



UN NUEVO PARADIGMA COSMOLÓGICO: MODIFICACIÓN A GRAN ESCALA DE LA GRAVITACIÓN

NELSON FALCON. 

Universidad de Carabobo. Facultad Experimental de Ciencia y Tecnología. Dpto. de Física,
Laboratorio de Física de la Atmosfera y Espacio Ultraterrestre. Carabobo, Venezuela.

nelsonfalconv@gmail.com

Recibido: 20/07/2025, Revisado: 05/08/2025, Aceptado: 12/08/2025

Resumen

Se propone un término correctivo a la ley de Newton basado en el principio de Mach, un campo tipo Yukawa inverso, dependiente de la distancia comóvil. Este ajuste finito a la gravitación explica curvas de rotación galáctica, la masa virial en cúmulos de galaxias y la constante cosmológica sin invocar materia oscura no bariónica. Se integra en la cosmología FRW, deduciendo la ley de Hubble-Lemaître y ofreciendo una interpretación natural de la energía oscura. Se discuten implicaciones astrofísicas en virialización, corrimiento al rojo gravitacional y lente gravitacional, además de abordar la tensión de Hubble. Se concluye que esta modificación a gran escala de la gravitación es una alternativa mensurable al paradigma de materia oscura y se sugiere líneas futuras de investigación en la dinámica de cúmulos galácticos y la formación de estructuras.

Palabras clave: Gravitación modificada, Principio de Mach, Materia oscura, Ley de Hubble-Lemaître.

A New Cosmological Paradigm: Large-Scale Modification of Gravitation

Abstract

A corrective term to Newton's law is proposed based on Mach's principle, a comoving distance-dependent inverse Yukawa-type field. This finite adjustment to gravitation explains galactic rotation curves, the virial mass in galaxy clusters, and the cosmological constant without invoking non-baryonic dark matter. It is integrated into FRW cosmology, deducing the Hubble-Lemaître law and offering a natural interpretation of dark energy. Astrophysical implications for virialization, gravitational redshift, and gravitational lensing are discussed, in addition to addressing the Hubble strain. It is concluded that this large-scale modification of gravitation is a measurable alternative to the dark matter paradigm, and future research directions in galaxy cluster dynamics and structure formation are suggested.

Key words: Modified gravitation, Mach's principle, Dark matter, Hubble-Lemaître law..

1. Introducción

Para describir la dinámica del Universo, a escala astronómica y cosmológica, se considera que la única interacción entre estrellas o galaxias es la gravitación. Más específicamente, se asume a priori la validez universal de la Ley de Newton, según la cual la fuerza de la gravedad viene dada por el inverso del cuadrado de la distancia. Recordemos que incluso la Relatividad General asume la validez de la Ley de la gravitación de Newton, considerando que este es el límite al que tiende la interacción gravitacional en la aproximación del campo débil.

La Ley del Cuadrado Inverso de la distancia asume un rango infinito para la interacción gravitacional. Sin embargo, la cosmología prescribe el radio finito del universo (radio de Hubble). Entonces surge un problema epistemológico: ¿cómo puede una interacción tener un rango mayor que el universo mismo? El rango infinito de gravitación implica necesariamente una masa cero para el gravitón, lo que contradice la existencia de ondas gravitacionales detectadas. Durante las últimas dos décadas, la colaboración LIGO-Virgo ha realizado observaciones de ondas gravitacionales emitidas por la fusión de un sistema binario. En estas observaciones, el rango de masa del gravitón se limitó a menos de 10^{-60} kg (Gao, 2023), lo que sugiere que el rango de la fuerza gravitacional es finito y, por lo tanto, contradice la ley de gravitación de Newton.

Si bien es cierto que la validez de la ley de la gravedad del cuadrado inverso de Newton se ha verificado con precisiones superiores a 10^{-4} para experimentos similares a los de Eötvös, no existe evidencia empírica de su validez más allá del sistema solar; se asume cierta para estimar la masa de estrellas binarias. Al utilizar la gravedad newtoniana (la ley de la gravedad del cuadrado inverso)

para describir la dinámica de los objetos dentro del sistema solar, asumimos la aproximación de dos cuerpos y despreciamos las contribuciones de las demás estrellas. Esto se justifica, en primer lugar, porque la masa del Sol es mucho mayor que la de todos los demás componentes del sistema solar y, en consecuencia, el problema reducido de dos cuerpos puede abordarse perturbadoramente.

Y segundo, porque el movimiento dentro del sistema solar es tal que la distancia de comorbilidad es insignificante en relación con la distancia interestelar y, por lo tanto, las contribuciones gravitacionales de las demás estrellas de nuestra galaxia son aproximadamente las mismas en todos los puntos de la trayectoria, es decir, en una esfera gaussiana con un radio mucho menor que la distancia interestelar media (del orden de cuatro años luz). Pero estas suposiciones no se cumplen para rangos de distancia de comorbilidad del orden de kiloparsecs y megaparsecs. Dentro de un cúmulo de galaxias, el campo gravitacional alrededor de una galaxia individual también debe contener contribuciones de todas las demás galaxias cercanas; su suma total no es necesariamente cero, ya que las galaxias dentro de los cúmulos no tienen una distribución esférica homogénea y las distancias de comorbilidad no son mucho menores que la separación media entre galaxias, y su interacción gravitacional múltiple no puede despreciarse.

Por lo tanto, si la inercia local está relacionada de alguna manera con la distribución a gran escala de la materia en el Universo (Principio de Mach), la ley de gravitación de Newton es insuficiente para describirla.

Claramente, no es posible calcular explícitamente esa contribución global (debida a la distribución a gran escala de la materia) a la fuerza gravitacional entre dos partículas. Einstein lo intentó mediante el término cosmológico Λ , pero quedó pendiente cómo

modelar su equivalente en distancias estelares dentro de una galaxia dada y dentro de cúmulos de galaxias. Por otra parte, la gravitación estándar, basada en la ley del cuadrado inverso de la distancia y su equivalente relativista de rango infinito, conduce a serias dificultades en la descripción del Universo: (i) No puede explicar las curvas de rotación de las galaxias, que muestran su incompatibilidad con las masas virializadas de las galaxias, (ii) Dentro de los ricos cúmulos de galaxias, la masa inferida es significativamente menor que la requerida para mantener estos sistemas gravitacionalmente estables (problema de la masa faltante de Zwicky), y (iii) en escalas cosmológicas, la densidad de materia bariónica observada es mucho menor que la predicha por los modelos cosmológicos de Friedman-Robertson-Walker con constante cosmológica (Λ FRW) y curvatura nula.

Para resolver las incompatibilidades entre las observaciones astronómicas y la gravitación, a escalas superiores al sistema solar, se ha conjeturado la existencia de materia exótica denominada materia oscura, más precisamente, materia oscura no bariónica. Esta materia oscura no estaría compuesta por elementos químicos de la tabla periódica ni por los componentes básicos del Modelo Estándar de Física de Partículas, en abierta contradicción con los experimentos terrestres y la observación espectral (visible, infrarrojo, rayos X, ultravioleta y rayos gamma).

Por lo tanto, el problema de la masa faltante se ha convertido en un paradigma. La historia de la ciencia ha mostrado numerosos ejemplos de supuestos paradigmáticos cuya revisión crítica condujo a su abandono y sustitución por alternativas mensurables para comprender la naturaleza. Recordemos los epiciclos de Ptolomeo hasta el siglo XVII, el paradigma del flogisto en el siglo XVIII y el éter en el siglo XIX, antes del advenimiento

de la relatividad especial. Por lo tanto, la interacción gravitatoria entre dos estrellas o entre dos galaxias sería la prescrita por la ley del cuadrado inverso de Newton más una contribución adicional de las masas distantes, que no necesitan ser las mismas para diferentes puntos del espacio; ya que, a gran escala, la distribución de masa no es esférica con su centro en el marco de observación local.

Entonces, la hipótesis general es que todas las partículas con masa están sujetas a la fuerza de la gravedad a través de la ley de la gravitación del cuadrado inverso, más un término adicional que varía con la distancia de co-movimiento causada por la distribución a gran escala de la masa bariónica, en el sentido del principio de Mach. En la sección 2 se discute la fenomenología y el origen de este término correctivo del potencial gravitacional, En la sección 3 se muestran los resultados de la cosmología Λ FRW con gravedad modificada sin incluir materia oscura y la deducción teórica de la Ley de Hubble-Lemaître, En la sección 5 se discuten las implicaciones astrofísicas y finalmente se muestran las conclusiones en la última sección.

2. Modelo Fenomenológico

La idea general es que todas las partículas con masa en reposo no nula están sujetas a la fuerza de la gravedad a través de la ley del cuadrado inverso de la gravitación, más un término adicional que varía con la distancia comóvil (Falcon 2013, Falcon y Aguirre 2014, Falcon 2021). Esta contribución complementaria a la ley del cuadrado inverso sería causada por la distribución a gran escala de la masa bariónica, en el sentido del principio de Mach. El término de fuerza adicional sería cero en rangos de distancia comóvil del orden del Sistema Solar, débilmente atractivo en rangos de distancia interestelar, muy atractivo en rangos de distancia comparables a los cúmulos de galaxias y repulsivo a escalas cósmicas

(Figura 1). Llamamos a este término, debido a su forma, campo inverso tipo Yukawa (U_{YF}).

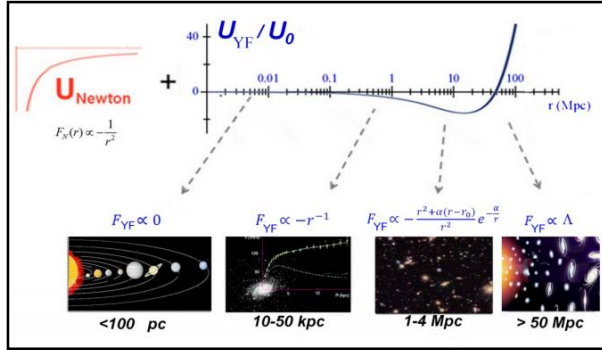


Fig. 1. Modificación a gran escala del pensamiento gravitacional del Campo U_{YF} en escala astronómica para diferentes rangos de la distancia comóvil.

Entonces, la fuerza gravitacional tendría un rango finito, del orden de megapársecs. En estructuras a gran escala con dimensiones superiores a 10 Mpc, existe un vínculo gravitacional entre las galaxias, mediante una cadena secuencial de atracciones gravitacionales entre sus componentes vecinos, pero no mediante un centro común. Cabe destacar que asumir un rango infinito para la gravedad implicaría, entre otras cosas, imaginar masas colosales para el centro atractor en los súper cúmulos de galaxias, que son inobservables (Agujeros Negros Hipermasivo).

Considerando los primeros momentos de la formación del Universo (superficie de última dispersión), la energía promedio por unidad de masa (U) puede expresarse para cada nucleón (N) a la temperatura T_d del plasma durante la recombinación, utilizando la distribución de Boltzmann, como el trabajo requerido para mover el protón desde la posición inicial, hasta la distancia de comovimiento r con respecto al centro de la nube protogaláctica, de masa M , como:

$$\langle U \rangle \equiv \langle \frac{u}{N} \rangle = -U_0(r_0 - r)e^{-\frac{\varepsilon}{k_B T}} \quad (1)$$

Donde k_B representa la constante de Boltzmann, U_0 es una constante y ε es la energía del protón. Esta energía es únicamente energía cinética, que podría expresarse en términos de la energía gravitacional de las nubes protogalácticas que se forman posteriormente, por lo tanto:

$$U_{YF} \equiv \langle U \rangle = U_0(r - r_0)e^{-\frac{\alpha}{r}} \quad (2)$$

Con

$$\alpha = \frac{Gm_p M}{k_B T_d} = \frac{4\pi G m_p}{3k_B T_d} r_0 \rho_c \quad (3)$$

Donde se ha usado ($k_B T_d \approx 13,6$ eV). M and r_0 denotan la masa y el radio promedio de la protogalaxia respectivamente y ρ_c la densidad crítica. $U_0 \equiv U_0(M) = 4\pi l GM r_0^{-1}$ es una constante de acoplamiento en unidades de J/kg y $l \equiv 1 \text{ m}^{-1}$ es un parámetro dimensional. Se obtiene así $r_0 = 47.12 \text{ Mpc} \sim 50 \text{ Mpc}$ y $\alpha = 2.47 \text{ Mpc} \sim 2.5 \text{ Mpc}$. Un modelo exacto requerirá ajustar los valores de las constantes de acoplamiento sin modificar la fenomenología,

La fuerza por unidad de masa (aceleración) complementaria a gran escala de la gravitación Newtoniana resulta:

$$F_{YF}(r) \equiv -\vec{\nabla} U_{YF} = U_0 e^{-\frac{\alpha}{r}} \left(1 + \frac{\alpha}{r} - \frac{\alpha r_0}{r^2} \right) \quad (4)$$

Nótese que la fuerza máxima ocurre en $r_m \approx 1.2 \text{ Mpc}$ que es el orden del radio de Abell en cúmulos de galaxias. También cuando r es despreciable entonces $F_{YF} \approx 0$, es decir, la gravedad solo está prescrita por la ley del cuadrado inverso de la gravitación, de acuerdo con experimentos tipo Eötvös. Para rangos de distancias comóviles en kiloparsec, entre objetos débilmente ligados gravitacionalmente, obtenemos $F_{YF} \sim r^{-1}$, por lo tanto, los resultados de MoND-Milgrom se recuperan como un caso particular, y podrían aplicarse para resolver el

problema de las curvas de rotación de galaxias. La fuerza F_{YF} es nula en $r_c \cong 11.2$ Mpc, en el orden del valor promedio de transición suave a aglutinación fuerte en la distribución de galaxias; y en concordancia con la masa no nula del gravitón de acuerdo con los resultados de las ondas gravitacionales.

3. Cosmología Λ FRW

Consideremos ahora un modelo cosmológico habitual del Big Bang (Λ FRW), con un tensor de energía-momento homogéneo e isótropo FRW-métrico para un fluido perfecto, entonces obtenemos las ecuaciones de Friedman habituales con constante cosmológica Λ y curvatura nula ($k=0$):

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{\Lambda c^2}{3} \quad (5)$$

$$\frac{2\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = -\frac{8\pi G}{c^2}P + \Lambda c^2 \quad (6)$$

Donde \mathcal{R} es el tensor de curvatura de Riemann, P y ρ denotan la presión y la densidad, respectivamente. Como es habitual, c denota la constante de velocidad de la luz y G la constante de aceleración de la gravedad.

Ahora, asumimos que L es una variable cósmica con respecto a la distancia comóvil. Cabe destacar que la covarianza está garantizada porque a escalas cosmológicas (rangos de la distancia comóvil: $r \gg 50$ Mpc) la F_{YF} es constante (Fig. 1). En estas escalas cosmológicas, las galaxias se describen como partículas de polvo mediante el tensor de energía de impulso para fluidos perfectos. Por lo tanto, la energía oscura puede considerarse una «fuerza cósmica» en el sentido del principio de Mach, causada por la materia ordinaria, mediante el término cosmológico Λ :

$$\Lambda \equiv \Lambda_0 F_{YF}(r) = -\frac{3H_0}{c^3} \frac{dU_{YF}(r)}{dr} \quad (7)$$

Donde H_0 es el valor presente de la rata de expansión y la constante de acoplamiento es $\Lambda_0 \equiv 3H_0 c^{-3} \cong 0.31 \cdot 10^{-42} \text{m}^{-3} \text{s}^{-2}$. Donde $r \rightarrow r_m$, el parámetro cosmológico Λ , en escala intergaláctica resulta: $\Lambda(r_m) \approx (397.73 \text{ kg m}^{-2}) \text{GH}_0 c^{-3}$. En consecuencia, la ecuación de Friedman es ahora:

$$0 = H_0^2 [(\Omega_b + \Omega_b \Omega_{YF}) + \Omega_\Lambda - 1] = H_0^2 [\Omega_m + \Omega_\Lambda - 1] \quad (8)$$

Donde se ha empleado los parametros de densidad estandars: $\Omega_b = \rho/\rho_c$, $\Omega_\Lambda = \Lambda c^2/3H_0^2$, para la densidad de materia y el termino cosmológico respectivamente, junto a la definición $\Omega_{YF} \equiv \Lambda(r_m)c^2/3H_0^2$.

Ahora bien, el resultado notable es que el parámetro de materia oscura fría (Ω_c) podría interpretarse ahora, como la contribución gravitacional causada por la distribución a gran escala de la materia bariónica ordinaria: $\Omega_m = (\Omega_b + \Omega_b \Omega_{YF}) = \Omega_b + \Omega_c$ sin postular la existencia de partículas exóticas desconocidas (materia oscura no bariónica). Por lo tanto, como $\Omega_{YF} \approx 10.42$ y usando $\Omega_b \approx 0.0223$ y $\Omega_\Lambda \approx 0.6911$ (Falcon 2021), se obtiene $\Omega_m \approx 0.255$ y $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 0.255 + 0.6911 \approx 1$.

Consideremos los fotones emitidos desde una galaxia remota con velocidad de recesión v , y su observación en el sistema de referencia local. Por lo tanto, deberíamos evaluar la U_{YF} en $r \gg 50$ Mpc, con condición inicial $v = 0$ en $t = 0$. Encontramos:

$$V = \int a \, dt = \int \left(\lim_{r \rightarrow \infty} F_{YF} \right) \frac{dr}{c} \cong \left(\frac{U_0}{c} \right) r \quad (9)$$

Remplazando la constante de acoplamiento $U_0 = 4\pi G \text{ kg m}^{-2}$, se obtiene la ley de Hubble-Lemaître (Falcon y Aguirre 2014, Falcon 2021):

$$V = \left(\frac{4\pi G \ell}{c} \right) r \equiv H_0 r \cong \left(86.3 \frac{\text{km}}{\text{sMpc}} \right) r \quad (10)$$

Donde $\ell \equiv 1 \text{ kg m}^{-2}$ es un parámetro dimensional. Nótese que el valor de H_0 es el límite superior teórico, evaluado para los objetos más distantes ($r \gg 50 \text{ Mpc}$). También la energía oscura podría interpretarse como la aceleración cósmica en marcos locales, causada por la distribución a gran escala de la materia bariónica ordinaria, como lo prescribe el Principio de Mach, a través del potencial U_{YF} . En efecto cuando $r \rightarrow r_c$, el parámetro cosmológico $\Lambda(r)$ en escalas intergalácticas es ahora: $\Lambda(r_c) \cong 0.623 (3H_0^2 c^{-2})$. Usando aquí el límite superior para el parámetro de Hubble $H_0 = 86.3$, obtenemos $\Omega_\Lambda \approx 0.72$ en buen acuerdo con las medidas de la expansión mediante observaciones de supernovas SNIa.

Por otra parte, en el universo temprano, durante la era de la recombinación, la distancia comóvil tiende hacia el horizonte material. $r/r_0 \rightarrow 0.778$ entonces, usando (9), se obtiene $H_0 \approx 67,15 \frac{\text{km}}{\text{sMpc}}$, mientras que si $r/r_0 \rightarrow 0.86$ entonces $H_0 \approx 74,22 \frac{\text{km}}{\text{sMpc}}$ (Fig. 2).

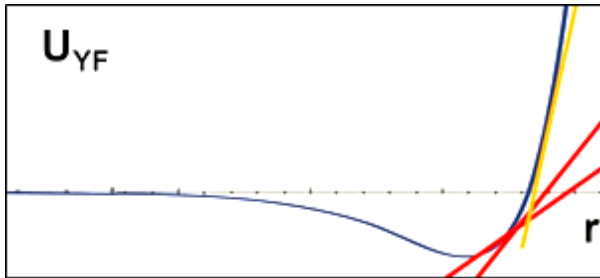


Fig. 2. La pendiente en la gráfica del potencial U_{YF} da el valor de la Constante de Hubble, su valuación a distintas distancias comoviles explica la denominada Tensión de Hubble.

Estos resultados abren nuevas posibilidades para comprender la llamada tensión de Hubble, es decir, la aparente incompatibilidad entre las mediciones del parámetro de Hubble utilizando las anisotropías del Fondo Cósmico de Microondas (CMB) y las mediciones directas utilizando supernovas de tipo Ia.

4. Implicaciones Astrofísicas

En la década de 1930, Zwicky propuso el enfoque de la materia oscura, basándose en la incompatibilidad entre la gravedad newtoniana y los residuos de velocidad medidos en los cúmulos de galaxias. El problema de la masa faltante surgió al aplicar el Teorema del Virial para calcular la masa a partir del radio y la velocidad radial proyectados en los cúmulos de galaxias, lo que resultó en una masa virial calculada cien veces mayor que la inferida a partir de la luminosidad observada en el Grupo Local y la vecindad estelar solar.

Consideremos la expresión del virial de Clausius $G \equiv \sum_i \vec{p}_i \cdot \vec{r}_i$ cuando se deriva con respecto al tiempo y luego se promedia con respecto a un período completo (τ):

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{dG}{dt} dt = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \sum_i -\vec{\nabla} U_i \cdot \vec{r}_i dt + \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \sum_i \frac{p_i^2}{2m_i} dt \quad (11)$$

Si las partículas están sujetas únicamente al potencial newtoniano, obtenemos la conocida relación entre las energías cinética (T) y potencial (U): $\langle U \rangle = 2\langle T \rangle$. Pero si ahora las partículas están sujetas a un potencial gravitatorio con un término adicional de largo alcance, como U_{YF} , tenemos:

$$\langle U \rangle + \langle U_{YF} \rangle = 2\langle T \rangle + \frac{1}{\tau} \int_0^\tau U_0 \left(\alpha - \frac{\alpha r_0}{r} \right) e^{-\alpha/r} dt \quad (12)$$

Resulta que la masa virializada es ahora, en promedio, 500 veces menor que la calculada originalmente con el potencial gravitacional newtoniano (Falcon 2025), compatible entonces con la relación masa-luminosidad observada en los cúmulos de galaxias. Se resuelve la paradoja de Zwicky sin recurrir a la materia oscura no bariónica,

gracias a la adición de la energía de enlace del campo U_{YF} .

El corrimiento al rojo astronómico total es la suma del corrimiento al rojo Doppler debido al movimiento emisor-receptor, el corrimiento al rojo causado por el campo gravitacional (corrimiento al rojo gravitacional) y el corrimiento al rojo cosmológico debido a la expansión cósmica. El componente gravitacional del corrimiento al rojo es directamente proporcional al campo gravitacional. Ahora bien, el sistema inercial proporciona, a través del U_{YF} , una contribución adicional al corrimiento al rojo gravitacional que aumenta con la distancia comóvil.

Cuando la distancia a la fuente es inferior a unos pocos Mpc, el término adicional es insignificante. Sin embargo, esto es importante en otros casos, ya que dos galaxias a la misma distancia y en posiciones muy diferentes podrían presentar un corrimiento al rojo diferente debido al sistema inercial local (U_{YF}). Esto podría resolver la controversia de Arp.

Si la distribución a gran escala de la materia, representada por el potencial U_{YF} , causa un cambio en el potencial gravitacional efectivo en el corrimiento al rojo gravitacional, entonces se esperaría que también afectara la curvatura de la luz en el formalismo de lente gravitacional. El efecto de la curvatura del espacio-tiempo en la trayectoria de la luz dentro de la lente gravitacional se describe en términos del índice de refracción efectivo, directamente proporcional al campo gravitacional. La inclusión del campo U_{YF} aumenta el ángulo de deflexión de la lente gravitacional. En consecuencia, las estimaciones de la masa de la lente gravitacional se habrían sobreestimado (Falcon 2025) de manera análoga al problema de la masa faltante de Zwicky. Obviamente, esto no afecta la observación de la desviación de la luz en caso

de un eclipse solar total, ya que la U_{YF} se desprecia a escala del sistema solar (Fig.1).

En el formalismo habitual del crecimiento estructural y la formación de galaxias, se parte de oscilaciones acústicas adiabáticas (BAO). Para BAO, se asume la relación $\Omega_m = \Omega_b + \Omega_c$. Es fácil ver que la modificación a gran escala de la gravitación newtoniana como enfoque alternativo para la materia oscura fría produciría un resultado idéntico para BAO, debido a la identidad aritmética $\Omega_m = (\Omega_b + \Omega_b \Omega_{YF}) = \Omega_b + \Omega_c$ previamente deducida.

El término materia oscura fría puede entonces interpretarse como la energía asociada con la contribución gravitacional del sistema inercial sin invocar la existencia de materia no bariónica exótica (Falcon 2023).

5. Conclusiones y perspectivas.

Vemos que la inclusión de una modificación a gran escala de la gravedad newtoniana podría ser una alternativa viable al paradigma de la materia oscura no bariónica, permite teóricamente deducir la ley empírica de Hubble, ofrece una interpretación "natural" de la energía oscura y es concomitante con la cosmología FRW y la física habitual.

Independientemente de si la expresión propuesta para el llamado campo inverso de tipo Yukawa (U_{YF}) es exactamente la propuesta aquí, se ha demostrado que la inclusión de un término gravitacional adicional que varía con la distancia podría incorporar explícitamente el Principio de Mach como alternativa teórica al paradigma de la materia oscura no bariónica. Esta modificación a gran escala de la gravitación, con una función comóvil dependiente de la distancia, sería compatible con la cosmología FRW, los observables astronómicos y el alcance finito de la gravedad.

La modificación a gran escala de la

gravedad, debería tener consecuencias en varios aspectos relevantes de la astrofísica: la dinámica observada de los cúmulos globulares que no siguen estrictamente la 3ra Ley de Kepler, la dinámica dentro de los cúmulos de galaxias y las colisiones (*merging of galaxies*) observadas en ellos, y modificaría también el cálculo de la fragmentación de nubes auto gravitantes y las protogalaxias (longitud de Jeans). Estos temas escapan del alcance del presente trabajo, y su estudio se presenta en este mismo volumen en varios artículos relacionados.

6. Agradecimientos

Se agradece el financiamiento del Ministerio del Poder Popular para la Ciencia y Tecnología a través del proyecto CFP 20250000038: Modificación a gran escala de la Gravedad: alternativa a la Materia oscura y Energía Oscura del Universo.

7 Bibliografía

Falcon, N. 2013. Modification of the Newtonian Dynamics in Λ FRW-Cosmology an Alternative Approach to Dark Matter and Dark Energy. JMP 319. 10-18. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=36069>

Falcon, N., Aguirre A. 2014. Theoretical Deduction of the Hubble Law Beginning with a MoND Theory in Context of the Λ FRW-Cosmology. IJAA. 4. 551-559. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=51478>

Falcon, N. 2021. A large-scale heuristic modification of Newtonian gravity as an alternative approach to dark energy and dark matter. J Astrophys Astron 42. 102. <https://link.springer.com/article/10.1007/s1>

[2036-021-09752-0](https://doi.org/10.23880/oaja-16000103/abstract)

Falcon, N. 2023. Modified Gravitation and Mach's Principle: An Alternative to the Dark Matter and Dark Energy Cosmological Paradigm. OAJA 1 (1): 000103 <https://medwinpublishers.com/OAJA/article/10.23880/oaja-16000103/abstract>

Falcon, N. 2025. Zwicky's Missing Mass: Dark Matter versus Modified Gravity. OAJA 3 (1): 000156 <https://medwinpublishers.com/OAJA/article/10.23880/oaja-16000156/abstract>

Gao, Q. (2023). Constraint on the mass of graviton with gravitational waves. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 66(2), 220411. <https://doi.org/10.1007/s11433-022-1971-9>