

Choque de paradigmas:

MOND vs Λ CDM

Una visión general de los argumentos científicos

Alfredo Suescun

Examen de Cosmología

20/12/2022

Facultad de Ciencias - UdelaR

Capítulo 1:

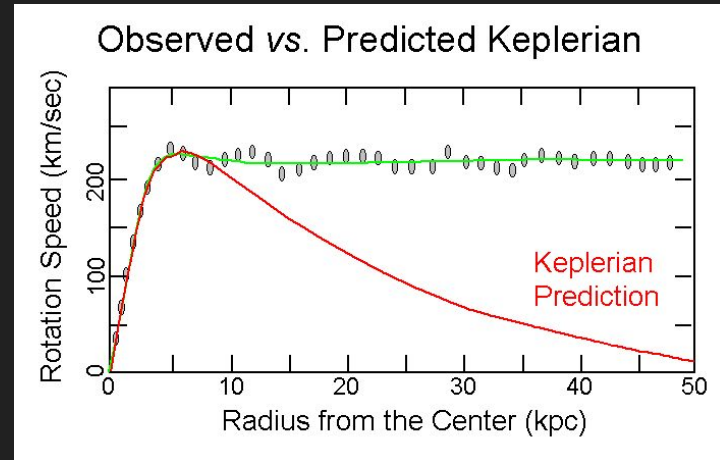
Una aproximación histórica y lógica al problema

Situación: Estudio de las curvas de rotación de galaxias.

Hipótesis:

1. La mayoría de la masa gravitatoria se encuentra en estrellas (y en formaciones de gas), las cuales podemos observar.
2. La aceleración gravitatoria se comporta de igual manera a escala galáctica que a escala local.

Sin embargo, las observaciones no se corresponden con las predicciones teóricas.



(R. Pogge, 2016)

Entonces, ¿Ahora que?

Si la conclusión lógica que se desprende de las hipótesis no se corresponde con la realidad, entonces una de las hipótesis debe ser erróneas.

Propuesta Λ CDM

Hipótesis:

1. ~~La mayoría de la masa gravitatoria se encuentra en estrellas, las cuales podemos observar.~~

Hay una fracción importante de la masa gravitatoria que no son las estrellas, y parecería no poder ser observada (Materia Oscura).

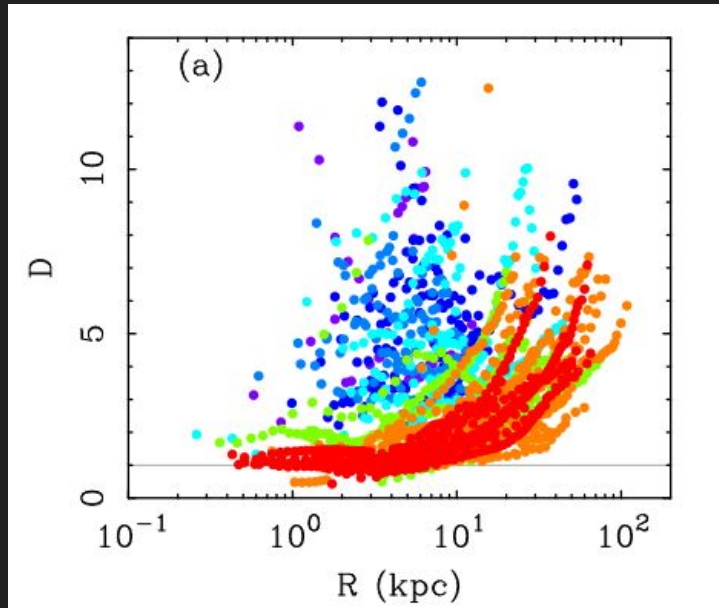
2. La aceleración gravitatoria se comporta de igual manera a escala galáctica que a escala local.

“Número Oscuro”

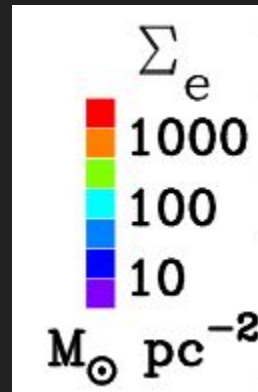
$$1 + 1 = 3 \quad \longrightarrow \quad 1 + 1 + 1 = 3$$

Propuesta Λ CDM

En el universo hay una “Discrepancia de masa”, entre la masa que vemos, y la cual sentimos sus efectos gravitatorios.



(S. McGaug et al, 2016)



Para explicar la velocidad de rotación de galaxias luminosas, a partir de cierto radio es necesario invocar materia oscura.

Para las galaxias menos luminosas, no importa el radio, la materia oscura siempre es importante.

Propuesta Λ CDM

Han habido distintas propuestas de que podría causar esta discrepancia de masa:

- Mini agujeros negros?
- Otro tipo de MACHOS (Massive Astrophysical Compact Halo Object)?
- Neutrinos?
- Otro tipo de partícula?

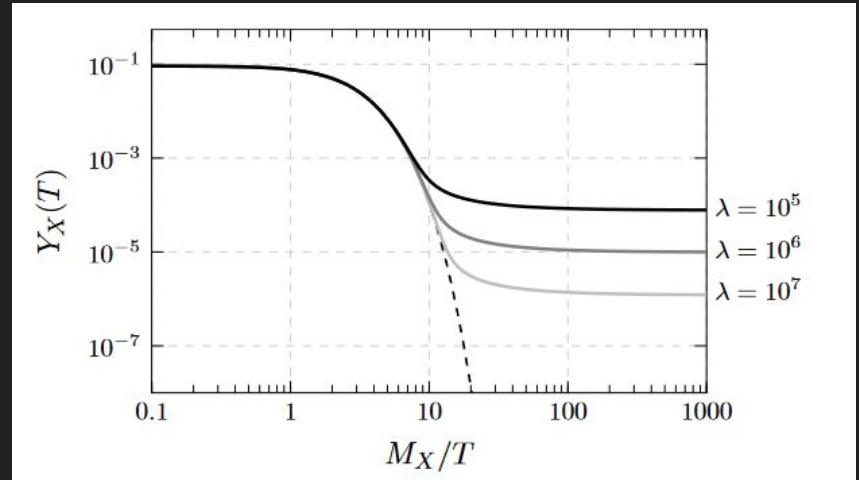
Actualmente el consenso es que la materia oscura está compuesta de WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) no bariónicos.

Debido a su comportamiento no-relativista, se le denomina Cold Dark Matter (CDM)

En conjunto a la energía oscura (Λ) esta teoría se la suele denominar Λ CDM

El milagro de los WIMPS

La física de partículas predice que si una partícula tuviera las propiedades que se espera de la materia oscura, calculando su tasa de aniquilación luego del “Freeze Out” de la materia oscura, nos da un resultado bastante cercano a la densidad esperada de materia oscura en el universo actual.



Tomado del texto de Baumann.

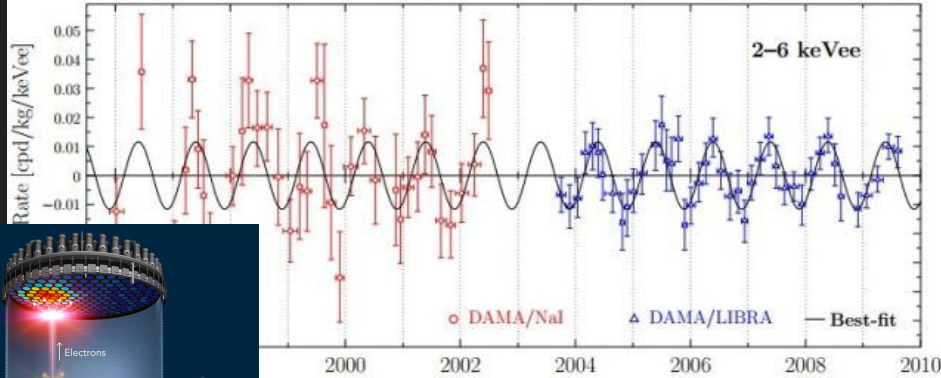
$$\frac{dY_X}{dx} = -\frac{\lambda}{x^2} \left[Y_X^2 - (Y_X^{\text{eq}})^2 \right],$$

Ecuación de Riccati

Problemas de detección.

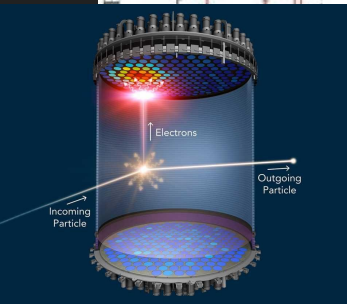
Teorizada previamente por Fritz Zwicky y varios otros científicos, esta teoría toma potencia con la propuesta de Vera Rubin en los 70.

Desde entonces han habido +50 experimentos distintos que propusieron encontrar evidencia concluyente de materia oscura, pero ninguno lo ha logrado.



Experimento DAMA/LIBRA:
Buscaba corroborar la existencia de WIMPS estudiando la velocidad relativa del movimiento terrestre a través del halo de materia oscura.

Parecía dar resultados positivos pero no ha logrado ser replicado, estamos a espera del experimento SABRE que realizará algo similar en Australia en 2023.

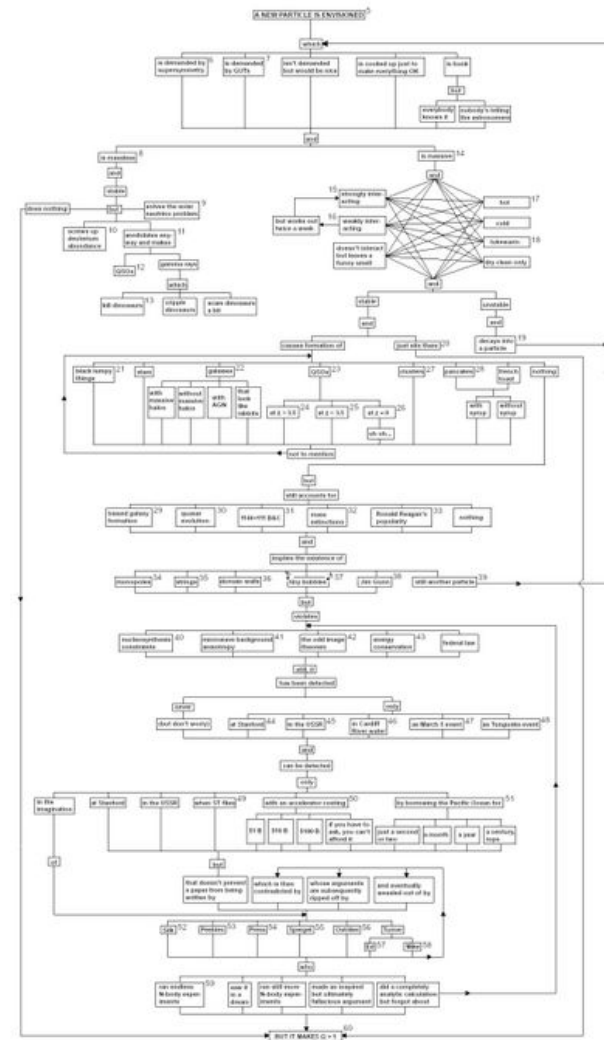
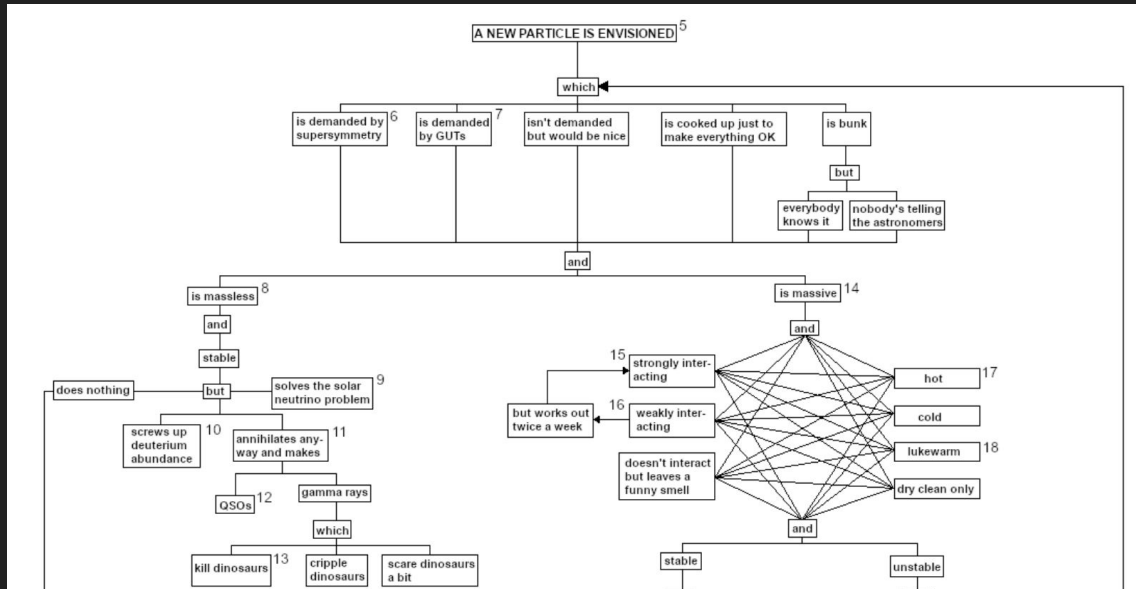


¿Por qué no hemos detectado a la materia oscura todavía?

Claramente debe ser otro tipo de partícula que las discutidas previamente

“La materia oscura es una partícula demanda por supersimetría que es masiva y estable pero de todos modos se aniquilan emitiendo rayos gamma y asustando a los dinosaurios”

(Estudiantes de Princeton, 1986)



¿Por qué estamos tan seguros que la primera hipótesis es la incorrecta? ¿Por qué no modificar la segunda?

Propuesta MOND

Hipótesis:

1. La mayoría de la masa gravitatoria se encuentra en estrellas, las cuales podemos observar.
2. ~~La aceleración gravitatoria se comporta de igual manera a escala galáctica que a escala local.~~

La aceleración gravitatoria se comporta de distinta manera a escala galáctica que a escala local.

Específicamente, MOND propone que existe un cambio de régimen, pero no al llegar a cierta distancia grande, si no cuando se llega a un cierto valor pequeño de aceleración.

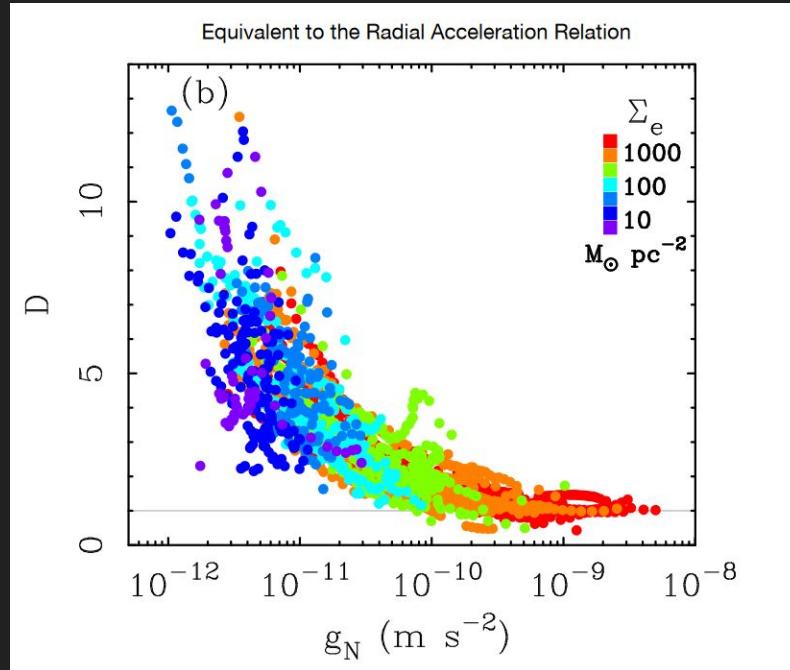
Propuesta MOND

Podemos reinterpretar la discrepancia de masa como una discrepancia de aceleración.

$$D = \frac{a}{g_N}$$

$$a = \frac{V^2}{R}$$

$$g_N = -\frac{\partial\Phi_b}{\partial R}$$



¿Que observamos?

Para aceleraciones altas, no hay discrepancia, esta empieza a aparecer a los 10^{-10} m/s

Si tan solo pudiésemos cambiar la aceleración...

Propuesta MOND

Modified Orbital Newtonian Dynamics (MOND)

Propuesto por Milgrom en 1983:

Newtonian regime

$$a = g_N \text{ for } a \gg a_0$$

MOND regime

$$a = \sqrt{g_N a_0} \text{ for } a \ll a_0$$

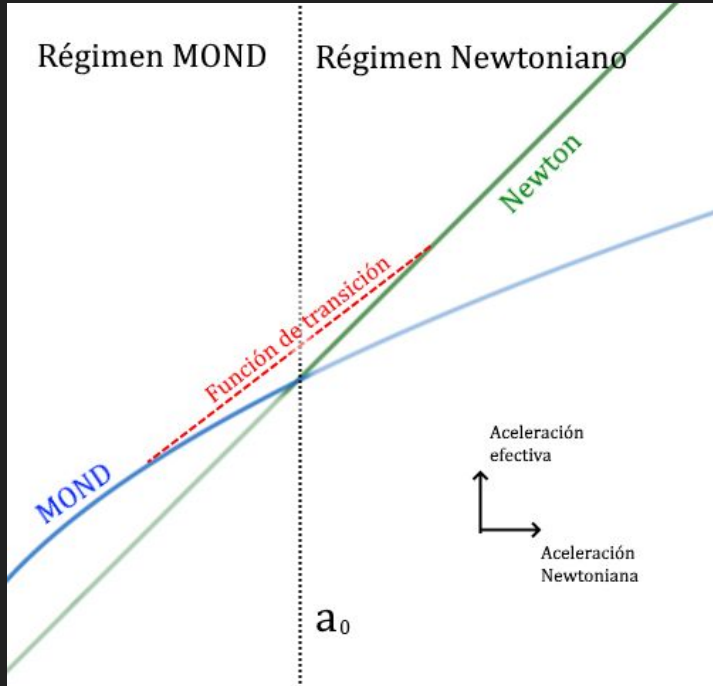
$$a_0 \approx 10^{-10} \frac{m}{s^2}$$

Para que el régimen MOND entre en efecto, la aceleración gravitatoria tiene que ser extremadamente baja.

Propuesta MOND

$$a = \sqrt{g_N a_0} \text{ for } a \ll a_0$$

$$\mu \left(\frac{a}{a_0} \right) a = g_N$$



Aunque esto cumple con un par de propiedades interesantes (que no entiendo del todo)...

$$(t, \mathbf{x}) \rightarrow \lambda(t, \mathbf{x})$$

Invariante bajo transformaciones space-like y time-like

A priori esta formulación de MOND no satisface la conservación de la energía.

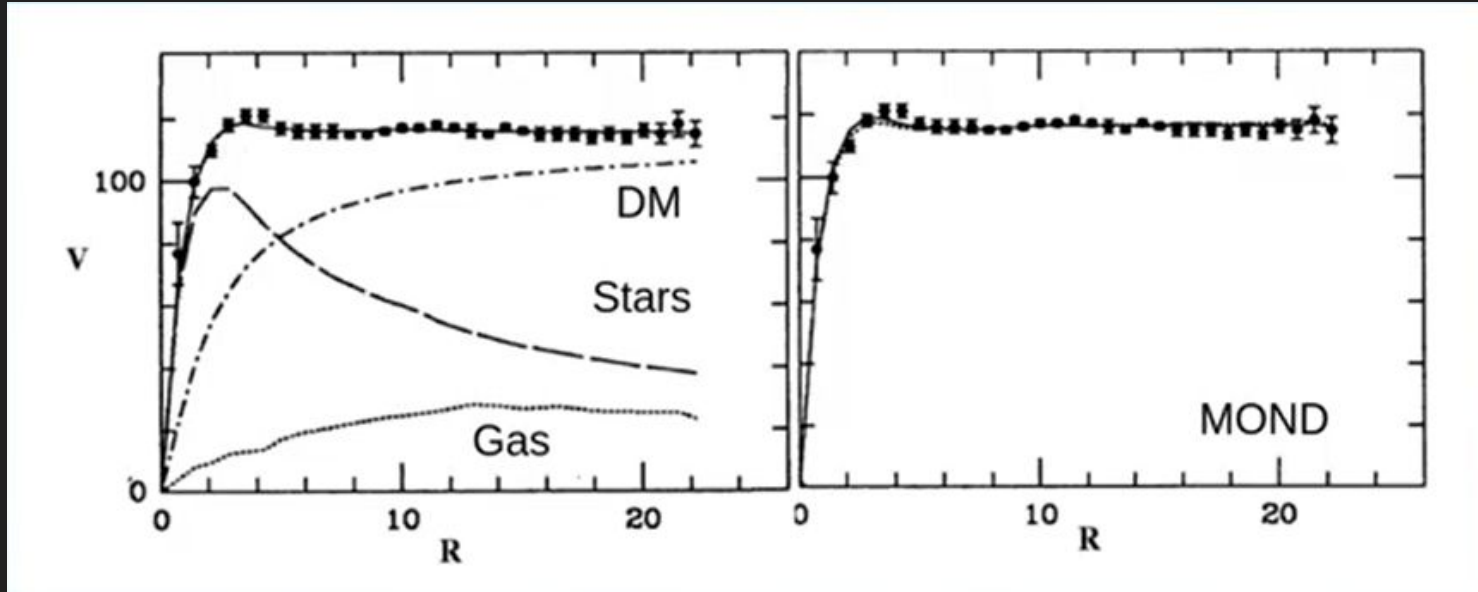
Ecuación de Poisson modificada derivada de un Lagrangiano

$$\nabla \left[\mu \left(\frac{\nabla \Phi}{a_0} \right) \nabla \Phi \right] = 4\pi G \rho$$

Capítulo 2:

¿Quién precisa la materia oscura?

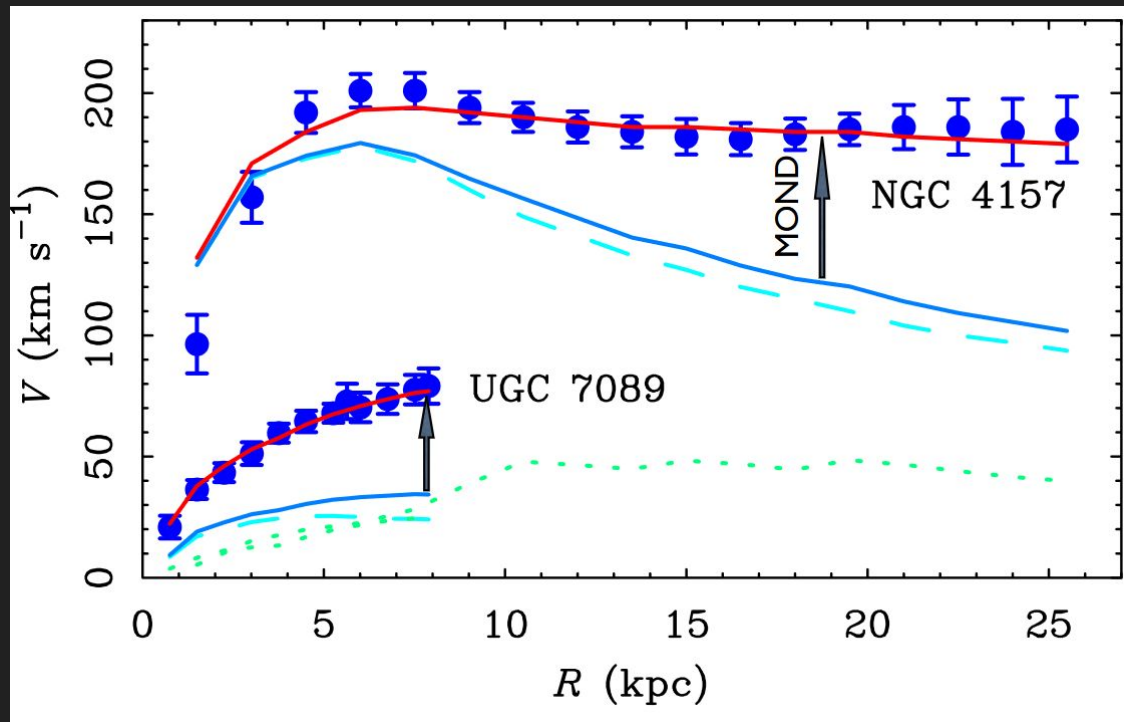
“What you see, is what you have”



(Begeman et al, 1991) - NGC 6503

El pilar fundamental de MOND es que no se precisa invocar materia oscura, se puede recrear la curva de rotación simplemente desde el gas y estrellas.

Curvas de rotación a cualquier escala



MOND predice de forma excelente la curva de rotación para todas las galaxias.

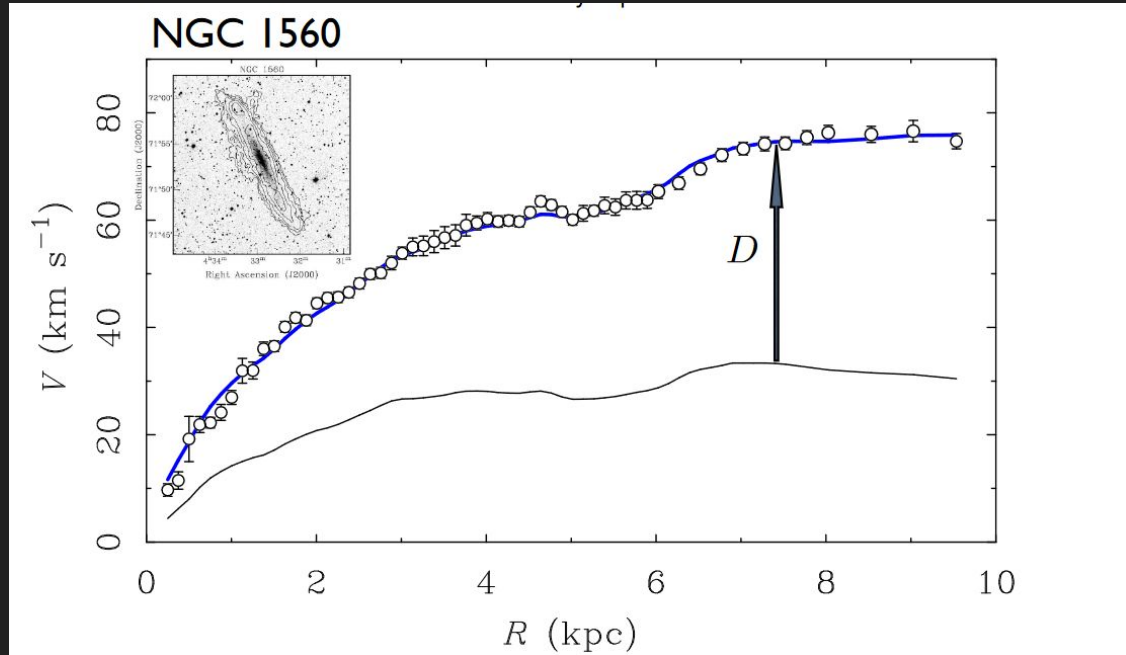
En galaxias de alto brillo superficial (masivas) el ajuste es mínimo hasta salir del bulbo, en galaxias de bajo brillo superficial (menos masivas) es inmediatamente notorio.

Regla de Renzo y Ley de Sancisi.

“For any feature in the luminosity profile there is a corresponding feature in the rotation curve and vice versa.”

Aplicar ciegamente la idea del halo de materia oscura llevaría a que casi todas las galaxias tuvieran el mismo tipo de curva de rotación.

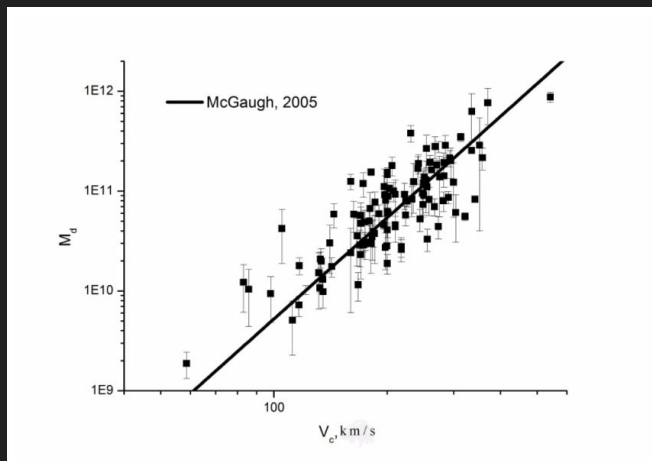
MOND permite variaciones acordes a la regla de Renzo.



Tully-Fisher en MOND

MOND, aunque originalmente solamente pensado como una solución a la curva de rotación, hace mucho más que eso.

Relación Tully-Fisher (1977)



$$V \propto L^\gamma$$

$$L \propto M$$

Para una galaxia plana con órbitas circulares, MOND llega a :

$$a = \sqrt{g_N a_0}$$

$$\frac{V^2}{R} = \sqrt{\frac{GM}{R^2}} a_0$$

$$V^4 = a_0 GM$$

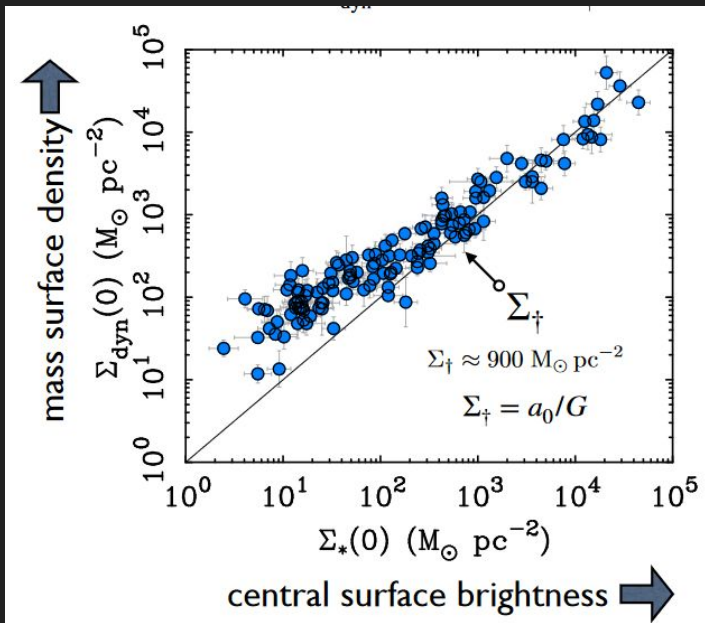
MOND demuestra que esta relación es universal.
“Tully-Fisher Bariónico”

Λ CDM previamente predecía que no se cumpliría para galaxias de bajo brillo superficial.

Densidad de masa y Brillo Superficial

Relación entre la densidad de masa superficial de las galaxias y su brillo superficial central.

Parece una relación evidente, pero bajo Λ CDM estas cantidades no tendrían necesariamente que estar conectadas

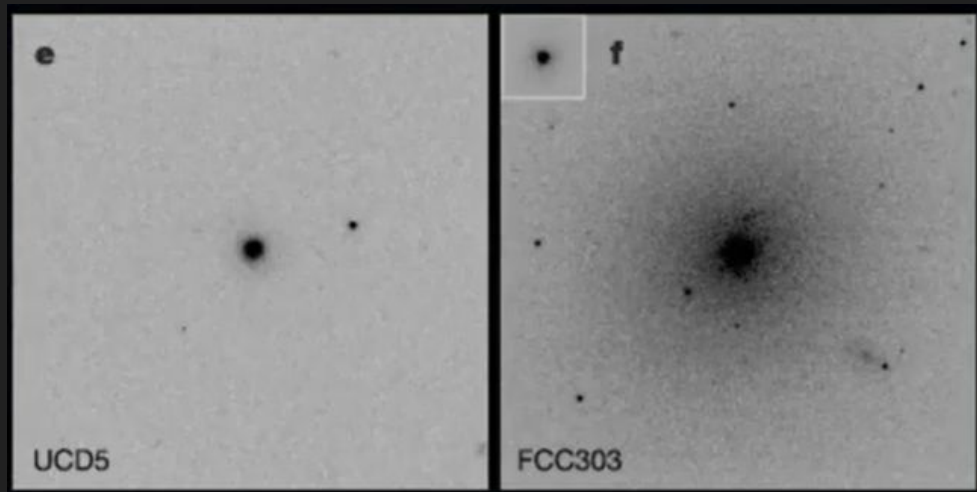


(Lelli et al, 2016)

La teoría de MOND predice una separación de la relación 1:1 aproximadamente en la posición que se observa,

La teoría Λ CDM no prevé este comportamiento y debe realizar fine-tuning.

Galaxias Enanas Ultra Compactas



(Drinkwater et al, 2000)

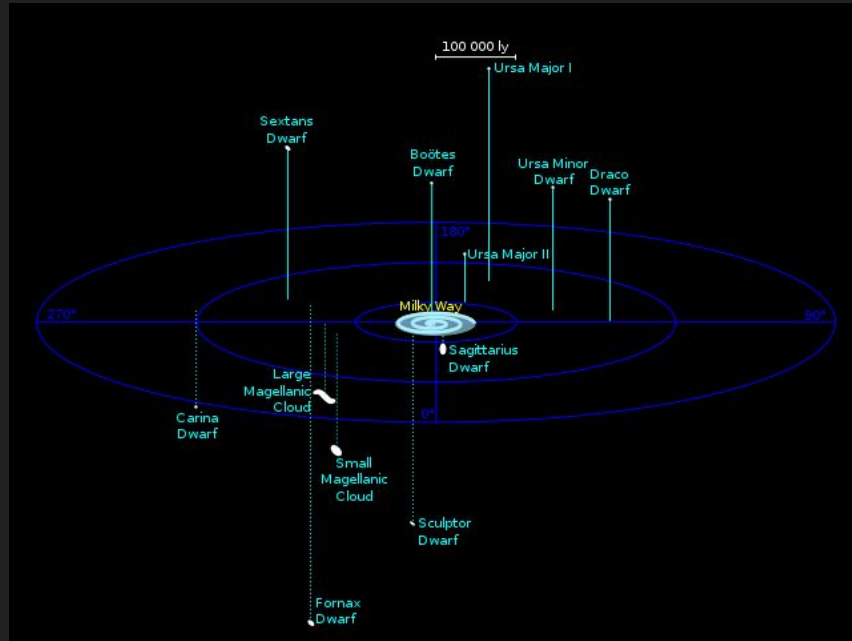
Razonamiento Λ CDM:
Galaxias Enanas presentan gran cantidad de materia oscura ($M/L \approx 100$)

Razonamiento MOND:
Al ser un objeto compacto, la gravedad es Newtoniana.

¿Que se observó? Las curvas de rotación de estos objetos no precisan materia oscura para ser ajustadas.

Fine-Tuning Λ CDM: La materia oscura se perdió junto al Halo de estos objetos.

Otras explicaciones *a priori* de mond



El grupo local presenta menos galaxias satélites que las esperadas bajo Λ CDM

Table 1. MOND Predictions & Tests.

Prediction	Test Positive?	<i>A Priori</i> ?
MASR (Tully-Fisher)		
1. Normalization	Yes	No
2. Slope	Yes	No
3. Mass & Asymptotic Speed	Yes	Yes
4. Surface Brightness Independence	Yes	Yes
Rotation Curves		
5. Flat Rotation Curves	Yes	No
6. Acceleration Discrepancy	Yes	Yes
7. Rotation Curve Shapes	Yes	Yes
8. Surface Brightness & Density	Yes	Yes
9. Detailed Fits	Yes	No
10. Stellar Population Y_*	Yes	—
11. Feature Correspondence	Yes	—
Disk Stability		
12. Freeman Limit	Yes	No
13. Vertical Velocity Dispersions	?	No
14. LSB Galaxy Morphology	Yes	Yes

Pero, ¿Y la Relatividad General?

New Relativistic Theory for Modified Newtonian Dynamics

Constantinos Skordis, Tom Złóśnik (2021)

Campo TeVeS (2005)

+

Campo Vectorial fue cambiando en el tiempo.

New Relativistic Theory for Modified Newtonian Dynamics

Constantinos Skordis¹ and Tom Złóśnik²

¹CEICO, Institute of Physics (PZU) of the Czech Academy of Sciences, Na Slovance 19902, 182 21, Prague, Czech Republic

We propose a relativistic gravitational theory leading to modified Newtonian dynamics, a paradigm that explains the observed universal galactic acceleration scale and related phenomenology. We discuss phenomenological requirements leading to its construction and demonstrate its agreement with the observed cosmic microwave background and matter power spectra on linear cosmological scales. We show that its action expanded to second order is free of ghost instabilities and discuss its possible embedding in a more fundamental theory.

Introduction. – Alternative theories of gravity to general relativity (GR) have received immense interest in the past 20 years or so [1, 2]. The driving force behind this interest is not so much that gravity has not been tested in a large region of parameter space [3], but, more importantly, the cosmological systems residing in some parts of that region exhibit behavior from which dark matter (DM) and dark energy (DE), collectively called the dark sector, are inferred.

While most investigations deal with DE, the hypothesis that the DM phenomenon is due to gravitational degrees of freedom (d.o.f.) has received less attention [4, 5]. Earliest evidence for the existence of DM [6–11] was later supported by observations of the motion of stars within galaxies [12, 13]. Milgrom proposed [20, 22] that this could, instead, result from modifying the inertia or dynamics of baryons or the gravitational law at accelerations smaller than $a_0 = 1.2 \times 10^{-10} \text{m/s}^2$. The latter is further explored in [23] where, if gradients of the potential Φ are smaller than a_0 , non-relativistic gravity is effectively governed by

$$\vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\vec{\nabla} \Phi_1 \vec{\nabla} \Phi_2}{a_0} \right) = 4\pi G \rho_p \quad (1)$$

Here, G is the Newtonian gravitational constant, and ρ the matter density. These models are referred to as modified Newtonian dynamics (MOND).

Much work has gone into deducing astrophysical consequences of MOND in consistency with data [24–26] and alternative DM based explanations of this law [4, 5, 27]. It is inherently non-relativistic and, thus, difficult to test in cosmological settings (but see [8]), as systems such as the cosmic microwave background (CMB) require a relativistic treatment. CMB physics involves only linearly perturbing a Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) background, making it a particularly useful system, devoid of nonlinear modeling systematics, for testing relativistic MOND (RMOND). Relativistic theories that yield MOND behavior have been proposed [23, 28–32] making clear predictions regarding gravitational lensing and cosmology. In cases where the CMB and matter power spectra (MPS) have been computed, no theory has been shown to fit all of the cosmological data while preserving MOND phenomenology in galaxies [33–35], though see [27].

We present the first RMOND theory which reproduces galactic and lensing phenomenology similar to the Bekenstein-Sanders Tensor-Vector-Scalar (TeVeS) theory [33,

34] and, unlike TeVeS, successfully reproduces the key cosmological observables: CMB and MPS. We describe its construction, discuss its cosmology and show that it is devoid of ghost instabilities. We discuss open questions and possibilities toward its more fundamental grounding.

Phenomenological requirements. – RMOND theories have always been constructed on phenomenological grounds rather than based on fundamental principles. Quite likely the reason is that the MOND law is empirical, and even the observation that it is scale invariant [28, 29] has not yet led to a definitive conclusion as to how this invariance could lead to a MOND gravitational theory. RMOND theories should obey the principle of general covariance and the Einstein equivalence principle. There are, however, no not provide any guidance as to how RMOND should look like. Indeed, many theories obeying these have nothing to do with MOND, and many RMOND theories obeying these same principles are in conflict with observations. Principle-based MOND theories include [30–32], however, these are nonrelativistic. Still, the phenomenological approach, that we also follow, can provide valuable guidance toward a more fundamental theory.

What are the necessary phenomenological facts that any successful MOND theory should lead to? It must (i) return to GR (hence, Newtonian gravity) when $\sqrt{\Phi} \gg a_0$ in quasistatic situations while (ii) reproducing the MOND law (1) when $\sqrt{\Phi} \ll a_0$. It should also (iii) be in harmony with cosmological observations including the CMB and MPS, (iv) reproduce the observed gravitational lensing of isolated objects without DM halos, and (v) propagate most mode gravitational waves (GWs) at the speed of light.

We consider each requirement in turn. Clearly, (i) means that when $|\nabla^2 \Phi| \gg a_0$, the standard Poisson equation $\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho_p$ holds while (ii) means that when $|\nabla^2 \Phi| \ll a_0$, the MOND equation (1) holds. While in many cases [36, 37, 38] the transition between (i) and (ii) depends only on $|\nabla^2 \Phi|$, in TeVeS it is facilitated by a scalar d.o.f., σ . We follow the latter and assume that the physics encapsulated by (i) and (ii) sits within the TeVeS framework.

A template nonrelativistic action then, is

$$S = \int d^4x \left[\frac{1}{8\pi G} \left[|\nabla \phi|^2 + \mathcal{J}(\nabla) \cdot \nabla \phi \right] + \mathcal{S}_p \right], \quad (2)$$

where $\phi = \Phi + \psi$ is the potential that couples universally to matter, G is a constant and $\mathcal{J} = |\nabla \phi|^2$. The field ψ obeys

¿El principio de inequivalencia?

MOND sugiere (bastante
controversialmente) que el
principio de equivalencia no se
cumple.

La masa inercial de un objeto, no
se corresponde con la masa
gravitatoria de un objeto.

Esto se conoce como el “External
Field Effect”

Testing the Strong Equivalence Principle: Detection of the External Field Effect in Rotationally Supported Galaxies

Kyu-Hyun Chae¹, Federico Lelli², Harry Desmond³, Stacy S. McGaugh⁴, Pengfei Li⁴, and James M. Schombert⁵

¹Department of Physics and Astronomy, Sejong University, 209 Neungdong-ro Gwangjin-gu, Seoul 05006, Republic of Korea; chae@sejong.ac.kr, kyuhunchae@gmail.com

²School of Physics and Astronomy, Cardiff University, Queens Buildings, The Parade, Cardiff, CF24 3AA, UK; LelliF@cardiff.ac.uk

³Astrophysics, University of Oxford, Denys Wilkinson Building, Keble Road, Oxford, OX1 3RH, UK; harry.desmond@physics.ox.ac.uk

⁴Department of Astronomy, Case Western Reserve University, Cleveland, OH 44106, USA; ssm69@case.edu, pxl283@case.edu

⁵Department of Physics, University of Oregon, Eugene, OR 97403, USA; jschombt@gmail.com

Received 2020 July 21; revised 2020 September 17; accepted 2020 September 23; published 2020 November 20

Abstract

The strong equivalence principle (SEP) distinguishes general relativity (GR) from other viable theories of gravity. The SEP demands that the internal dynamics of a self-gravitating system under freefall in an external gravitational field should not depend on the external field strength. We test the SEP by investigating the external field effect (EFE) in Milgromian dynamics (MOND), proposed as an alternative to dark matter in interpreting galactic kinematics. We report a detection of this EFE using galaxies from the Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves (SPARC) sample together with estimates of the large-scale external gravitational field from an all-sky galaxy catalog. Our detection is threefold: (1) the EFE is individually detected for 80 to 116 “golden” galaxies subjected to exceptionally strong external fields, while it is not detected in exceptionally isolated galaxies, (2) the EFE is statistically detected at more than 4σ from a blind test of 153 SPARC rotating galaxies, giving a mean value of the external field consistent with an independent estimate from the galaxies’ environments, and (3) we detect a systematic downward trend in the weak gravity part of the radial acceleration relation at the right acceleration predicted by the EFE of the MOND modified gravity. Tidal effects from neighboring galaxies in the Λ cold dark matter (CDM) context are not strong enough to explain these phenomena. They are not predicted by existing Λ CDM models of galaxy formation and evolution, adding a new small-scale challenge to the Λ CDM paradigm. Our results point to a breakdown of the SEP, supporting modified gravity theories beyond GR.

Unified Astronomy Thesaurus concepts: Non-standard theories of gravity (1118); Disk galaxies (391); Gravitation (661); Modified Newtonian dynamics (1069)

1. Introduction

The hypothesis that general relativity (GR) and its Newtonian limit hold exactly in the weak gravity regime requires that the universe is permeated by invisible dark matter (DM). The existence of DM is a key assumption of the standard cosmological model Λ cold dark matter (Λ CDM), which has been successful in explaining many cosmological observations on the largest scales of the cosmos (Frenk & White 2012; Peebles 2012). The Λ CDM paradigm, however, is facing several challenges on small scales (Kroupa 2015; Bullock & Boylan-Kolchin 2017), such as the unexpected phase-space correlation of satellite galaxies (“the satellite plane problem”; see, e.g., Kroupa et al. 2016; Müller et al. 2018) and the unexpected coupling in galaxies between the visible matter (barions) and the observed dynamics, usually dominated by the DM halo at large radii (McGaugh et al. 2016; Lelli et al. 2017).

A drastically different idea is represented by the Milgromian dynamics (MOND) paradigm (Milgrom 1983) that modifies the standard laws of dynamics at low accelerations (weak gravitational fields) rather than assuming nonbaryonic DM. Several a priori predictions of MOND have been confirmed by later observations as reviewed by Sanders & McGaugh (2002), Famaey & McGaugh (2012), and McGaugh (2020). The

construction of a MOND cosmology remains a tall order (McGaugh 2015), but the recent relativistic MOND theory of Skordis & Zlosnik (2020) appears promising, being able to reproduce the power spectrum of the cosmic microwave background as good as Λ CDM.

The relativistic theory of Skordis & Zlosnik (2020) reduces to the nonrelativistic modified-gravity theory of Bekenstein & Milgrom (1984), violating the strong equivalence principle (SEP) of GR: the internal dynamics of a self-gravitating body may be affected by external gravitational fields, beyond usual tidal forces. More specifically, these theories violate local positional invariance (LPI) for gravitational experiments, which differentiates the SEP from the less stringent (but well tested) Einstein equivalence principle, containing the weak equivalence principle, Lorentz invariance, and the LPI for nongravitational experiments only (Will 2014).

The radial acceleration relation (RAR) is of particular importance in the DM versus MOND debate (McGaugh et al. 2016; Lelli et al. 2017). This empirical relationship links the observed centripetal acceleration $a_{\text{obs}}(R) = V_{\text{obs}}^2(R)/R$ in galaxies to the expected Newtonian accelerator $a_{\text{New}}(R) = V_{\text{New}}^2(R)/R$ from the observed baryonic matter distribution.

$$a_{\text{obs}} = \mu\left(\frac{a_{\text{New}}}{a_0}\right) a_{\text{New}} \quad (1)$$

where $\mu(x)$ is an empirical fitting function and a_0 is an acceleration scale. In Λ CDM the RAR must arise from the

Λ CDM siempre juega muy seguro, raramente hace predicciones, y con la gran cantidad de parámetros libres que tiene, siempre puede ajustar la teoría a los resultados

“The *concept* of dark matter is not falsifiable. If we exclude one candidate, we are free to make up another one.

-Stacy McGaugh



“Whatever the dark matter is, it has to look, smell, and act like MOND.”

FIN?



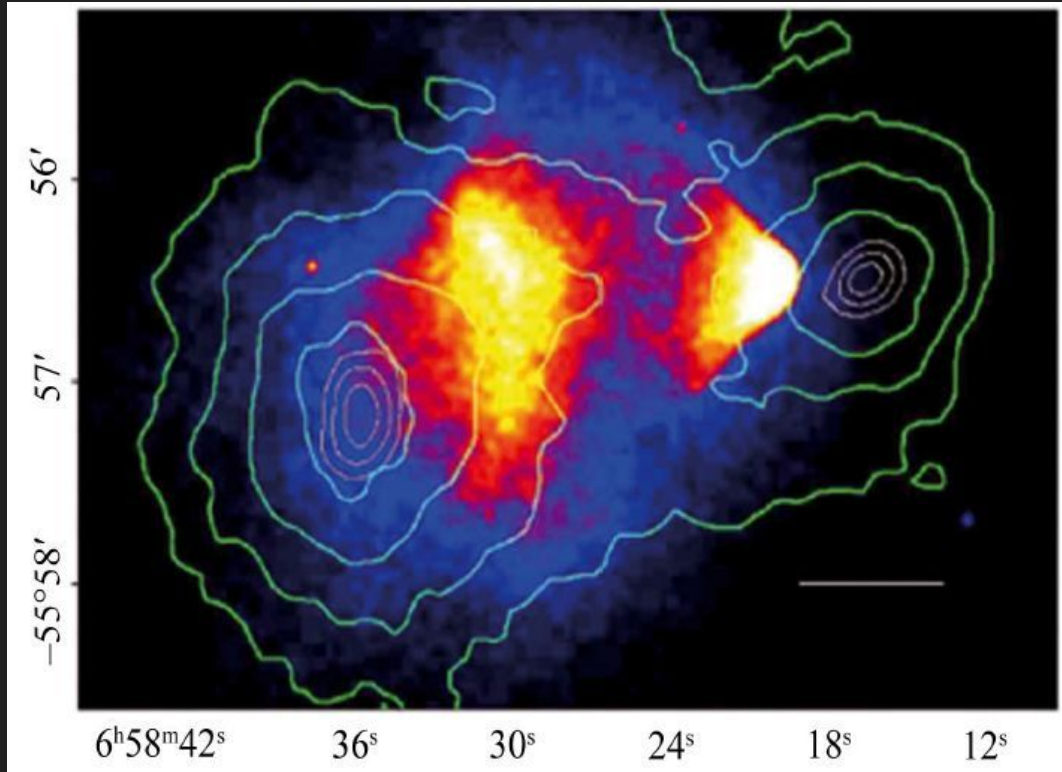
Ustedes, al unísono:

“Pero Alfredo, ¿Que pasa con el Bullet Cluster?”

Capítulo 3:

Una herida de bala para MOND

El Bullet Cluster

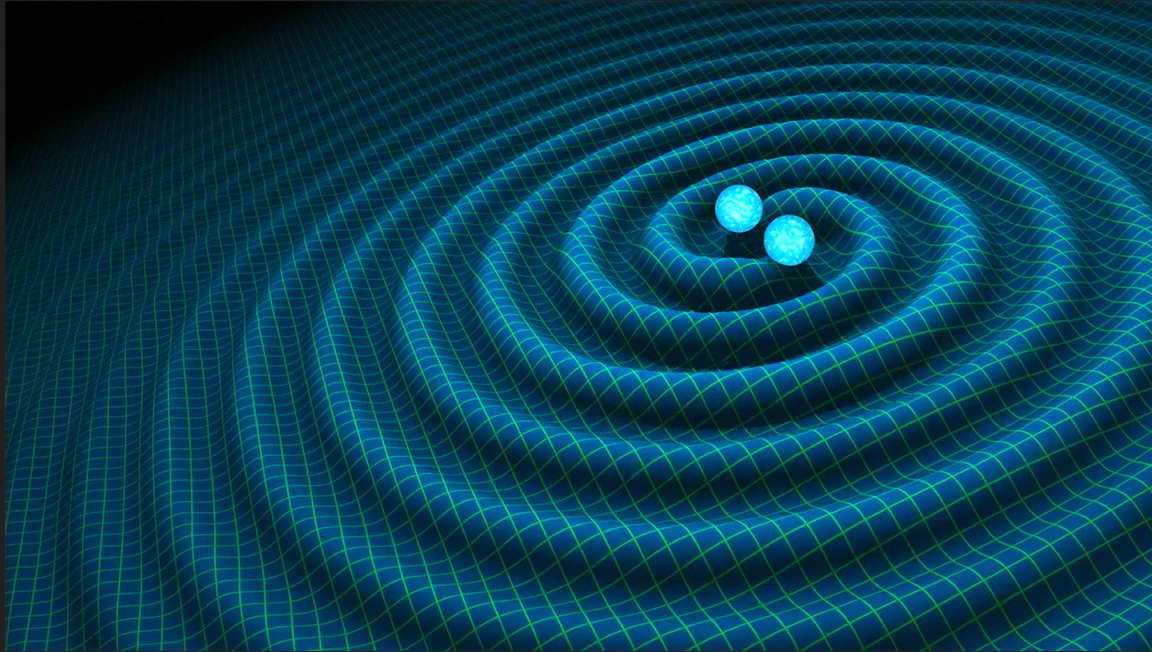


(Markevitch et al, 2002)

El Bullet Cluster es 2 clusters de galaxias que chocan entre sí de frente.

Si no hay materia oscura, ¿Por qué la mayoría del lensing gravitacional parecería darse en regiones vacías?

Predicciones erroneas



Una de las predicciones de MOND era que las ondas gravitacionales no viajan a la velocidad de la luz.

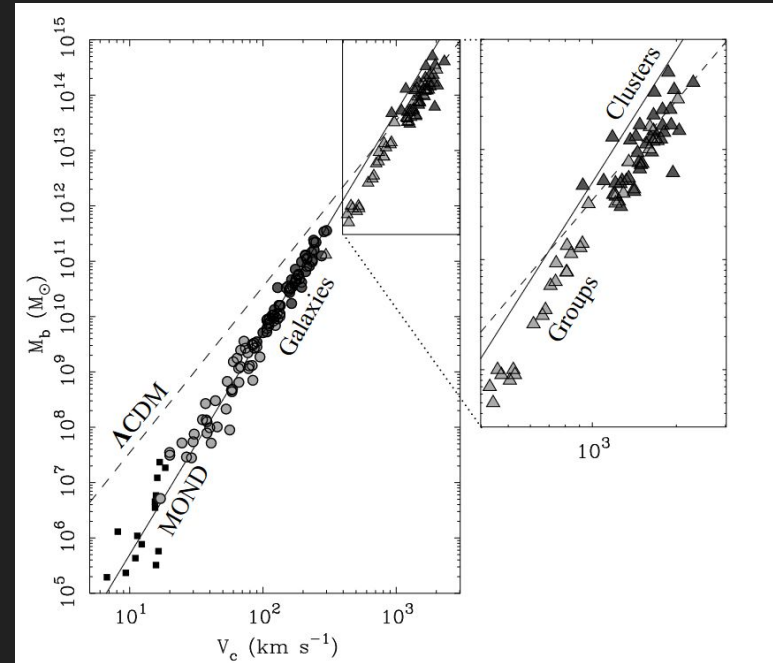
Sin embargo, en 2016, la detección simultánea en LIGO señaló que estas si viajaban a la velocidad de la luz.

Ajusta bien...pero no tan bien

Si uno ajusta MOND a Galaxias, y después lo quiere aplicar a Clusters de Galaxias, hay un problema...

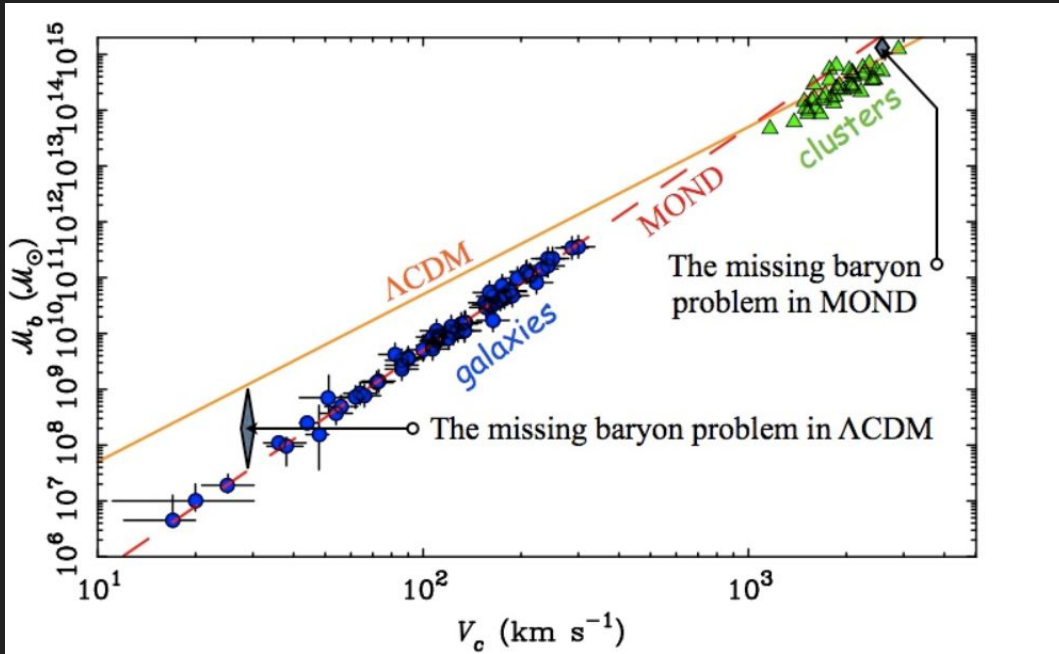
Hay un faltante de materia para poder justificar las órbitas de los clusters.

Es decir la teoría que propone “Lo que es lo que tenes” precisa de partículas invisibles.

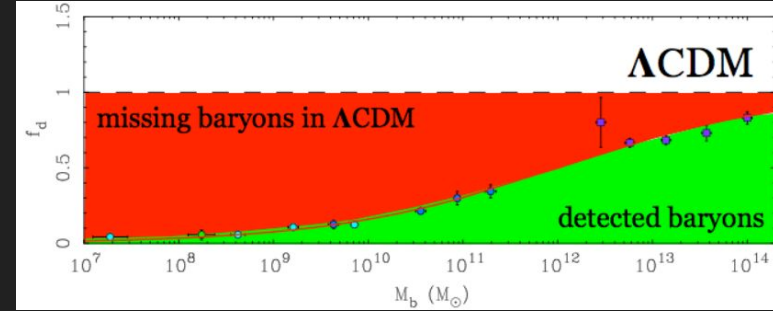


(Sanders et al, 2003)

~~Materia~~ Bariones Oscuros



(McGaugh et al, 2010)



(McGaugh et al, 2010)

MOND y Λ CDM ambos discrepan con las cantidad de bariones sugeridas por la nucleosíntesis primordial.

Problemas en los choques de galaxias.

Bajo Λ CDM, los halos de materia oscura son esenciales para crear fricción entre galaxias que están por chocar, reduciendo la cantidad de estrellas expulsadas.

Sin embargo, bajo MOND, este factor no se tiene en cuenta, llevando a que los “merge times” de estas galaxias sean más lento que el esperado.

Aunque no se tiene claro cuál de ambas teorías predice mejor la realidad, MOND parece tener comportamientos problemáticos.

Interacting Galaxies with MOND

O. Tirit and F. Combes

Observatoire de Paris, LERMA

Abstract. We compare N-body simulations performed in MOND with analogs in Newtonian gravity with dark matter (DM). We have developed a code which solves the Poisson equation in both gravity models. It is a grid solver using adaptive mesh refinement techniques, allowing us to study isolated galaxies as well as interacting galaxies. Galaxies in MOND are found to form bars faster and stronger than in the DM model. In Newton dynamics, it is difficult to reproduce the observed high frequency of strong bars, while MOND appears to fit better the observations. Galaxy interactions and mergers, such as the Antennae, are also simulated with Newton and MOND dynamics. In the latter, dynamical friction is much weaker, and merging time-scales are longer. The formation of tidal dwarf galaxies in tidal tails are also compared in MOND and Newton+DM models.

Observational tests of Λ CDM and MOND

Observational Test	Successful	Promising	Unclear	Problematic
Spiral Galaxies				
galaxy rotation curve shapes	X			X
surface brightness $\sim \Sigma \sim a^2$	X			X
galaxy rotation curve fits	X			X
fitted M^*L	X			X
Tully-Fisher Relation				
baryon based	X		X	
slope	X		X	
normalization	X			X
no size nor Σ dependence	X		X	
no intrinsic scatter	X			X
Galaxy Disk Stability				
maximum surface density	X		X	
spiral structure in LSBGs	X			X
thin & bulgeless disks		X		X
Interacting Galaxies				
tidal tail morphology		X X		
dynamical friction		X X		
tidal dwarfs	X			X
Spheroidal Systems				
star clusters			X X	
ultrafaint dwarfs			X X	
dwarf Spheroidals	X		X	
ellipticals	X X			
Faber-Jackson relation	X X			
Clusters of Galaxies				
dynamical mass	X			X
mass-temperature slope	X		X	
velocity (bulk & collisional)		X		X
Gravitational Lensing				
strong lensing	X X			
weak lensing	X X			
Cosmology				
expansion history	X		X	
geometry	X		X	
big bang nucleosynthesis	X	X		
Structure Formation				
galaxy power spectrum	X			X
BAO scale	X			X
empty voids		X		X
early structure		X X		
Background Radiation				
first/second acoustic peak	X	X		
second/third acoustic peak	X			X
detailed fit	X			X
early re-ionization	X	X		

¿Confirmado entonces?
¿MOND está mal?

Es cierto que a escala de clusters de galaxias Λ CDM parece predecir mejor ciertas cosas, pero esto de ninguna manera falsea a MOND.

Aunque es vergonzoso que a MOND le siga faltando bariones, a Λ CDM también le faltan esos bariones oscuros.

Hay algunas áreas en donde, indudablemente, MOND predice mejor que Λ CDM, otras que no tanto.

Capítulo 4:

¿Qué tiene que decir la Cosmología de este asunto?

Viejos amigos, nuevos amigos

El desarrollo de la cosmología va mano en mano con el modelo Λ CDM, son viejos amigos que crecieron juntos.

Esto sin embargo hace complejo hilar donde es que el modelo Λ CDM hizo predicciones correctas, y donde es que simplemente se apoyó en las observaciones cosmológicas de la época. Se corre el riesgo de un fine-tuning excesivo, pero igualmente brinda elegantes soluciones.

MOND carece de su propia cosmología, pero podemos aplicar el espíritu de MOND a la cosmología sugerida por Λ CDM y ver qué cambios aparecen en el universo.

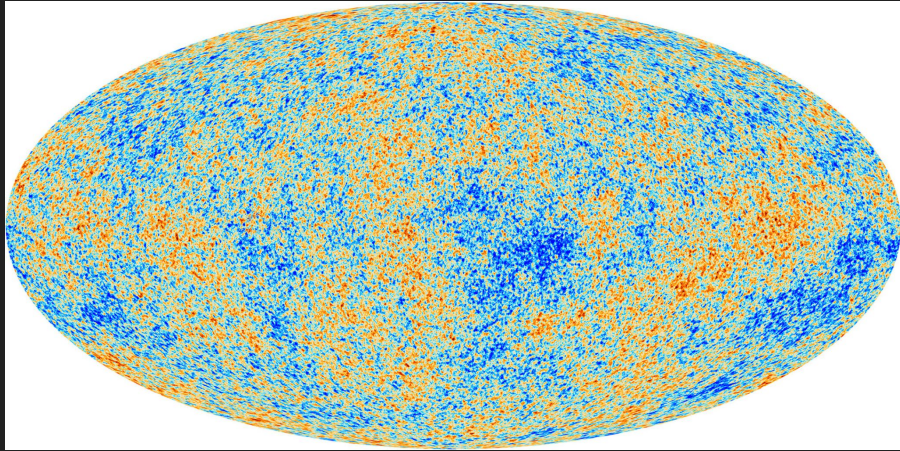
FUNDAMOND: Historia del Universo de MOND

Una primera asunción que debemos hacer es asumir que a_0 no varía con el tiempo.

Al principio, durante la época dominada por radiación, el universo Λ CDM y MOND se comportan de igual manera. La primera diferencia surge en que en MOND no ocurre el “Freeze-Out” de la materia oscura.

Como el universo MOND tiene menos materia, la igualdad “radiación-materia” se da mucho después, no en $z_{\text{eq}} \approx 3300$, si no en $z_{\text{eq}} \approx 400$. Pero obviando ese detalle la evolución es igual.

Formación de estructura en Λ CDM



Esta predicción es una de las grandes victorias de Λ CDM.

En Λ CDM, la materia oscura es una pieza fundamental para la formación de estructura que vemos ahora.

Debido a que la Materia Oscura se separa de la sopa primordial antes que la materia bariónica, esta va formando estructuras a la cual la materia bariónica puede ir enseguida ocurre el desacople, facilitando la formación.

Formación de estructura en MOND

“En MOND hay menos tiempo, menos masa, y no existen los pozos de potencial previos, sería imposible formar la estructura que se ve actualmente”

MOND and the Galaxies

F. Combes^a and O. Tiret^b

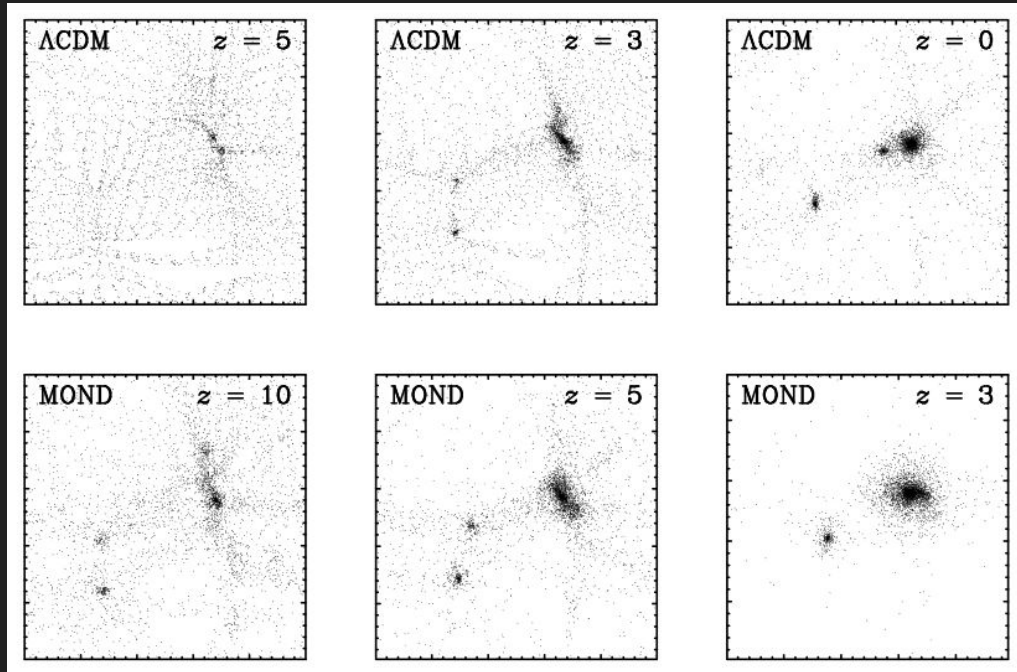
^a*Observatoire de Paris, LERMA, 61 Av de l'Observatoire,
F-75014 Paris, France*

^b*SISSA, via Beirut 4, I-34014 Trieste, Italy*

Abstract. We review galaxy formation and dynamics under the MOND hypothesis of modified gravity, and compare to similar galaxies in Newtonian dynamics with dark matter. The aim is to find peculiar predictions both to discriminate between various hypotheses, and to make the theory progress through different constraints, touching the interpolation function, or the fundamental acceleration scale. Galaxy instabilities, forming bars and bulges at longer term, evolve differently in the various theories, and help to bring constraints, together with the observations of bar frequency. Dynamical friction and the predicted merger rate could be a sensitive test of theories. The different scenarios of galaxy formation are compared within the various theories and observations.

Sin embargo, con simulaciones computacionales sin materia oscura y con MOND se logra encontrar la misma cantidad de estructura a gran escala que la que se observa en la realidad.

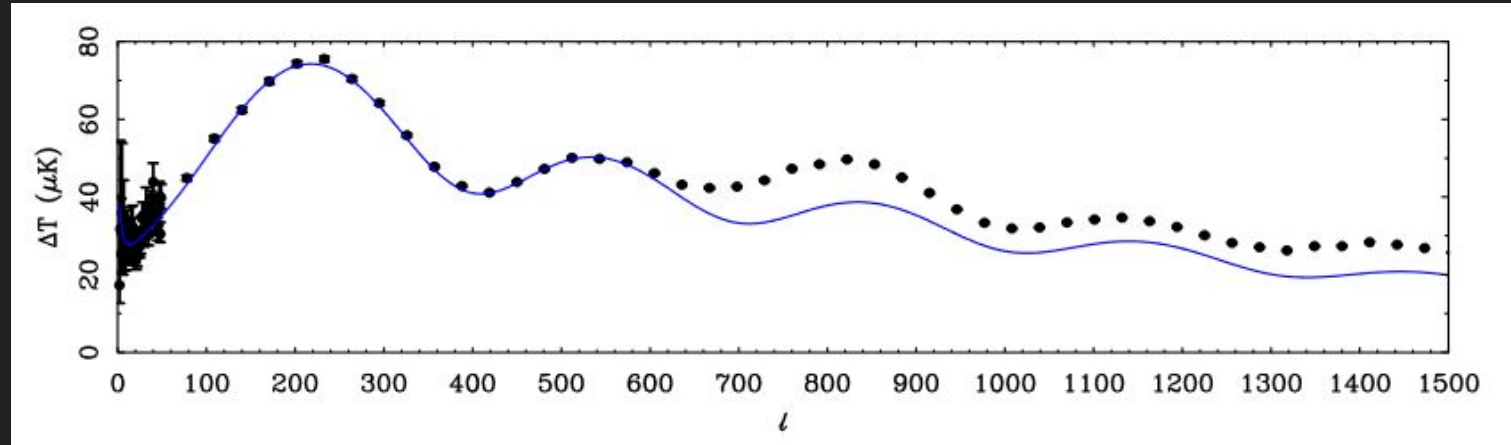
Como forma estructura MOND?



Al haber menos masa total, el régimen MOND tiene más libertad para actuar, creando formaciones de manera drástica.

Sin embargo, MOND corre el peligro de sobre-crear formaciones.

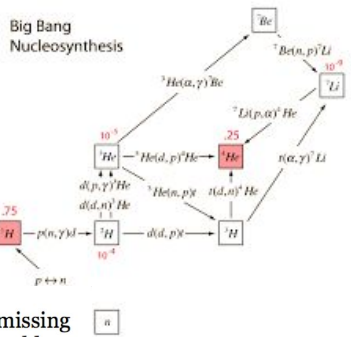
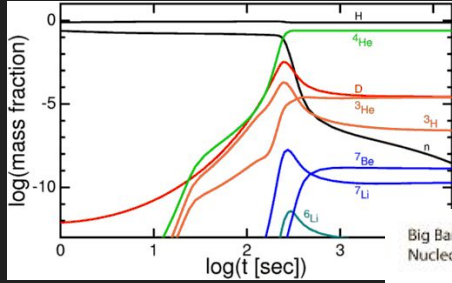
Power Spectrum del CMB



El power spectrum nos informa la distancia angular entre las distintas formaciones del Universo.

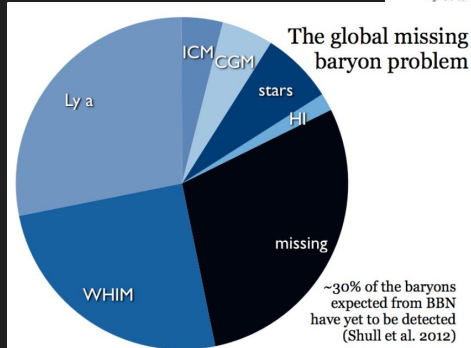
MOND logró predecir de forma correcta la relación entre el primer y el segundo pico, sin embargo predecía una disminución en el tercer pico, que no fue observada.

Nucleosíntesis.



No existen diferencias en cómo ambos modelos tratan la Nucleosíntesis, y en ambos ocurre el problema de que hay menos bariones observados que lo que sugiere la nucleosíntesis.

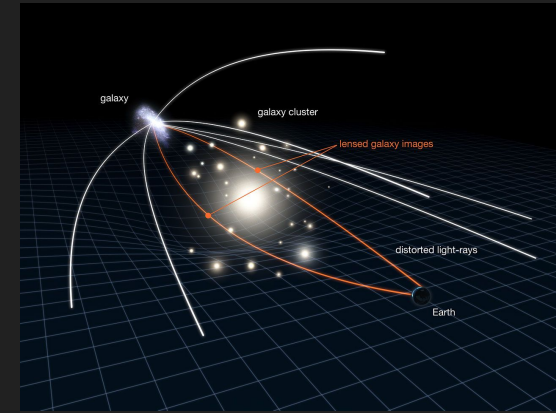
Para MOND es un problema embarazoso pero que a la vez es una excusa conveniente. Para Λ CDM es una observación más.



Lentes gravitacionales.

El modelo Λ CDM logra predecir de forma concreta los efectos de lentes gravitacionales con la ayuda de Relatividad General.

El modelo de MOND que incluye la relatividad general es bastante nuevo, por lo que no se ha podido evaluar en profundidad su concordancia con las observaciones, sin embargo evaluaciones básicas parecerían sugerir que MOND logra describir estos efectos cualitativamente.



Capítulo 5:

¿Qué aprendimos de todo esto?

¿Vale la pena seguir investigando MOND?

“A possibly less fraught question is: Has the Milgromian research program exhibited enough evidence of progress that one should consider devoting one’s time to it? – given that doing so would probably entail one’s not continuing to work on the standard cosmological model. I am going to risk the ire of standard-model cosmologists (and probably also some philosophers) by answering ‘yes,’ but with one qualification:

The most striking successes of the Milgromian research program are associated with theory variants T0 and T1 . Given the background knowledge that existed c. 1980 (e.g. the known, asymptotic flatness of galaxy rotation curves), the proposal that the kinematics of any disk galaxy could be predicted, with high accuracy, from the observed distribution of normal matter alone was amazingly bold: rather as if one had predicted that the gravitational field of a planet is determined by (say) its spin angular momentum, or its surface area. There was simply no basis, under the standard model, for believing any such thing, and yet it turned out to be correct.”

- A Philosophical Approach to MOND (229-230), David Merritt.

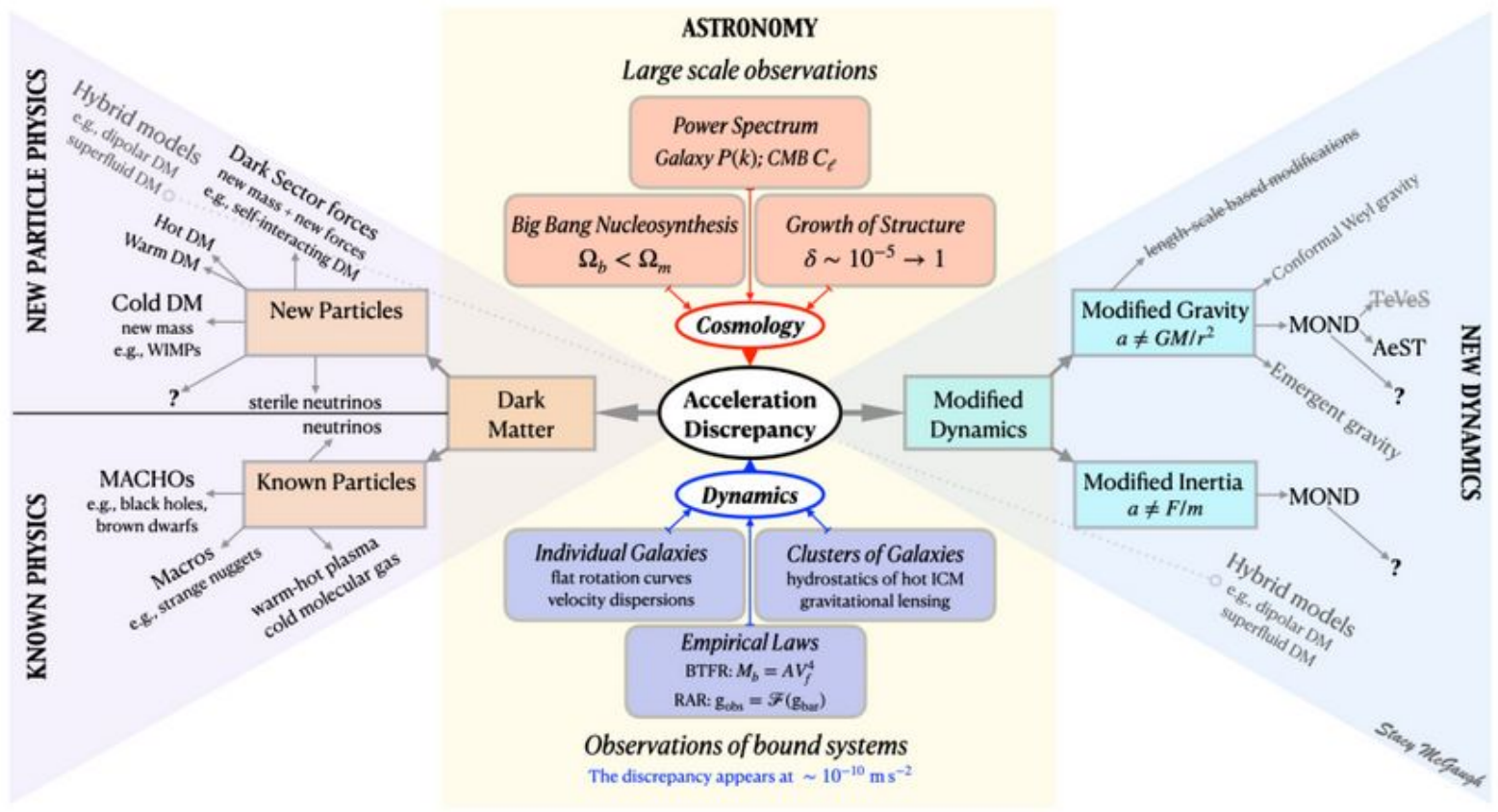
¿Cuál de ambas teorías está mal entonces?

Una actitud que suelen tener los defensores de Λ CDM es “La pregunta ya no es entre Materia Oscura y MOND, si no entre Materia Oscura solo, o Materia Oscura Y MOND”

Esta actitud es usada para desprestigiar a MOND, e implicar que como independientemente tiene fallas, no vale la pena seguir investigando.

Sin embargo el modelo previo a Λ CDM, SCDM también presentaba sus problemas, pero no fue rechazado en su totalidad, si no que el modelo Λ CDM fue construido encima de él.

MOND también ha soportado diversos intentos de falsificarlo.



Conclusión

Aunque MOND claramente tiene sus problemas, no puede ser inmediatamente desechada debido a la alta cantidad de predicciones *a priori* que ha tenido.

Sin embargo, es muy difícil descartar la idea de materia oscura, ya que brinda soluciones a problemas críticos que presenta la teoría MONDIANA.

La solución parecería encontrarse en un punto medio entre estas teorías.

Habrà que seguir buscando la respuesta en las estrellas...



¿Preguntas?

Para ver las referencias más importantes utilizadas y material adicional dirigirse a:

<https://pastebin.com/cVxnSWQd>