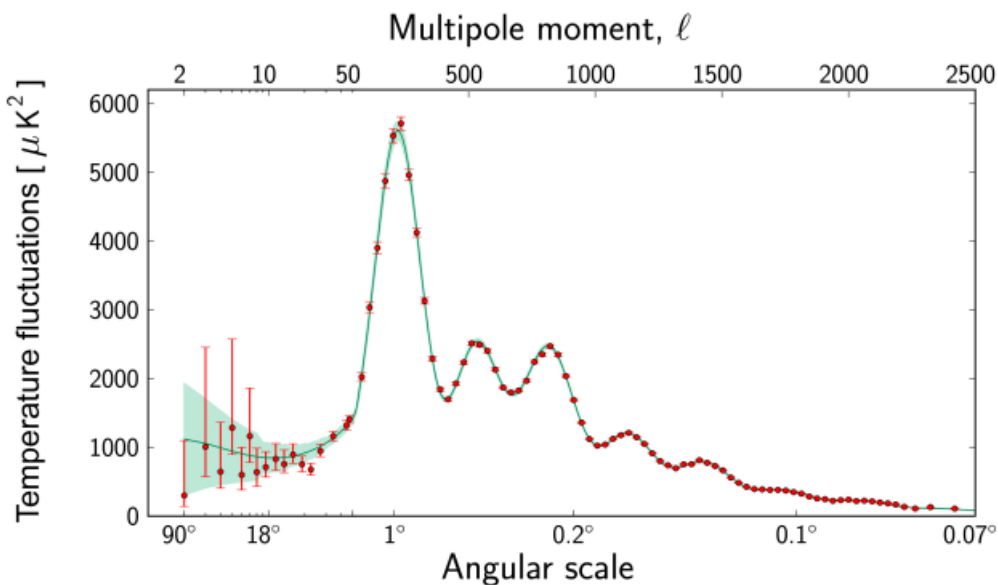


Fig. 8. Espectre sonor de l'univers en el moment de la recombinació. [22]

L'eix horitzontal està en graus, ja que estem mesurant les longituds per les seues grandàries aparents: els angles visuals que creen al cel. El primer pic (to fonamental) és d'aproximadament un grau. Amb les convencions de la figura, això significa que mitja longitud d'ona del to fonamental ocupa un angle d'un grau al cel. Recordant que el mapa de la radiació de fons que vegem correspon a una esfera gegantesca des de la que, en el moment de la recombinació, va eixir la llum que ara mateix ens arriba. Calculem quanta distància ocupava en eixa esfera un arc de dos graus i obtenim que la longitud d'ona del mode fonamental és, aproximadament, un milió d'anys-llum.

Este mateix resultat el podríem predir de manera teòrica. Les ones de l'univers primitiu es movien en totes les direccions. Al superposar-se dos ones de la mateixa longitud d'ona, movent-se en sentits contraris, es formen ones estacionaries, que (com en una guitarra) reboten als extrems i es superposen amb elles mateixa. En una ona sonora estacionària el contrast màxim de densitats s'aconsegueix quan l'ona ha realitzat un nombre exacte de mitges oscil·lacions. Aquelles ones que en l'instant de la recombinació hagueren realitzat un nombre exacte de mitges oscil·lacions haurien de ser les que en eixe moment produïren un major contrast de densitats. Concretament, el mode fonamental deuria correspondre a un ona sonora que, després dels primers 380 000 anys haguera tingut temps just de realitzar mitja oscil·lació, per tant el període d'oscil·lació seria el doble d'eixe temps. Conegut el període d'oscil·lació i la velocitat de propagació (velocitat del so en aquell plasma) es pot calcular la longitud d'ona, que resulta ser aproximadament un milió d'anys-llum.

La predicció teòrica i l'observació concorden perfectament. Les altres ones que en el moment de la recombinació havien realitzat un número exacte de mitges oscil·lacions (una, una i mitja, etc.) estaven també en un moment propici per produir màxim contrast de densitats. Eixes ones

són els harmònics, que corresponen als pics segon, tercer, quart, etc. que observem en l'espectre sonor de la Fig. 8, de nou en perfecte acord amb la teoria.

L'espectre sonor primitiu ens proporciona informació valuosa sobre la forma geomètrica de l'univers i el seu contingut de matèria. Després de mitja oscil·lació, l'ona sonora del mode fonamental va produir un cert contrast de densitats, provocant que en algunes zones la matèria es comprimira. A este fenomen va col·laborar la força d'atracció gravitatòria, que fa que la matèria tendisca a contraure's. A la vegada, la força gravitatòria depèn de la quantitat de matèria present. Per tant, l'altura del primer pic està relacionada amb la densitat total de matèria: a major densitat de matèria, major altura del pic.

La densitat total de matèria i energia de l'univers és amb gran exactitud l'anomenada densitat crítica, la necessària per a un univers pla. El que es dedueix de l'altura del primer pic és que la densitat de matèria és aproximadament un 32% de la densitat crítica. Eixe és també el resultat al que s'arriba a partir de les mesures actuals de les densitats de matèria ordinària i fosca de l'univers. La suma representa, aproximadament, el 32% de la densitat crítica, en perfecte acord amb el que ens diu l'altura del primer pic de l'espectre sonor primitiu.

El segon pic de la Fig. 8 correspon a l'ona sonora que va acabar de fer una oscil·lació en el moment de la recombinació. Durant esta oscil·lació, en alguns llocs la matèria es va comprimir i posteriorment expandir o rebotar, com una molla que es comprimeix i després es descomprimeix. La força que va impulsar el rebot venia de la pressió de la radiació del plasma, de manera que sols va afectar a la matèria en forma de plasma, és a dir, la matèria ordinària. La matèria fosca va continuar comprimint-se, mentre que el plasma es va descomprimir. D'esta manera, l'altura del segon pic està relacionada amb la quantitat de matèria ordinària. I el que es dedueix d'eixa altura és que la densitat de matèria ordinària és un 5% de la densitat crítica, de nou en extraordinari acord amb les mesures directes. El 27% restant (fins completar el 32% del primer pic) és un tipus de matèria que no interacciona amb la ordinària (si no hagués format part del plasma i hagués rebotat amb ell). Esta és, naturalment, la matèria fosca.

Estudiant enginyosament les fluctuacions de la radiació de microones hem pogut deduir l'existència de matèria fosca i la seua abundància. El 68% que falta per completar la densitat crítica, que és la que té l'univers, és l'energia fosca.

Actualment es sap que la densitat d'energia de la matèria ordinària (bariònica) és $\Omega_b = (0.0493 \pm 0.0006)$, i la densitat d'energia de la matèria fosca és $\Omega_{dm} = (0.265 \pm 0.007)$ [18].

2.5. Formació d'estructures

Es pot entendre teòricament l'evolució de les inhomogeneïtats primitives comentades anteriorment des de l'època de la recombinació fins ara. La DM (juntament amb l'energia fosca) ha jugat un paper essencial en el procés d'agrupació progressiva de la matèria. El procés de formació d'estrelles i galàxies porta un temps. Si només hi hagués matèria ordinària en l'univers, no hi hauria hagut temps suficient perquè les perturbacions de densitat creixeren fins formar les galàxies i cúmuls actuals. És a dir, sense matèria fosca encara no existirien les galàxies, un evidència de DM molt important.

Però no sols l'abundància de la DM és important, també ho és la velocitat amb que es mouen les partícules que la componen. Si eixa velocitat fora molt gran (el que es denomina "matèria fosca calenta"), el procés d'agrupament de la matèria hauria sigut molt menys eficient. La raó és que les ràpides partícules fosques haurien escapat amb facilitat als efectes gravitatoris i no s'acumularien amb la mateixa eficàcia. Per tant, necessitem "matèria fosca freda", que des del principi puga agrupar-se per efecte de la seua pròpia gravetat. Esta important característica permet descartar molts candidats a DM.

Per calcular l'evolució de la matèria des de la recombinació fins hui, cal ajudar-se de superordinadors.

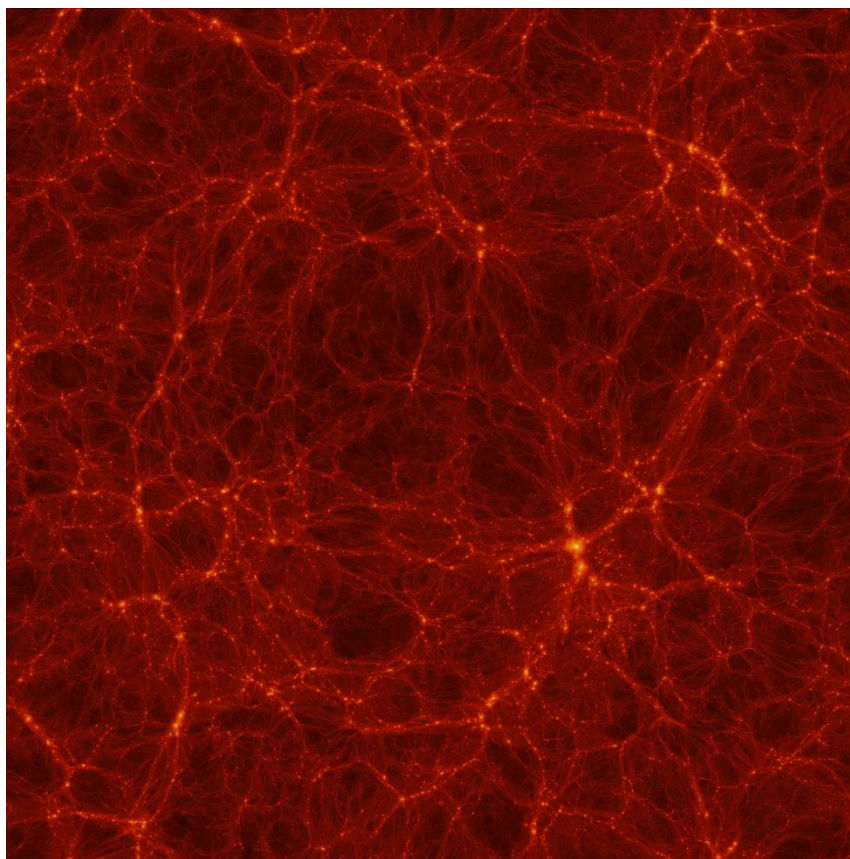


Fig. 9. Simulació de l'estructura a gran escala d'un fragment de l'univers [23].

Esta textura filamentosa obtinguda teòricament, concorda molt bé amb la que realment s'observa de l'estructura a gran escala de l'univers actual, sempre que es partisca de les següents hipòtesis:

- La densitat de DM de l'univers és aproximadament un 27% de la densitat crítica. Açò coincideix, dins els errors teòrics i experimentals, amb l'abundància de matèria fosca determinada per altres mètodes mencionats anteriorment, com les lents gravitacionals o l'anàlisi del CBR.
- La DM és freda. Al començament del procés d'agrupament, la velocitat de les partícules fosques no podia ser massa pròxima a la de la llum.

S'ha observat que les galàxies actuals tendeixen a acumular-se en circumferències amb un diàmetre de 960 milions d'anys llum, que és precisament aquella longitud característica inicial multiplicada per mil, a causa de l'expansió de l'univers des de la recombinació. Esta és una prova clara de que les fluctuacions sonores del plasma primitiu foren les llavors que posteriorment donaren lloc a les galàxies i cúmuls.

A més, la matèria fosca també és crucial per entendre la forma que tenen les galàxies. La OM perd energia per radiació, però la DM no pot radiar. Este és el motiu pel qual la matèria fosca està en l'halo i la OM al centre, com hem comentat a l'apartat 2.1. Este fenomen ajuda a entendre el que succeeix al famós Cúmulo Bala, el qual realment és el resultat de la col·lisió de dos cúmuls de galàxies, i és la prova més directa de l'existència de matèria fosca.

Als cúmuls galàctics hi ha centenars o milers de galàxies, però la major contribució a la massa de la matèria ordinària del cúmulo la fa el gas intergalàctic, té 15 vegades més massa (de matèria ordinària) que les galàxies. A més, també hi ha DM (entre 5 i 6 vegades més massa que la OM). Per tant: la major part de la massa és matèria fosca; la resta és matèria ordinària, principalment gas intergalàctic, i, en molta menys quantitat, galàxies individuals. Estes últimes representen de l'ordre de l'1% de la massa total d'un cúmulo.

Si la DM no existira, el gas intergalàctic seria el màxim responsable de l'efecte de lent gravitacional que es dona als cúmuls. Una manera de demostrar que la DM existeix seria llevar el gas intergalàctic del cúmulo i comprovar si es segueix donant el mateix efecte de lent gravitacional. Això seria una prova pràcticament irrefutable de que eixe efecte no està causat pel gas, sinó per la DM. Este fenomen l'obtenim gràcies al xoc entre dos cúmuls, com és el cas del Cúmulo Bala [11].

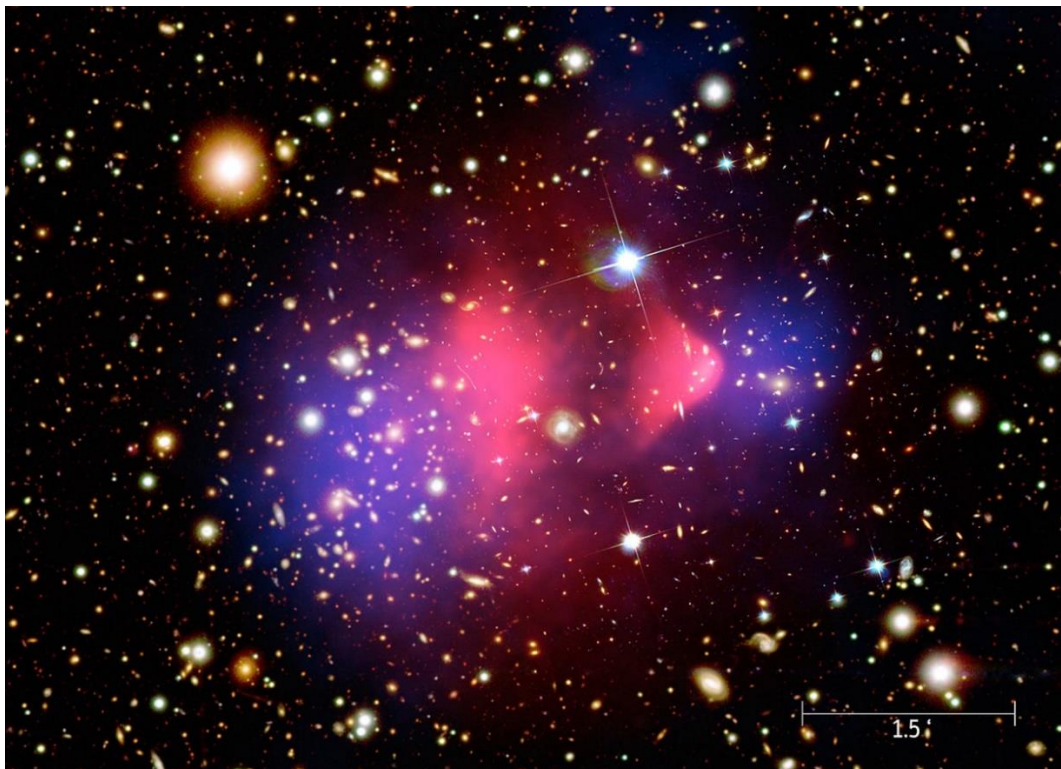


Fig. 10. Imatge de raigs X (rosa) superposada a una imatge de llum visible (galàxies), amb la distribució de la matèria calculada a partir de la lent gravitatòria (blau). [24]

Curiosament, les galàxies individuals no es troben al mateix lloc que els núvols de gas, sinó desplaçades, concretament estan més allunyades del centre que els propis núvols. La raó és que, al travessar-se, els dos núvols de gas interaccionen electromagnèticament entre ells, frenant-se. Per altra banda, les galàxies estan tan allunyades unes de altres dins de cada cúmulo, que els dos eixams galàctics s'atravessen casi sense tocar-se, de manera que no frenen el seu moviment. Per això estan més avançades que els núvols de gas. L'observació de l'emissió de raig X permet comprovar que la matèria ordinària en el gas és molt més abundant que la de les galàxies individuals, com és habitual. Ara cal considerar quin és l'efecte de lent gravitacional produït pels cúmuls.

Les taques blaves de la Fig. 10 representen les zones on l'efecte de lent gravitacional és major, i per tant on es troba la major part de la matèria. Però, de la matèria ordinària, en estes taques blaves sols estan les galàxies, no els núvols de gas. Per tant, la major part de la matèria als cúmuls no està als núvols de gas. En conseqüència, la DM ha d'existir, sobretot perquè estes proves observacionals són independents del model. Per altra banda, el centre de masses aparent de la col·lisió està molt allunyat del centre de masses bariònic, de nou cal la presència de DM.

A més, el Cúmulo Bala ens diu que la DM no sols interacciona molt poc amb la OM, sinó molt poc amb ella mateixa. De lo contrari, els núvols de DM també haurien "friccionat" entre si al

travessar-se, com els de gas, i s'haurien quedat endarrerits. Posteriorment al cúmulo de Bala, s'han analitzat altres xocs de cúmuls galàctics (com el MACS J0025.4-1222), que exhibeixen també una separació entre els núvols de gas i la DM, pareguda al Cúmulo Bala.

3. Concordança i característiques

En primer lloc convé comentar la famosa Concordança Còsmica. El valor de les densitats d'energia de la matèria i l'energia fosca es pot obtenir amb molta precisió de la concordança entre quatre dades diferents (Fig. 11).

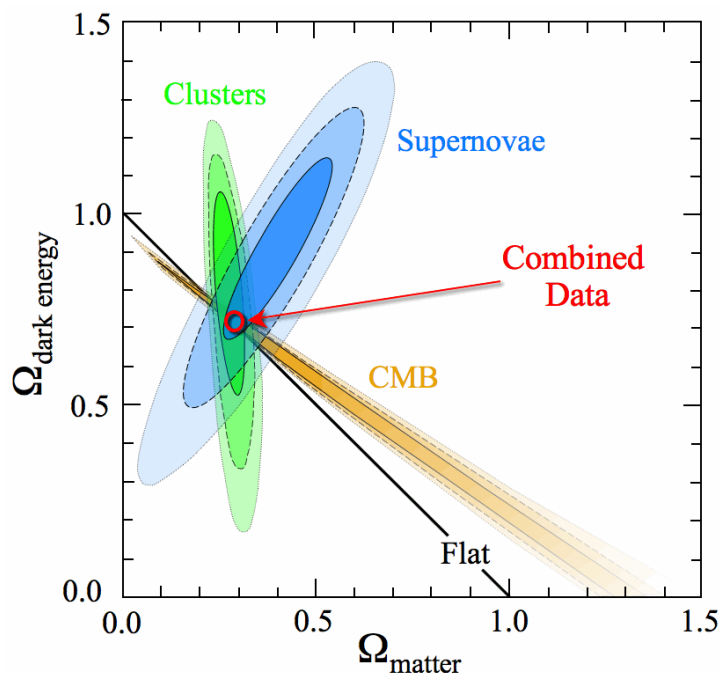


Fig. 11. Els resultats combinats de les anàlisis del fons còsmic de microones, supernoves llunyanes de tipus Ia i mesures de cúmuls de galàxies en el pla $\Omega_m \equiv \rho_m/\rho_c$ vs $\Omega_{de} \equiv \rho_{de}/\rho_c$ de densitats d'energia de la matèria i del buit (energia fosca), normalitzades a la densitat crítica. [25]

En esta figura és superposen les mesures de cúmuls de galàxies sobre la quantitat de matèria a l'univers (en verd), les dades del fons còsmic de microones (en groc), les mesures d'acceleracions de supernoves (en blau), i la línia d'univers pla on la suma de les dos densitat dona 1 (en negre). Els valors exactes d'estes densitats les podem trobar a la llista de constants i paràmetres astrofísics [18].

Com hem anat comentat al llarg del treball, la concordança dels mètodes utilitzats en cadascuna de les evidències és impressionant. Recollint tota la informació, podem fer un retrat robot de com és la matèria fosca. Concretament sabem sis característiques:

1. Interacciona molt dèbilment amb la OM; fins ara sols s'ha observat la força gravitatòria que exerceix sobre ella. Si hi ha altres tipus d'interaccions entre elles han de ser molt dèbils; de lo contrari, la matèria fosca ja hauria sigut detectada de forma directa.
2. Tampoc pareix interaccionar molt amb ella mateixa. De lo contrari hauria constituït el seu propi plasma en l'univers primitiu, però els pics de l'espectre sonor de la radiació de fons indiquen que la DM no era un plasma i que va col·lapsar gravitatòriament sense

rebotar (com si ho feia el plasma de OM). A més, altres observacions, com el Cúmulo Bala, indiquen que els núvols de DM es travessen sense interaccionar entre ells, el que suggereix que la DM no sols es invisible per a nosaltres sinó també per a ella mateixa.

3. No pot estar feta de partícules ordinàries. No la poden formar protons, neutrons i electrons; de lo contrari els càlculs de la nucleosíntesi primitiva donarien resultats contradictoris amb les dades observacionals. A més, l'espectre sonor de la radiació de fons ens indica que la DM no va formar part del plasma primordial de OM. D'això deduïm també que la DM no pot estar feta de partícules carregades elèctricament, de lo contrari també hauria format part del plasma primitiu.
4. Ha de ser molt estable, és a dir, si es desintegra ho ha de fer a un ritme molt lent. Sabem que en l'univers primitiu el percentatge de DM era aproximadament el mateix que ara. Així que la vida d'una partícula fosca ha de ser com a mínim l'edat de l'univers.
5. Cal també explicar per què forma un 27% del contingut total de l'univers. A partir de l'estudi de la nucleosíntesi primitiva s'ha sabut explicar les abundàncies dels elements lleugers. De la mateixa manera, si un tipus de partícula amb determinades característiques (massa e interaccions) és candidata a DM, es pot calcular amb quanta abundància es va produir a l'univers primitiu. El percentatge de DM en l'univers és una pista crucial per identificar candidats raonables.
6. Per últim, hem vist que per obtindre l'estructura a gran escala actual també cal que la matèria fosca siga freda.

4. Propostes

Hi ha moltíssimes propostes per explicar la matèria fosca, i cada dia més.



Fig. 12. Possibles explicacions de la naturalesa de la matèria fosca. [26]

Quan els físics teòrics treballen sobre possible candidats a partícula fosca existeixen dos estratègies possibles. La primera és determinar el rang possible de les seues propietats per intentar acorralar-la experimentalment i detectar-la. Però el retrat robot fet a l'apartat 3 no és tan precís com pareix, per exemple la massa de la partícula fosca podria ser des de molt menor a la dels neutrins fins molt més gran que la de totes les partícules elementals conegudes. Sense una idea més concreta de les seues propietats és difícil dissenyar experiments eficaços per detectar-la.

La segona és considerar candidats motivats per consideracions teòriques. Els models de nova física per resoldre els enigmes del model estàndard (SM, per les sigles en anglès) solen implicar l'existència de noves partícules, algunes de les quals compleixen les característiques de la misteriosa partícula fosca. Esta estratègia fa la recerca més eficient, però basada en prejudicis teòrics que podrien ser erronis. El es fa és seguir les dos estratègies a la vegada.

Explorarem cinc candidats a formar part de la composició de la matèria fosca, i una proposta alternativa.

4.1. MACHOs

Els barions (protons i neutrons) formen estrelles i planetes ordinaris, però també objectes menys comuns com forats negres, estrelles de neutrons, nanes blanques i nanes marrons. Estos objectes menys coneguts es coneixen com objectes astrofísics massius d'halo compacte (MACHOs), que poden ser difícils de detectar i, per tant, candidats a matèria fosca.

No obstant això, hem vist a l'apartat 3 que la DM no pot estar feta de OM. A més, la quantitat de gas o pols bariònica seria visible quan les estrelles l'il·luminaren. Experimentalment el rang exclòs de masses d'objectes és des de la meitat de la massa de la Terra fins a trenta masses solars, la qual cosa cobreix casi tots els candidats plausibles. Per tant, pot ser que els MACHOs contribuïsquen mínimament a la misteriosa matèria fosca, però de cap manera poden ser l'ingredient principal.

4.2. Forats negres primordials

Un forat negre primordial (PBH, per les sigles en anglès) és un tipus de forat negre que no s'ha format pel col·lapse gravitatori d'una estrella, sinó ben abans de l'existència d'estrelles, en l'extrema densitat de l'univers a l'inici de la seua expansió. Van ser proposats als anys setanta per Barnard Carr i Stephen Hawking [27]. Este tipus de forats negres s'haurien format abans de la nucleosíntesi, per tant, podrien estar fets de OM sense entrar en contradicció amb els càlculs d'abundàncies d'elements. També podrien estar fets d'algun tipus de matèria no bariònica desconeguda.

En un principi es pensava que els PBHs podien ser un component substancial de la matèria fosca, per a certs rangs de masses concrets. Actualment, aquest és un tema de discussió intensa i només es pot resumir dient que ningú sap certament com han nascut, com estan distribuïts, ni com són. En una revisió molt recent sobre els forats negres [28] es conclou que no poden proporcionar més del 10% de l'abundància de DM. Esta conclusió és per a tota massa del PBH excepte per al rang de masses de 10^{-15} a 10^{-10} vegades la massa solar, el qual encara es desconeix molt i està basat en moltes suposicions teòriques. A la vegada, la seua interacció amb la OM i amb ells mateixos fan que a priori no s'ajusten bé a les característiques de la DM.

4.3. Neutrins

La majoria de les partícules conegudes són massa inestables (muó, tau i composicions de quarks), no poden ser matèria fosca, l'única excepció són els neutrins. El neutrí és una partícula lleugera que té massa i no interacciona fàcilment amb altres partícules ni amb ella mateixa. Però no pot ser la DM (o sols representa una part molt menuda), per dos raons. La primera és que, quan es calcula el romanent de neutrins còsmics procedents del Big Bang, resulta que no és suficient per constituir un 27% de la densitat crítica; per aconseguir-ho, deurien ser bastant més pesats del que són. La segona raó és que els neutrins suposarien un tipus de matèria fosca calenta i, com sabem, la DM ha de ser freda.

Convé mencionar els neutrins estèrils, partícules hipotètiques que no interaccionen per mitjà de cap de les interaccions fonamentals del model estàndard, amb excepció de la gravetat. Han estat proposats per ajudar a resoldre l'origen de la massa dels neutrins i ser candidats a matèria fosca, no obstant això, estes partícules no tenen una sustentació teòrica tan sòlida com les següents.

4.4. WIMPs

A pesar de que el SM funciona molt bé en la pràctica, hi ha aspectes intrigants de les partícules elementals que no és capaç d'explicar. Açò suggereix fortament que ha d'haver física més enllà del SM. Per altra banda, ninguna de les partícules descrites per esta teoria (les úniques conegudes) pot ser la DM. Així que la DM també necessita nova física.

Els càlculs teòrics indiquen que si una partícula té una massa entre 10 i 1000 vegades la massa d'un protó, aproximadament, i presenta sols interaccions dèbils, aleshores l'abundància amb la que s'hauria produït en l'univers primitiu seria la que observem de DM. Estes partícules s'anomenen WIMPs (Weakly Interacting Massive Particle), és a dir, "partícula massiva amb dèbil interacció". Són els candidats més estudiats per a la DM, tant des del punt de vista teòric com des de l'experimental. La raó és que el "problema de la naturalitat", un dels enigmes del SM sobre la massa dels bosons W i Z, suggereix la seua existència. [9] [29]

Una de les teories més estudiades per resoldre el problema de la naturalitat és l'anomenada supersimetria. Esta teoria està molt desprestigiada per la manca d'evidència experimental directa (LHC, etc), però val la pena comentar-la. Diu que cal incloure noves partícules al SM amb una massa de l'ordre de centenars (o com a molt milers) de vegades la massa d'un protó. En la majoria dels models la partícula supersimètrica més lleugera és el neutralí, el qual és una WIMP que, sense haver-ho buscat, posseeix les característiques perfectes per a formar

la DM: és estable, la seua massa està en el rang adequat perquè es produïsquen amb l'abundància necessària i dona lloc a DM freda. Podria ser que la partícula fosca fora el neutralí.

A més de la supersimetria, existeixen altres models teòrics que podrien solucionar el problema de la naturalitat del SM, i que també donen lloc a WIMPs. Per exemple els models de Higgs compostos o models de Higgs múltiples. Una altra proposta de física més enllà del SM són els models amb dimensions espacials extres, els quals estan actualment rebent atenció. Una partícula movent-se en elles (i no en les tres dimensions convencionals) ens pareixeria que està en repòs, però amb molta energia; és a dir, ens pareixeria que té massa i, per tant, que és una partícula distinta. Precisament una d'aixes partícules podria tindre les característiques d'una WIMP i ser la responsable de la DM.

La supersimetria i les dimensions extres són molt habituals en models de física més enllà del SM, concretament en les teories de supercordes, l'intent més seriós per resoldre la falta de consistència matemàtica de les forces gravitatòries a nivell quàntic.

4.5. Axions

Els axions són partícules proposades per resoldre un problema teòric del model estàndard relacionat amb l'estructura de les interaccions fortes. De nou sense voler, s'ajusten perfectament a les característiques de la DM. Són partícules molt estables, de massa molt menuda (més lleugers que els neutrins) i que es produïren en molta quantitat (en cas d'existir) en l'univers primitiu. També serien matèria fosca freda, i les seues interaccions amb la OM són extremadament dèbils, al igual que amb elles mateixa, de manera que els mètodes de detecció directa de WIMPs no serveixen per axions. [10] [30]

4.6. Gravetat modificada

El matemàtic Le Verrier, cap al 1840, va intentar explicar l'anomalia en l'òrbita d'Urà postulant l'existència d'un nou planeta anomenat Neptú. Le Verrier estava en certa manera proposant la presència de "matèria fosca" com la responsable del fenomen, i va tindre èxit. Vint anys després, Le Verrier va intentar explicar l'anomalia en l'òrbita de Mercuri postulant l'existència d'un nou planeta anomenat Vulcano. En este cas no hi havia ninguna "matèria fosca" (ningun planeta Vulcano). La causa de l'enigmàtica precessió de Mercuri era la diminuta correcció relativista a la força gravitatòria newtoniana. També pot ser que les evidències que atribuïm a

la matèria fosca realment siguen evidències de que les nostres teories físiques són incompletes. És a dir, que la matèria fosca siga com Vulcano o com l'èter, inexistent.

Hem utilitzat l'Eq. 1 repetidament, però podria ser que "G" no fora constant. Si per exemple "G" fora proporcional a "r", obtindríem un gràfic com l'experimental de la Fig. 2 de tal manera que no caldria postular l'existència de ninguna matèria fosca per entendre les velocitats anòmalament grans de les estrelles en la perifèria de les galàxies. A les teories d'este tipus, que postulen que, a grans distàncies, l'atracció gravitatòria difereix de la predita per la llei de Newton, produint un efecte que pareix degut a una matèria fosca, es diuen teories MOND (Modified Newtonian Dynamics). L'exemple de "G" no constant no està recolzat per cap model teòric.

La primera correcció que podem pensar a la llei de Newton és la correcció relativista. Les equacions de la relativitat general es poden aplicar al sistema de la Fig. 1, el que obtenim és una força gravitatòria efectiva que és la famosa llei de gravitació universal de Newton amb correccions.

$$F = G \frac{M \cdot m}{r^2} - \frac{4}{c^2} \cdot \frac{G^2 \cdot M^2 \cdot m}{r^3} + \dots$$

La contribució relativista és una suma de termes, dels quals sols he posat el més important. El valor d'estos termes sol ser diminut però sempre està ahí.

En ningun cas la correcció relativista pot ser la responsable de l'estrany moviment de les estrelles i galàxies. El motiu està en la forma de la correcció, com és inversament proporcional al cub de "r", a les distàncies de les òrbites estel·lars és absolutament menyspreable. Tal vegada les correccions d'Einstein tampoc siguen perfectes i fallen a eixes distàncies, però actualment hi ha evidències de que no és el cas. Precisament, la pròpia teoria de la relativitat dona lloc a un efecte (exhaustivament demostrat) que ha resultat essencial per establir eixes evidències, parle de les lents gravitacionals aplicades al ja comentat Cúmulo Bala.

El Cúmulo Bala és la prova més directa de l'existència de DM (i contra les teories MOND), però hi ha més. Per exemple, el percentatge de DM de les galàxies varia d'unes a altres, i existeixen inclús galàxies nanes amb un percentatge de DM de fins un 99%. És difícil imaginar una situació així si la DM fora una il·lusió òptica produïda per una gravetat modificada. Un esperaria que si la quantitat de OM de dos galàxies és pareguda, la quantitat de DM aparent que produiria la gravetat modificada també deuria ser-ho.

5. Taula resum

Amb tot aquesta informació podem fer una taula resum per veure quines de les característiques de l'apartat 3 compleixen cadascun dels candidats (quadres verds), i quines no (quadres rojos).

	Interacció OM	Interacció DM	No bariònica	Estable	Abundància	Freda
MACHO						
PBH						
Neutrí						
WIMP						
Axió						

Amb aquestes evidències podem dir que el més probable és que les partícules fosques siguin axions o neutrals, precisament els candidats a DM que estan sent considerats més seriosament per la comunitat científica. Convé recordar també la possibilitat que siguin les dos (o més) a la vegada en una certa proporció.

6. Detectors

Em centraré en els detectors de matèria fosca més comuns, els que busquen WIMPs o Axions. Els MACHOs es poden identificar usant la tècnica de detecció de la característicament simètrica pujada i baixada de la intensitat de la llum. També les valuoses ones gravitacionals i el nou Telescopi James Webb poden ajudar molt a entendre els misteris de la cosmologia actual i, en particular, de la matèria fosca.

Existeixen desenes d'experiments amb l'objectiu de detectar la DM. Fonamentalment es segueixen tres tipus d'estratègies:

6.1. Detecció directa

Actualment es té una idea bastant precisa de la densitat de matèria fosca que existeix en la nostra regió de la Via Làctia: aproximadament mitja mil·lionèsima de gram per kilòmetre cúbic, és a dir, la massa de 300 protons per litre. Usant este valor es pot calcular quantes partícules fosques hi ha al nostre voltant [31] [32]. Per exemple, si la partícula fosca fora 100 vegades més pesada que un protó (que seria el cas d'un WIMP típic), aleshores tindriem unes tres partícules fosques per litres. Amb una velocitat promig de 300 km/s (0.1% de la velocitat de la llum), s'ha determinat que el flux d'este tipus de WIMPs en un centímetre quadrat de qualsevol superfície seria de cent mil partícules per segon. Per tant, a pesar de que la interacció DM-OM és molt menuda, el flux de partícules fosques és lo suficientment intens com per intentar detectar-les directament. Un exemple de detecció directa seria observar quan un nucli atòmic sent l'impacte d'una partícula fosca, com fan, per exemple, en l'experiment ANAIS baix del Pirineu aragonés [33], o en l'experiment XENON1T baix dels Apenins [34].

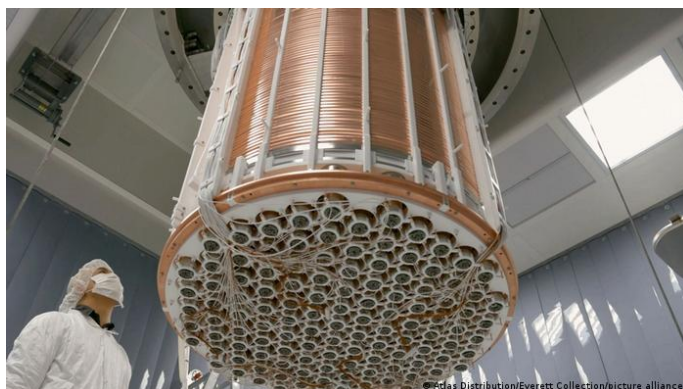


Fig. 13. Instal·lació del detector XENON1T.

A pesar de tots els esforços realitzats, fins ara no s'ha trobat ninguna senyal clara de partícules fosques en ningun experiment. No obstant això, han descartat grans rangs de valors per la

seua massa i les seues interaccions. D'esta manera, molts candidats teòrics han pogut ser descartats, donat que, si foren les partícules fosques, ja els haurien detectat. Els experiments de detecció directa són especialment adequats per detectar (o descartar) WIMPs. De fet, una part important del rang de paràmetres dels WIMPs ha sigut ja explorada i s'espera que en els pròxims anys es detecten (o descarten).

Per altra banda, els axions són hipotètiques partícules extremadament lleugeres (de l'ordre de 10 000 milions de vegades més lleugeres que els electrons) i amb una interacció extremadament dèbil, per tant, molt difícils de detectar. Una avantatge és que, si constitueixen la DM, ha d'haver uns 10 000 bilions d'axions per litre. Tenen la propietat de que, al interaccionar amb un camp magnètic intens, poden transmutar-se en un fotó. Donada la massa de l'axió, el fotó correspondria a una radiació de microones. Seguint estos principis s'ha construït un detector d'axions, anomenat ADMX (Axion Dark-Matter Experiment), instal·lat en la Universitat de Washington [35]. Si la DM està feta d'axions, existeix una gran expectativa en que este experiment pugua detectar-los en els pròxims anys. La detecció directa de DM seria la més neta i decisiva.



Fig. 14. Instal·lació de l'imant ADMX en la Universitat de Washington.

6.2. Detecció indirecta

En el mètode de detecció indirecta, el que es busca són les partícules ordinàries que es produïrien per l'aniquilació de partícules fosques amb les seues antipartícules. Este procés és més fàcil que es produisca en zones on la densitat de partícules fosques és major. Per exemple el centre de la Via Làctia. Estos estudis es fan amb detectors instal·lats en satèl·lits, com els anomenats FERMI [36] o el AMS [37]. Tot i que els experiments de detecció indirecta estan donant resultats interessants, no és poden interpretar bé degut a fonts d'incertesa procedents de l'enorme activitat de tipus astrofísica al centre galàctic.

6.3. Producció de DM

Tot i que la interacció DM-OM és molt menuda, existeix una probabilitat (esperem que no menyspreable) de generar partícules fosques al fer xocar dos partícules ordinàries, sobretot si es fan moltes col·lisions. L'LHC és el millor col·lisionador per generar partícules fosques. Evidentment, la sola producció de noves partícules amb les característiques adequades no provaria que són les constituents de la DM, però seria un indicatiu molt fort al seu favor. Els experiments en LHC també han restringit el rang possible per a la massa i les interaccions de la partícula fosca. La recerca de la partícula fosca és sens dubte un tema de gran interès i rellevància per a la física actual.

Bibliografia

Algunes de les fonts generals inicials:

- https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_matter
- Conferències i vídeos divulgatius (principalment de l'IFT).
- Llibres divulgatius (principalment "La materia oscura" de National Geographic).
- A. De Rújula (2021). "The Dark Side of the Universe".
- G. Bertone; D. Hooper (2016). "A history of Dark Matter".

Referències:

- [1] Zwicky, F. (1933), *Helvetica Physica Acta* 6, 110. "The Redshift of Extragalactic Nebulae". Estudi dels desplaçaments cap al roig de diversos cúmuls de galàxies, va notar una gran dispersió a les velocitats aparents de vuit galàxies dins del Cúmulo Coma i va aplicar el teorema virial al cúmul per estimar-ne la massa.
- [2] Zwicky, F. (1937), *Astrophys. J.* 86, 217. "On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae". En este article afina i amplia els valors de les masses de les galàxies del Clúster Coma.
- [3] Gamow, G. (1946), *Physical Review* 70, 572. "Expanding Universe and the Origin of Elements".
- [4] Alpher, R. A., H. Bethe, i G. Gamow (1948), *Physical Review* 73, 803. "The Origin of Chemical Elements". Els autors d'aquest article van incloure Hans Bethe (que, segons es diu, no va contribuir a la investigació) per tal de facilitar el joc de paraules que va permetre que es conegués com el document "alfa-beta-gamma".
- [5] B.D. Fields (Astronomy, Illinois U.; Physics, Illinois U.), P. Molaro (INAF-OATS Trieste) i S. Sarkar (Rudolf Peierls, Oxford U.) (2019). "Big Bang Nucleosynthesis".
- [6] Penzias, A. A., i R. W. Wilson (1965), *Astrophys.J.* 142, 419. "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s".
- [7] Rubin, V. C., i W. K. Ford, Jr. (1970), *Astrophys. J.* 159, 379. "Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions". Observacions de la corba de rotació de la galàxia d'Andròmeda (M31).
- [8] Rubin, V. C., N. Thonnard, i W. K. Ford, Jr. (1978), *ApJ* 225, L107. "Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV. Systematic dynamical properties, Sa -> Sc". Corbes de rotació per a deu galàxies espirals d'alta lluminositat, troben que són planes fins al radi mesurat més exterior.
- [9] Steigman, G., i M. S. Turner (1985), *Nucl.Phys.* B253, 375. "Cosmological constraints on the properties of weakly interacting massive particles". Treball inicial sobre WIMPs.

- [10] Peccei, R., i H. R. Quinn (1977), Phys.Rev. D16, 1791. “Constraints imposed by CP conservation in the presence of pseudoparticles”. & Phys.Rev.Lett. 38, 1440. “CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles”. Els dos treballs inicials sobre axions (del mateix any i els mateixos autors).
- [11] Clowe, D., M. Bradač, A. H. Gonzalez, M. Markevitch, S. W. Randall, C. Jones, i D. Zaritsky (2006), ApJ 648, L109, astro-ph/0608407. “A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter”.
- [12] Planck Collaboration,, P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. J. Banday, R. B. Barreiro, J. G. Bartlett, i et al. (2015), ArXiv e-prints arXiv:1502.01589. “Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters”.
- [13] <https://phys.org/news/2011-12-dark.html>
- [14] Bosma, A. (1978) (PhD Thesis, Groningen Univ.) “The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types”. Observació per ràdio dels camps de velocitat i les corbes de rotació corresponents de 25 galàxies.
- [15] Penzias, A. A. (1961), AJ 66, 293. “Free Hydrogen in the Pegasus I Cluster of Galaxies”. Busca hidrogen lliure al cúmulo de Pegasus I i estableix un límit superior d'una desena part de la seua massa virial.
- [16] Natarajan, Priyamvada; Chadayammuri, Urmila; Jauzac, Mathilde; Richard, Johan; Kneib, Jean-Paul; Ebeling, Harald; Jiang, Fangzhou; Bosch, Frank van den; Limousin, Marceau; Jullo, Eric; Atek, Hakim; Pillepich, Annalisa; Popa, Cristina; Marinacci, Federico; Hernquist, Lars; Meneghetti, Massimo; Vogelsberger, Mark (2017). Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 468 (2): 1962-1980. Bibcode:2017MNRAS.468.1962N. “Mapping substructure in the HST Frontier Fields cluster lenses and in cosmological simulations”.
- [17] EUROPEAN SPACE AGENCY, NASA, KEREN SHARON (TEL-AVIV UNIVERSITY) AND ERAN OFEK (CALTECH).
- [18] <https://pdg.lbl.gov/2020/reviews/rpp2020-rev-astrophysical-constants.pdf>
- [19] <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA16874>
- [20] Hinshaw, G., D. Larson, E. Komatsu, D. N. Spergel, C. L. Bennett, J. Dunkley, M. R. Nolta, M. Halpern, R. S. Hill, N. Odegard, L. Page, K. M. Smith, J. L. Weiland, B. Gold, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, G. S. Tucker, E. Wollack, i E. L. Wright (2013), ApJS 208, 19, arXiv:1212.5226. “Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results”.
- [21] https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_CMB#.YfLK06F7uLA.link
- [22] https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_Power_Spectrum#.YfLKmT2Dso4.link

- [23] https://www.cosmosim.org/resources/simus/Bolshoi_high-res.jpg
- [24] <https://chandra.harvard.edu/photo/2006/1e0657/more.html>
- [25] <https://motls.blogspot.com/2016/04/consensus-and-concordance-models.html>
- [26] <https://home.cern/news/series/lhc-physics-ten/breaking-new-ground-search-dark-matter>
- [27] Carr, B. J., i S. W. Hawking (1974), MNRAS 168, 399. "Black Holes in the Early Universe".
- [28] Bernard Carr, Kazunori Kohri, Yuuiti i Jun'ichi Yokoyama (2020), arxiv:2002:12778. "Constraints on Primordial Black Holes".
- [29] Bertone, G. (2010), Nature 468, 389, arXiv:1011.3532 [astro-ph.CO]. "The moment of truth for WIMP Dark Matter". Treball actual sobre WIMPs.
- [30] Jeff A. Dror, Hitoshi Murayama i Nicholas L. Rodd (2021), arXiv:2101.09287. "The Cosmic Axion Background". Treball actual sobre axions.
- [31] Kafle, P.R.; Sharma, S.; Lewis, G.F.; Bland-Hawthorn, J. (2014), The Astrophysical Journal. 794 (1). "On the Shoulders of Giants: Properties of the Stellar Halo and the Milky Way Mass Distribution".
- [32] Pato, M., F. Iocco, i G. Bertone (2015), JCAP 1512 (12), 001, arXiv:1504.06324 [astro-ph.GA]. "Dynamical constraints on the dark matter distribution in the Milky Way".
- [33] J. Amare, S. Cebrian, C. Cuesta, E. Garcia, M. Martinez, M.A. Olivan, Y. Ortigoza, A. Ortiz de Solorzano, C. Pobes, J. Puimedon, M.L. Sarsa, J.A. Villar, P. Villar (2015) arXiv:1508.07213. "Status of the ANAIS Dark Matter Project at the Canfranc Underground Laboratory".
- [34] Aprile, E.; et al. (col·laboració XENON) (2018) arXiv : 1805.12562. "Dark Matter Search Results from a One Ton-Year Exposure of XENON1T".
- [35] La col·laboració ADMX; Asztalos, SJ; Carosí, G.; Hagmann, C.; Kinión, D.; van Bibber, K.; Hotz, M.; Rosenberg, L.; Rybka, G.; Hoskins, J.; Hwang, J.; Sikivie, P.; Tanner, DB; Bradley, R.; Clarke, J. (2010) arXiv : 0910.5914. "A SQUID-based microwave cavity search for dark-matter axions".
- [36] Les col·laboracions Fermi-LAT, DES, A. Albert, B. Anderson, K. Bechtol, A. Drlica-Wagner, M. Meyer, M. Sanchez-Conde, L. Strigari, M. Wood, T. M. C. Abbott, F. B. Abdalla, A. Benoit-Levy, G. M. Bernstein, R. A. Bernstein, E. Bertin, D. Brooks, D. L. Burke, A. Carnero Rosell, M. Carrasco Kind, J. Carretero, M. Crocce, C. E. Cunha, C. B. D'Andrea, L. N. da Costa, S. Desai, H. T. Diehl, J. P. Dietrich, P. Doel, T. F. Eifler, A. E. Evrard, A. Fausti Neto, D. A. Finley, B. Flaugher, P. Fosalba, J. Frieman, D. W. Gerdes, D. A. Goldstein, D. Gruen, R. A. Gruendl, K. Honscheid, D. J. James, S. Kent, K. Kuehn, N. Kuropatkin, O. Lahav, T. S. Li, M. A. G. Maia, M. March, J. L. Marshall, P. Martini, C. J. Miller, R. Miquel, E. Neilsen, B. Nord, R. Ogando, A. A. Plazas, K. Reil,

- A. K. Romer, E. S. Rykoff, E. Sanchez, B. Santiago, M. Schubnell, I. Sevilla-Noarbe, R. C. Smith, M. Soares-Santos, F. Sobreira, E. Suchyta, M. E. C. Swanson, G. Tarle, V. Vikram, A. R. Walker, R. H. Wechsler (2016) arXiv:1611.03184 “Searching for Dark Matter Annihilation in Recently Discovered Milky Way Satellites with Fermi-LAT”.
- [37] Jan Heisig, Michael Korsmeier, Martin Wolfgang Winkler (2020) arXiv:2005.04237. “Dark matter or correlated errors: Systematics of the AMS-02 antiproton excess”.