

El Lado Oscuro del Universo

Sheryl Melara

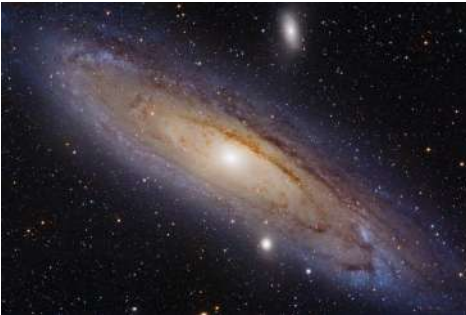
Instituto de Física, UNAM

25 de junio de 2020

Esta charla consistirá de tres partes principales:

- La materia oscura y sus características
- Posibles candidatos a materia oscura
- Detección de materia oscura

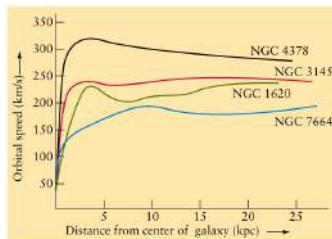
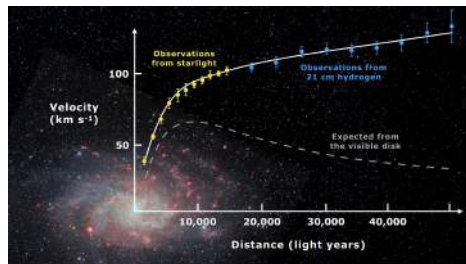
Paso 1: Describir la materia oscura



¿Qué es la materia oscura?
¿Cuáles son sus características?
¿Existe evidencia de materia oscura?

Curvas de rotación de galaxias espirales: primera 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.

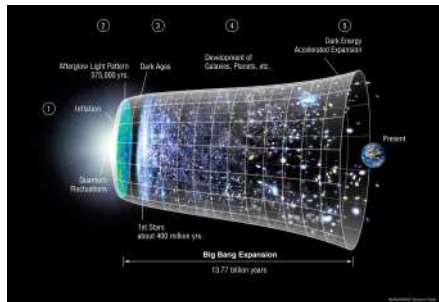


El Cúmulo Bala: Más evidencia de materia oscura



Figura: Imagen del Cúmulo Bala (Bullet Cluster). Créditos: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch et al.; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter)



Λ CDM es el modelo estándar cosmológico que describe la evolución del universo. Λ hace referencia a la inclusión de la *constante cosmológica* dentro del modelo. Este modelo nos proporciona la siguiente información:

- El universo se encuentra bajo una expansión acelerada.
- La constante cosmológica Λ está asociada a la *energía oscura*, responsable de la aceleración de la expansión del universo.
- Las características de la materia oscura CDM.

Planck y los parámetros cosmológicos

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

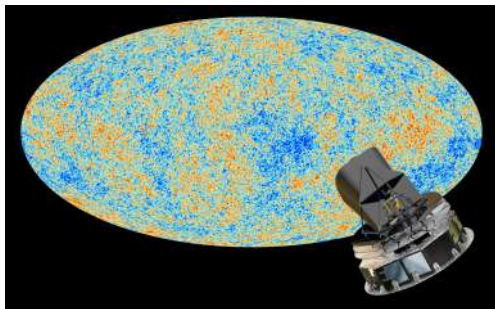


Figura: Planck y el CMB (Cosmic Microwave Background)

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.

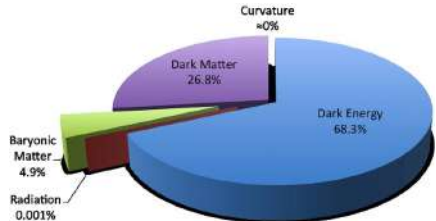
El lado oscuro del universo...

Dato:

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

Características de la materia oscura:

- Es eléctricamente neutra
- No interactúa con el campo electromagnético
- No interactúa mucho con otras partículas
- Es estable
- Es no relativista



Pero...¿Qué es exactamente la materia oscura?



Así como la materia bariónica está formada por *partículas elementales*, pensamos que la materia oscura es también una partícula. El Modelo Estándar es la teoría que describe las partículas elementales y sus interacciones.

Las partículas elementales se dividen en dos grandes grupos: fermiones y bosones.

STANDARD MODEL OF ELEMENTARY PARTICLES



Lo que el Modelo Estándar 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.

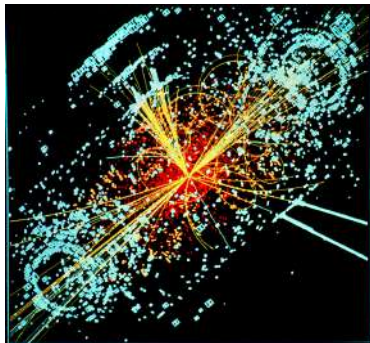


Figura: Simulación de la producción de un bosón de Higgs para el detector de CMS en el LHC del CERN. Créditos: Lucas Taylor, CERN.

Para describir la materia oscura necesitamos física más allá del Modelo Estándar.

Parte 2: Buscar candidatos a materia oscura



Una vez que hemos descrito la naturaleza de la materia oscura, el siguiente paso es encontrar posibles candidatos

Posibles candidatos a materia oscura

- WIMPs (Weakly Interactive Massive Particles)
1 GeV – 1 TeV
 - Partículas supersimétricas
 - Neutrinos pesados
 - partículas escalares
- Axions
- Neutrinos estériles
- MACHOs (Massive Compact Halo Objects)

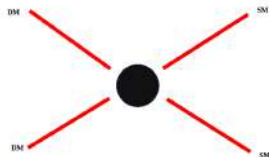
Dark Matter Candidates: A Ten-Point Test

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



El Milagro WIMP

En el universo temprano:



- Asumimos que la partícula DM estuvo en equilibrio térmico con partículas del SM a una temperatura T lo suficientemente alta.
- $n_{DM} \sim e^{-m_{DM}/T}$
- la razón de aniquilación se vuelve $n_{DM} \langle \sigma_{ann} v \rangle \sim H$
- Freeze-out ocurre a $T_{fo} \simeq m_{DM}/20$
- La densidad actual de las WIMPs es:

$$\Omega h^2 \approx \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle \sigma_{ann} v \rangle}$$

WIMP Miracle!

Partículas en la escala electro-débil tienen la densidad correcta

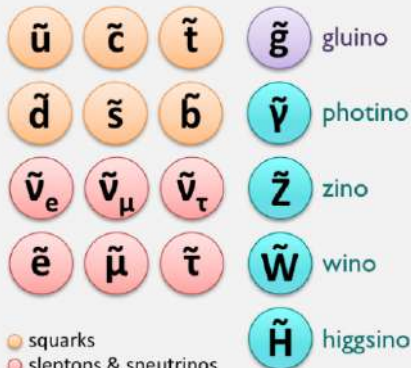
Más allá del Modelo Estándar... MSSM

Standard Model particles



- quarks
- leptons
- force particles

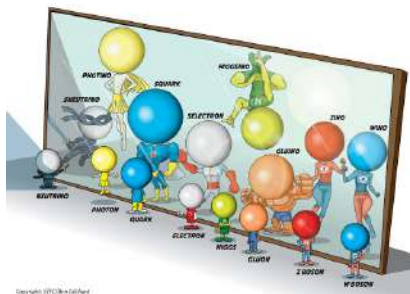
Supersymmetric partners



- squarks
- sleptons & sneutrinos
- neutralinos $\tilde{\chi}^0$ & charginos $\tilde{\chi}^\pm$

SUSY: Motivaciones

- Tiene la habilidad de ligar la gravedad a otras interacciones fundamentales.
- Posee un rol esencial en teoría de cuerdas.
- SUSY podría ayudar a estabilizar la escala de masa electrodébil respecto a correcciones radiativas.
- En modelos en los que se conserva paridad R, la partícula super-simétrica más ligera (LSP) sería un excelente candidato a materia oscura.



Super-WIMPs como materia oscura

Candidatos:

- neutralino χ
- sneutrino $\tilde{\nu}$
- gravitino

Inconvenientes

- El neutralino χ más ligero no reproduce la correcta densidad relic.
- $\tilde{\nu}$ reproduce la densidad correcta, pero la sección eficaz DM-nucleon se encuentra por encima de los límites establecidos por experimentos.

Alternativas:

- Considerar el NMSSM (Next-to-Minimal Supersymmetric Standard Model)
- Incorporar una simetría adicional $U(1)$ ¹
- Incluir sneutrinos derechos $\tilde{\nu}_R$
- La materia oscura puede estar compuesta de Super-WIMPS + otro candidato.

¹Revisiting (s)neutrino dark matter in natural SUSY arXiv:1909.11686v1

IDM: Inert Doublet Model

El modelo inerte es una extensión con un doblete de Higgs adicional.

$$H_1 = \begin{pmatrix} G^+ \\ \frac{\nu + h + iG^0}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} H^0 \\ \frac{H^0 + iA^0}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

Tiene las siguientes características:

- Se llama inerte ya que uno de los dobletes, H_2 , no adquiere un valor de expectación en el vacío (VEV).
- La partícula inerte más ligera es candidata a materia oscura.
- Posee simetría Z_2 bajo la cual H_1 es par y H_2 impar. Esta simetría garantiza la estabilidad del candidato a DM.

Potencial del Modelo Inerte

El potencial para el Modelo Inerte está dado por:²

$$V = \mu_1^2 |H_1|^2 + \mu_2^2 |H_2|^2 + \lambda_1 |H_1|^4 + \lambda_2 |H_2|^4 + \lambda_3 |H_1|^2 |H_2|^2 \\ + \lambda_4 |H_1^\dagger H_2|^2 + \frac{\lambda_5}{2} [(H_1^\dagger H_2)^2 + hc]$$

Donde λ_i y μ_i son parámetros reales. Notar que el primer y tercer término juntos representan el potencial del Higgs del ME:

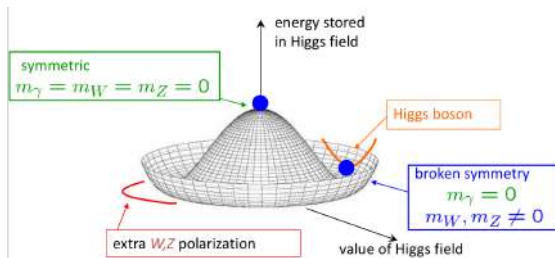
$$V_{Higgs} = \mu_1^2 |H_1|^2 + \lambda_1 |H_1|^4$$

²The Inert Doublet Model of Dark Matter Revisted arXiv:1003.3125v3

EWSB: Rompimiento Espontáneo de Simetría

H_1 es el doblete de Higgs del Modelo Estándar, de manera que al considerar perturbaciones alrededor del mínimo del potencial, ocurre un rompimiento espontáneo de simetría; H_1 adquiere un VEV y los bosones de norma Z^0 , W^+ y W^- adquieren masa.

$$SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_Q$$



Parámetros del Modelo Inerte

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

$$\begin{aligned} m_{H^\pm}^2 &= \mu_2^2 + \frac{1}{2} \lambda_3 v^2 \\ m_{H^0}^2 &= \mu_2^2 + \frac{1}{2} (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5) v^2 \\ m_{A^0}^2 &= \mu_2^2 + \frac{1}{2} (\lambda_3 + \lambda_4 - \lambda_5) v^2 \end{aligned}$$

Donde $v = 246$ GEV es el valor de expectación de H_1 . Se escoge H_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_{A^0} , $m_{H^\pm}$, m_{H^0} y los acoplamientos λ_2 , $\lambda_{345} = \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5$.

Densidad Relic: La Ecuación de Boltzmann

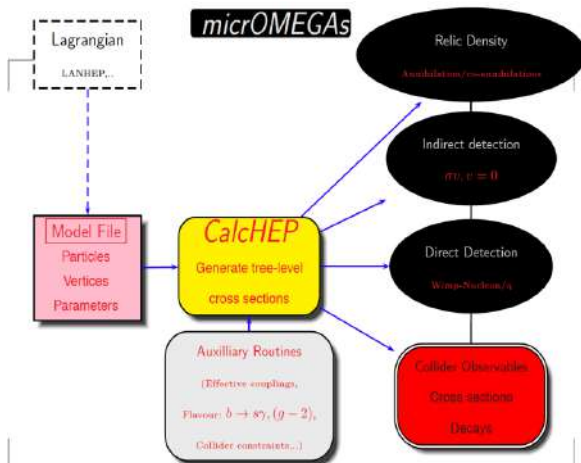
Para determinar si nuestra partícula propuesta es un buen candidato a materia oscura, necesitamos calcular la densidad relic Ωh^2 . Para determinar la densidad relic, necesitamos resolver la ecuación de Boltzmann:

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

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 diseñado para realizar cálculos en física de partículas.

MicrOmegas: diseñado para calcular la densidad relic Ωh^2



G. Belanger, F. Boudjema, A. Pukhov: arXiv.1402.0787

Resultados para el IDM

Se proporciona a MicrOmegas los parámetros del modelo, las masas de los escalares, la masa del candidato a DM y la del bosón de Higgs para obtener el valor de la densidad.

```

MacBook-Pro-de-Jose:IDM josehalim$ ./main_only_relic dataI.par

Dark matter candidate is '~X' with spin=0/2

== MASSES OF HIGGS AND ODD PARTICLES: ==
Higgs masses and widths
h 500.00 6.41E+01

Masses of odd sector Particles:
~X : MHX = 70.000 || ~H3 : MH3 = 76.000 || ~H+ : MH+ = 190.000

== Calculation of relic density ==
Xf=2.46e+01 Omega=5.49e-02
# Channels which contribute to 1/(omega) more than 1%.
# Relative contributions in % are displayed
31% ~X ~X ->W+ W-
10% ~H3 ~X ->d D
10% ~H3 ~X ->s S
10% ~H3 ~X ->b B
8% ~H3 ~X ->u U
8% ~H3 ~X ->c C

```

El IDM provee un buen candidato a materia oscura cuya densidad relic coincide con los datos de Planck $\Omega_c h^2 = 0.120 \pm 0.001$, en los siguientes rangos de masa:

- Partículas DM ligeras: $m < 10$ GeV (Rango de masas excluido)
- Masas entre 50 y 100 GeV
- Partículas pesadas de hasta 525 GeV.

Paso 3: Detección de Materia Oscura



Una vez que hemos establecido las características de la materia oscura e identificado posibles candidatos, el siguiente paso es emprender la búsqueda de materia oscura.

XENON1T: The Xenon Experiment

Es un experimento diseñado para la observación de materia oscura. Actualmente es el experimento con mayor sensibilidad para la detección de DM.



Figura: El experimento se encuentra bajo tierra. El poster sobre el tanque indica lo que hay adentro.

- Instalado en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso del INFN en Italia.
- El detector contiene 3.2 toneladas de Xenón líquido. De las cuales 2.0 sirven como blanco para las interacciones.
- Posee dos arreglos de PMTs (tubos foto-multiplicadores)

Principio de Detección



Figura: El detector de XENON1T. Se puede observar la estructura de cobre que crea el campo eléctrico y los PMT's.

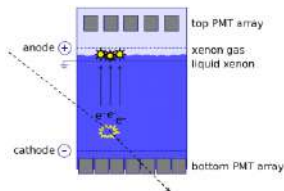


Figura: Principio de detección

Una interacción en el Xenón líquido da como resultado una pequeña señal de luz S1, la cual es registrada por los PMTs. A su vez, cada interacción produce electrones, los cuales son desviados por un campo eléctrico hacia la interfaz líquido-gas y se genera una segunda señal S2.

¿Hemos detectado materia oscura?

El 17 de junio la colaboración de XENON1T anunció lo siguiente:
Observación de un exceso electrónico de eventos en el detector. ¿Significa que hemos detectado materia oscura?



La colaboración de XENON1T no claman haber detectado materia oscura. El exceso de eventos todavía debe ser explicado. Este exceso puede deberse a ³

- Decaimientos del tritio en el detector.
- Neutrinos que se colaron en el detector y que poseen un momento magnético mayor del que se pensaba.
- La detección de un axión solar, lo cual implicaría la detección de una nueva partícula que puede ser materia oscura.

³xenon1t.org

XENON1T collaboration arXiv:2006.09721v1

En conclusión...

- WIMPs y Axiones son muy buenos candidatos a materia oscura ya que sus características concuerdan con el modelo Λ CDM.
- El modelo IDM proporciona un buen candidato a WIMP dentro de un amplio rango de masas.
- La materia oscura puede no estar compuesta de solamente un tipo de partícula sino, de varias especies. De manera que podría estar compuesta de partículas supersimétricas y otro tipo de WIMPs.
- La materia oscura tiene características que dificultan su detección.
- XENON1T ha observado un exceso de eventos que podría tratarse de axiones y por tanto, de materia oscura pero aún no se posee suficiente información para confirmarlo.
- Detectar materia oscura es uno de los retos más grandes de la física y se sigue trabajando en mejorar los experimentos actuales para poder lograrlo.

¡Gracias por su atención!