

Compatibilidad del modelo WIMP de materia oscura con la emisión de rayos gamma en el centro Galáctico

Juan Antonio Paredes Ahumada

Instituto de Astrofísica
Facultad de Física
Pontificia Universidad Católica de Chile

Profesor Guía : Dr. Benjamin Koch
Profesor Co-guía : Dr. Germán Gómez
Comisión Informante : Dr. Andreas Reisenegger
Dr. Manuela Zoccali

23 de junio de 2016

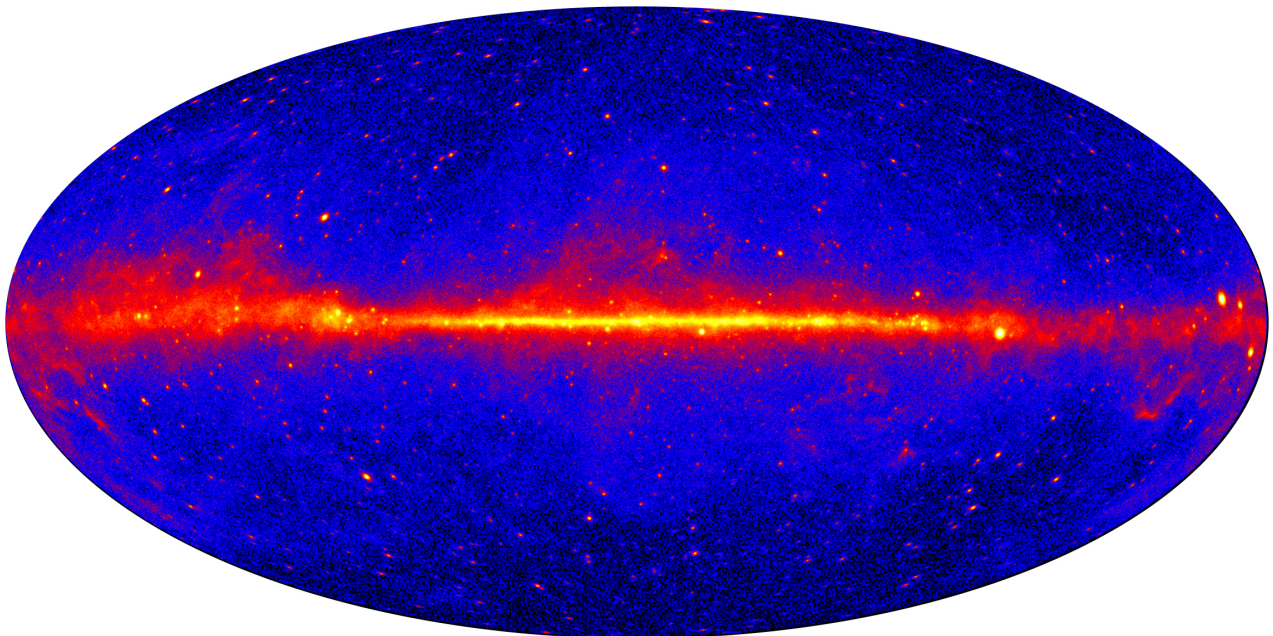
Outline

- 1 Introduccion
- 2 Evidencias de Materia Oscura
- 3 Partículas Masivas con Interacción Débil
- 4 Metodología y Ajuste de modelos
- 5 Resultados
- 6 Conclusiones

Introducción

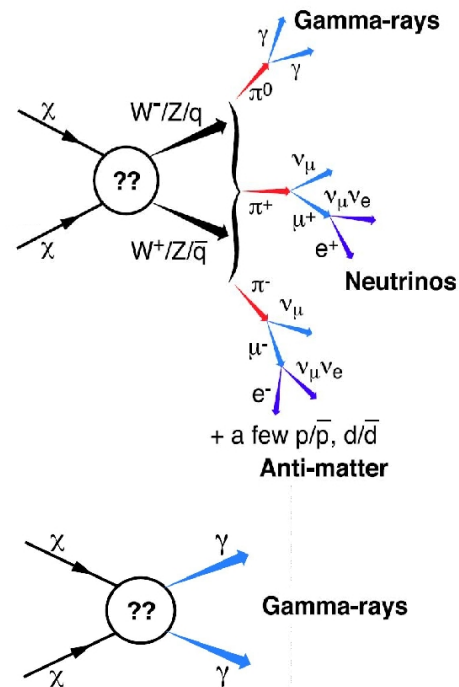
Telescopio de Gran Área (LAT) a bordo del observatorio espacial de rayos gamma Fermi realiza mediciones en rayos gamma de toda la esfera celeste.

Exceso de emisión de rayos gamma alrededor del centro Galáctico



Introducción

- Detección indirecta de materia oscura.
- Candidato a Materia Oscura: Partículas Masivas con Interacción Débil (WIMP)



Objetivo

Determinar si la sección eficaz $\langle\sigma v\rangle$, masa, canal de aniquilación y distribución que deben tener las partículas de materia oscura en la region del centro Galáctico son compatibles con:

- Exceso de emisión alrededor del Centro Galáctico.
- La no observación de una señal similar en las galaxias enanas satélites de la Vía Láctea.

Evidencia de Materia Oscura

Indicios de que la cantidad de materia visible es insuficiente para explicar los efectos gravitacionales que se observan.

- Curva de rotación de galaxias espirales
- Dinámica de cúmulos de galaxias
- Anisotropías del Fondo Cósmico de Microondas

Esta tipo de materia no consiste en partículas elementales ya descubiertas.

Escala Galáctica

$$\frac{GM(r)}{r^2} = \frac{v^2(r)}{r}$$

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

Las curvas de rotación exhiben que $v(r)$ se mantiene aproximadamente constante.

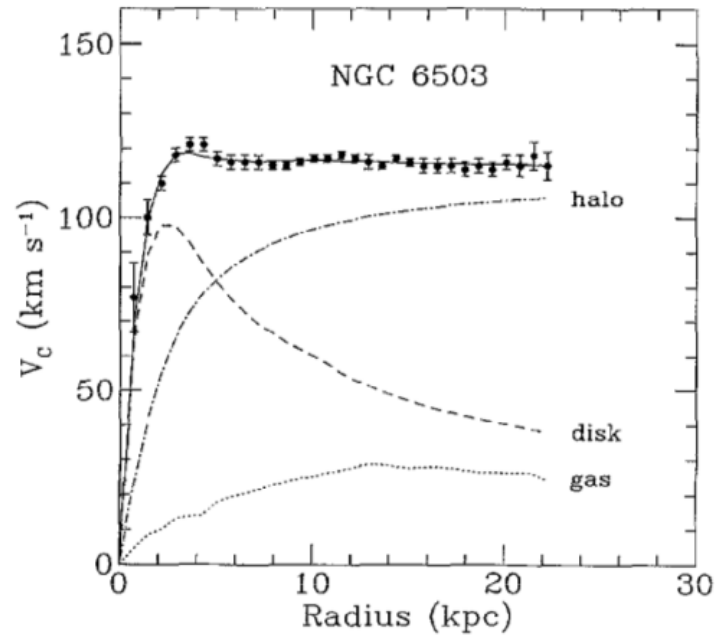


Figura 1 : Curva de rotación galaxia NGC6503.

Escala Galáctica

Parametrización del perfil de densidad del halo de materia oscura para reproducir las curvas de rotación medidas:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)^\gamma [1 + (r/r_s)^\alpha]^{(\beta-\gamma)/\alpha}}$$

Modelo NFW: $(\alpha, \beta, \gamma) = (1, 3, 1)$

Escala de Cúmulos de Galaxias

- Fritz Zwicky en 1933
- Cúmulo de galaxias: sistema ligado gravitacionalmente.
- $M_{vir} \approx 3.21 \cdot 10^{15} M_{\odot}$

$$\frac{M}{L} \approx 10^2 \frac{M_{\odot}}{L_{\odot}}$$

Masa mayor a lo esperado según la masa visible.

Problema de “masa desaparecida”.

Escala de Cúmulos de Galaxias

Otro método: Emisión de rayos X del gas caliente intracúmulo.
Considerando un gas ideal en equilibrio hidrostático.

$$T \approx (1,3 - 1,8)keV \left(\frac{M_r}{10^{14}M_{\odot}} \right) \left(\frac{1Mpc}{r} \right)$$

Tomando el ejemplo de Coma: $T \approx 10keV$

Se necesitan $\approx 1,67 \times 10^{15}M_{\odot}$ para tener esa temperatura.

Escalas Cosmológicas

Estudio de las anisotropías del Fondo Cósmico de Microondas (CMB) determina la cantidad de materia en el Universo.

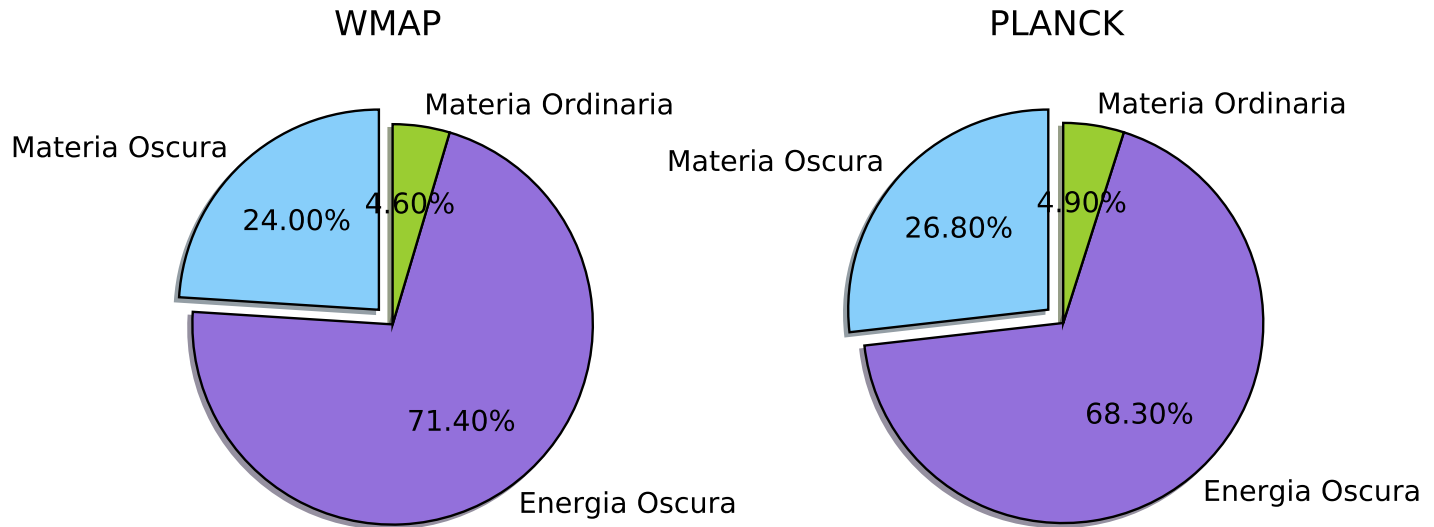


Figura 2 : Contenido del Universo.

¿Qué es la Materia Oscura?

- Existen indicios observacionales de Materia Oscura.
- Interactúa gravitacionalmente.
- Es no relativista (“Cold Dark Matter”)
- Pequeña sección eficaz de interacción consigo misma.

Hasta el momento no hay partícula del Modelo Estándar que cumpla con estos requisitos.

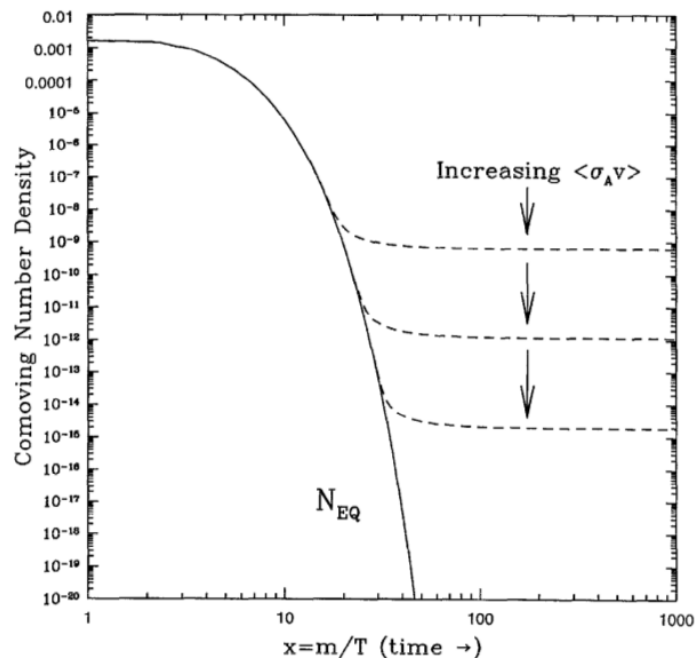
Partículas Masivas con Interacción Débil (WIMP)

Modelo más llamativo de Materia Oscura

“Predice” la abundancia de Materia Oscura

La ecuación de Boltzmann describe la evolución de la densidad de WIMPs:

$$\frac{dn_\chi}{dt} + 3Hn_\chi = -\langle\sigma v\rangle[n_\chi^2 - (n_\chi^{eq})^2]$$



Modelo WIMP

$$\Omega_\chi h^2 = \frac{m_\chi n_\chi}{\rho_c} \simeq \frac{3 \cdot 10^{-27} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}}{\langle \sigma v \rangle}$$

Si $\langle \sigma v \rangle \simeq 3 \times 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$
 entonces $\Omega_\chi h^2 \sim 0,11$.

Muy cercano al valor medido.

Si se incluye Materia Oscura en el centro Galáctico.

¿Valor de $\langle \sigma v \rangle$ necesario para generar el flujo de rayos gamma consistente con las observaciones de LAT.?

Flujo de rayos gamma provenientes de WIMPs

$$\frac{d\Phi}{dE} = \underbrace{\frac{\langle\sigma v\rangle}{8\pi m_{DM}^2} \sum_i Br_i \frac{dN_i}{dE}}_{\text{Física de Partículas}} \underbrace{\int_{los} \rho_{DM}^2(l) dl}_{\text{J-factor}}$$

Problema: No se conoce la masa ni los canales de aniquilación de la partícula de materia oscura.

Asumir que las partículas se aniquilan en un par de partículas del Modelo Estándar. Partícula de 50 GeV de masa que se aniquilan únicamente en el par $b\bar{b}$.

Flujo de rayos gamma provenientes de WIMPs

¿Y la distribución espacial?

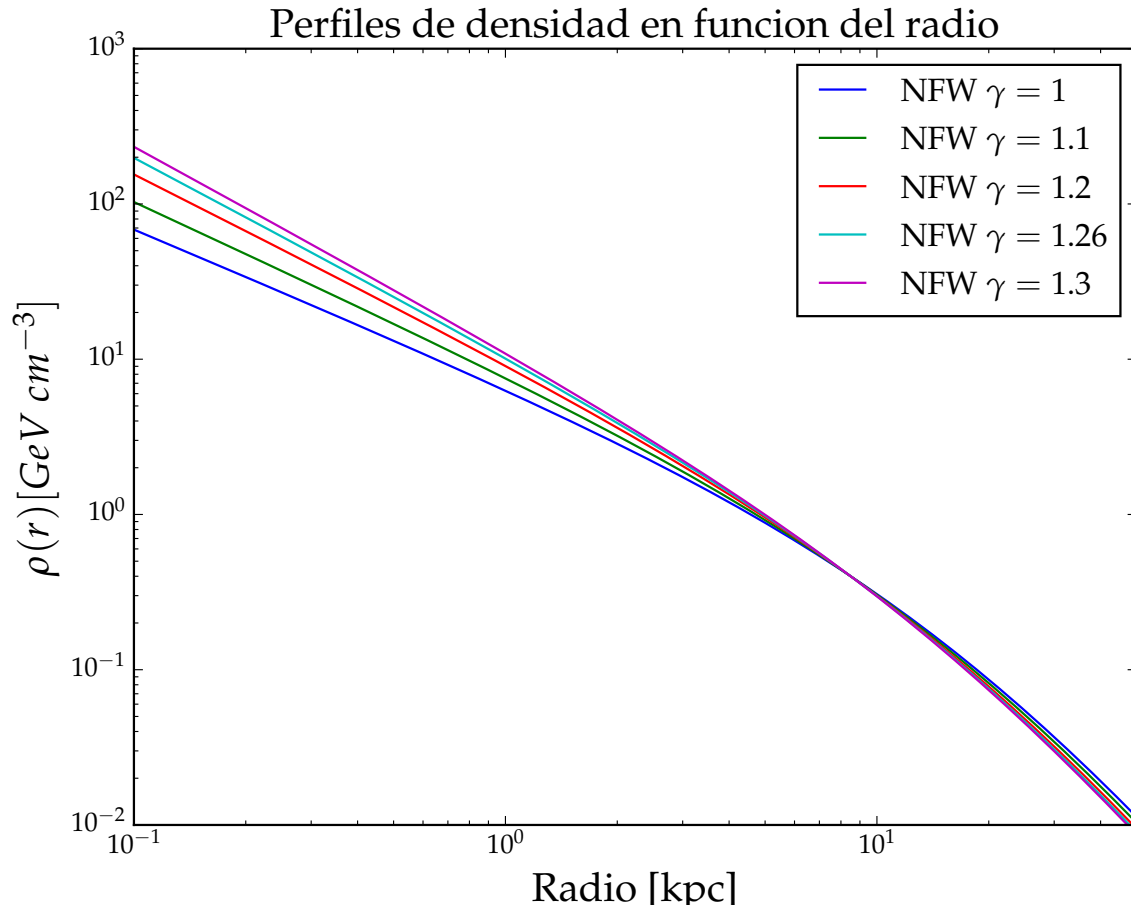
Perfil de densidad NFW

$$\rho(r) = \frac{\rho_{\odot} [1 + (r_{\odot}/r_s)]^{3-\gamma}}{(r/r_{\odot})^{\gamma} [1 + (r/r_s)]^{3-\gamma}}$$

Factor de escala $r_s = 20\text{kpc}$. $\rho_{\odot} = 0.4 \text{ GeV cm}^{-3}$. Esto no es suficiente para restringir el valor de γ en la región de interés.

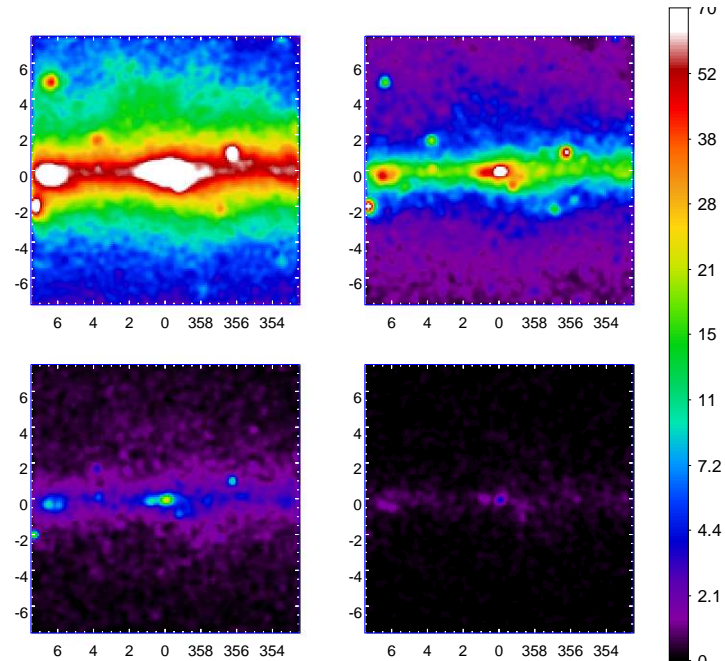
Se varía el valor de γ en los ajustes: 5 valores distintos ($\gamma=1, 1.1, 1.2, 1.26, 1.3$)

Modelando el flujo de rayos gamma



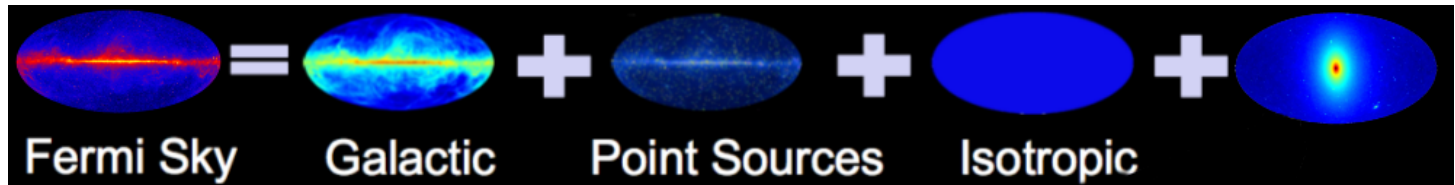
Selección de Datos

- Ocho años de datos de LAT (01/09/2008 - 07/04/2016)
- Rango de energía 0.5 - 50 GeV
- Región de interés: cuadrado de 15° de lado en torno al centro galáctico.
- Resolución de 0.1 deg/pix.
- 21 bins de energía separados logarítmicamente



Background en la Búsqueda de Materia Oscura

La aniquilación de WIMPs no es la única fuente de emisión.
Se utilizan modelos que parametrizan las otras fuentes para determinar la contribución que hace la señal de materia oscura al total observado.



Modelos de Background

La formación de rayos cósmicos se atribuye a las supernovas, la cuales actúan como aceleradores de partículas.

Para modelar la zona del centro Galáctico se usan 3 modelos distintos

- SNR I ($z=10$, $T_s=150$)
- SNR II ($z=4$, $T_s=100000$)
- Lorimer ($z=10$, $T_s=150$)

Cada modelo es una aproximación, ninguno contiene toda la incertidumbre en el modelamiento de la emisión en el centro Galáctico.

Formalismo de Likelihood

Para determinar si un modelo reproduce adecuadamente los datos de observación se utiliza el método de binned Likelihood(\mathcal{L})

Análisis bineado, los datos se separan en bins espaciales y de energía. El número de cuentas observadas en cada bin se expresa mediante una distribución de Poisson

$$P(y_i|f(x_i)) = \frac{f(x_i)^{y_i} e^{-f(x_i)}}{y_i!}$$

Likelihood:

$$\mathcal{L}(f(x_i)|y_i) = \prod_i P(y_i|f(x_i))$$

Formalismo de Likelihood

Para determinar si un modelo reproduce adecuadamente los datos de observación se utiliza el método de binned Likelihood(\mathcal{L})

Análisis bineado, los datos se separan en bins espaciales y de energía. El número de cuentas observadas en cada bin se expresa mediante una distribución de Poisson

$$P(y_i|f(x_i)) = \frac{f(x_i)^{y_i} e^{-f(x_i)}}{y_i!}$$

Likelihood:

$$\mathcal{L}(f(x_i)|y_i) = \prod_i P(y_i|f(x_i))$$

$$- \ln(\mathcal{L}) = \sum_i [f(x_i) + \ln(y_i!) - y_i \ln(f(x_i))]$$

Comparación del likelihood de modelos: modelo que contiene solo el background (SNR I, SNR II o Lorimer sin materia oscura) y el mismo modelo, pero con materia oscura añadida como una nueva fuente de emisión de rayos gamma.

$$\Delta \ln(\mathcal{L}) = \ln(\mathcal{L}_{DM}) - \ln(\mathcal{L}_{null})$$

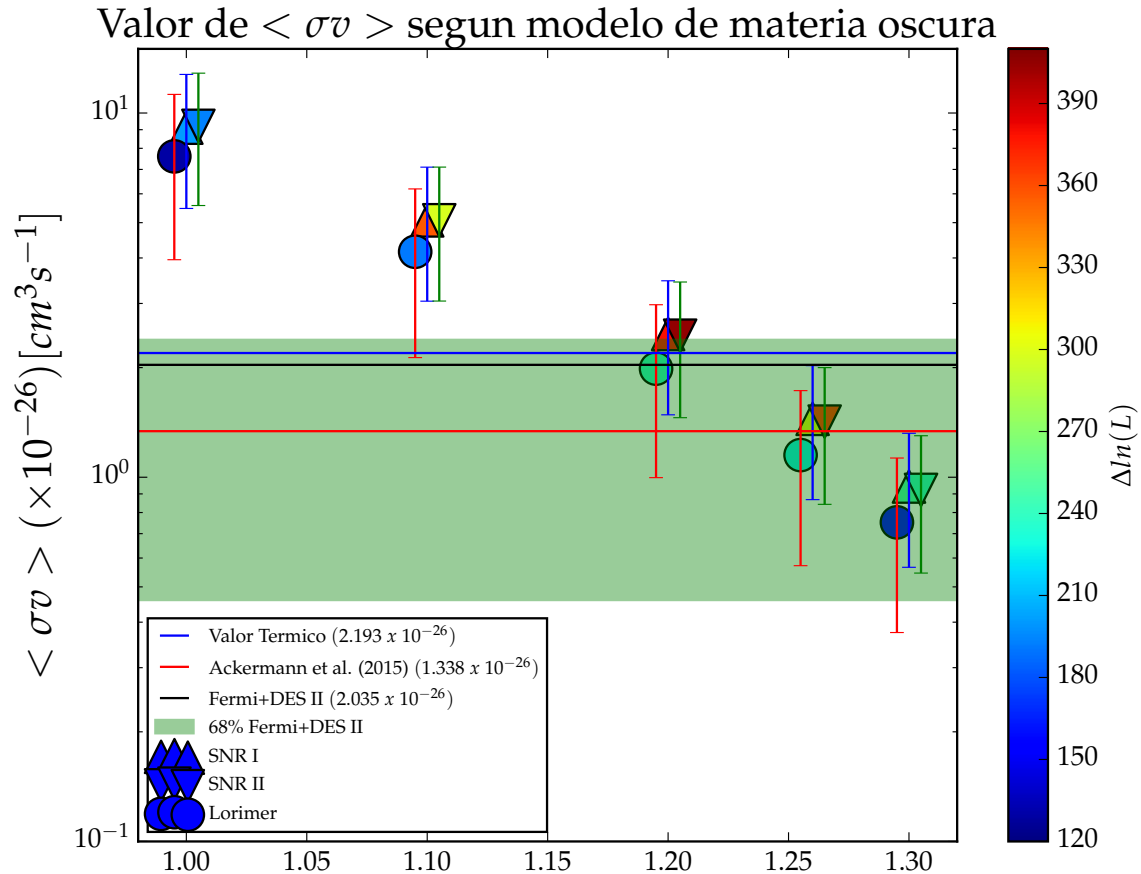
Se repite variando la distribución espacial de materia oscura
 $\gamma = 1, 1.1, 1.2, 1.26, 1.3$

$$\frac{d\Phi}{dE} = \underbrace{\frac{\langle \sigma v \rangle}{8\pi m_{DM}^2} \sum_i Br_i \frac{dN_i}{dE}}_{\text{Física de Partículas}} \underbrace{\int_{los} \rho_{DM}^2(l) dl}_{\text{J-factor}}$$

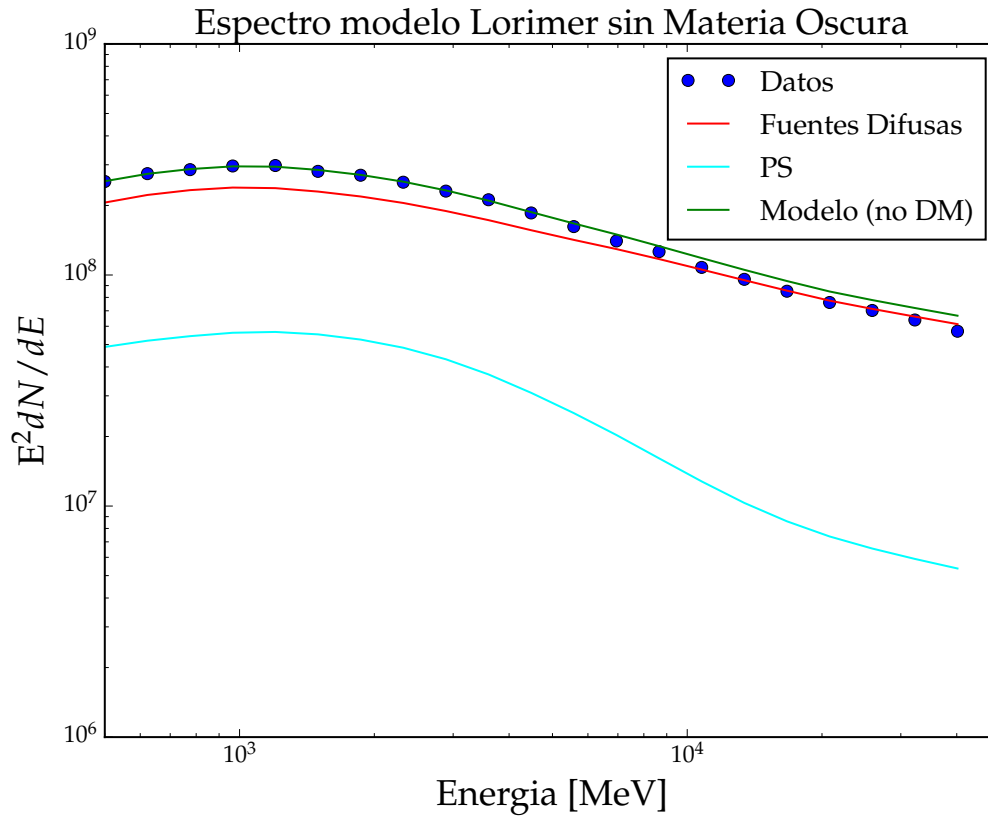
Resultados

Modelo	γ	$\Delta \ln(\mathcal{L})$	$\langle \sigma v \rangle$ ($\times 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)	% eventos de materia oscura
SNRI	1	201.1716	9.11639	6.61 %
	1.1	356.7078	5.07264	5.94 %
	1.2	378.8813	2.47311	5.03 %
	1.26	300.3363	1.44663	4.29 %
	1.3	245.9255	0.943104	3.69 %
SNRII	1	193.0184	9.21857	6.68 %
	1.1	297.0621	5.07511	5.95 %
	1.2	404.655	2.44636	4.97 %
	1.26	366.0852	1.42113	4.21 %
	1.3	238.556	0.922816	3.61 %
Lorimer	1	129.7779	7.60233	5.51 %
	1.1	191.0628	4.15971	4.87 %
	1.2	238.3042	1.98673	4.04 %
	1.26	225.6688	1.15036	3.41 %
	1.3	157.644	0.751884	2.94 %

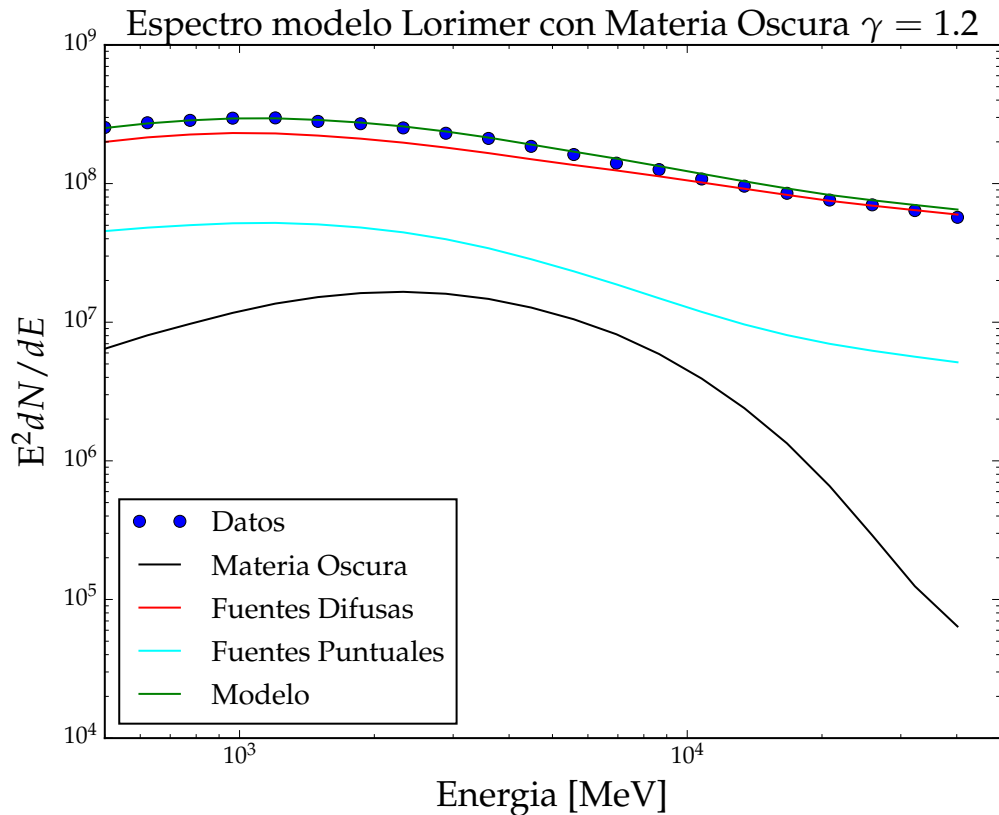
Resultados

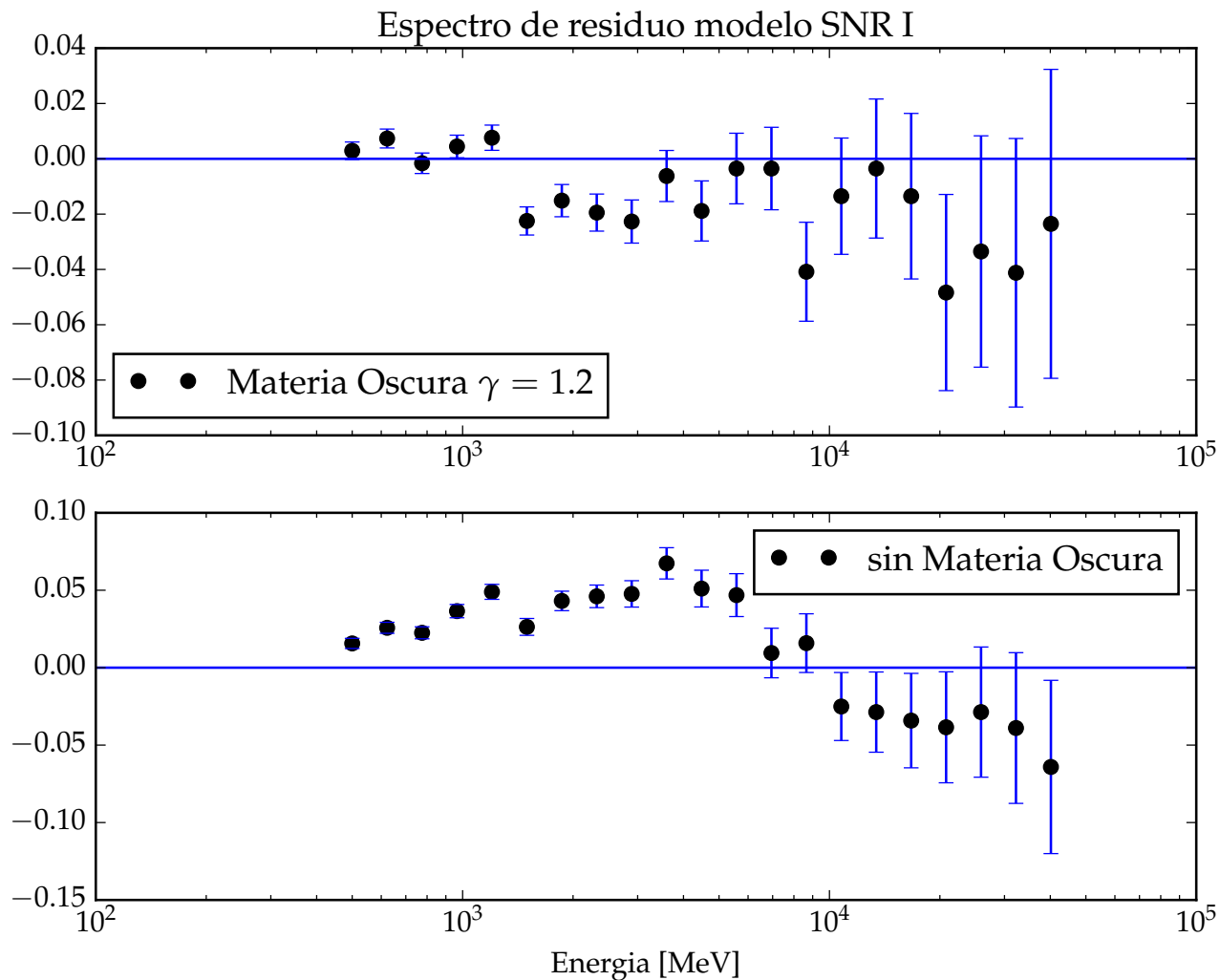


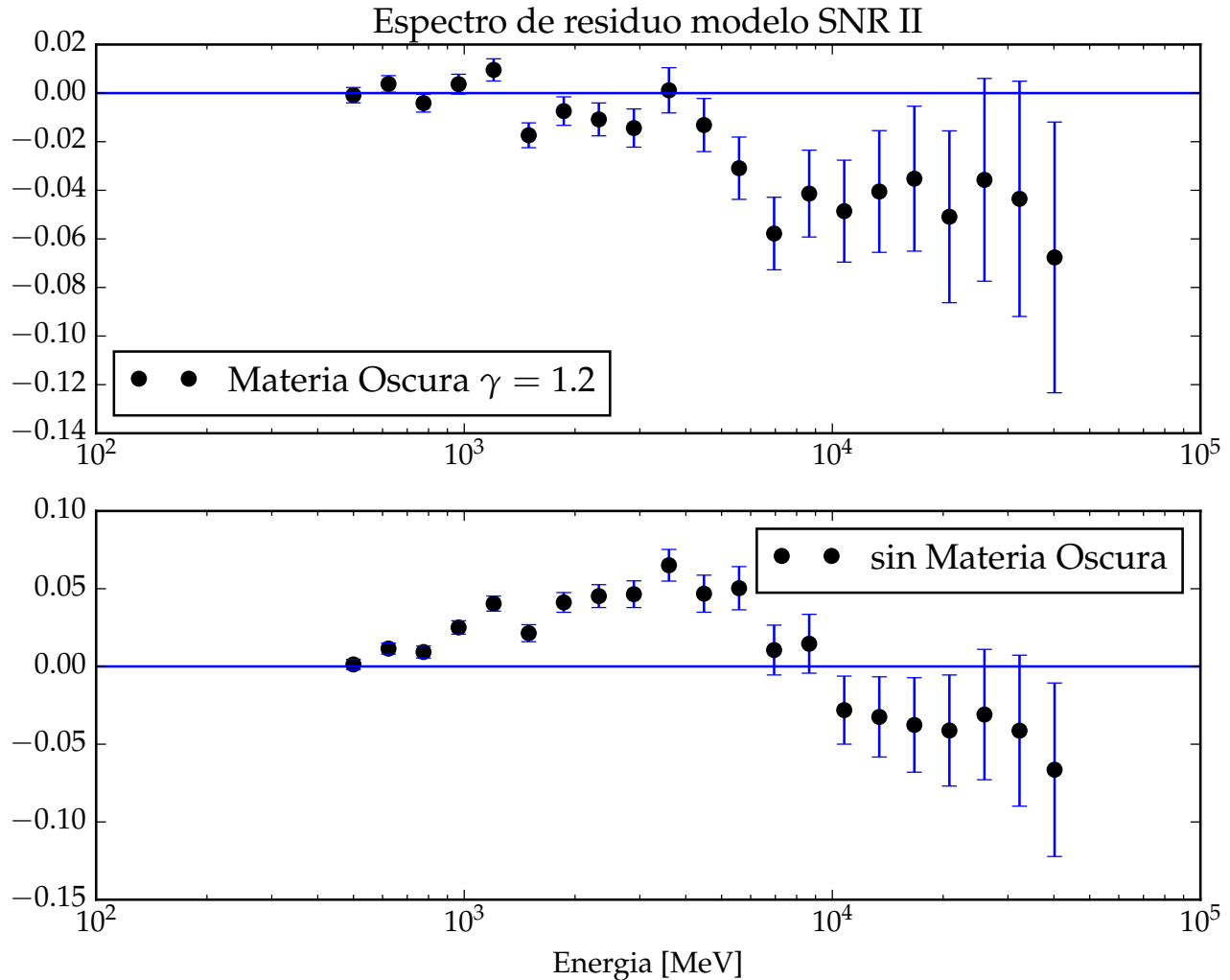
Resultados

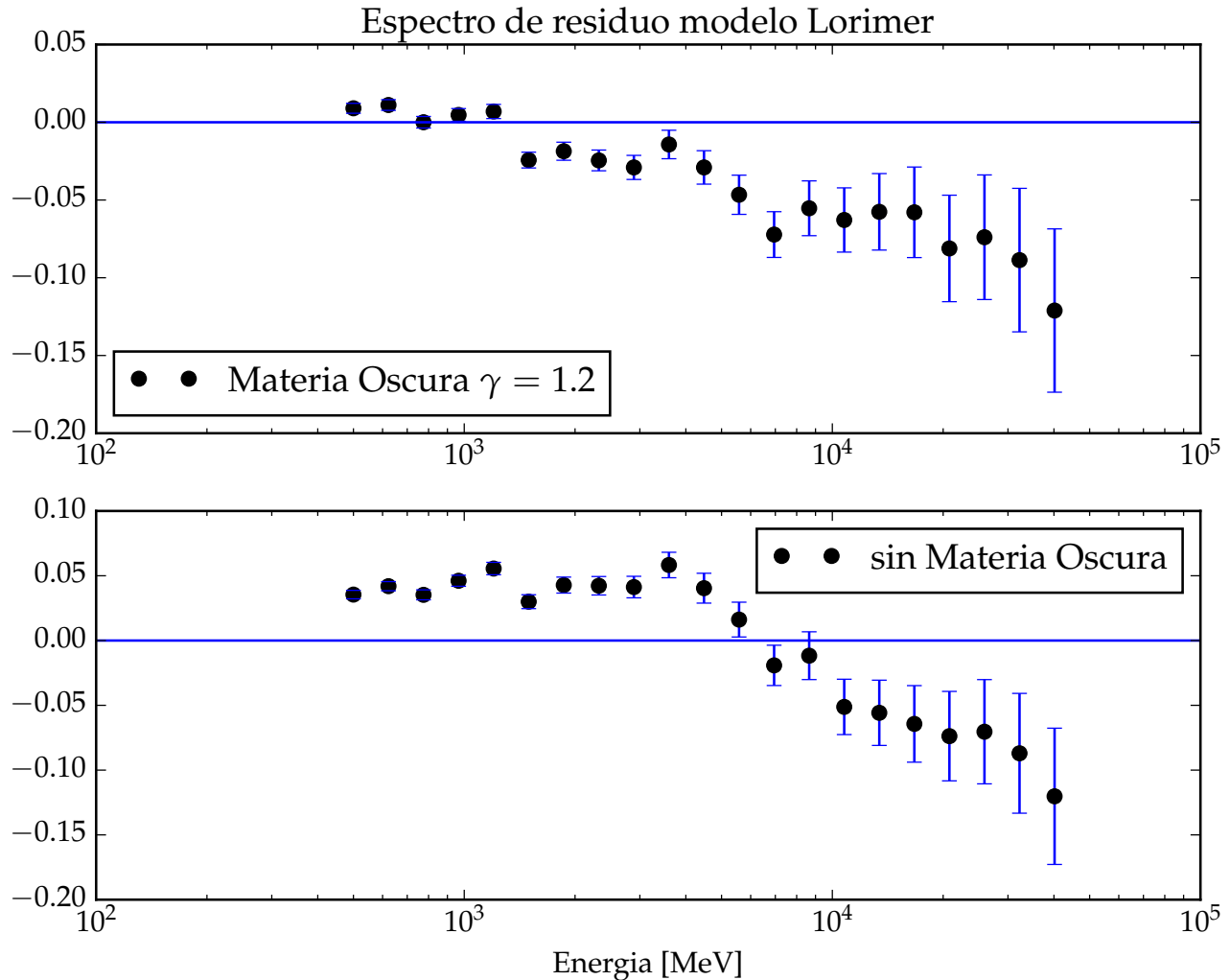


Resultados









Criterio de Información Bayesiana

Maximización del Likelihood no asegura presencia de Materia Oscura. El Criterio de Información Bayesiana (BIC) es un criterio de selección de modelo para 'penalizar' el exceso de parámetros libres presentes en un modelo.

Menor BIC implica:

- El ajuste a los datos es mejor.
- Se necesitan menos variables para explicar los datos.

$$BIC = -2\ln(\mathcal{L}) + k \ln(n)$$

Criterio de Información Bayesiana

ΔBIC	Evidencia a favor del menor BIC	Modelo con $\gamma = 1,2$	ΔBIC
0-2	Débil	SNR I	744.6
2-6	Favorable	SNR II	796.16
6-10	Fuerte	Lorimer	463.46
> 10	Muy Fuerte		

El modelo solo con background no es suficiente. Debe haber una fuente de emisión extra.

Conclusiones

- El ajuste a los datos de observación mejora si materia oscura es añadida, prefiriendo el caso de una distribución con $\gamma = 1,2$, independiente del modelo utilizado como background.
- Sección eficaz de aniquilación de la partícula de materia oscura cercana al valor necesario para que su abundancia coincida con las mediciones de densidad reliquia de WMAP y Planck
- El modelo preferido es consistente con los límites establecidos por la no observación de señal en las galaxias esferoidales enanas satélites de la Vía Láctea.
- Otros fenómenos pueden ser posibles causas del exceso.