

# Física de Rayos Cósmicos a la escala del GeV

Parte  
III



Campos y Cuerdas - 10 Marzo 2017

**Dark Matter Hunters**  
Digital resources for hunting the dark sector

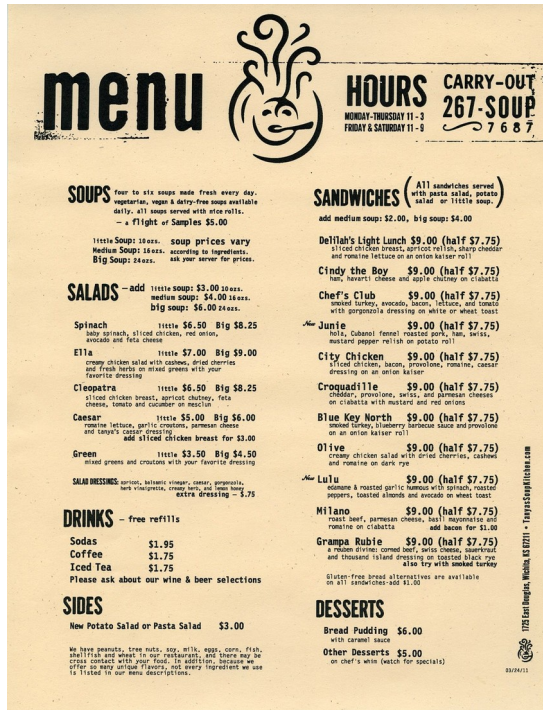


Lawphysics

Roberto A. Lineros

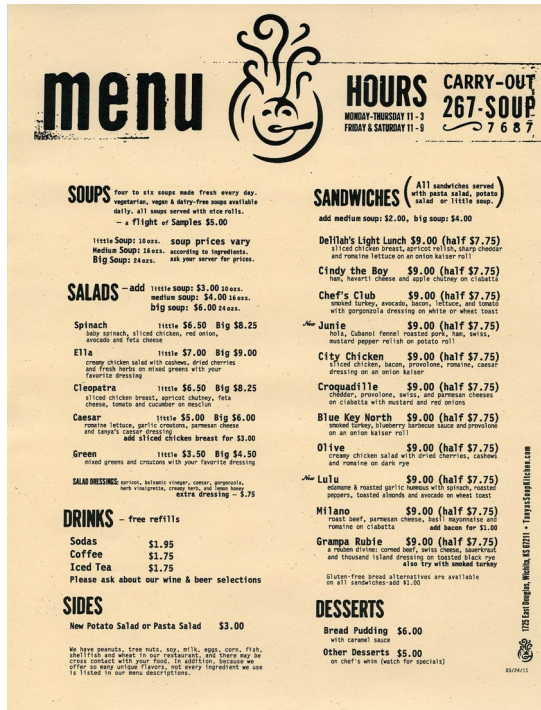
@Roberto\_Lineros

# Programa



- ¿Qué son los rayos cósmicos?
- Propagación de rayos cósmicos
- Fuentes astrofísicas
- Materia Oscura

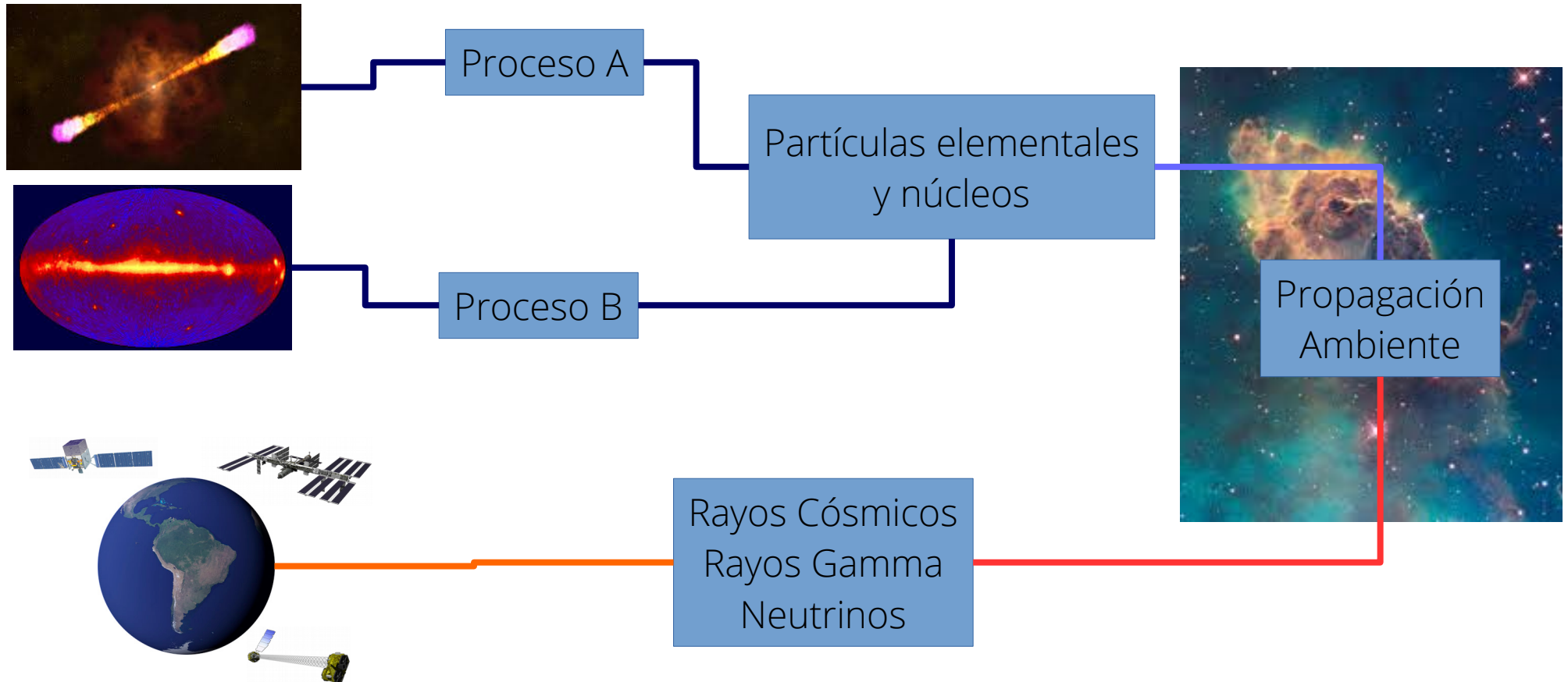
# Programa



- ¿Qué son los rayos cósmicos?
- Propagación de rayos cósmicos
- Fuentes astrofísicas
- Materia Oscura

HOY

# Rayos cósmicos





# Propagación de rayos cósmicos



A diagram illustrating the propagation of cosmic rays. It features a central image of a spiral galaxy. Overlaid on this is a 3D representation of a cylinder, defined by three horizontal ellipses at the top, middle, and bottom. A vertical dashed line on the left side of the cylinder is labeled  $L_z$ , representing its height. A horizontal dashed line on the right side of the middle ellipse is labeled  $R$ , representing its radius. At the bottom of the cylinder, two mathematical expressions are displayed:  $b(\epsilon) = b_0 \epsilon^2$  on the left and  $D(\epsilon) = K_0 \epsilon^\delta$  on the right.

 $L_z$  $R$ 

$$b(\epsilon) = b_0 \epsilon^2$$

$$D(\epsilon) = K_0 \epsilon^\delta$$

# Ecuación de transporte (estática)

La ecuación estática sin términos de convección es:

$$-D(\epsilon)\nabla^2\psi - \partial_\epsilon (b(\epsilon)\psi) = s(\vec{x}, \epsilon)$$

La función de Green corresponde a la solución para una fuente puntual:

$$-D(\epsilon)\nabla^2 G - \partial_\epsilon (b(\epsilon)G) = \delta^3(\vec{x} - \vec{x}_s)\delta(\epsilon - \epsilon_s)$$

La solución para una fuente arbitraria se obtiene haciendo la convolución:

$$\psi(\vec{x}, \epsilon) = \int_\epsilon^\infty d\epsilon_s \int d^3x_s s(x_s, \epsilon_s) G(\vec{x}, \vec{x}_s, \epsilon, \epsilon_s)$$



# Fuentes astrofísicas de electrones y positrones

Primarios: Remanentes de supernova y pulsars

- Secundarios: Interacción RC nucleares con el medio interestelar



# Fuentes astrofísicas de electrones y positrones

Primarios: Remanentes de supernova y pulsars

- Secundarios: Interacción RC nucleares con el medio interestelar

Esto lo vimos en  
la clase anterior



# Rayos cósmicos primarios

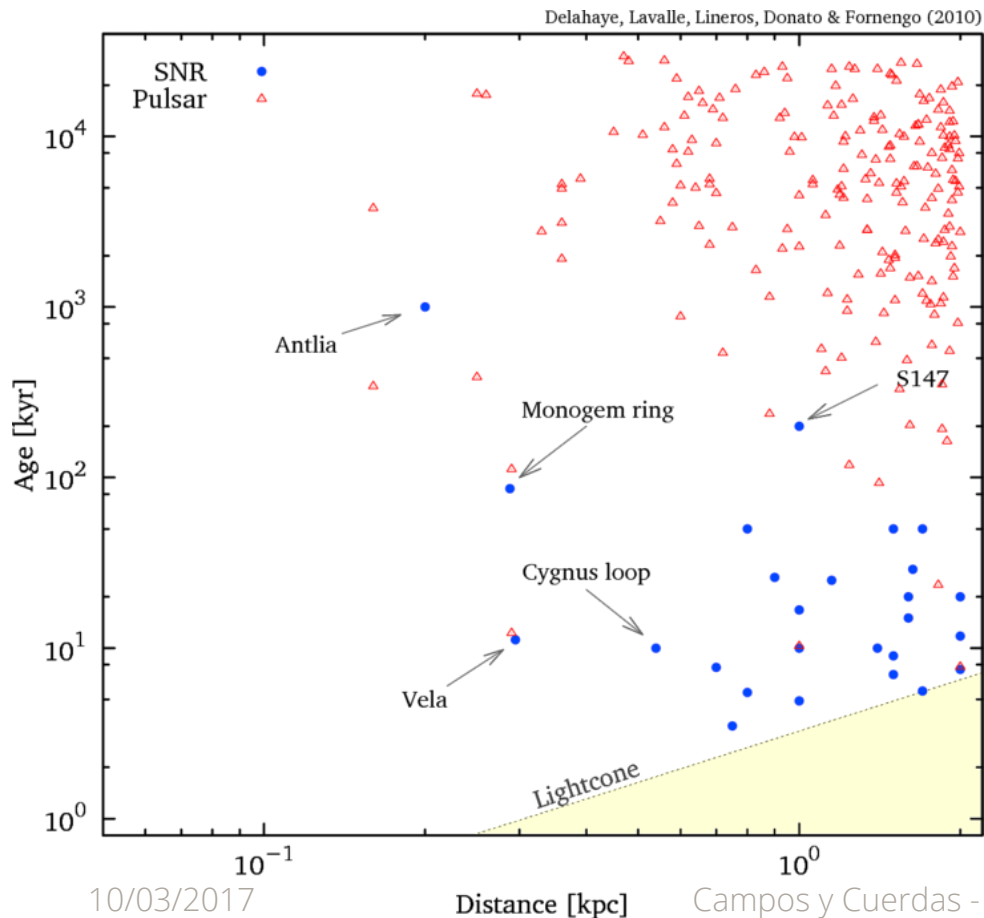


Son generados por la actividad astrofísica.

A la escala del GeV, las fuentes típicas son:

- Remanentes de supernova
- Pulsares

# Rayos cósmicos primarios



La diferencia con otras fuentes es que son discretas en el tiempo.

A una distancia de 2 kpc:

- 20 SNRs
- 200 Pulsars

$$\Gamma_{\text{SN}} \sim 3/\text{siglo}$$

# Ecuación de transporte (tiempo dependiente)

En este caso la ET se modifica:

$$\partial_t \psi - D(\epsilon) \nabla^2 \psi - \partial_\epsilon (b(\epsilon) \psi) = s(t, \vec{x}, \epsilon)$$

Y la función de Green se obtiene de la misma manera:

$$\partial_t G - D(\epsilon) \nabla^2 G - \partial_\epsilon (b(\epsilon) G) = \delta(t - t_s) \delta^3(\vec{x} - \vec{x}_s) \delta(\epsilon - \epsilon_s)$$

# Ecuación de transporte (tiempo dependiente)

La función de Green tiempo dependiente es más amigable:

$$G(t, t_s, \vec{x}, \vec{x}_s, \epsilon, \epsilon_s) = \delta(t - t_s - \tau_c) G(\vec{x}, \vec{x}_s, \epsilon, \epsilon_s)$$

Donde el tiempo de enfriamiento es:

$$\tau_c(\epsilon, \epsilon_s) = \int_{\epsilon}^{\epsilon_s} \frac{d\epsilon}{b(\epsilon)}$$

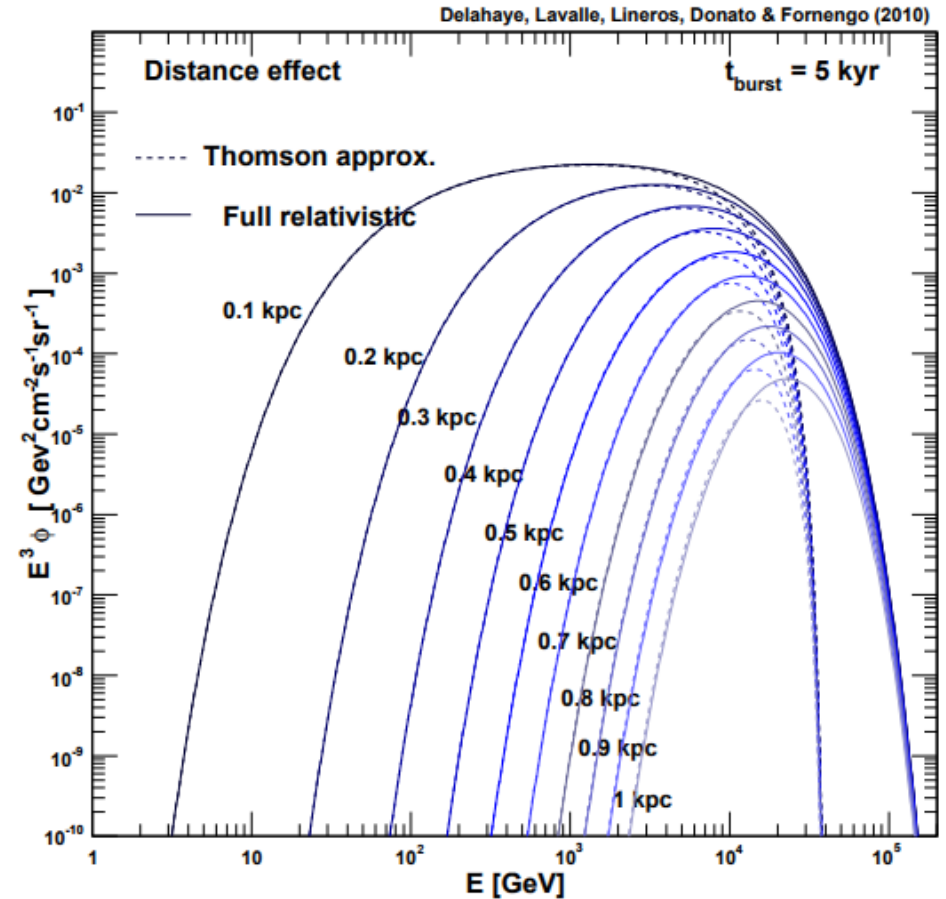
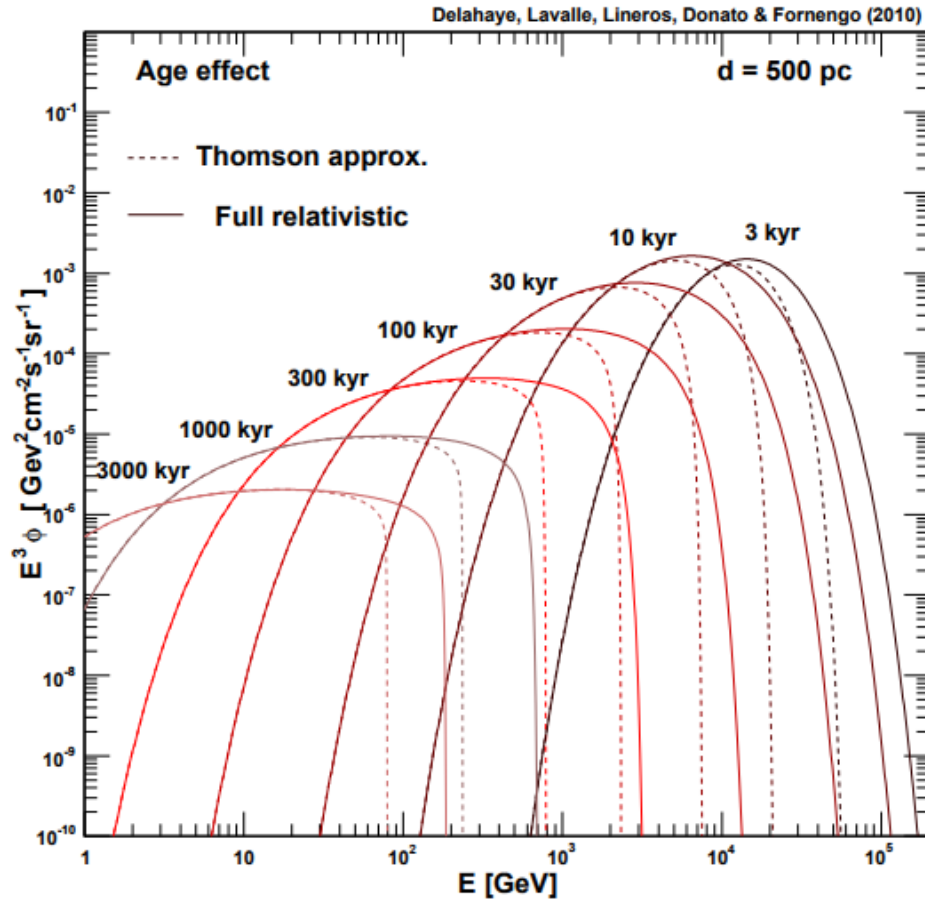


# Ecuación de transporte (tiempo dependiente)

Y la solución general para cualquier fuente:

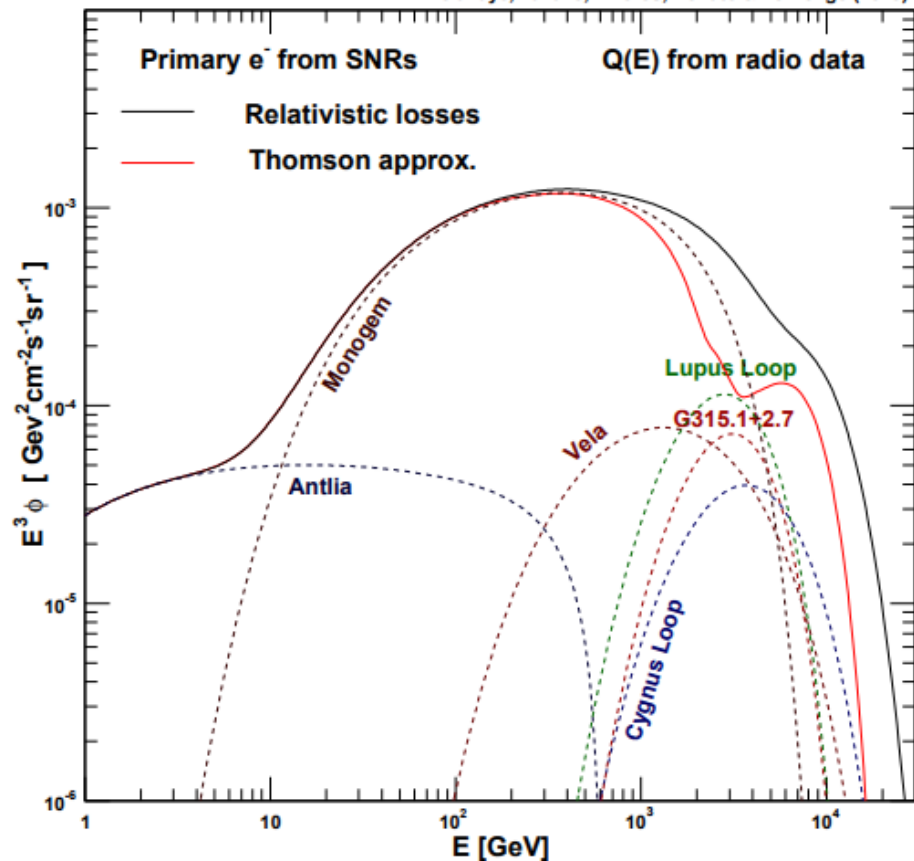
$$\psi(t, \vec{x}, \epsilon) = \int_{-\infty}^t dt_s \int_{\epsilon}^{\infty} d\epsilon_s \int d^3x_s s(t_s, x_s, \epsilon_s) G(t, t_s, \vec{x}, \vec{x}_s, \epsilon, \epsilon_s)$$

# Soluciones tiempo dependiente

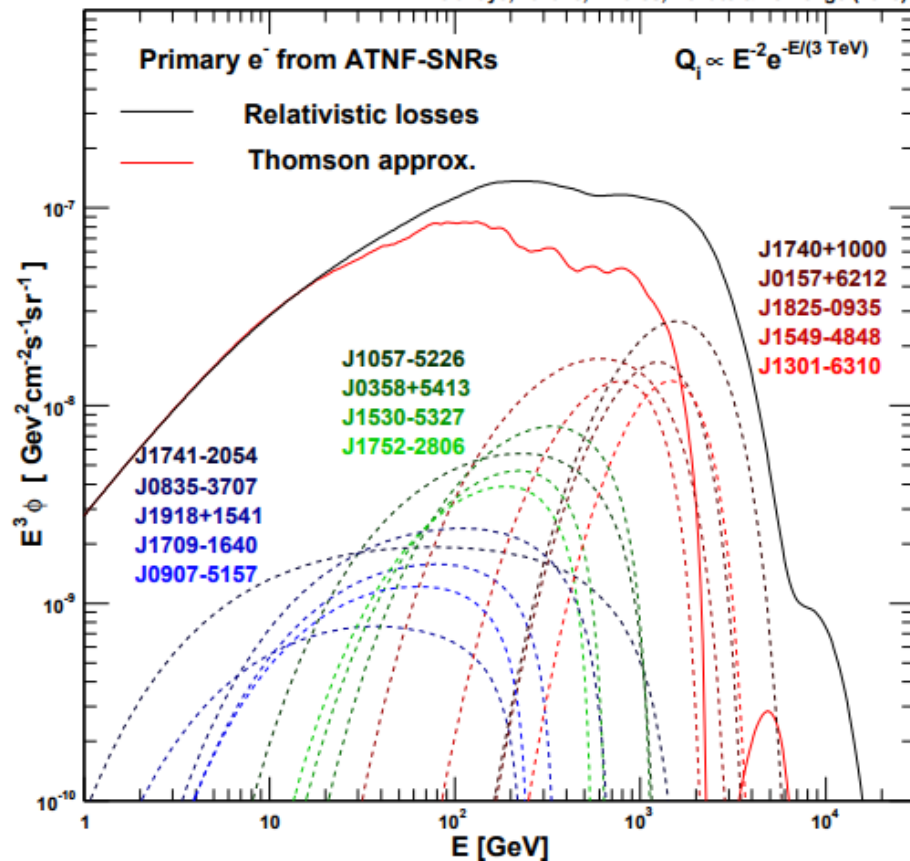


# Flujos provenientes de primarios

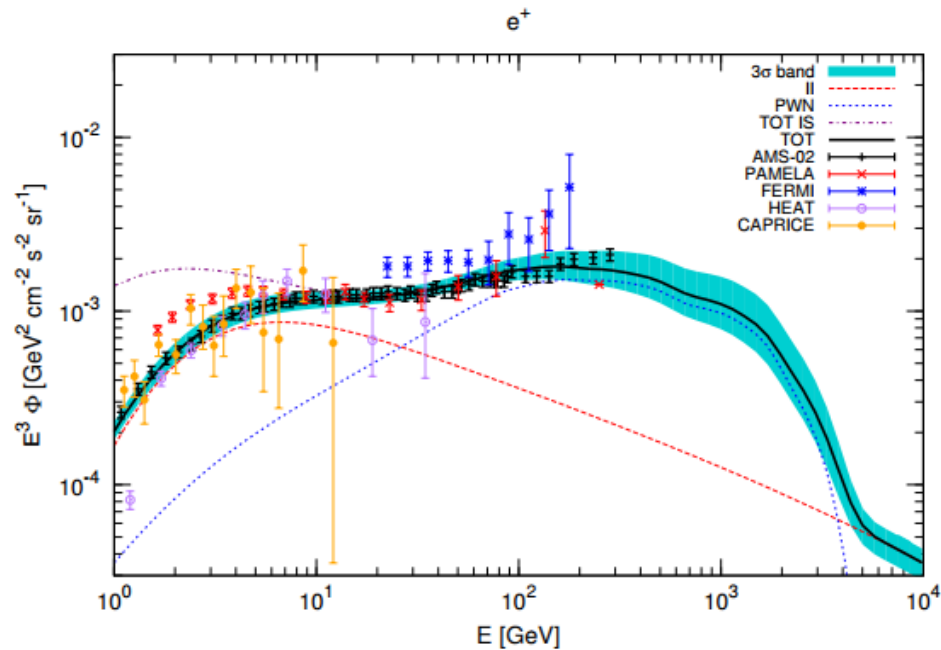
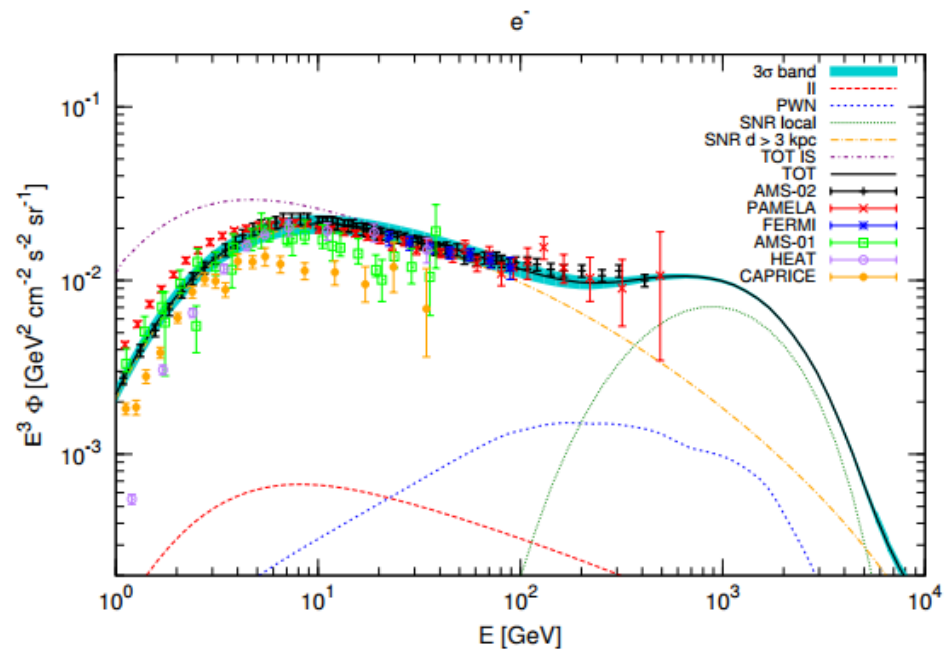
Delahaye, Lavalie, Lineros, Donato & Fornengo (2010)



Delahaye, Lavalie, Lineros, Donato & Fornengo (2010)

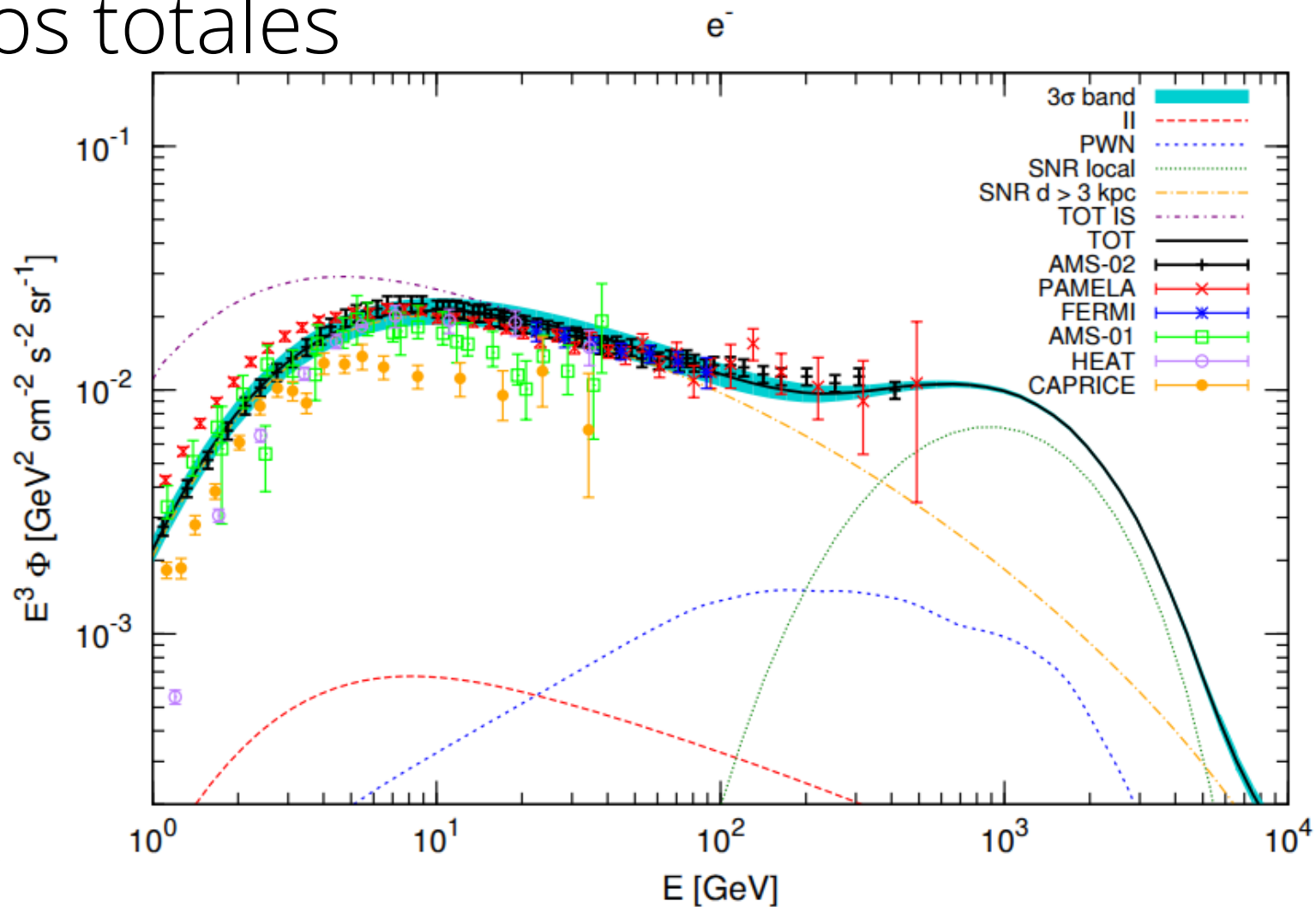


# Flujos totales

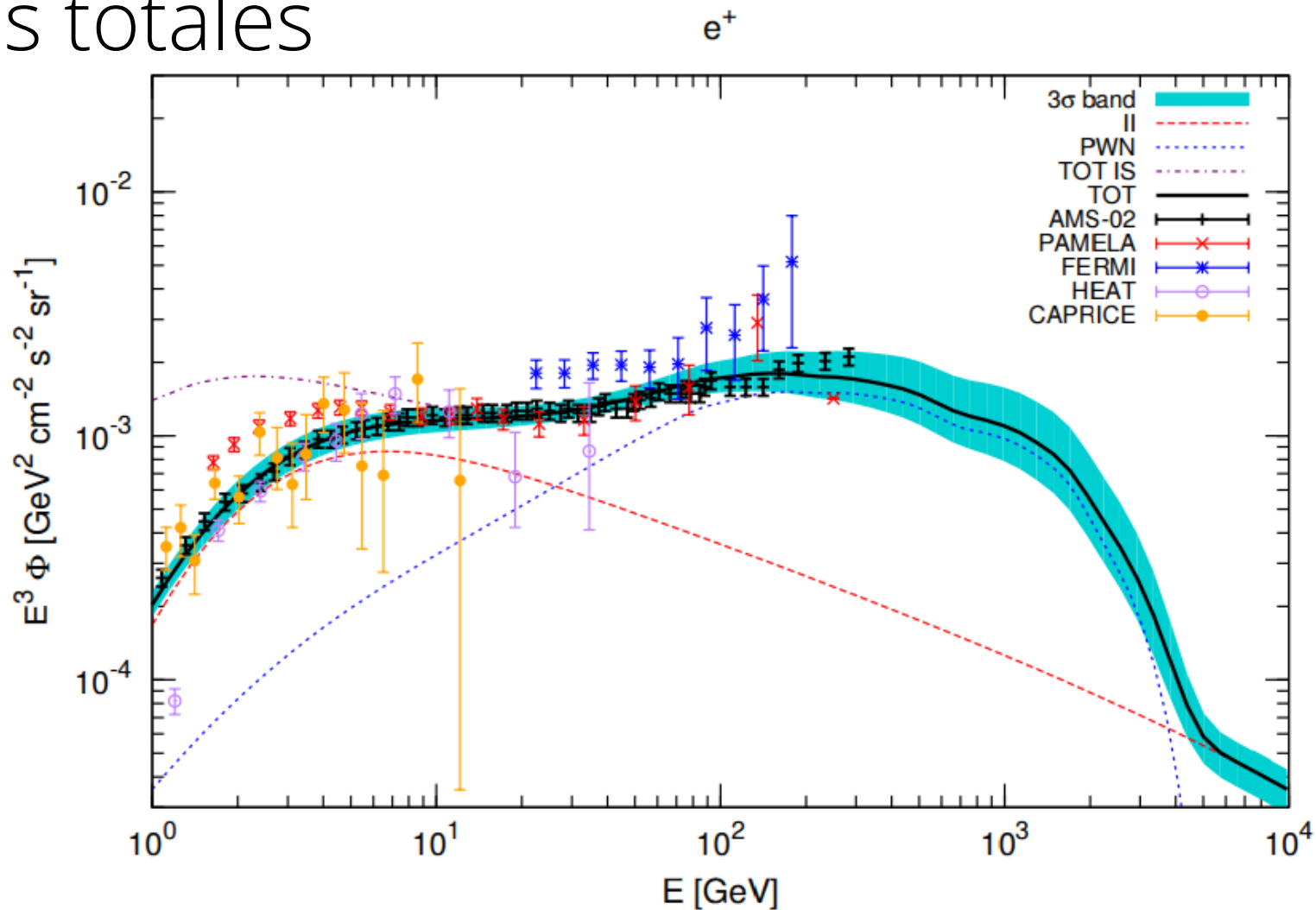




# Flujos totales



# Flujos totales





The background of the slide is a detailed visualization of the cosmic web, showing a complex network of dark matter filaments and galaxy clusters. The filaments are depicted as thin, interconnected lines of purple and blue, while the clusters are represented by denser, brighter regions of yellow and orange. The overall pattern is a dense, interconnected mesh that fills the entire frame.

Fuentes exóticas de rayos cósmicos:

Materia Oscura





Vera Rubin

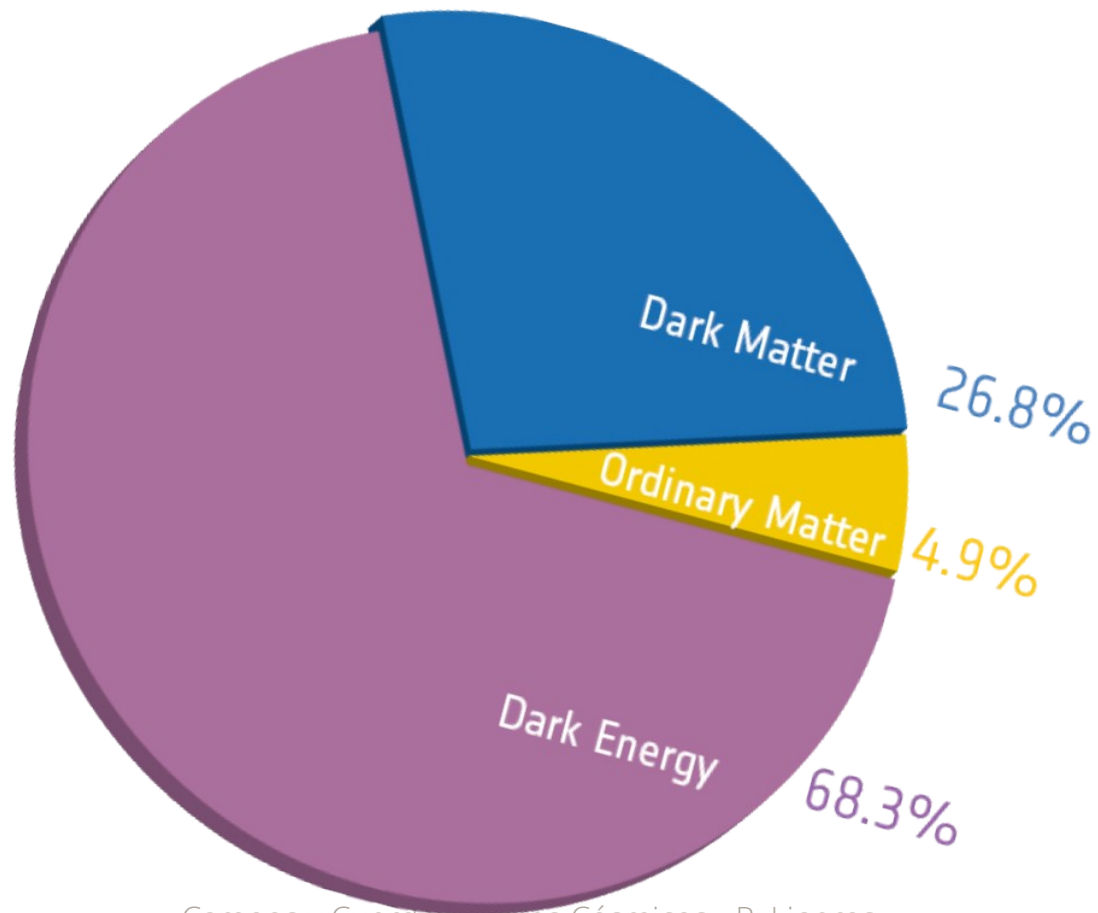


Fritz Zwicky

Introducción (muy rápida) a la  
materia oscura

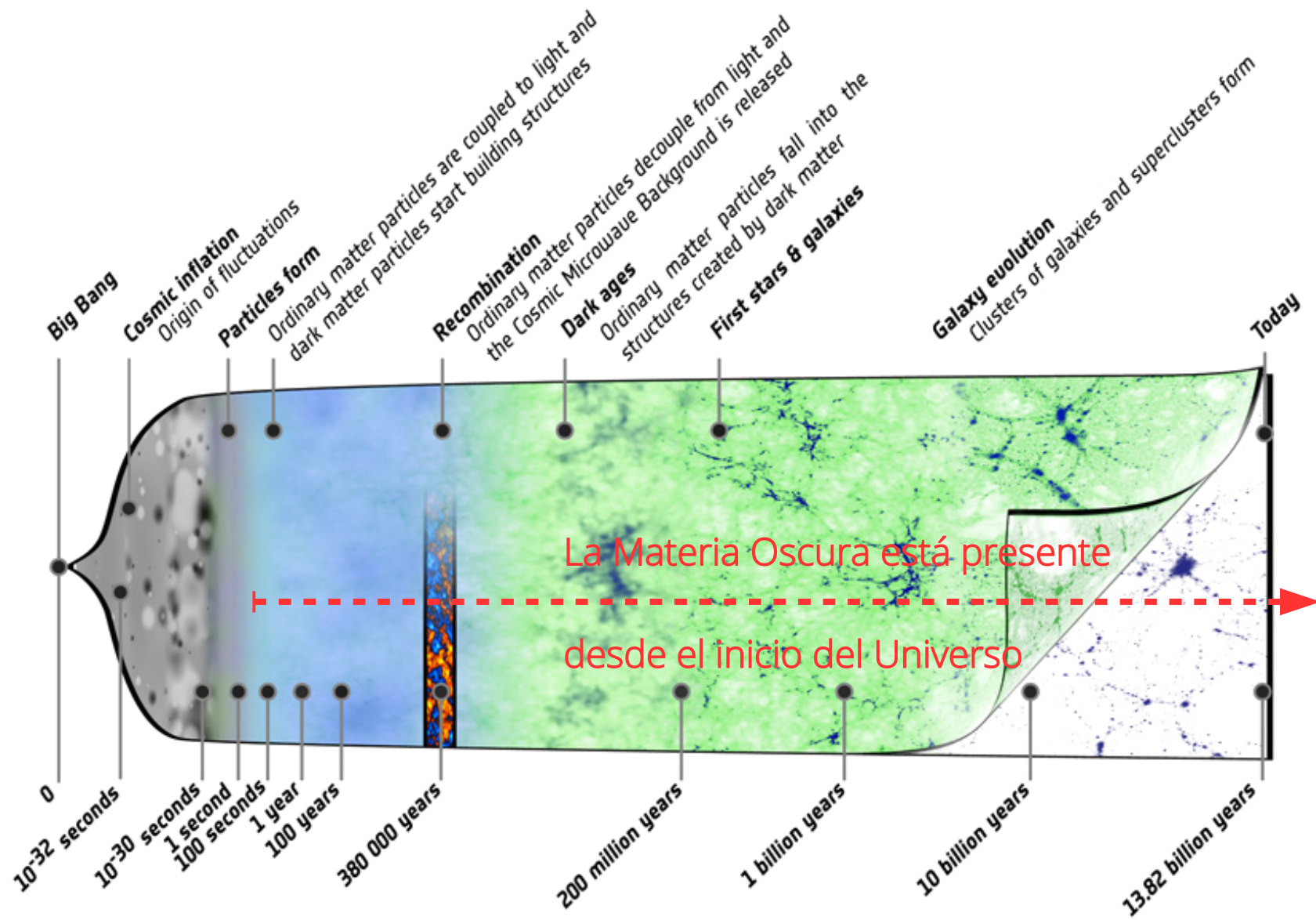


# Los ingredientes del Universo

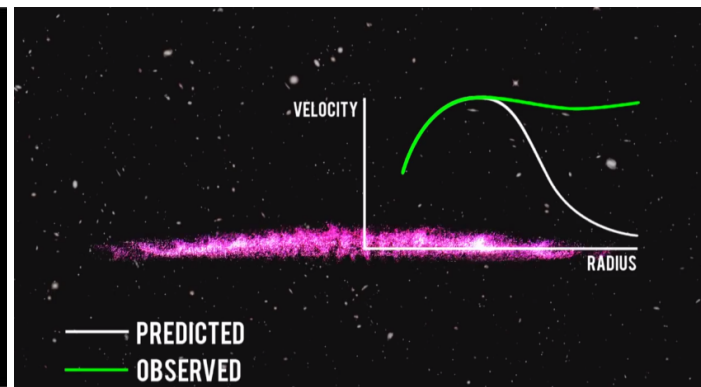
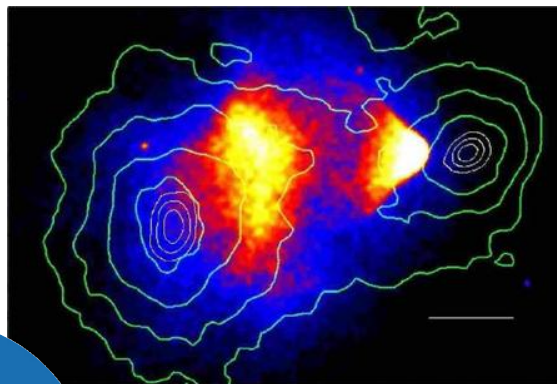
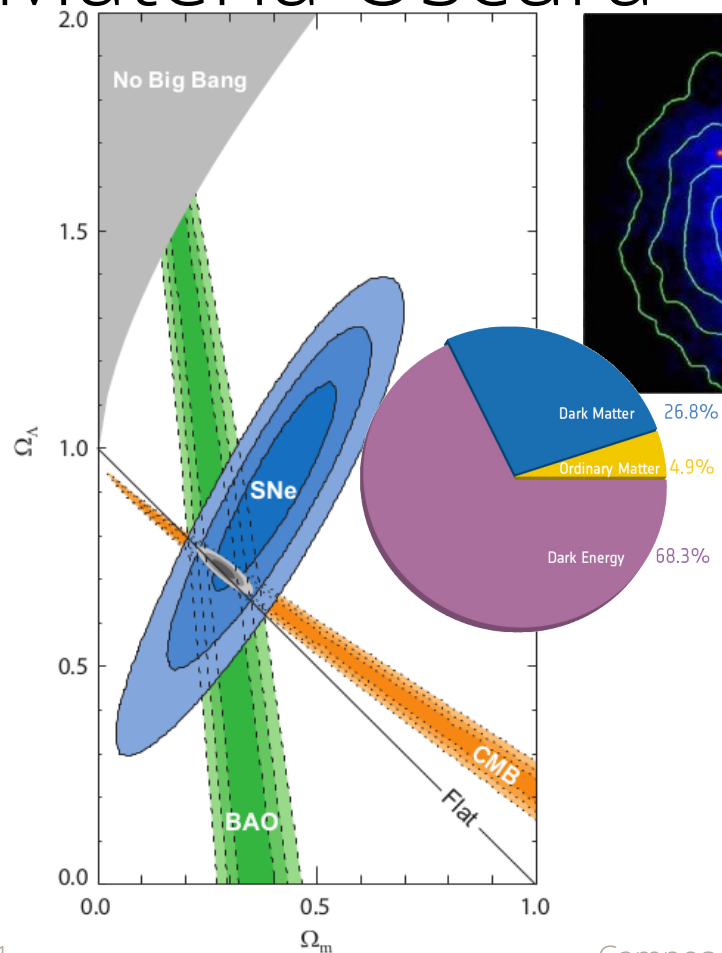


# Los ingredientes del Universo





# Materia Oscura

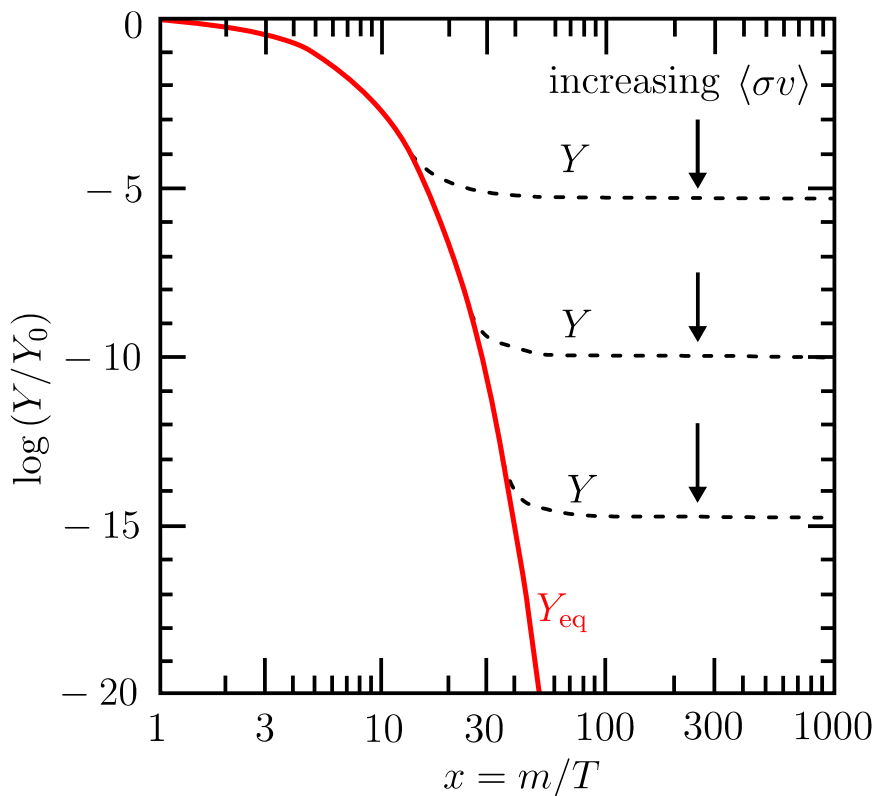


Observaciones que sustentan esta hipótesis:

- Dinámica de (cúmulos de) galaxias
- Formación de estructuras
- Anisotropías del CMB
- Oscilación Acústica de Bariones

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 = 0.1196 \pm 0.0031$$

# Mat eria Oscura tipo WIMP



- Remanente **térmico** el Big Bang
- Abundancia **correcta** para  

$$\langle\sigma v\rangle \sim 1 \text{ pb} \cdot c$$
- Masa en el rango del **GeV-TeV**

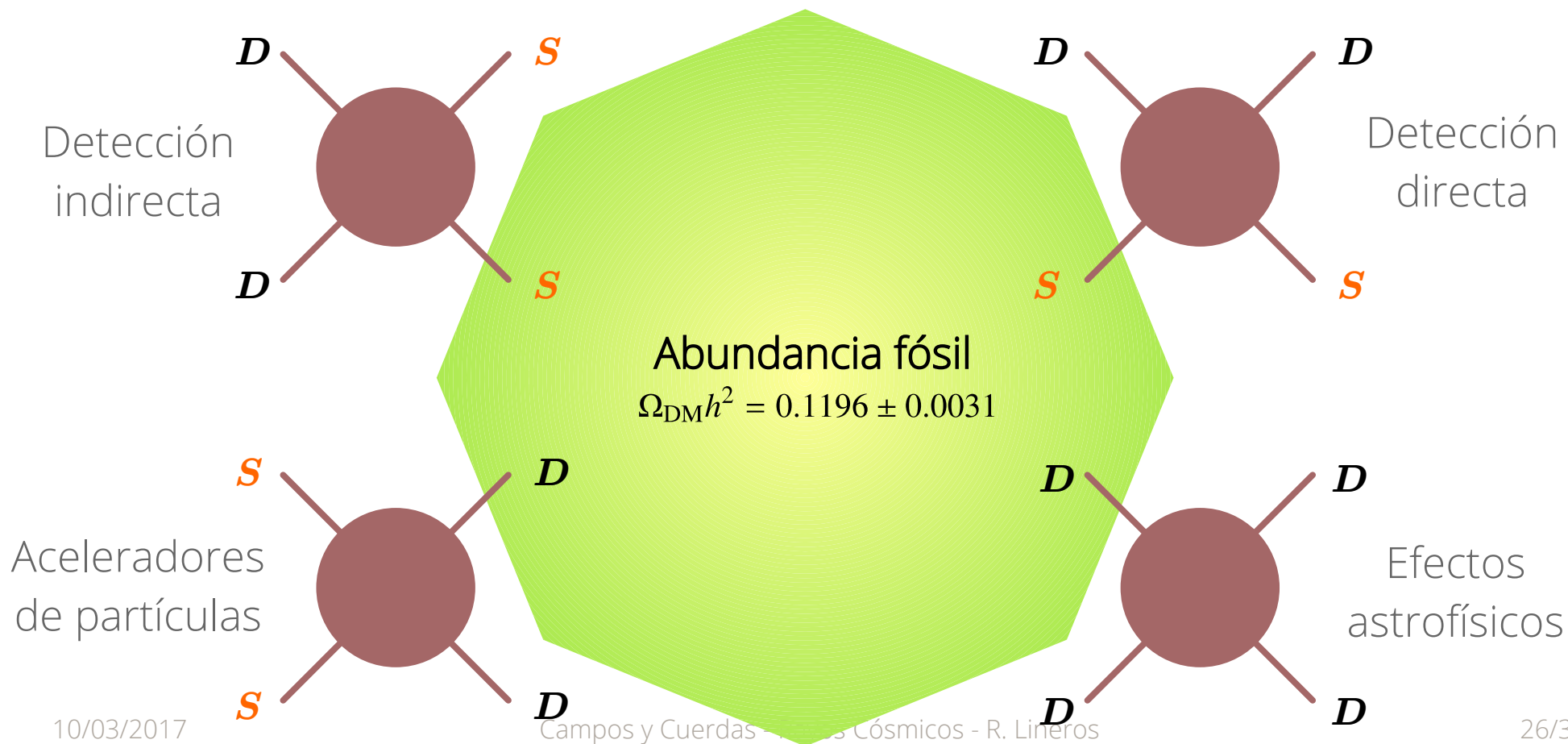
Para WIMPs:

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \simeq 0.1 \frac{3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle\sigma v\rangle_{\text{f.o.}}}$$

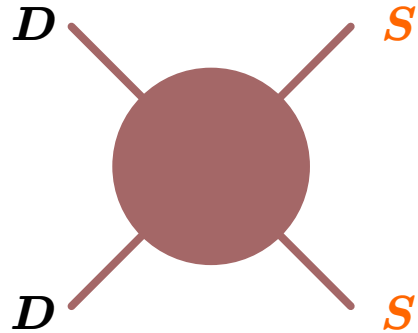
$$T_{\text{DM}}^{\text{f.o.}} \simeq \frac{1}{20} m_{\text{DM}}$$



# Búsquedas de Materia Oscura

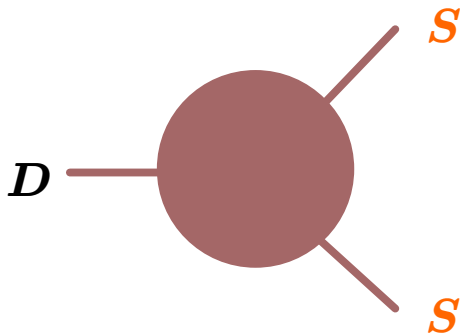


# Matéria Oscura como fuente



Aniquilación

$$s_{\text{DM}}(\vec{x}, \epsilon) = \eta \langle \sigma v \rangle \frac{\rho_{\text{DM}}^2(\vec{x})}{m_{\text{DM}}^2} \frac{dn_X}{d\epsilon}(\epsilon)$$



Desintegración

$$s_{\text{DM}}(\vec{x}, \epsilon) = \frac{1}{\tau_{\text{DM}}} \frac{\rho_{\text{DM}}(\vec{x})}{m_{\text{DM}}} \frac{dn_X}{d\epsilon}(\epsilon)$$



# Materia Oscura como fuente

Sección eficaz de aniquilación

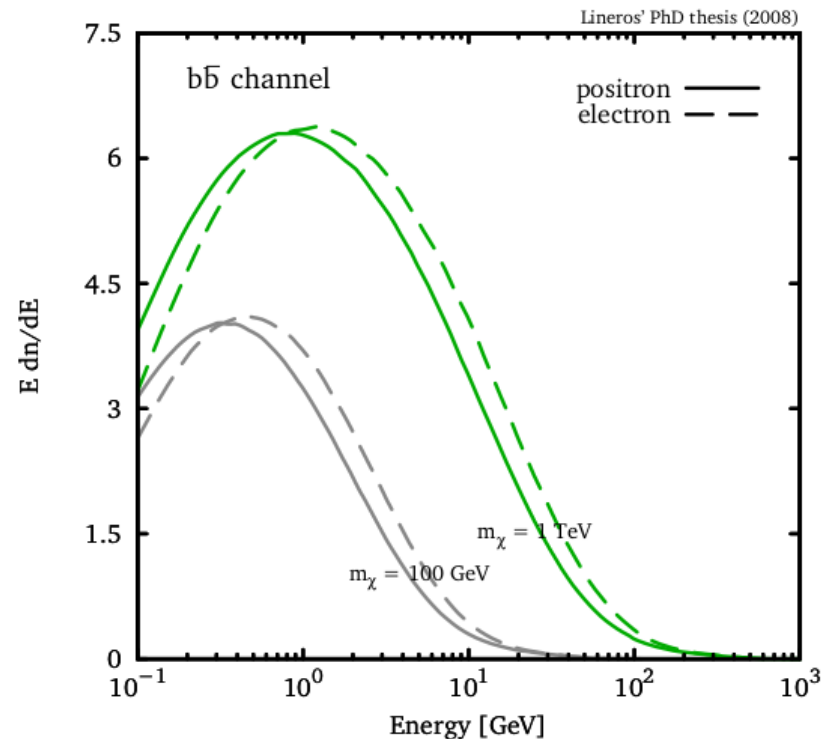
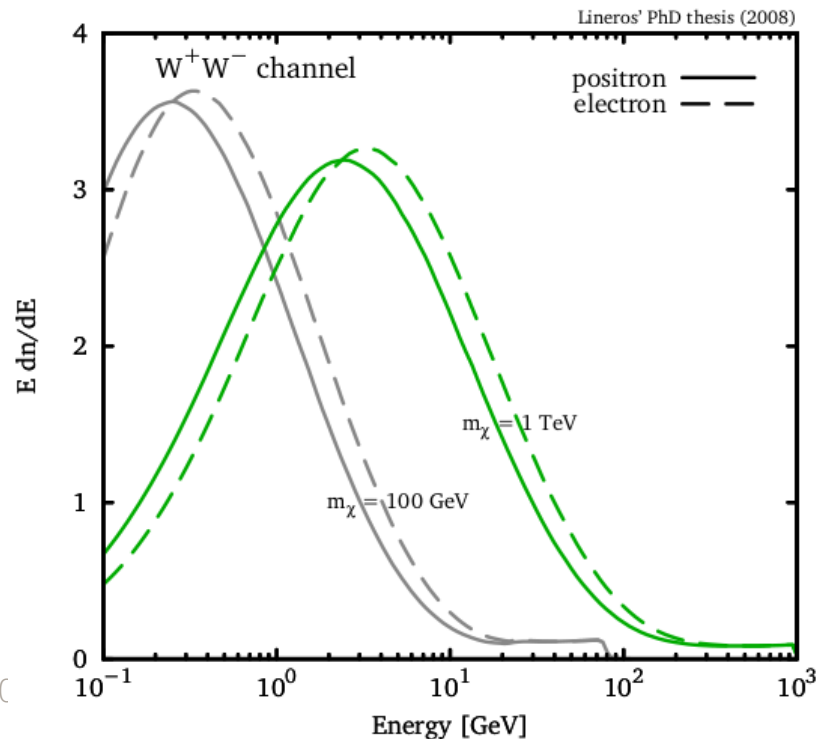
Espectro de emisión

$$s_{\text{DM}}(\vec{x}, \epsilon) = \eta \langle \sigma v \rangle \frac{\rho_{\text{DM}}^2(\vec{x})}{m_{\text{DM}}^2} \frac{dn_X}{d\epsilon}(\epsilon)$$

Densidad de número

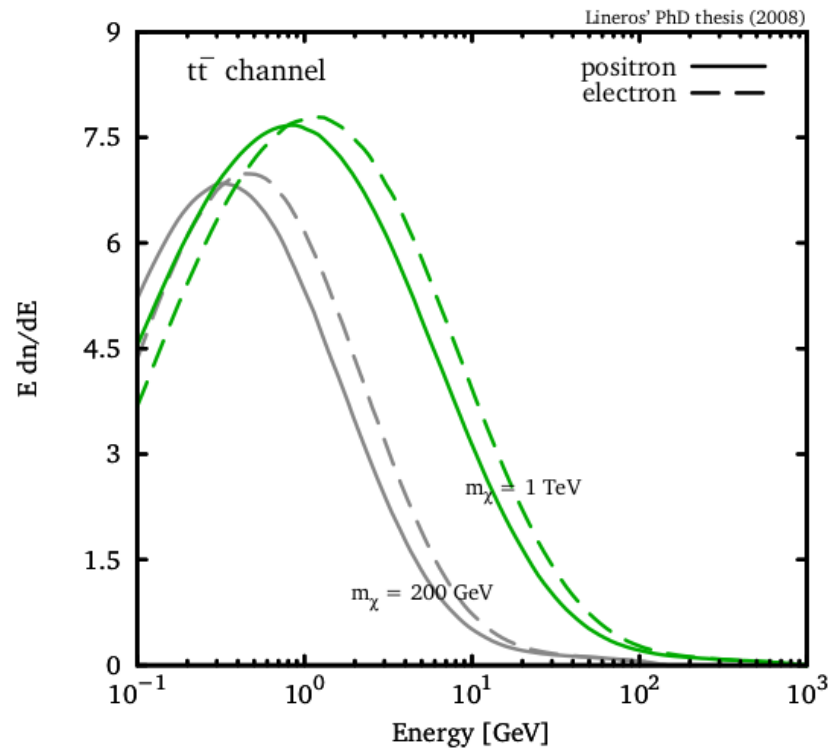
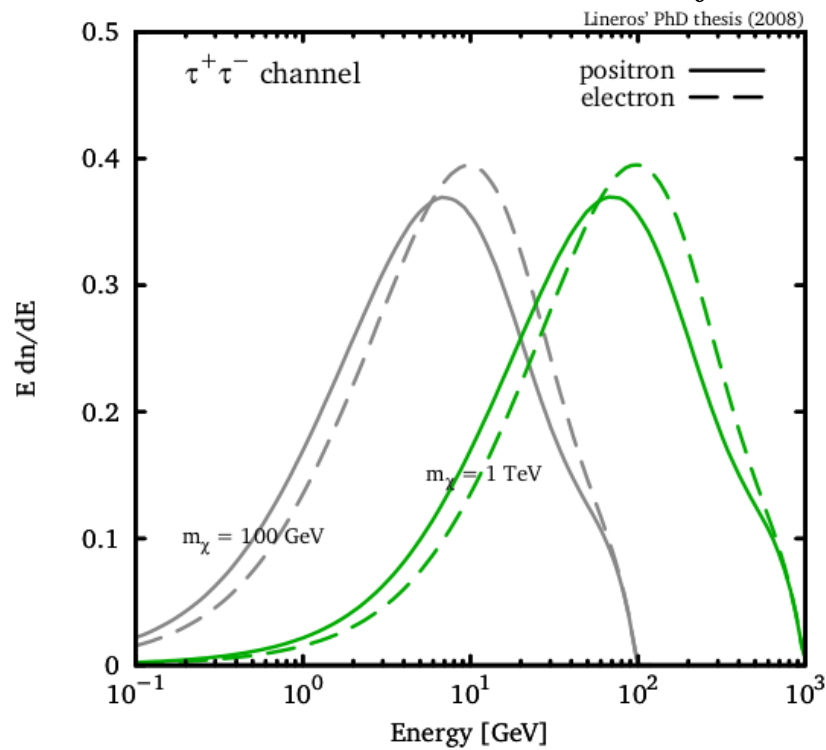
# Materia Oscura como fuente

$$\frac{dn_X}{d\epsilon}(\epsilon) = \sum_i Br(i \rightarrow X) \frac{dn_{iX}}{d\epsilon}(\epsilon)$$



# Materia Oscura como fuente

$$\frac{dn_X}{d\epsilon}(\epsilon) = \sum_i Br(i \rightarrow X) \frac{dn_{iX}}{d\epsilon}(\epsilon)$$



# Solución de Ecuación de Transporte

La función de halo para la materia oscura a la posición de la Tierra:

$$\tilde{I}_{\odot}(\lambda) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} A_{i,n} J_0(k_{r,i} r_{\odot}) \exp\left(-\frac{1}{4} g_{i,n}^2 \lambda^2\right)$$

Donde:

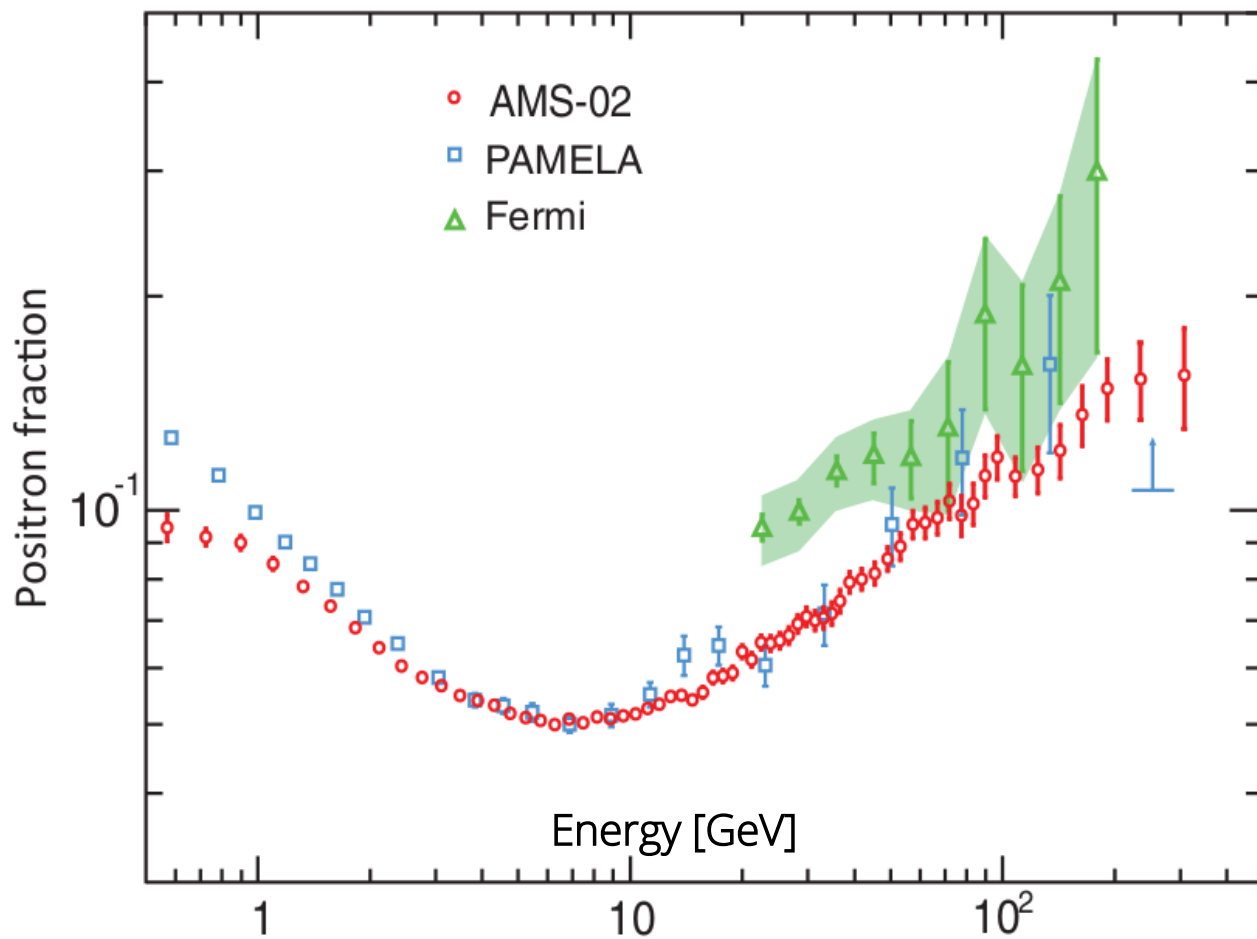
$$A_{i,n} = \frac{2}{L_z R^2 J_1(k_{r,i} R)} \int_0^R r dr \int_{-L}^L dz f(r, z) J_0(k_{r,i} r) \cos(k_{z,n} z)$$

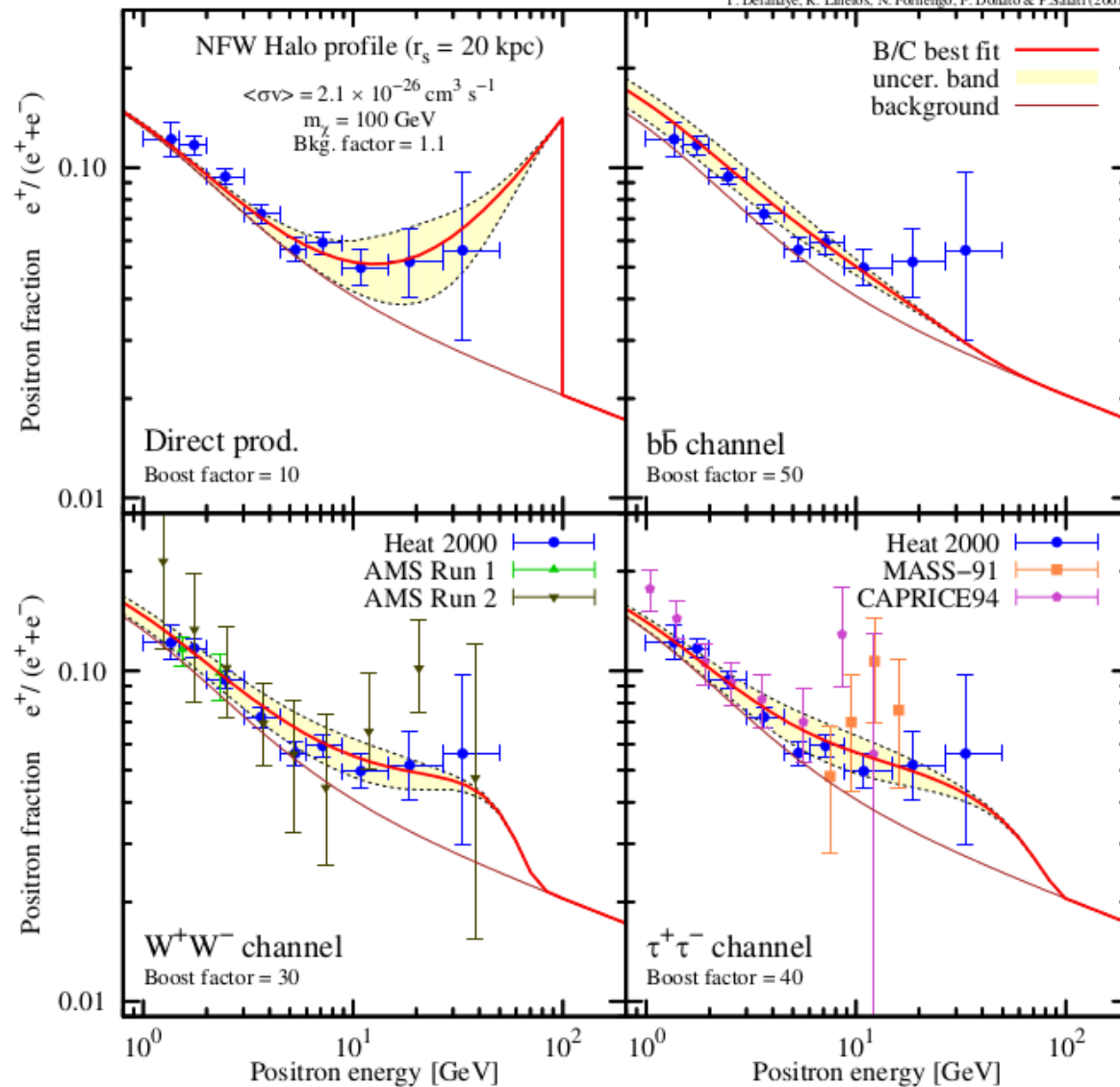
$$f(r_{\odot}, z_{\odot}) = 1 \qquad k_{r,i} = \frac{\alpha_{0,i}}{R} \qquad k_{z,n} = \frac{n\pi}{2L}$$

# Y el flujo de electrones y positrones

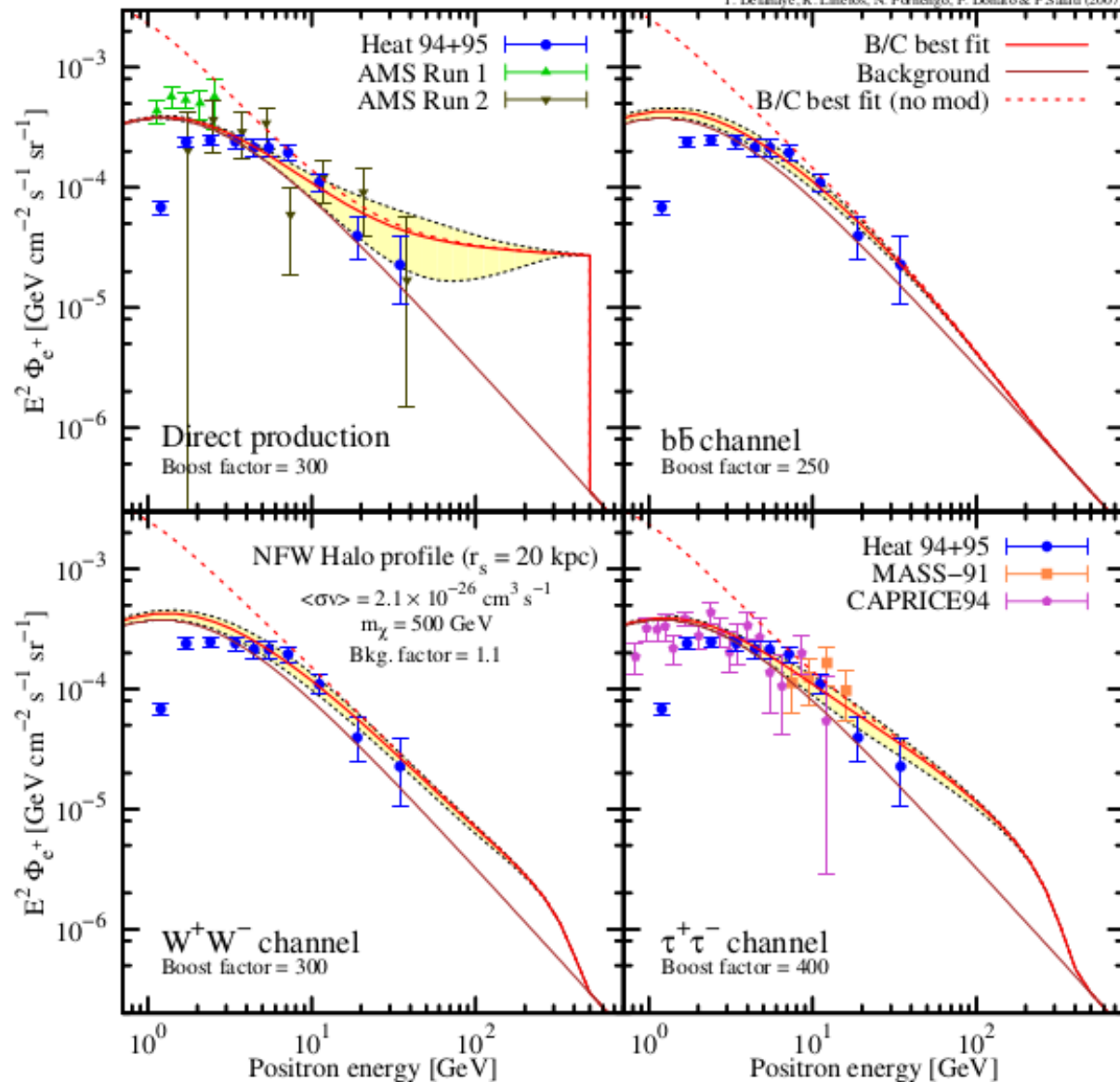
$$\Phi_e(\epsilon) = \frac{\beta c}{4\pi} \left( \eta \langle \sigma v \rangle \frac{\rho_{\text{DM}}^2(\vec{x}_\odot)}{m_{\text{DM}}^2} \right) \frac{1}{b_0 \epsilon^2} \int_\epsilon^\infty d\epsilon_s \frac{dn_e}{d\epsilon}(\epsilon_s) \tilde{I}_\odot(\lambda(\epsilon, \epsilon_s))$$

# Buscando MO con positrones

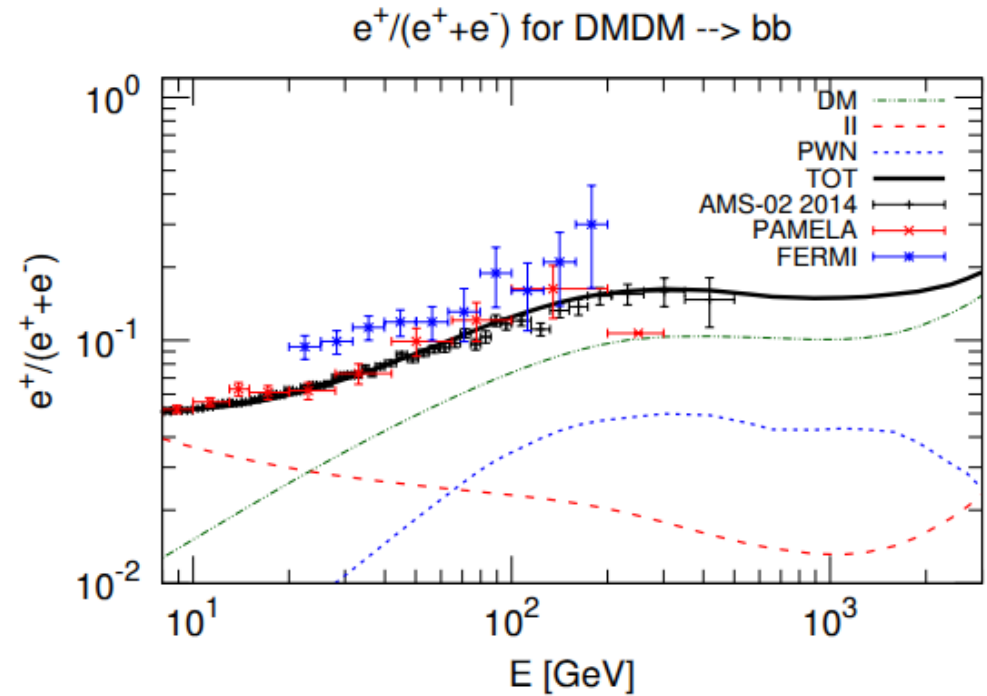
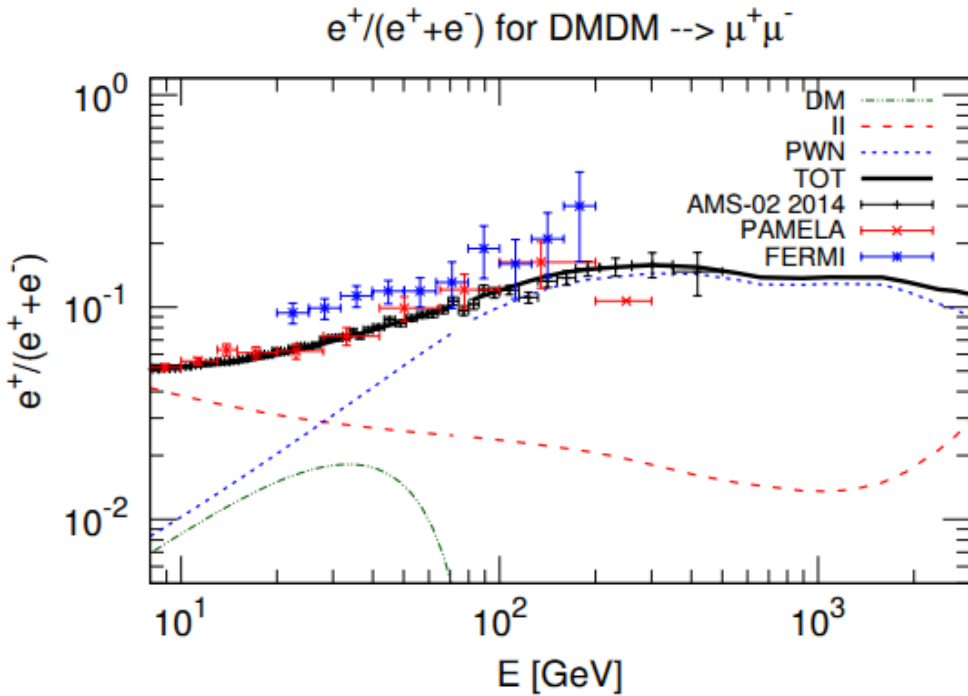








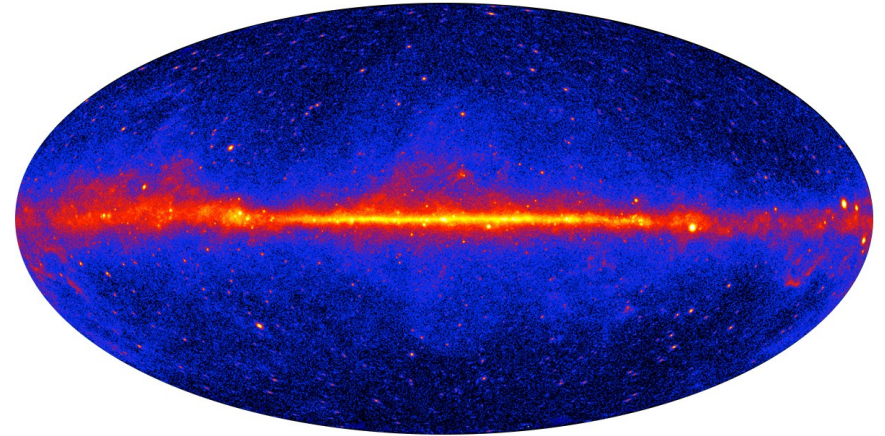
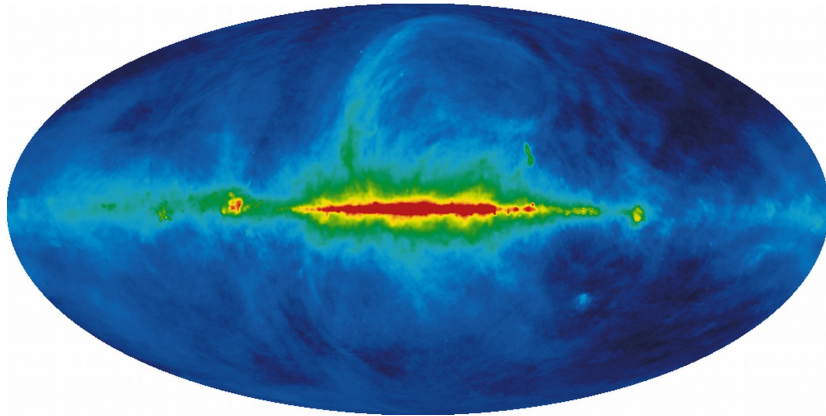
# Ajustes de los flujos



Di Mauro et al. arxiv:1507.07001

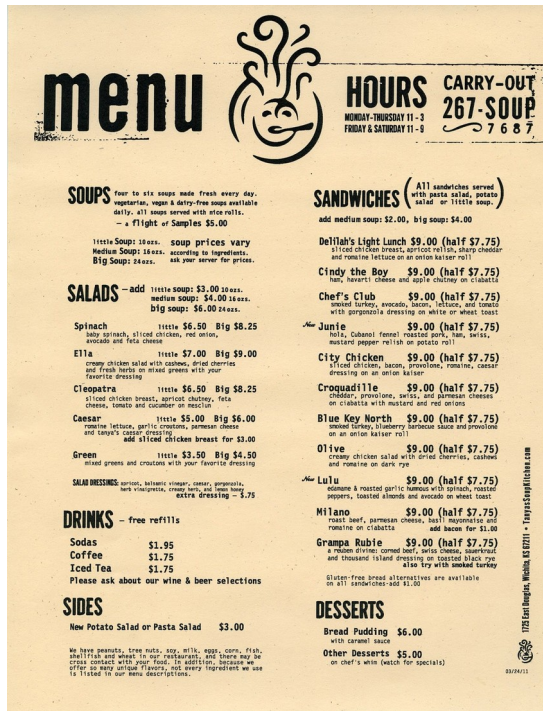
# Otras señales por estudiar...

- Emisión Radio (Sincrotrón)
- Emisión Rayos X (Scattering Inverso de Compton)
- Emisión de Rayos Gamma (Scattering Inverso de Compton)





# Lo que hemos visto:



- ¿Qué son los rayos cósmicos?
- Propagación de rayos cósmicos
- Fuentes astrofísicas
- Materia Oscura

Fin :)