

# Búsquedas indirectas de materia oscura en cúmulos de galaxias con CTA

Sergio Hernández-Cadena<sup>1</sup>, Rubén Alfaro Molina<sup>1</sup>,  
José Andrés García González<sup>2</sup>, Alvaro Yobain Prats Martínez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INSTITUTO DE FÍSICA, UNAM,

<sup>2</sup>TECNOLÓGICO DE MONTERREY, ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS  
DIVISIÓN DE RAYOS CÓSMICOS [SMF] (ONLINE)

Noviembre, 2021



# Contenidos



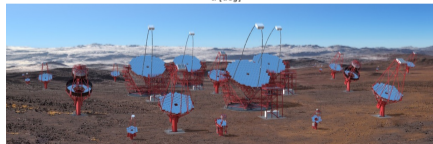
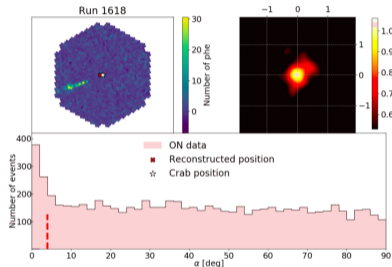
- 1 Introducción
- 2 Cúmulos de galaxias
- 3 Observaciones
- 4 Análisis
- 5 Resultados
- 6 Resumen

# Introducción

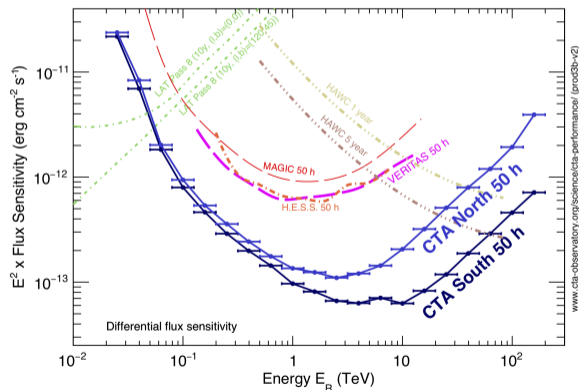
# CTA: Arreglo de Telescopios Cherenkov

Observatorio terrestre de rayos gamma de siguiente generación

1. Energías desde 20 GeV hasta 300 TeV
2. All-Sky Coverage: Dos arreglos de Telescopios de Imagen Cherenkov en Aire (IACTs)
  - 1) CTA North [La Palma, Canary Islands, Spain]
  - 2) CTA South [Cerro Paranal, in Chile]



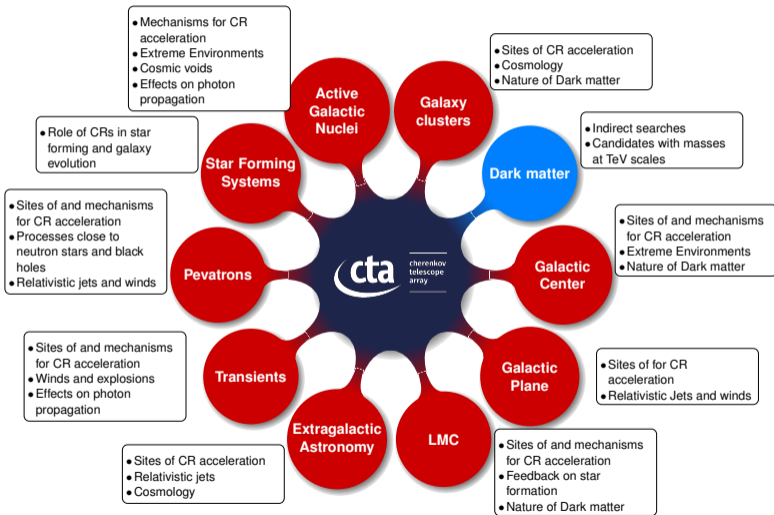
# CTA Performance



[www.cta-observatory.org/science/cta-performance/](http://www.cta-observatory.org/science/cta-performance/) (proc3b-v2)

1. Mejor resolución en Energía
2. 10× mejora en sensibilidad
3. Respuesta rápida para el seguimiento transientes
4. Campo de visión amplio
5. Mejor resolución angular

# CTA Key Science Programs

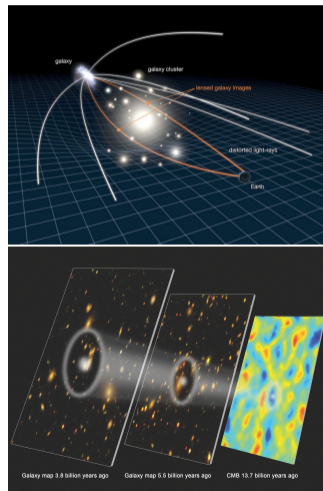


# Materia oscura

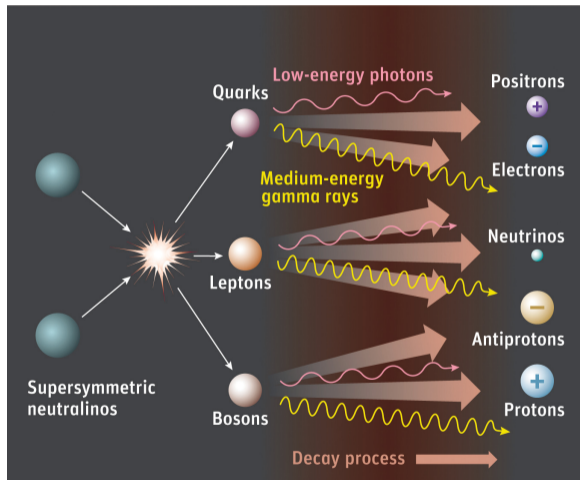
Existe bastante evidencia sobre la existencia de la materia oscura, pero su naturaleza es todavía un misterio

1. Curvas de rotación de galaxias
2. Lentes gravitacionales
3. Oscilaciones acústicas de bariones

Se estima que la materia oscura representa cerca  $\approx 27\%$  del contenido del Universo



# Búsquedas indirectas de candidatos tipo WIMP



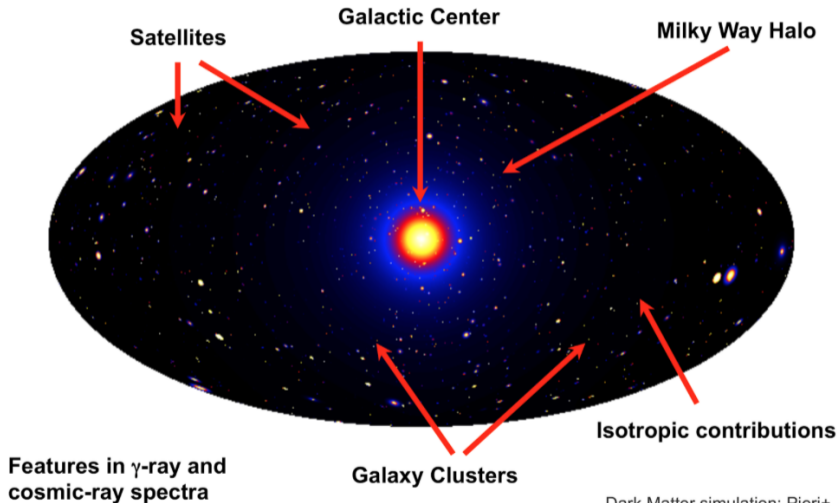
1. Weakly Interactive Massive Particles (WIMPs)
2. Candidates with masses at TeV scales
3. Annihilation and decay of WIMPs
4. Continuum and line-emission spectra

$$\frac{d\Phi^{\text{ann}}}{dE} = \underbrace{\frac{\langle\sigma v\rangle}{8\pi m^2} \frac{dN}{dE}}_{\text{P.P. term}} \underbrace{\int \int \rho_{\text{DM}}^2 dl d\Omega}_{\text{J factor}}$$

$$\frac{d\Phi^{\text{dec}}}{dE} = \underbrace{\frac{\Gamma}{4\pi m} \frac{dN}{dE}}_{\text{P.P. term}} \underbrace{\int \int \rho_{\text{DM}} dl d\Omega}_{\text{D factor}}$$



# ¿Dónde buscar materia oscura?



Dark Matter simulation: Pieri+  
[2011PhRvD..83b3518P](https://arxiv.org/abs/2011.03806)

# Cúmulos de galaxias

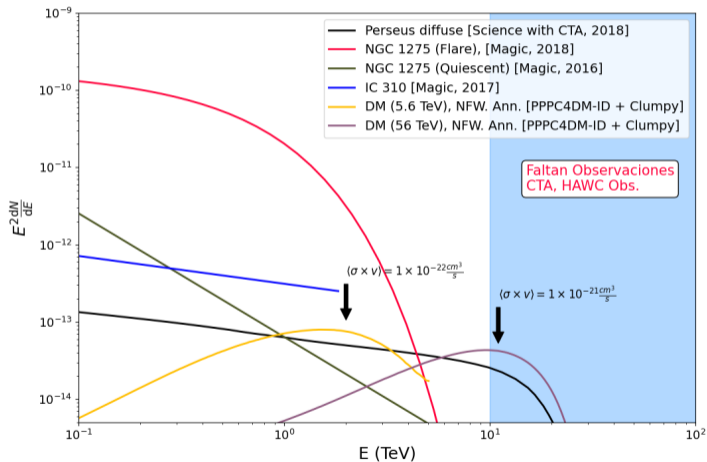
# ¿Por qué cúmulos de galaxias?



## Materia Oscura

1. Objetos ligados más grandes el Universo
  2. Fuentes más brillantes en rayos X
  3.  $\sim 85\%$  en materia oscura
  4. Dinámica y procesos complejos
    - Estados de merging
    - Explosiones y voids [Por ejemplo Ophiuchus N. Werner, 2016]
  5. Posible aceleración de rayos cósmicos via interacciones en ICM
1. Objetos para probar el tiempo de vida de candidatos
  2. Aniquilación:
    - 1) Boost factor: Incrementa la señal hasta en dos órdenes de magnitud debido a la presencia de halos embebidos en el cúmulo  $\rightarrow$
  3. Es necesario considerar el efecto de otras componentes adicionales
    - 1) Galaxias activas en el centro
    - 2) Contribución de rayos cósmicos al flujo de rayos gamma

# Contribuciones al flujo de rayos gamma





## Objetos

Ver [M. Sánchez-Conde *et al.*, 2011]

1. Altos valores de factores astrofísicos
2. Valores *precisos* de la masa total del objeto
3. Cercanía
4. Extensión

1. Virgo es el mejor blanco, sin embargo su extensión representa un reto observacional para los observatorios
2. **Fornax** tiene valores de flujo similares a Virgo
3. En Perseus se espera una contribución importante debido a rayos cósmicos. Parte de CTA-KSP
4. **Ophiuchus** es un poco más lejano, pero interesante de estudiar debido a la dinámica que presenta

# Modelo de materia oscura



## Fornax

1. PS @ (54.61, -35.44)
2. Distance: 20.45 Mpc
3. Mass:  $1.01 \times 10^{14} M_{\odot}$
4.  $R_{200} = 0.96$  Mpc
5.  $z = 0.0046$ , EBL: Franceschini, 2008
6.  $J_{\text{factor}} = 2.21 \times 10^{18} \text{ GeV}^2 \text{ cm}^{-5}$   
[Clumpy, 2017]
7.  $D_{\text{factor}} = 2.65 \times 10^{19} \text{ GeV cm}^{-2}$   
[Clumpy, 2017]

## Ophiuchus

1. PS @ (258.10, -23.38)
2. Distance: 126.7 Mpc
3. Mass:  $23.16 \times 10^{14} M_{\odot}$
4.  $R_{200} = 2.74$  Mpc
5.  $z = 0.0280$ , EBL: Franceschini, 2008
6.  $J_{\text{factor}} = 2.21 \times 10^{18} \text{ GeV}^2 \text{ cm}^{-5}$   
[Clumpy, 2017]
7.  $D_{\text{factor}} = 2.65 \times 10^{19} \text{ GeV cm}^{-2}$   
[Clumpy, 2017]

# Observaciones

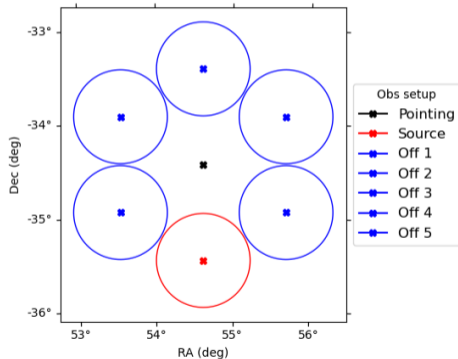
# Configuración para Observación OnOff



## OnOff Observation

1. Pointing con separación de  $1^\circ$  respecto a la región On
2. ROI con  $\theta_{\text{size}} = 3^\circ$
3. Región On con  $\theta_{\text{size}} = 0.5^\circ$  centrada en la posición del cúmulo
4. 5 regiones off con  $\theta_{\text{size}} = 0.5^\circ$  y reflejadas respecto al pointing
5. Tiempo de observación 100 h

Observaciones son simuladas  
usando `ctools`





**Análisis using** `csdmatter`

Cálculo de límites de exclusión para aniquilación y decaimiento de partículas de materia oscura con masas entre 100 GeV y 100 TeV

1. Basado en `ctools` y `gammalib`
2. Bajo paquete de python `ctaAnalysis` [v-1.0.1]
3. Test modelos para  $n$  valores de masa entre `mmin` y `mmax`
4. Espectro de fotones interpolado de proyecto PPC4DMID
5. Link: Ayuda y lista de parámetros
6. Repositorio en Github

```
from ctaAnalysis.csdmatter import csdmatter

# Create instance of csdmatter app
thistool = csdmatter()

# Passing input parameter to the app
thistool['inobs'] = file
thistool['srcname'] = srcname
thistool['mmin'] = mmin
thistool['mmax'] = mmax
thistool['mnumpoints'] = mnumpoints
thistool['process'] = process
thistool['channel'] = channel
thistool['ewcorrections'] = ewcorrections
thistool['logsigmav'] = logsigmav

# Then, execute the csdmatter tool
thistool.execute()
```

Para cada valor de masa  $m_i$ :

1. Crea modelo de DM alrededor de  $m_i$
2. Reemplaza el modelo de fuente con el modelo de DM
3. Calcula flujo esperado dado  $\langle\sigma_\chi v\rangle^{\text{Ref}}$
4. Realiza likelihood fitting y calcula TS
5. Calcula UL en el flujo
6. Calcula scale factor y obtiene límites de acuerdo al proceso

## 1. Scale Factor

$$\begin{aligned}\xi &= \frac{\Phi_{\text{Fit}}}{\Phi_{\text{Exp}}} \\ &= \frac{\int_{E_{\text{min}}}^{0.9 \times E_{\text{avail}}} \frac{d\Phi_{\text{Fit-Model}}^\gamma}{dE} dE}{\int_{E_{\text{min}}}^{0.9 \times E_{\text{avail}}} \frac{d\Phi_{\text{DM-Model}}^\gamma}{dE} dE}\end{aligned}$$

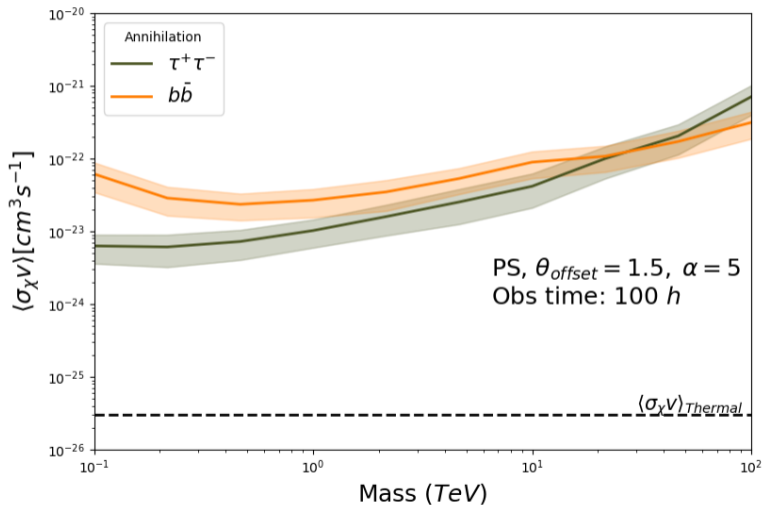
## 2. Límite de exclusión

$$\langle\sigma_\chi v\rangle^{\text{UL}} = \langle\sigma_\chi v\rangle^{\text{Ref}} \times \xi \quad \text{Aniquilación}$$

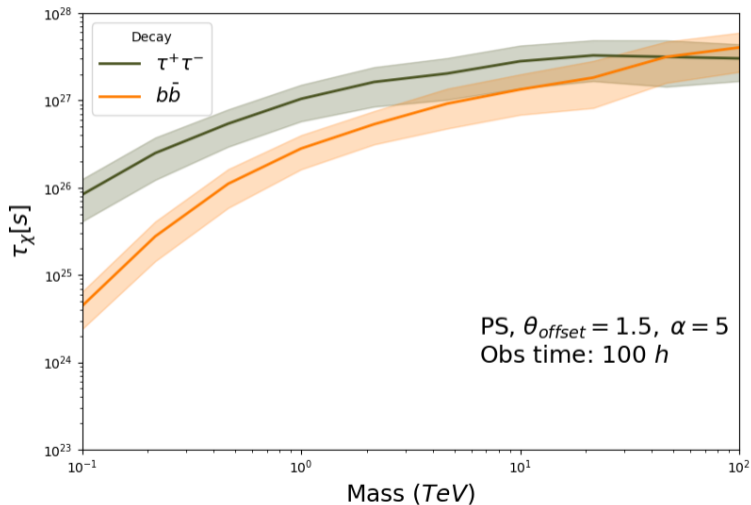
$$\tau_\chi^{\text{LL}} = \frac{\tau_\chi^{\text{Ref}}}{\xi} \quad \text{Decaimiento}$$

# Resultados

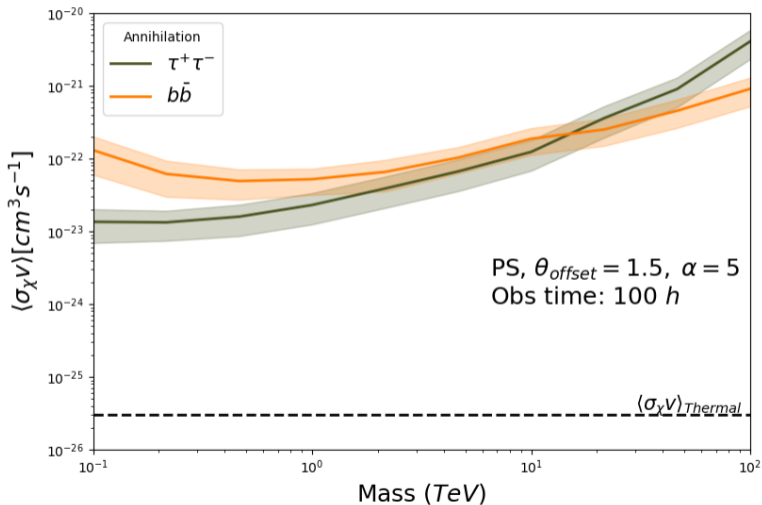
# Fornax. Resultados para aniquilación



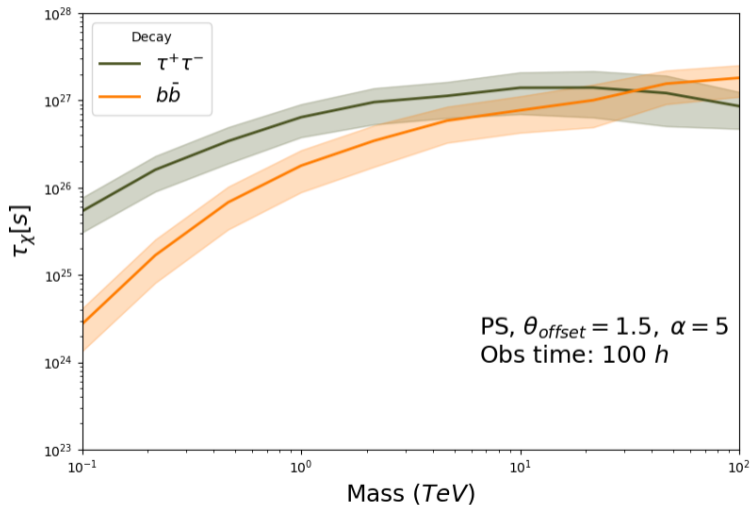
# Fornax. Resultados para decaimiento



# Ophiuchus. Resultados para aniquilación



# Ophiuchus. Resultados para decaimiento





# Resumen

1. CTA tiene grandes oportunidades para buscar señales de materia oscura @TeV
2. CTA planea dedicar más de 1500 h de observación para mejorar nuestro entendimiento sobre la elusiva componente de materia oscura
3. En CTA, también se realizan estudios para candidatos ligeros
4. Es necesario tener un entendimiento claro sobre las contribuciones al flujo de rayos gamma que pudieran afectar la detección o límites de exclusión a candidatos de materia oscura en cúmulos de galaxias
5. Presentamos los límites proyectados para 100 h de observación para los cúmulos de Fornax y Ophiuchus
6. Los límites son comparables a límites obtenidos para observaciones de Perseus con MAGIC, aunque se tiene que tener en mente que la estrategia de observación y de análisis difiere ligeramente
7. `csdmatter` es una herramienta diseñada para CTA y obtener límites de materia oscura para diferentes escenarios

¡Gracias!