

Física Más Allá del Modelo Estándar: El Modelo Escotogénico

Sheryl Melara

Instituto de Física, UNAM

3 de junio de 2021

Evidencia de materia oscura

En 1968 Vera Rubín y Kent Ford determinaron que la curva de rotación de galaxias espirales tiene una forma distinta a la predicha por la teoría.

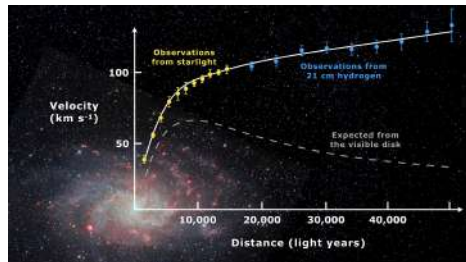


Figura: curva de rotación de una galaxia espiral



Figura: Vera Rubin

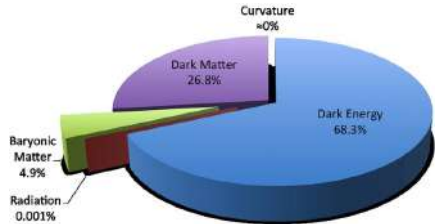


Figura: El cúmulo Bala

Características de la materia oscura

Características de la materia oscura:

- Es eléctricamente neutra
- No interactúa con el campo electromagnético
- Interactúa débilmente con otras partículas (Podría interactuar solamente a través de la gravedad)
- Es estable
- Es no relativista



Dato:

Alrededor de la cuarta parte del universo está hecha de materia oscura, mientras que la materia ordinaria ocupa solamente alrededor del 5 %

¿De qué está hecha la materia oscura?

Asumimos que la materia oscura está hecha de algún tipo de partícula que no hemos detectado aún.

- WIMPs (Weakly Interactive Massive Particles)
 $1\text{ GeV} - 1\text{ TeV}$
 - Partículas supersimétricas
 - Neutrinos pesados
 - bosones escalares
- Axiones $10^{-5} - 10^{-3} \text{ eV}$.
- Neutrinos estériles $\sim \text{KeV}$
- PBH Agujeros negros primordiales



Dark Matter Candidates: A Ten-Point Test

M. Taoso, G. Bertone, A. Masiero
arXiv:0711.4996v2

Física más allá del Modelo Estándar

Dentro del Modelo Estándar no tenemos partículas que cumplan con las características de la materia oscura. El ME no puede explicar:

- El origen de la masa de los neutrinos.
- La asimetría que existe entre la materia y antimateria.
- La interacción gravitacional.
- La existencia de materia oscura.



STANDARD MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES

QUARKS	UP mass: 2.3 MeV/c ² charge: 2/3 spin: 1/2 	CHARM 1,275 GeV/c ² 2/3 1/2 	TOP 173.07 GeV/c ² 2/3 1/2 	GLUON 0 0 1 	HIGGS BOSON 125 GeV/c ² 0 0 0
	DOWN 4.8 MeV/c ² -1/3 1/2 	STRANGE 95 MeV/c ² -1/3 1/2 	BOTTOM 4.18 GeV/c ² -1/3 1/2 	PHOTON 0 0 1 	GAUGE BOSONS
	ELECTRON 0.511 MeV/c ² -1 1/2 	MUON 105.7 MeV/c ² -1 1/2 	TAU 1,777 MeV/c ² -1 1/2 	Z BOSON 91.2 GeV/c ² 0 1 	
	ELECTRON NEUTRINO <2.2 eV/c ² 0 1/2 	MUON NEUTRINO <0.17 MeV/c ² 0 1/2 	TAU NEUTRINO <1.5 MeV/c ² 0 1/2 	W BOSON 80.4 GeV/c ² ±1 1 	

El Modelo Escotogénico

Es una extensión del Modelo Estándar que involucra la masa de los neutrinos y la presencia de materia oscura, popular por su simplicidad.

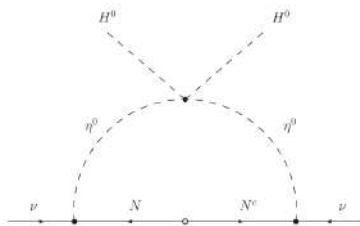


Figura: Masas de los neutrinos a un loop

$$L_N = \frac{M_N}{2} \bar{N}^c N + Y_N \eta \bar{N} \ell + h.c.$$

Propuesto por Ernest Ma (2006)

Phys. Rev. D73, 077301

Características del Modelo Escotogénico

El modelo escotogénico es una extensión del Modelo Estándar con un doblete de Higgs adicional y tres singuletes fermiónicos.

$$H = \left(\frac{G^+}{\frac{v + h + iG^0}{\sqrt{2}}} \right)$$

$$\eta = \left(\frac{\eta^+}{\frac{\eta_R^0 + i\eta_I^0}{\sqrt{2}}} \right)$$

Tiene las siguientes características:

- Provee un mecanismo para generar la masa de los neutrinos.
- Posee un doblete inerte η
- Posee simetría Z_2 bajo la cual H es par y η impar. Esta simetría garantiza la estabilidad del candidato a DM.
- Posee dos candidatos a DM: el escalar más ligero y uno fermiónico.

Potencial escalar

El potencial escalar para el modelo escotogénico está dado por:

$$V = \mu_1^2 |H|^2 + \frac{1}{2} \lambda_1 |H|^4 + \mu_2^2 |\eta|^2 + \frac{1}{2} \lambda_2 |\eta|^4 + \lambda_3 |H|^2 |\eta|^2 \\ + \lambda_4 |H^\dagger \eta|^2 + \frac{\lambda_5}{2} \left[(H^\dagger \eta)^2 + h.c. \right]$$

Donde λ_i y μ_i son parámetros reales. Notar que los primeros dos términos representan el potencial para el bosón de Higgs del Modelo Estándar:

$$V_{Higgs} = \mu_1^2 |H|^2 + \frac{1}{2} \lambda_1 |H|^4$$

Parámetros del Modelo Escotogénico

Se obtienen cuatro nuevos estados físicos en este modelo: dos bosones cargados $\eta^\pm$ y dos neutros, η_R^0 y η_I^0 . Cualquiera de los bosones neutros puede ser el candidato a materia oscura. Después de EWSB las masas de estos estados adquieren los valores:

$$m_{\eta^\pm}^2 = \mu_2^2 + \frac{1}{2}\lambda_3 v^2$$

$$m_{\eta_R^0}^2 = \mu_2^2 + \frac{1}{2}(\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5) v^2$$

$$m_{\eta_I^0}^2 = \mu_2^2 + \frac{1}{2}(\lambda_3 + \lambda_4 - \lambda_5) v^2$$

Donde $v = 246$ GEV es el valor de expectación de H . Se escoge η_R^0 como la partícula inerte más ligera ($\lambda_5 < 0$) y por tanto, candidata a materia oscura. Los parámetros en este modelo son: las masas escalares $m_{\eta_R^0}$, $m_{\eta^\pm}$, $m_{\eta_I^0}$ y los acoplamientos λ_2 , $\lambda_L = (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)/2$.

Densidad Relic: La Ecuación de Boltzmann

Para determinar si nuestra partícula propuesta es un buen candidato a materia oscura, necesitamos calcular la densidad relic $\Omega_c h^2$. Para determinar la densidad relic, necesitamos resolver la ecuación de Boltzmann:

$$\frac{dn}{dt} = -3Hn - \langle \sigma v \rangle [n^2 - n_{eq}^2]$$

Donde n es la densidad de número de la especie en cuestión, en este caso DM. H es el parámetro de Hubble y $\langle \sigma v \rangle$ el promedio de la sección eficaz por la velocidad.

Para resolver este tipo de ecuación hacemos uso de software como **MicrOmegas**, el cual proporciona la abundancia así como los canales de decaimiento. El siguiente paso es comparar el resultado con las observaciones cosmológicas.

Según las observaciones realizadas por Planck:

Parámetros de Λ CDM

- DM densidad
 $\Omega_c h^2 = 0.120 \pm 0.001$
- Densidad bariónica
 $\Omega_b h^2 = 0.0224 \pm 0.0001$
- Constante de Hubble
 $H_0 =$
 $67.4 \pm 0.5 \text{ Km/s/Mpc}$

Resultados recientes (2018):

arXiv:1807.06209

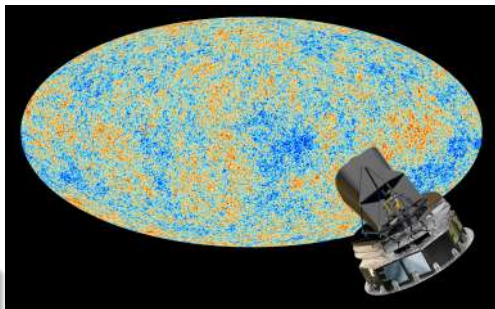


Figura: Planck y el CMB (Cosmic Microwave Background)

Nota: La densidad relic de la materia oscura $\Omega_c h^2$ es un parámetro importante para determinar si tenemos un buen candidato a materia oscura.

Resultados para el Modelo Escotogénico:

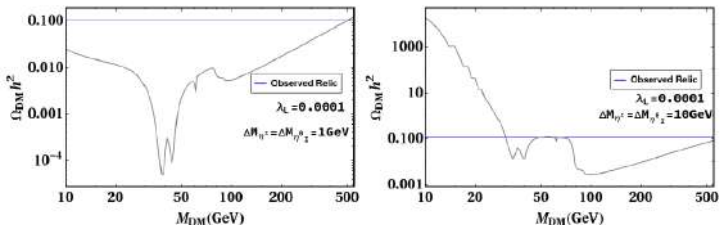


Figura: Variación de la densidad relic con respecto a la masa de la partícula de materia oscura. Ref: arXiv:2004.13762v1 [hep-ph]

Se concluyó:

- La materia oscura producida térmicamente no produce la abundancia relic total.
- La diferencia de masa entre los escalares juega un papel importante en la producción de la abundancia.
- La producción no térmica de materia oscura lleva a la densidad relic correcta.

Espacio de parámetros

En lugar de fijar el acoplamiento Higgs-DM λ_L , se pueden obtener los valores permitidos para λ_L y M_{DM} que satisfacen el valor de la densidad relic observada por Planck. Esta región permitida para los parámetros se muestra en los siguientes gráficos:

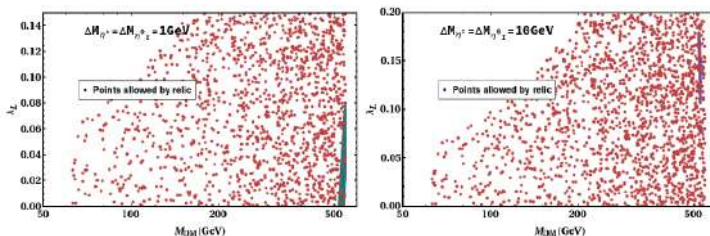


Figura: Región permitida para $\lambda_L - M_{DM}$ que satisface la abundancia relic y las constricciones del experimento XENON1T. Fuente: arXiv:2004.13762v1 [hep-ph]

Bariogénesis

Después del Big Bang debió crearse igual cantidad de materia que anti materia, sin embargo, actualmente hay mucha más materia que antimateria en el universo. Una posible explicación es la **Bariogénesis**.

Bariogénesis

Es el proceso físico mediante el cual se generó una asimetría entre el número de bariones y anti-bariones en el universo temprano.

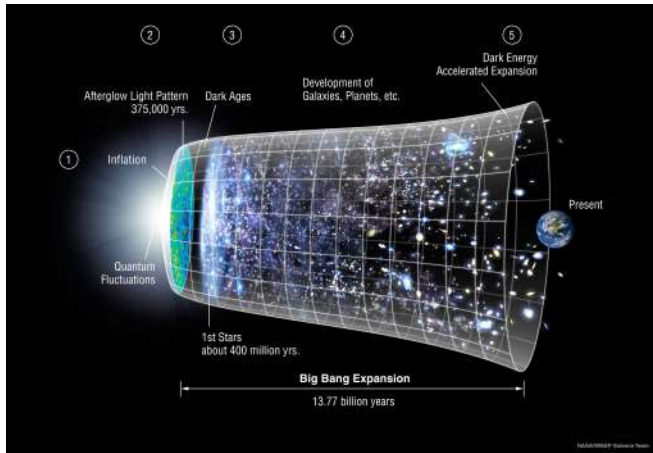


Razón Bariones-fotones:

$$\eta_B = \frac{n_B - \bar{n}_B}{n_\gamma}$$

$$\eta_B = (5.80 - 6.50) \times 10^{-10}$$

¿Cuándo ocurre la bariogénesis?



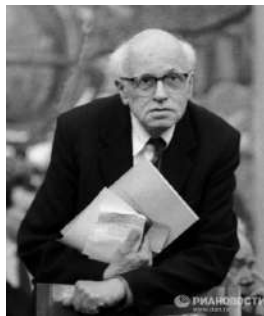
Condiciones de Sakharov

En 1967 Andrei Sakharov propuso las condiciones para que pueda darse la bariogénesis:

- Violación de número leptónico/bariónico
- Violación de C y CP
- Condiciones fuera del equilibrio térmico

Tipos de bariogénesis

- Decaimiento de partículas pesadas fuera del equilibrio.
- Bariogénesis electrodébil.
- Mecanismo de Affleck-Dine.



Ref:

A. Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5, 32 (1967).

Bariogénesis en el modelo Escotogénico

En el modelo Escotogénico se puede estudiar la bariogénesis proveniente del decaimiento de partículas pesadas fuera del equilibrio, en este caso los neutrinos:

$$N_2 \rightarrow \ell \eta, \bar{\ell} \eta^*$$

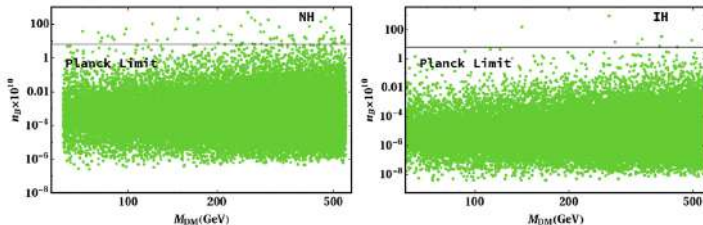


Figura: Asimetría bariónica en función de M_{DM} para la jerarquía normal e invertida.
 Ref: arXiv:2004.13762v1 [hep-ph]

La asimetría bariónica puede reproducirse en el modelo Escotogénico para un valor de $|\lambda_5| = 10^{-5} - 5$

Extensiones del modelo Escotogénico

A partir del modelo Escotogénico mínimo se pueden obtener otros modelos de interés como ser:

- Escotogénico + singlete escalar. **arXiv:2010.05937v1 [hep-ph]**
- Escotogénico + triplete escalar (seesaw tipo II). **A. Dasgupta, D. Borah, Nuclear Physics B 889 (2014).**
- Escotogénico + presencia de PBHs. **arXiv:2104.14496v1 [hep-ph], arXiv:2101.01921v1 [hep-ph].**
- Escotogénico + singlete escalar real + inflación. **arXiv:2009.13057v2 [hep-ph]**

En resumen...

- El modelo Escotogénico mínimo proporciona una solución en forma simple a dos problemas fundamentales en física de partículas y cosmología que no pueden explicarse solamente con el modelo Estándar.
- La producción de materia oscura térmicamente en este modelo es insuficiente.
- El modelo Escotogénico reproduce exitosamente la abundancia relic para la producción no térmica de materia oscura.
- Se puede reproducir la asimetría bariónica mediante el decaimiento de neutrinos pesados.
- A partir de este modelo se pueden construir otros más complejos para estudiar bariogénesis, inflación y materia oscura asimétrica.

¡Gracias por su atención!