

Primer taller: Más allá del Modelo Estándar y Astropartículas

Materia oscura escalar bicomponente.

Lucía E. Gutiérrez

Instituto de Física
Universidad Nacional Autónoma de México.

March 15, 2023



Objetivo:

- Analizar la viabilidad de un modelo de materia oscura compuesta por dos campos escalares.

Falta de señales en la búsqueda directa e indirecta de materia oscura.



Figure: Cúmulo bala. Crédito : X-ray : NASA / CXC/ CfA / M.Markevitch et al. ; Lensing Map : NASA / STScI; ESO WFI; Magellan / U.Arizona/ D.Clowe et al. Optical : NASA/STScI; Magellan / U.Arizona / D.Clowe et al.;

Modelo de referencia

Campo escalar clásico complejo

- $V(|\phi|) = \mu^2 |\phi|^2 + \sigma^2 |\phi|^4$
- $m_\phi \simeq 10^{-21} \text{eV}$
- Completamente no interactuante con otro tipo de materia.
- Estructura del Universo ¹
- Estructura armónica de las perturbaciones ²
- Perfiles de v_{rot} y halos galácticos ³
- Evita la súper abundancia de galaxias satélites

¹Schive, Chiueh, and Broadhurst, "Cosmic Structure as the Quantum Interference of a Coherent Dark Wave"; Mocz et al., "Galaxy formation with BECDM – II. Cosmic filaments and first galaxies"

²Cembranos, Maroto, and Núñez Jareño, "Cosmological perturbations in coherent oscillating scalar field models"; Amendola, "Perturbations in a coupled scalar field cosmology"

³Bernal, Matos, and Nunez, "Flat central density profiles from scalar field dark matter halo"

Candidatos

Candidatos escalares:

- Higgs-like (Cuántico)
- Axion-like (Cuántico)

Axión en QFT

- Bosón de Goldstone
- U(1) SSB, f_a
- $m_a \approx 6\mu\text{eV} \left(\frac{10^{12}\text{GeV}}{f_a} \right)$
- Escala de física no perturbativa Λ_a
- $V_a(\Phi_a) = \Lambda_a^4 \left[1 - \cos \left(\frac{\Phi_a}{f_a} \right) \right]$
- Axion-like
- $m_a \nleftrightarrow$ correcciones radiativas de QCD

Higgs-like

- Doblete $SU(2)$ de alguna Extensión del SM
- $\Phi_h = \begin{pmatrix} \Phi^+ \\ \Phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \Phi_1 + i\Phi_2 \\ \Phi_3 + i\Phi_4 \end{pmatrix}$
- Higgs inerte y estable
- $\Phi^0 \rightarrow \text{DMC}$
- $V_h(\Phi_h) = m_h^2 (\Phi_h^\dagger \Phi_h) + \frac{\lambda_h}{2} (\Phi_h^\dagger \Phi_h)^2$
- $m_h \sim \text{GeV}$

Modelos cuánticos



Modelos de campo clásico que se puedan incluir en la acción gravitacional y que obedezcan una ecu. semiclásica de movimiento (K-G).

Acoplamiento con el campo gravitacional.

Consideramos dos campos escalares cosmológicos (ψ_1, ψ_2), que contribuyen a la densidad de energía y materia del Universo y los acoplamos a la gravedad,

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{c^4}{16\pi G} R + \mathcal{L}_{\Phi_1, \Phi_2} \right). \quad (1)$$

En donde,

$$2\mathcal{L}_{\Phi_1, \Phi_2} = -\nabla^\mu \Phi_1^* \nabla_\mu \Phi_1 - \nabla^\mu \Phi_2^* \nabla_\mu \Phi_2 - V(\Phi_1, \Phi_2). \quad (2)$$

La variación de la acción con respecto a los campos Φ_1 y Φ_2 , nos da las ecuaciones de movimiento (K-G),

$$\begin{aligned} \square \Phi_1 - \frac{dV}{d|\Phi_1|^2} \Phi_1 &= 0 \\ \square \Phi_2 - \frac{dV}{d|\Phi_2|^2} \Phi_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

En el caso homogéneo, ($FL + k = 0$),

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} [\rho_r(t) + \rho_b(t) + \rho_\Lambda(t) + \rho_{\Phi_1, \Phi_2}], \quad (4)$$

ρ_x , $x = r, b, \Lambda$, es la densidad de energía asociada al tensor de energía momento.

$$\rho_{\Phi_1, \Phi_2} = \frac{1}{2c^2} |\partial_t \Phi_1|^2 + \frac{1}{2c^2} |\partial_t \Phi_2|^2 + \frac{1}{2} V(\Phi_1, \Phi_2). \quad (5)$$

$$\rho_{\Phi_1, \Phi_2} = \frac{1}{2c^2} |\partial_t \Phi_1|^2 + \frac{1}{2c^2} |\partial_t \Phi_2|^2 - \frac{1}{2} V(\Phi_1, \Phi_2). \quad (6)$$

Necesitamos encontrar valores para ρ_{Φ_1, Φ_2} y p_{Φ_1, Φ_2} .

Suponemos,

$$V(\Phi_1, \Phi_2) = V_1(\Phi_1) + V_2(\Phi_2). \quad (7)$$

Por lo cual,

$$\rho_{\Phi_1, \Phi_2} = \rho_1 + \rho_2 \quad \rho_1 = \frac{1}{2c^2} |\partial_t \Phi_1|^2 + \frac{1}{2c^2} V_1(\Phi_1)$$

$$\rho_{\Phi_1, \Phi_2} = p_1 + p_2 \quad \rho_2 = \frac{1}{2c^2} |\partial_t \Phi_2|^2 + \frac{1}{2c^2} V_2(\Phi_2)$$

Resolver el sistema de ecu. (3) y (4) considerando casos representativos para V_1 , V_2 .

Casos representativos:

Casos representativos:

- Higgs-like, $m_h = 100\text{GeV}$ y $\lambda_h = 1$.

$$V_h(\Phi_h) = m_h^2(\Phi_h^\dagger\Phi_h) + \frac{\lambda_h}{2}(\Phi_h^\dagger\Phi_h)^2, \quad \Phi_h = \begin{pmatrix} \Phi^+ \\ \Phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \Phi_1 + i\Phi_2 \\ \Phi_3 + i\Phi_4 \end{pmatrix}.$$

- Axion-like, $m_a \approx 6 \times \mu\text{eV} \left(\frac{10^{12}\text{GeV}}{f_a} \right)$, $f_{aGUT} = 10^{16}\text{GeV}$ y $f_{aPlank} = 10^{19}\text{GeV}$.

$$V_a(\Phi_a) = \frac{1}{2} \left(m_a^2 \Phi_a^2 - \frac{1}{12} \frac{m_a^2}{f_a^2} \Phi_a^4 \right).$$

- Campo clásico⁴, $m = 5.7 \times 10^{-10}\text{eV}$ y $\lambda = -5.40 \times 10^{-70}$.

$$V(|\phi|) = \mu^2 |\phi|^2 + \sigma^2 |\phi|^4.$$

Suponemos que los potenciales son validos durante toda la evolución del Universo.

Posibles combinaciones

- Modelo I = Clásico + Higgs
- Modelo II = Axión + Higgs
- Modelo III = Clásico + Axión

⁴Li, Rindler-Daller, and Shapiro, "Cosmological Constraints on Bose-Einstein-Condensed Scalar Field Dark Matter"

Evolución temporal de la densidad

Condiciones de frontera:

- $a = 1$,
- Ω_{i0} , conocidos de las observaciones.
- $\Omega_{c0} = \rho_1 + \rho_2$, en $a = 1$.

$$\rho_1(a = 1) = k \Omega_{c0} \rho_{\text{crit}},$$

$$\rho_2(a = 1) = (1 - k) \Omega_{c0} \rho_{\text{crit}}.$$

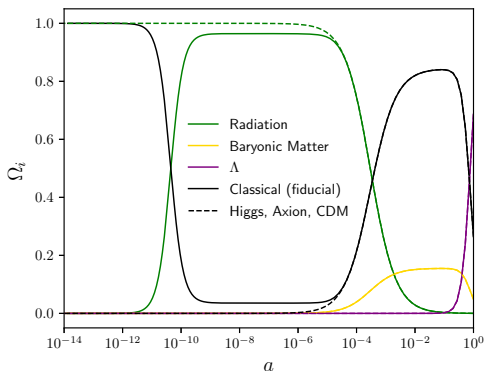


Figure: Densidad de energía para los campos individuales. Las líneas continuas corresponden a la cosmología de referencia clásica de autointeracción positiva Li, Rindler-Daller, and Shapiro, “Cosmological Constraints on Bose-Einstein-Condensed Scalar Field Dark Matter”. Las líneas punteadas corresponden al Universo CDM, la cual coincide con la gráfica para el Higgs y el axión.

Evolución temporal de la ecuación de estado

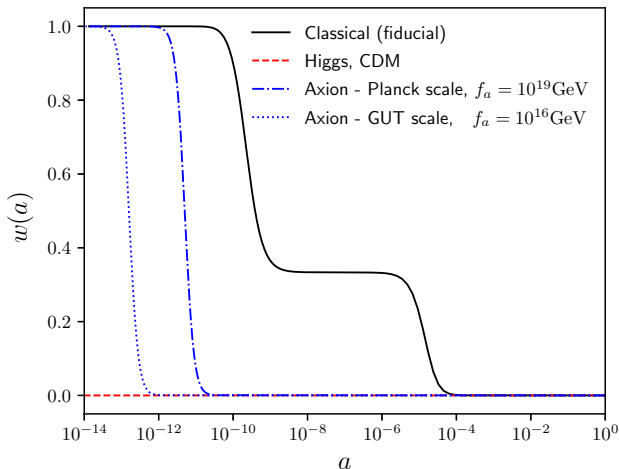


Figure: Ecuaciones de estado para los modelos con un solo campo escalar. El campo clásico transita por tres fases, el campo Axion-like transita por dos fases y el campo Higgs-like permanece indistinguible del paradigma Λ CDM.

Evolución de la densidad para el modelo de dos campos.

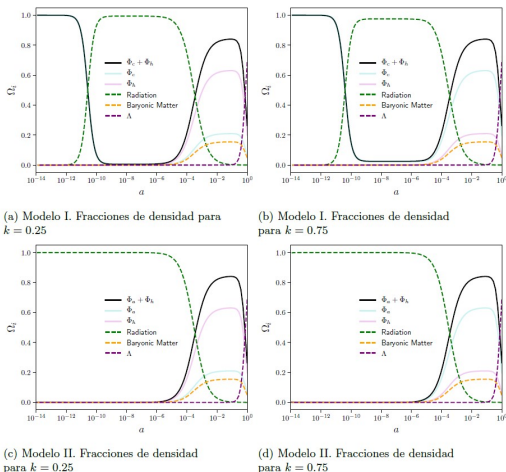
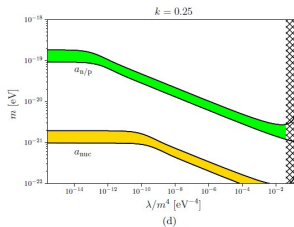
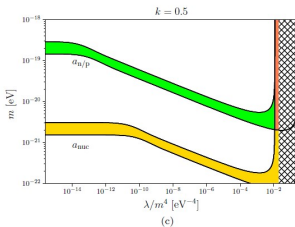
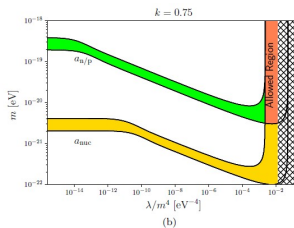
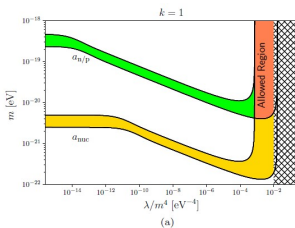


Figure: Evolución de los parámetros de densidad del Universo. Las líneas sólidas corresponden al modelo de campo escalar como materia oscura con dos componentes y las líneas quebradas representan al resto de contribuciones a la densidad.

Número efectivo de neutrinos



Resultados:

Para un solo campo	
■ Clásico	✓
■ Higgs= Λ CDM	X
■ Axión	X

Dos campos:	
■ axión + Higgs	X
■ Higgs + clásico	✓

¡Tenemos un modelo viable!

Higgs + clásico

Si, hasta el 58% de la DM es Higgs-like.



Trabajo en curso:

Materia oscura escalar bicomponente

Grupo de norma: $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times U(1)_{B-L} \times S_3$.

Contenido extra de materia:

- 3 dobletes $SU(2)$ en el sector de Higgs
- 3 Neutrinos de Majorana
- 3 Campos ϕ_i

Lagrangiana permitida por la simetría,

$$\mathcal{L}_{BL} = \mathcal{L}_{SM \times S_3} - y^D \bar{L} \tilde{H} N - \frac{1}{2} y^N \bar{N}^c \phi N - V(H, \phi), \quad (9)$$

En donde,

$$V(H, \phi) = V(\phi_i) + V(H_i) + V(H_i, \phi_i).$$





Schive et al.: Cosmic Structure as the Quantum Interference of a Coherent Dark Wave **Schive:2014dra**



Hsi-Yu Schive, Tzihong Chiueh, and Tom Broadhurst. “Cosmic Structure as the Quantum Interference of a Coherent Dark Wave”. In: **Nature Phys.** 10 (2014), pp. 496–499. DOI: [10.1038/nphys2996](https://doi.org/10.1038/nphys2996). arXiv: [1406.6586](https://arxiv.org/abs/1406.6586) [astro-ph.GA].



Mocz et al.: Galaxy formation with BECDM – II. Cosmic filaments and first galaxies **Mocz:2019uyd**



Philip Mocz et al. “Galaxy formation with BECDM – II. Cosmic filaments and first galaxies”. In: **Mon. Not. Roy. Astron. Soc.** 494.2 (2020), pp. 2027–2044. DOI: [10.1093/mnras/staa738](https://doi.org/10.1093/mnras/staa738). arXiv: [1911.05746](https://arxiv.org/abs/1911.05746) [astro-ph.CO].



Cembranos et al.: Cosmological perturbations in coherent oscillating scalar field models **Cembranos:2015oya**



J. A. R. Cembranos, A. L. Maroto, and S. J. Núñez Jareño. “Cosmological perturbations in coherent oscillating scalar field models”. In: **JHEP** 03 (2016), p. 013. DOI: [10.1007/JHEP03\(2016\)013](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2016)013). arXiv: [1509.08819](https://arxiv.org/abs/1509.08819) [astro-ph.CO].



Amendola: Perturbations in a coupled scalar field cosmology

Amendola:1999dr



Luca Amendola. "Perturbations in a coupled scalar field cosmology". In: **Mon. Not. Roy. Astron. Soc.** 312 (2000), p. 521. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2000.03165.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03165.x). arXiv: [astro-ph/9906073](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9906073).



Bernal et al.: Flat central density profiles from scalar field dark matter halo

Bernal:2003lwr



Argelia Bernal, Tonatiuh Matos, and Dario Nunez. "Flat central density profiles from scalar field dark matter halo". In: (Mar. 2003). arXiv: [astro-ph/0303455](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0303455).



Li et al.: Cosmological Constraints on Bose-Einstein-Condensed Scalar Field Dark Matter

Li:2013nal



Bohua Li, Tanja Rindler-Daller, and Paul R. Shapiro. "Cosmological Constraints on Bose-Einstein-Condensed Scalar Field Dark Matter". In: **Phys. Rev. D** 89.8 (2014), p. 083536. DOI: [10.1103/PhysRevD.89.083536](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.083536). arXiv: [1310.6061](https://arxiv.org/abs/1310.6061) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/abs/astro-ph)].

Dinámica del Universo

Ecuación de Friedmann, en términos del parámetro de densidad $\Omega_{tot} \equiv \rho/\rho_c$:

$$\frac{k}{a^2} = H^2 (\Omega_{tot} - 1), \quad \Omega_{tot} = \sum_i \Omega_i + \Omega_\Lambda,$$

$$\rho_c \equiv \frac{3H^2}{8\pi G_N}, \quad \Omega_\Lambda = \Lambda/3H^2, \quad H = 100h.$$

Para la época actual:

$$\Omega_b, \quad \Omega_\gamma, \quad \Omega_\nu \quad \text{y} \quad \Omega_c \quad (\Omega_m = \Omega_b + \Omega_c)$$

PDG

- $\Omega_\gamma h^2 = 2.47 \times 10^{-5}$
- $\Omega_\nu h^2 = 5 \times 10^{-4}$

Muy pequeñas con respecto a Ω_m y Ω_Λ .

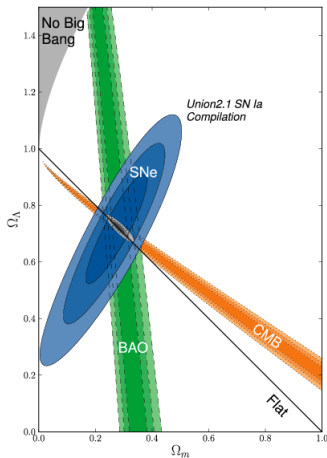


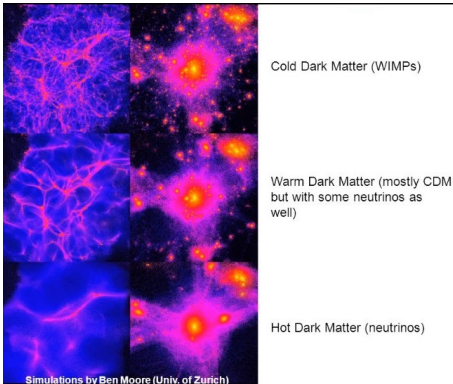
Figure: Credits: The Supernova Cosmology Project

Historia térmica del Universo

Edad	Temperatura	Evento
0	∞	Big Bang
$10^{-43}s$	$10^{19} GeV$	Era de Planck
$10^{-35}s$	$10^{16} GeV$	Era de Gran Unificación
?	?	Inflación
?	?	Bariogénesis
$10^{-11}s$	$246 GeV$	Rompimiento de la simetría electrodébil
$10^{-5}s$	$200 MeV$	Transición de fase de QCD
$1s - 15mn$	$0.05 - 1 MeV$	Big Bang Nucleosíntesis
$60ka$	$1 eV$	Igualdad materia-radiación
$370ka$	$0.3 eV$	Recombinación y desacoplamiento del fotón
$0.2 - 1 Ga$	$15 - 50 K$	Reionización
$1 - 10 Ga$	$3 - 15 K$	Formación de estructura
$6 Ga$	$4 K$	Transición a un Universo acelerado
$9 Ga$	$3 K$	Formación del sistema solar
$13.8 Ga$	$2.7 K$	Actualidad
$ka=10^3$ años	$Ga=10^9$ años	K = Grados Kelvin

Table: Historia del Universo. Se muestra un resumen de los eventos más importantes en la historia del Universo desde el Big-Bang hasta la actualidad. Créditos: Cosimo Bambi y Alexandre D. Dolgov, 2016.

Paradigma Λ CDM



Λ CDM

- WIMPs
- Neutra
- No bariónica
- fría en el proceso de formación de estructura.
- Ω_{c0}
- Estructura a gran escala.

Inconvenientes

- SLP
- Sin señales de DM en búsqueda directa e indirecta.

Necesitamos modificar algunas hipótesis.
Candidatos no SUSY y otros.

