

Incontri di Fisica delle Alte Energie (IFAE) 2025
Sa Manifattura, Cagliari
10th April 2025



Materia oscura e fisica fondamentale con il Cherenkov Telescope Array Observatory

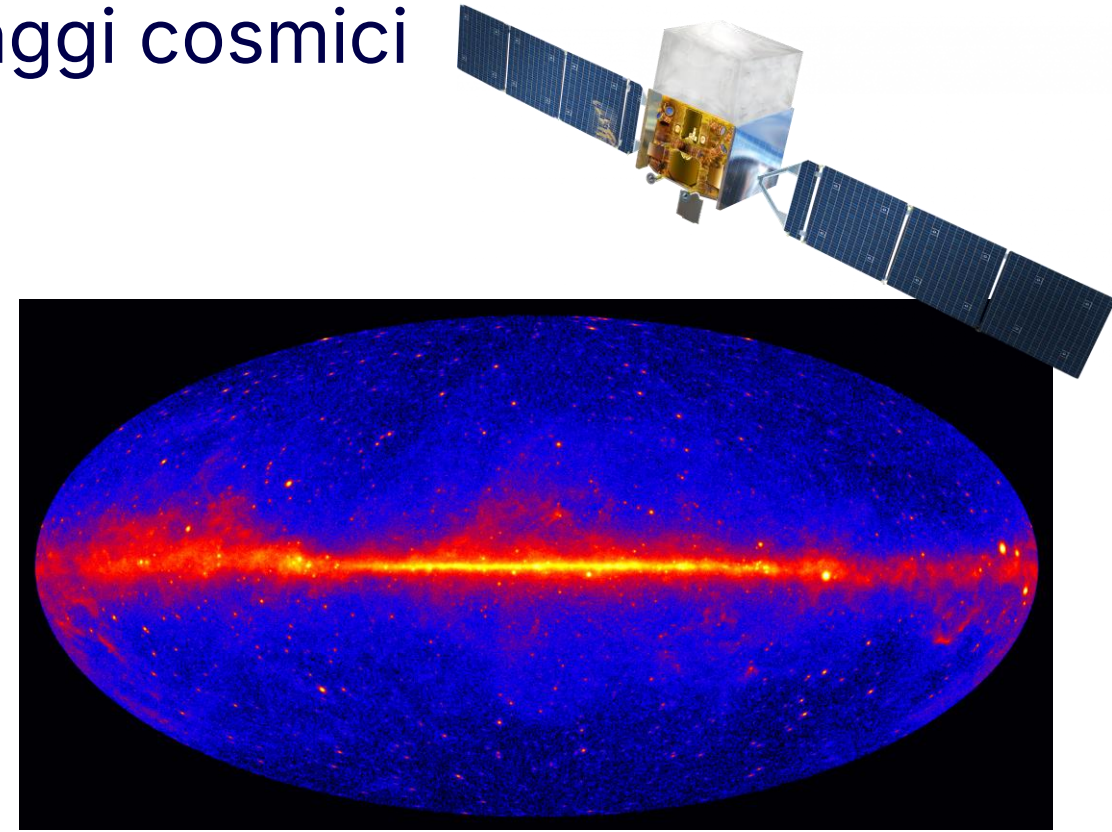


English version of
the slides on Indico!

Francesco Schiavone per il CTAO Consortium
Università degli Studi di Bari & INFN Bari
francesco.schiavone@ba.infn.it

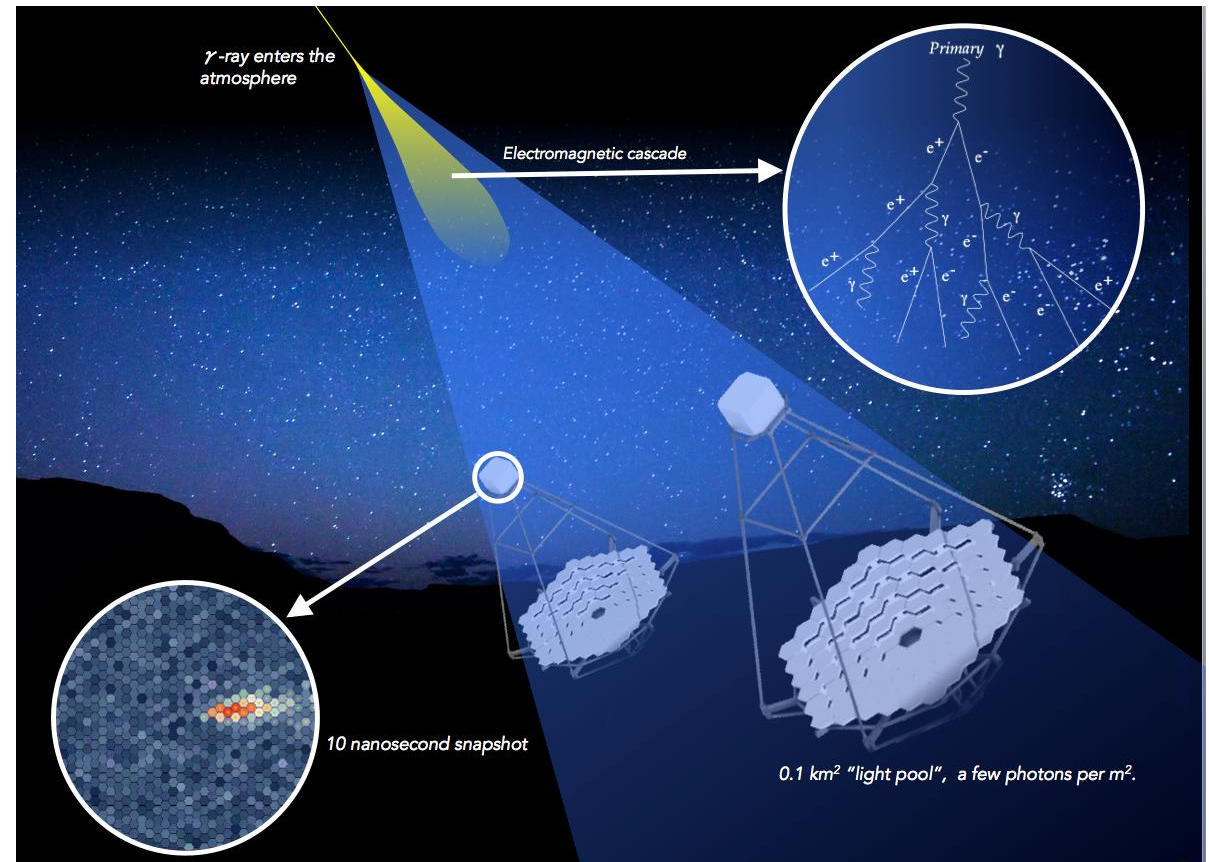
Astrofisica dei raggi gamma

- **Scopo:** caratterizzare i processi di alta energia in oggetti astrofisici, e.g. origine dei raggi cosmici
- **Problema:** i raggi gamma vengono (fortunatamente per noi!) assorbiti dall'atmosfera terrestre
- **Soluzione:** telescopi spaziali su satellite (e.g. Fermi-LAT, AGILE)
- **Risultati:** eccellenti, ma limitati dall'area efficace per energie superiori a ~ 100 GeV



Telescopi Cherenkov atmosferici ad immagini (IACT)

- I raggi gamma sono rivelati da misure della luce Cherenkov emessa dalle cascate EM
- L'atmosfera è usata come un calorimetro naturale
- Area efficace ~ dimensioni della «light pool», 10^4 m^2
- Sensibilità fino a decine o centinaia di TeV



Credit: CTAO

IACT attualmente in operazione



Daniel López / Instituto de Astrofísica de Canarias

MAGIC

Observatorio del Roque de Los
Muchachos, La Palma (ES)
2 riflettori da 17 m



H.E.S.S. collaboration, Clementina Medina

H.E.S.S.

Altopiano del Khomas (NA)
4 riflettori da 12 m + 1 da 28 m



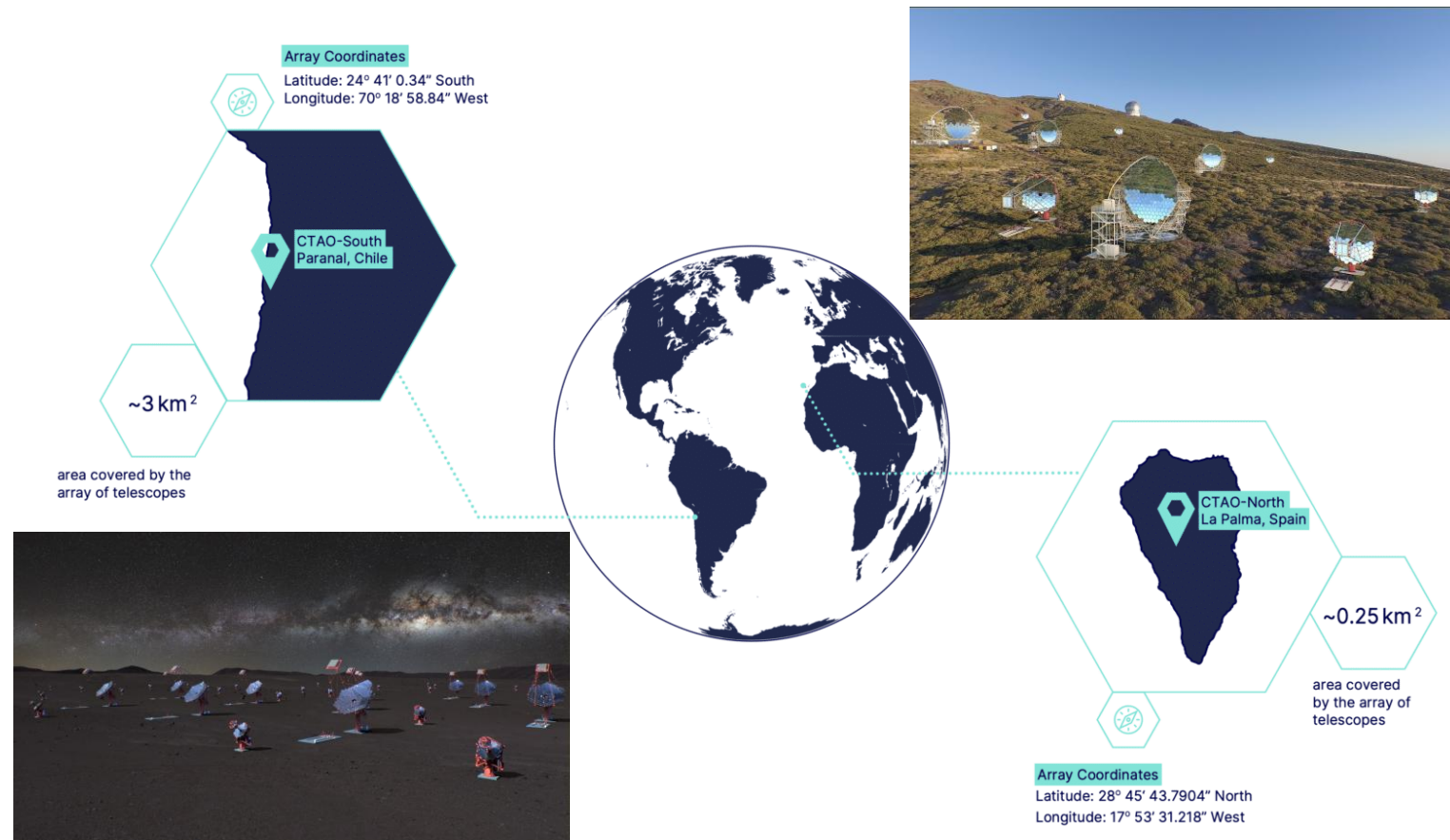
<https://veritas.sao.arizona.edu/about-veritas>

VERITAS

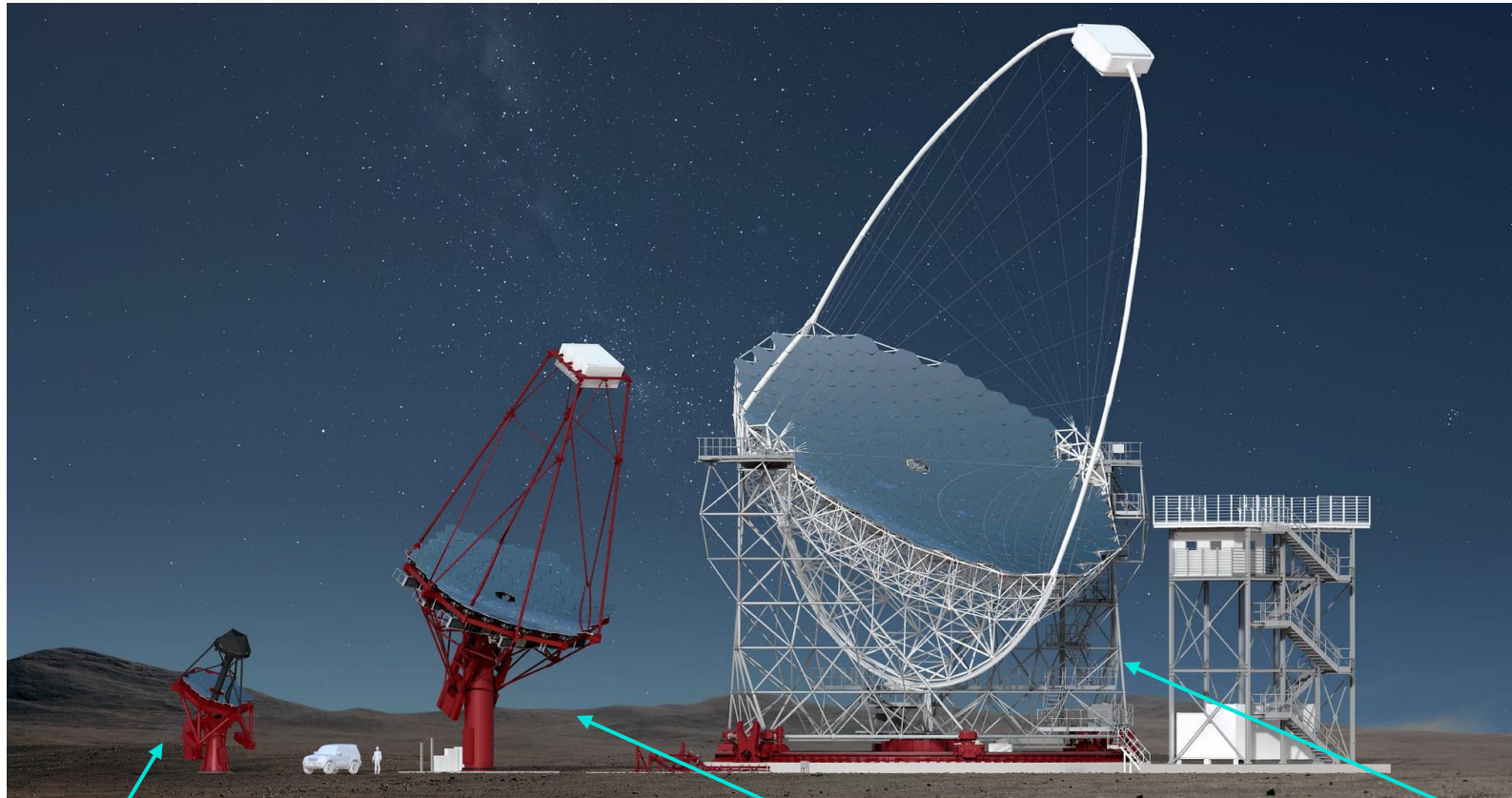
Fred Lawrence Whipple Observatory,
Arizona (US)
4 riflettori da 12 m

Cherenkov Telescope Array Observatory

- Osservatorio gamma di generazione futura
- 2 array previsti negli emisferi Nord e Sud
- ~70 telescopi in totale
- Migliore risoluzione energetica e spaziale, risposta più rapida ai transienti e copertura totale del cielo
- Sensibilità fra 20 GeV e 300 TeV



I telescopi di CTAO



Small-Sized Telescope (SST)
Riflettore primario da 4.3 m
9° FoV
Sensibilità fra 5 e 300 TeV

Medium-Sized Telescope (MST)
Riflettore da 12 m
8° FoV
Sensibilità fra 150 GeV e 5 TeV

Large-Sized Telescope (LST)
Riflettore da 23 m
4.3° FoV
Sensibilità fra 20 e 150 GeV

Prototipi in funzione:

- LST-1 (La Palma)
- Prototipo MST (Berlino)
- ASTRI-Horn/SST-2M (Catania)
- ASTRI-1 (Tenerife)
- SST-1M (Praga)

+ prototipo Schwarzschild-Couder Telescope (pSCT) in Arizona, US



I Key Science Projects di CTAO

- CTAO entrerà in funzione come un osservatorio di raggi gamma **aperto**
- Il 40% del tempo di osservazione durante i primi 10 anni sarà dedicato a diversi *Key Science Projects* (KSP)
- Una quantità significativa di questo tempo sarà utilizzata per studi su materia oscura e fisica fondamentale/esotica (DMEP)
- Questo interesse è evidente in molte recenti pubblicazioni del CTAO Consortium

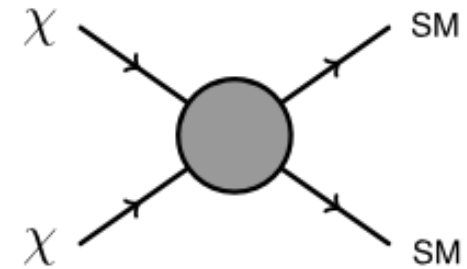
Theme	Question		Dark Matter Programme	Galactic Centre Survey	Galactic Plane Survey	LMC Survey	Extra-galactic Survey	Transients	Cosmic Ray PeVatrons	Star-forming Systems	Active Galactic Nuclei	Galaxy Clusters
Understanding the Origin and Role of Relativistic Cosmic Particles	1.1	What are the sites of high-energy particle acceleration in the universe?		✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓	✓	✓✓
	1.2	What are the mechanisms for cosmic particle acceleration?		✓	✓	✓		✓✓	✓✓	✓	✓✓	✓
	1.3	What role do accelerated particles play in feedback on star formation and galaxy evolution?		✓		✓				✓✓	✓	✓
Probing Extreme Environments	2.1	What physical processes are at work close to neutron stars and black holes?		✓	✓	✓			✓✓		✓✓	
	2.2	What are the characteristics of relativistic jets, winds and explosions?		✓	✓	✓	✓	✓✓	✓✓		✓✓	
	2.3	How intense are radiation fields and magnetic fields in cosmic voids, and how do these evolve over cosmic time?					✓	✓			✓✓	
Exploring Frontiers in Physics	3.1	What is the nature of Dark Matter? How is it distributed?	✓✓	✓✓		✓						✓
	3.2	Are there quantum gravitational effects on photon propagation?						✓✓	✓		✓✓	
	3.3	Do Axion-like particles exist?					✓	✓			✓✓	

Theme	Question		Dark Matter Programme	Galactic Centre Survey	Galactic Plane Survey	LMC Survey	Extra-galactic Survey	Transients	Cosmic Ray PeVatrons	Star-forming Systems	Active Galactic Nuclei	Galaxy Clusters
Understanding the Origin and Role of Relativistic Cosmic Particles	1.1	What are the sites of high-energy particle acceleration in the universe?		✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓	✓	✓✓
	1.2	What are the mechanisms for cosmic particle acceleration?		✓	✓	✓		✓✓	✓✓	✓	✓✓	✓
	1.3	What role do accelerated particles play in feedback on star formation and galaxy evolution?		✓		✓				✓✓	✓	✓
Probing Extreme Environments	2.1	What physical processes are at work close to neutron stars and black holes?		✓	✓	✓			✓✓		✓✓	
	2.2	What are the characteristics of relativistic jets, winds and explosions?		✓	✓	✓	✓	✓✓	✓✓		✓✓	
	2.3	How intense are radiation fields and magnetic fields in cosmic voids, and how do these evolve over cosmic time?					✓	✓			✓✓	
Exploring Frontiers in Physics	3.1	What is the nature of Dark Matter? How is it distributed?	✓✓	✓✓		✓						✓
	3.2	Are there quantum gravitational effects on photon propagation?						✓✓	✓		✓✓	
	3.3	Do Axion-like particles exist?					✓	✓			✓✓	

Rivelazione indiretta di materia oscura

L'ipotesi WIMP

- Materia oscura costituita da particelle massive debolmente interagenti (WIMP), la cui abbondanza è fissata durante il *freeze-out*
- Valore di riferimento per la sezione d'urto di annichilazione in particelle standard: $\langle\sigma v\rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ («WIMP miracle»)



Sorgenti candidate per la ricerca

- Centro Galattico (GC) della Via Lattea – segnale forte, ma fondo elevato
- Grande Nube di Magellano (LMC) – segnale e fondo intermedi
- Ammasso di Perseo – segnale e fondo intermedi
- Galasse sferoidali nane (dSphs) – segnale debole ma distinto, quasi nessun fondo

Segnale atteso dalla materia oscura

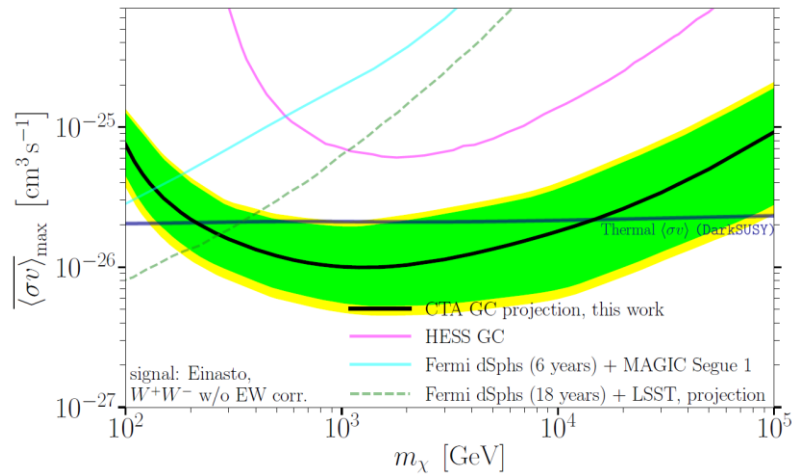
$$\frac{d\Phi}{dE} = \underbrace{\frac{1}{8\pi} \frac{\langle \sigma v \rangle}{m_\chi^2} \frac{dN_\gamma}{dE}}_{\text{Fattore di fisica delle particelle}} \underbrace{\int_{\Delta\Omega} \int_{\text{l.o.s}} \rho^2(\ell) d\ell}_{\text{Fattore astrofisico (J-factor)}}$$

Fattore di fisica delle particelle

- diffuso
- linea monocromatica
- box
- ...

Fattore astrofisico
(*J-factor*)

Sensibilità alla materia oscura (segnale diffuso)

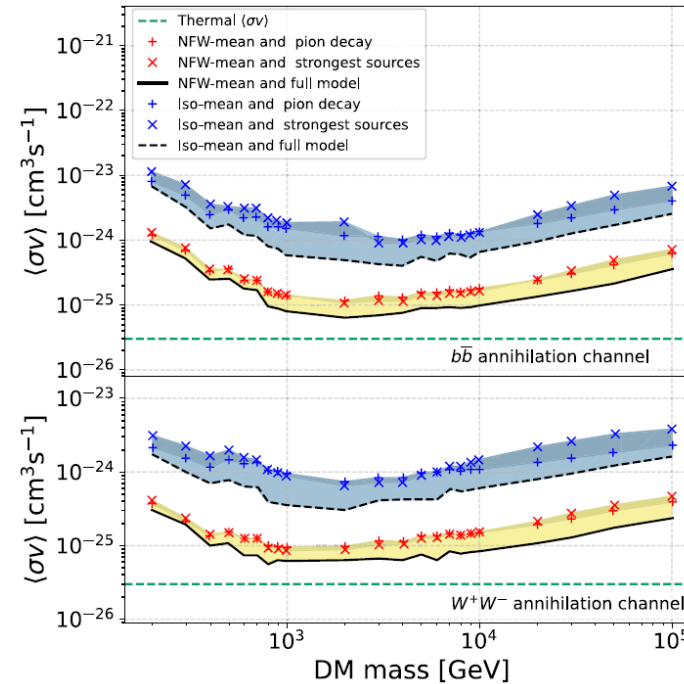


Centro Galattico

525 h (centro) + 300 h (esteso)

Canale $\chi\chi \rightarrow W^+W^-$

Ref: [JCAP01\(2021\)057](#)

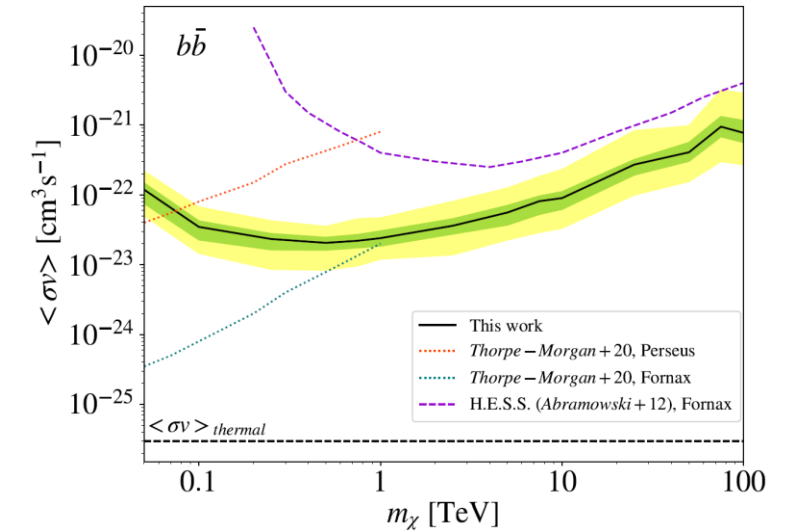


Grande Nube di Magellano

340 h

Canali $\chi\chi \rightarrow b\bar{b}, W^+W^-$

Ref: [MNRAS 523, 4 \(2023\), 5353](#)



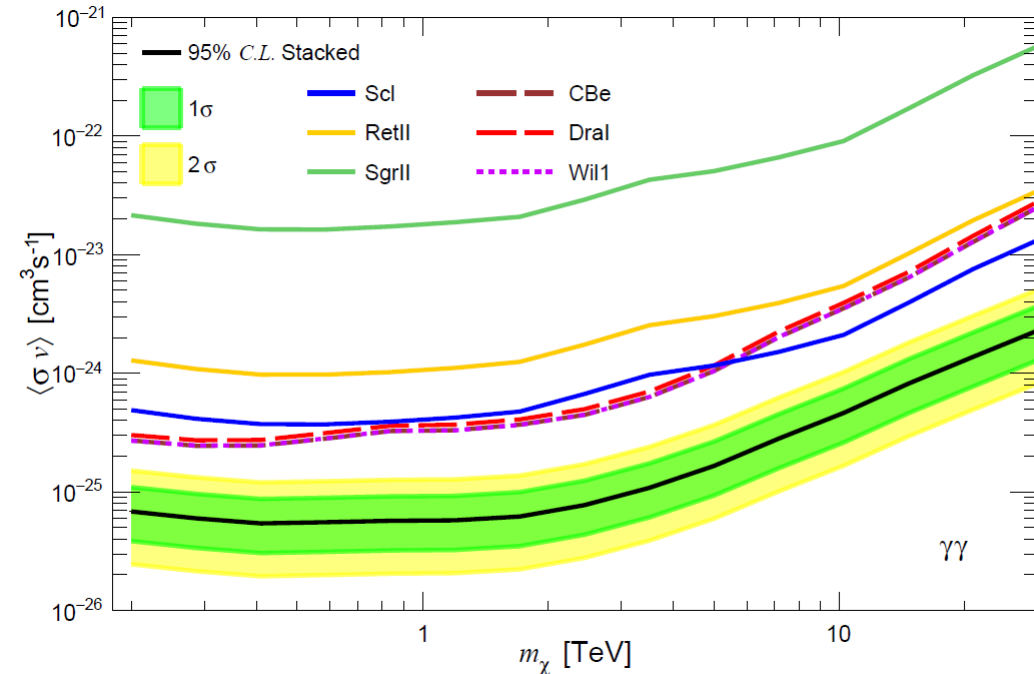
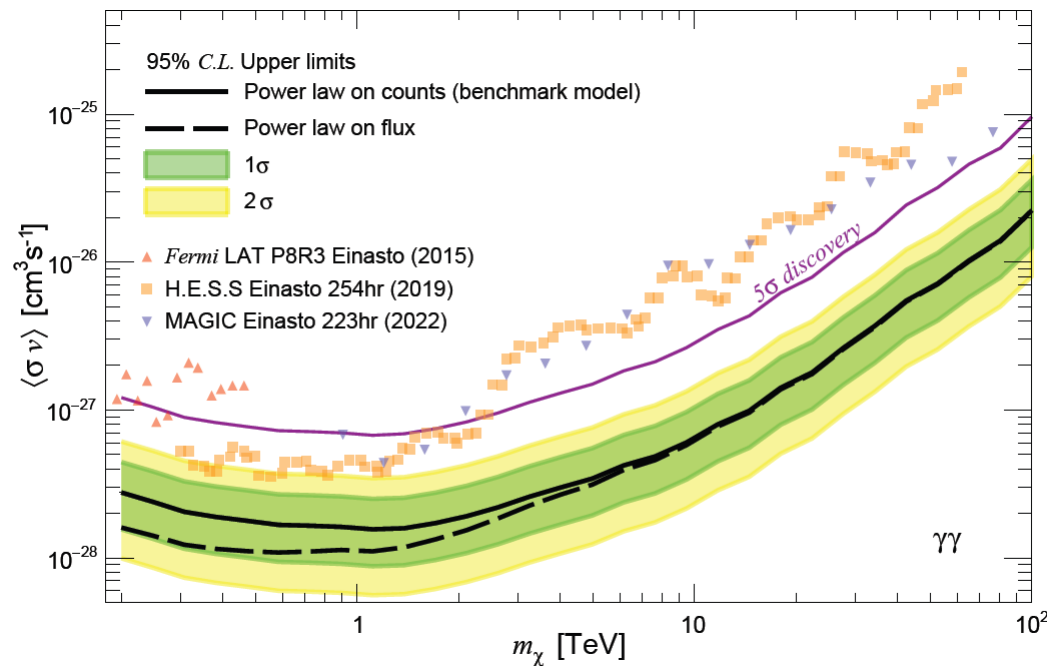
Ammasso di Perseo

300 h

Canale $\chi\chi \rightarrow b\bar{b}$

Ref: [JCAP10\(2024\)004](#)

Sensibilità alla materia oscura (linee)



Centro Galattico e galassie sferoidali nane

500 h (GC)

100 h per target (dSphs)

Ricerca di linee spettrali monocromatiche

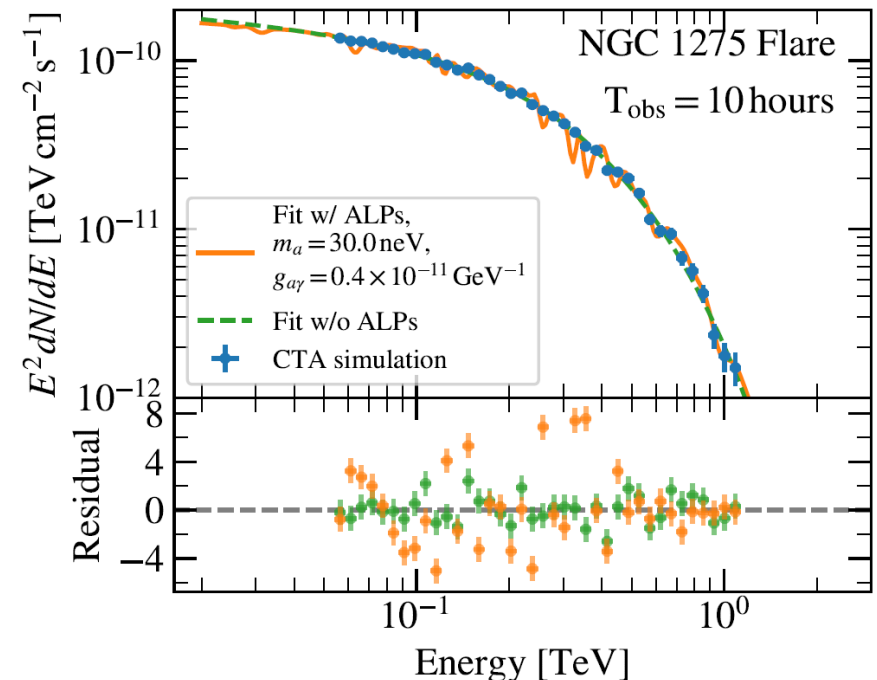
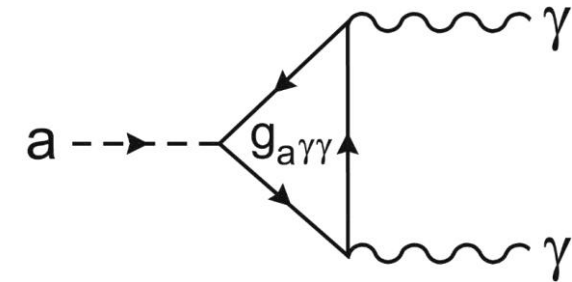
Ref: [JCAP07\(2024\)047](#)

Axion-like particles (ALP)

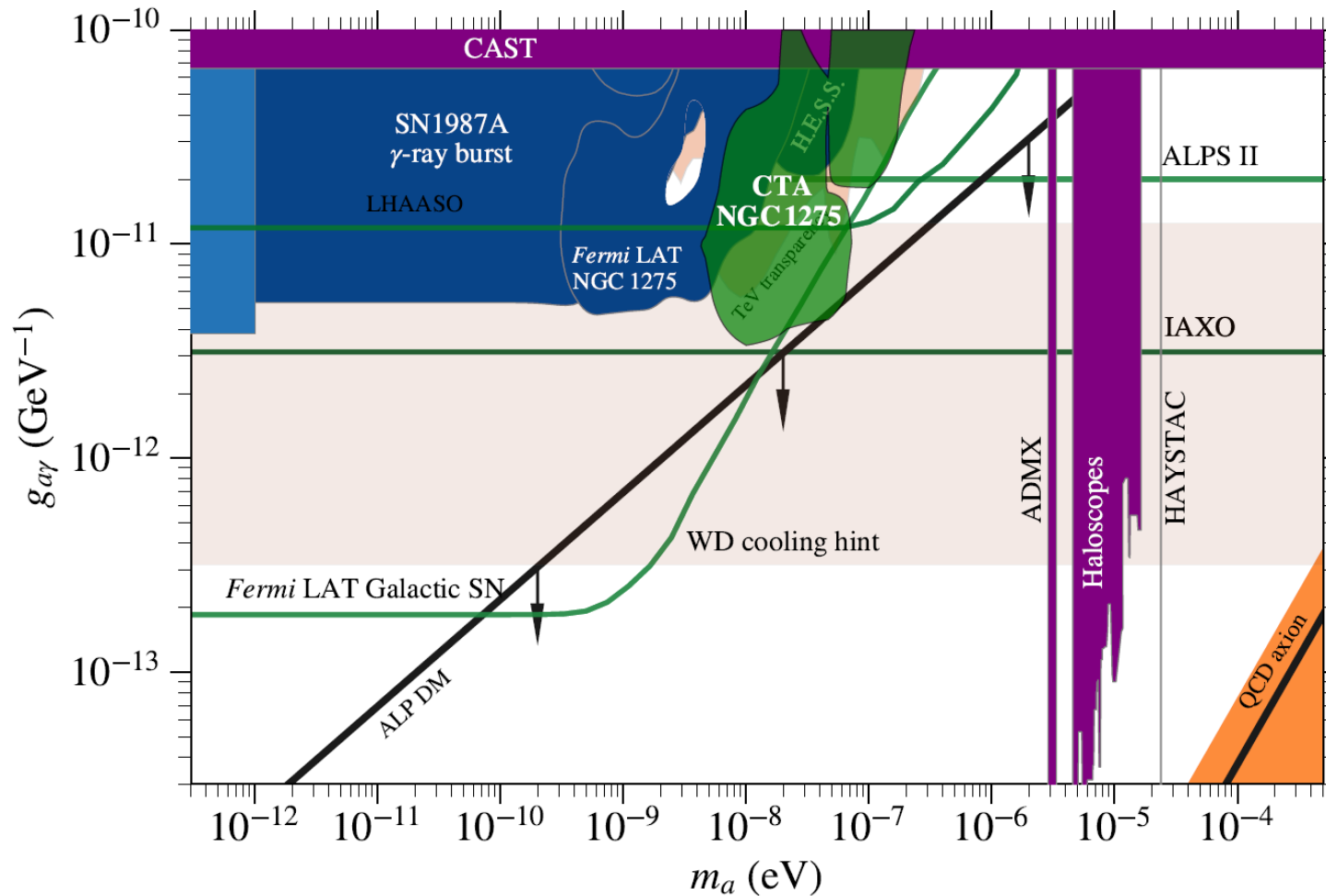
- Particelle pseudo-scalari ipotetiche di massa m_a e accoppiamento ai fotoni $g_{a\gamma}$, potenziali componenti di materia oscura
- L'accoppiamento $g_{a\gamma}$ consente oscillazioni ALP-gamma in campi magnetici
- La conseguente alterazione nella propagazione dei fotoni lascerebbe dei segni sugli spettri gamma osservati

Sorgenti candidate per la ricerca

- Nuclei galattici attivi (AGNs) – caratterizzati da distanze cosmologiche e campi magnetici



Sensibilità alle ALP

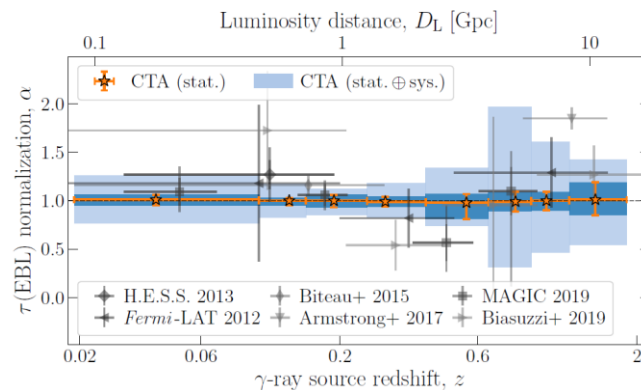


NGC 1275 nell'Ammasso di Perseo
 10 h (stato di flare)
 Ref: [JCAP02\(2021\)048](#)

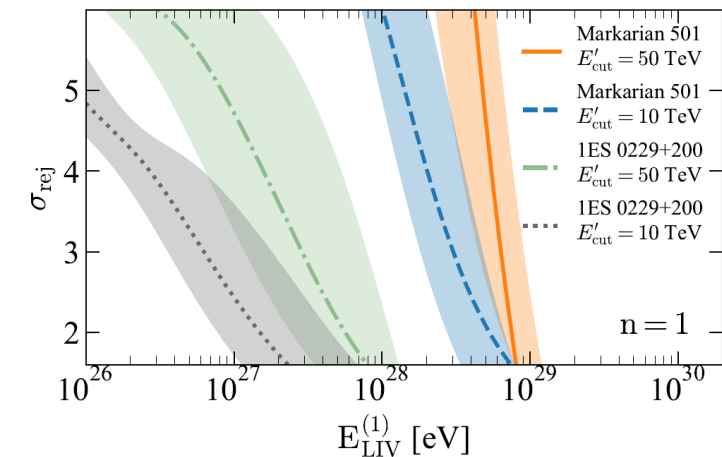
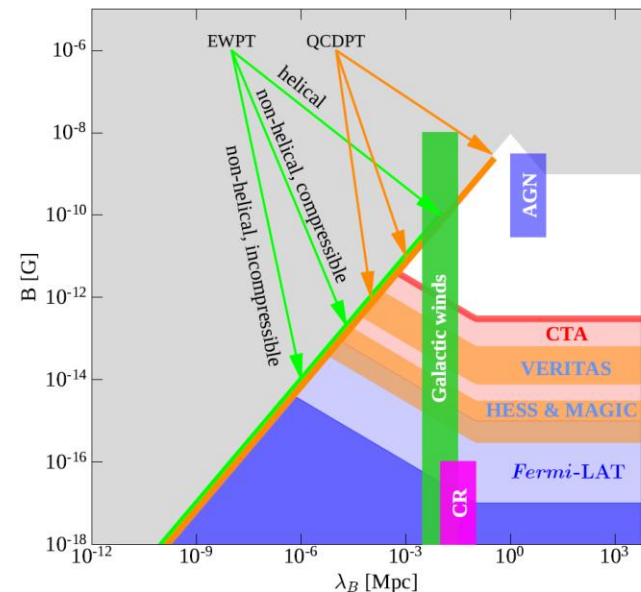
... molte altre sorgenti da esplorare!

Altra fisica fondamentale dagli AGN

- *Extragalactic background light* (EBL)
- Campo magnetico intergalattico (IGMF)
- Violazione dell'invarianza di Lorentz (LIV)
- ...



Ref: [JCAP02\(2021\)048](#)



Conclusioni

- CTAO offrirà un netto miglioramento su tutti i fronti rispetto all'attuale generazione di IACT
- Le ricerche di materia oscura giocheranno un ruolo importante nella definizione del programma scientifico
- Allo stesso modo, sarà possibile esplorare diversi scenari cosmologici di fisica fondamentale ed esotica
- Grandi progressi all'orizzonte!

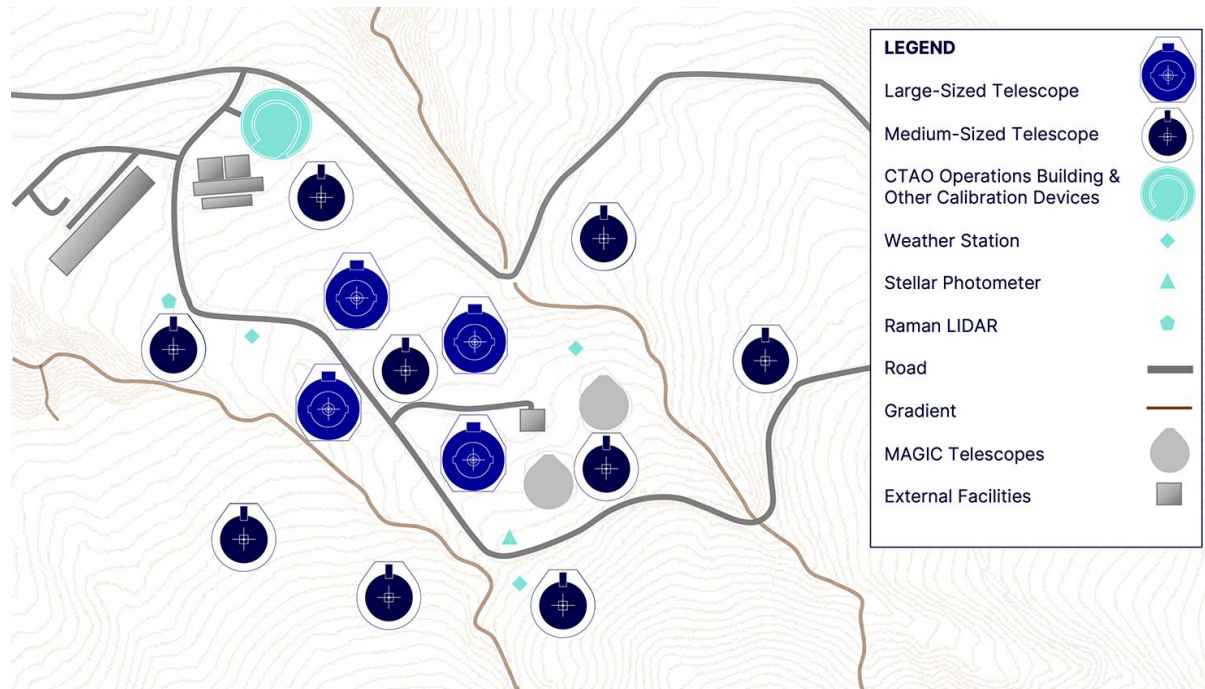
Grazie per l'attenzione!

Backup

Configurazione «Alpha» di CTAO

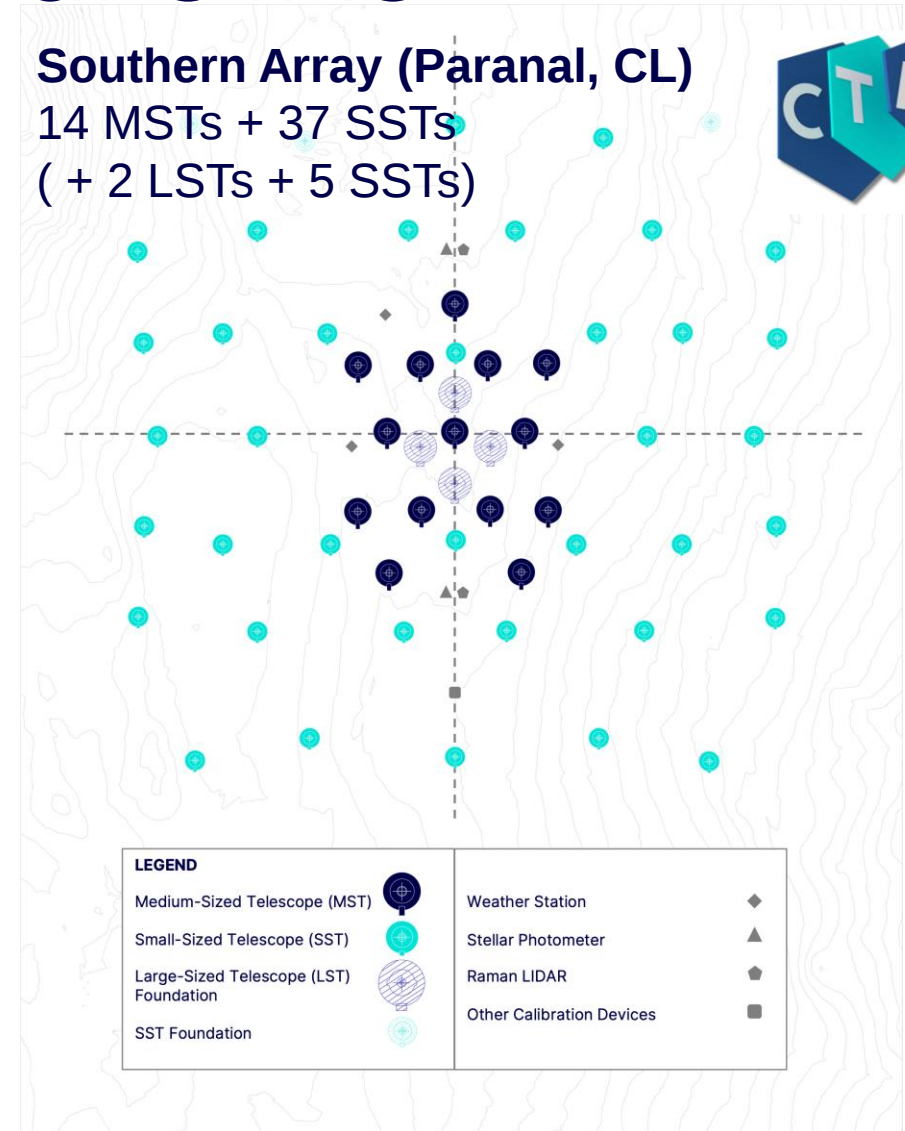
Northern Array (La Palma, ES)

4 LSTs + 9 MSTs

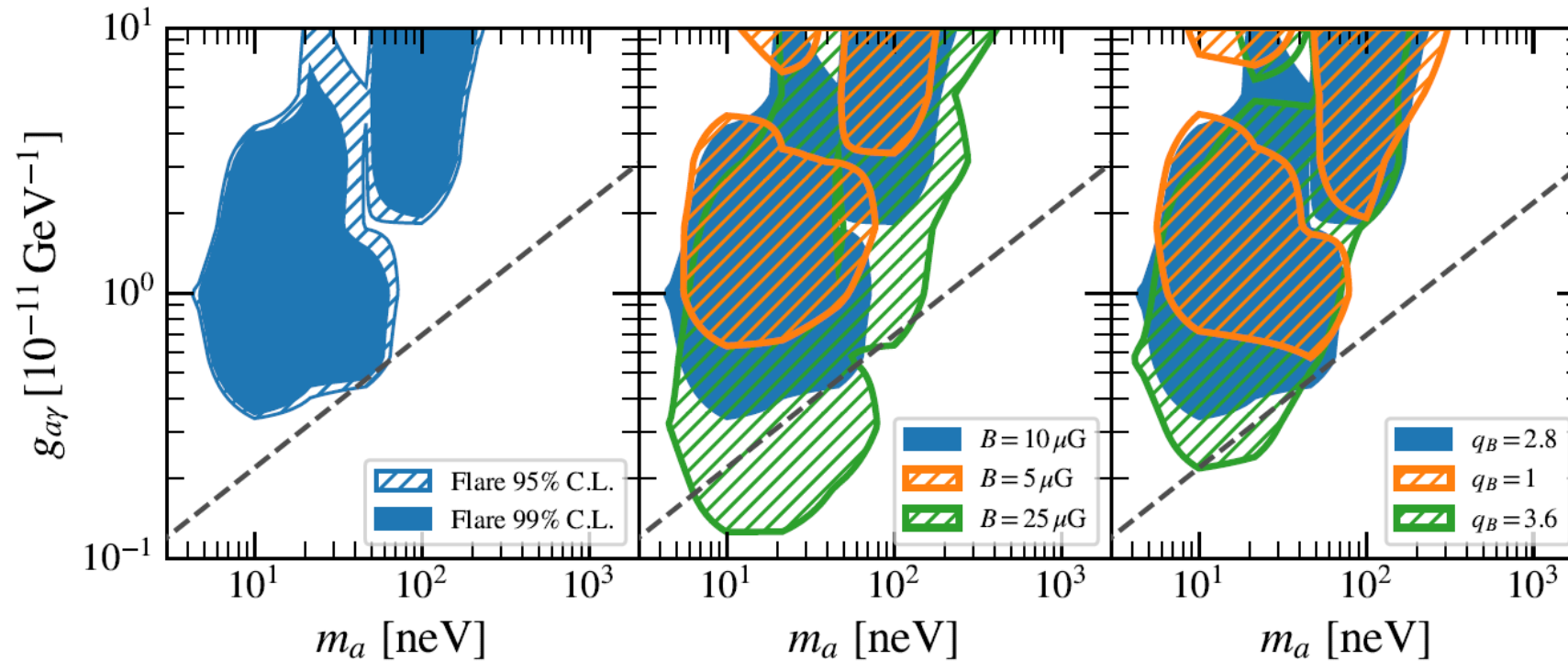


Southern Array (Paranal, CL)

14 MSTs + 37 SSTs
(+ 2 LSTs + 5 SSTs)



Sensibilità alle ALP



NGC 1275 nell'Ammasso di Perseo

10 h (stato di flare)

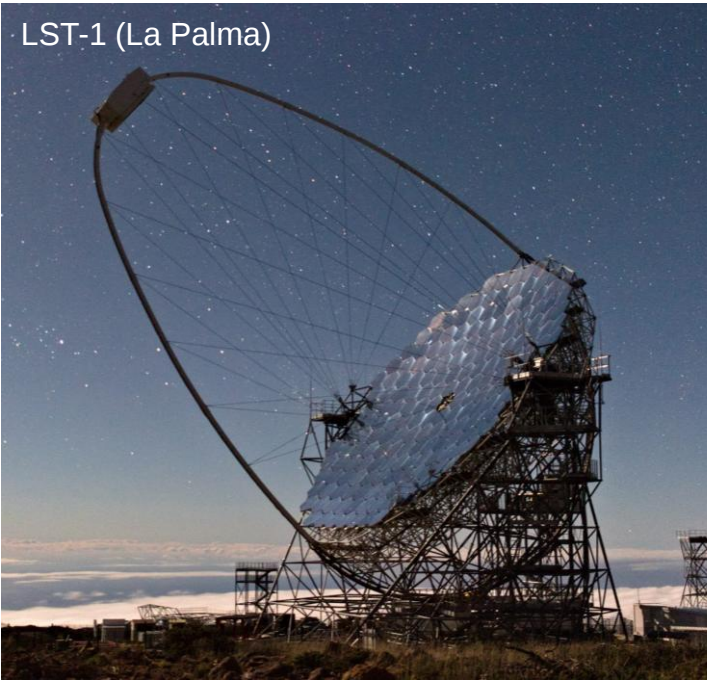
Ref: [JCAP02\(2021\)048](#)

... molte altre sorgenti da esplorare!

Prototipi dei telescopi di CTAO

<https://www.ctao.org/emission-to-discovery/telescopes/mst/>

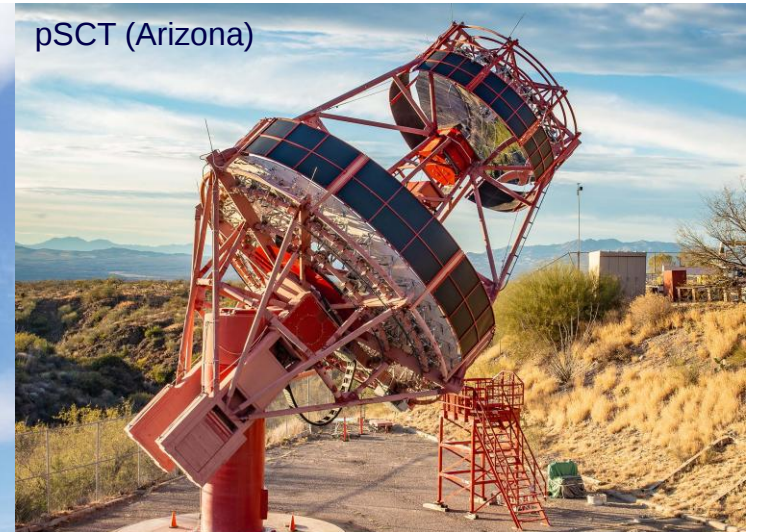
LST-1 (La Palma)



MST prototype (Berlin)



pSCT (Arizona)



SST-1M (Prague)



ASTRI-Horn/SST-2M (Catania)



ASTRI-1 (Tenerife)



<https://jointlab.upol.cz/jlo/en/content/sst-1m-captured-first-light-on-drevoj-observatory>

<http://www.inaf.it/en/inaf-news/astri-telescope-2020-vision>

Daniel López / Instituto de Astrofísica de Canarias