



[resources.perimeterinstitute.ca](https://resources.perimeterinstitute.ca)

**Predict, Observe, Explain Demonstration: Uniform Circular Motion**  
This demonstration utilizes a typical uniform circular motion apparatus to introduce students to the concept of dark matter.

**Hands-on Demonstrations: Gravitational Lensing**  
These demonstrations use simple objects to model gravitational lensing.

**Activity 1: Video Summary**

A set of discussion questions that review the content of the video.

**Activity 2: Key Concepts**

A question sheet that allows students to dig deeper into the material both numerically and conceptually.

**Activity 3: Gravity and Orbital Motion**

An activity where students use stretchy spacetime fabric and a variety of balls to model orbital motion.

**Activity 4: Dark Matter within a Galaxy**

Students use real data to explore the conflict between what is expected and what is observed.

**Activity 5: Advanced Mathematical Analysis**

An enrichment/extension activity for stronger students.

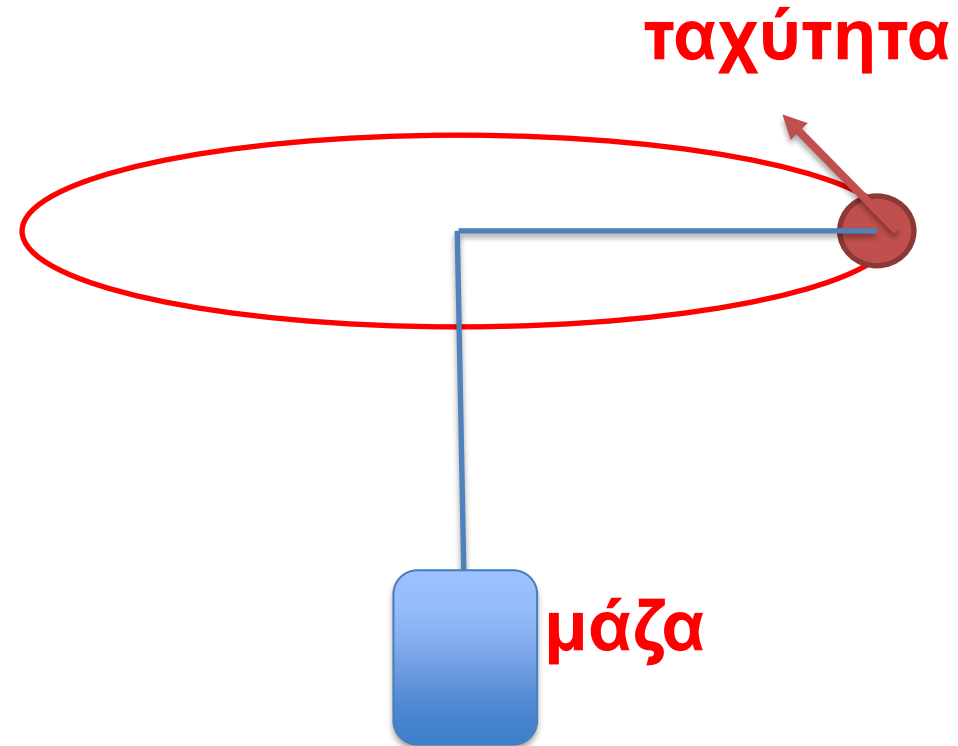
**Activity 6: Dark Matter Lab**

Students use a typical uniform circular motion apparatus to explore the connection between orbital speed and central force.

# Δραστηριότητα ομαλής κυκλικής κίνησης

**Προλέγω**  
**Παρατηρώ**  
**Εξηγώ**

Πώς συνδέονται η **μάζα** και η **ταχύτητα** σε κυκλική κίνηση;



# Δραστηριότητα ομαλής κυκλικής κίνησης

## Σκοπός:

**Προσδιορίστε τη μάζα ενός άγνωστου στοιχείου.**

1. Συλλέξτε δεδομένα για μία μάζα ανά ομάδα.
2. Σχεδιάστε ένα γράφημα της **ταχύτητας<sup>2</sup>** έναντι της **μάζας** σε ένα συλλογικό υπολογιστικό φύλλο.

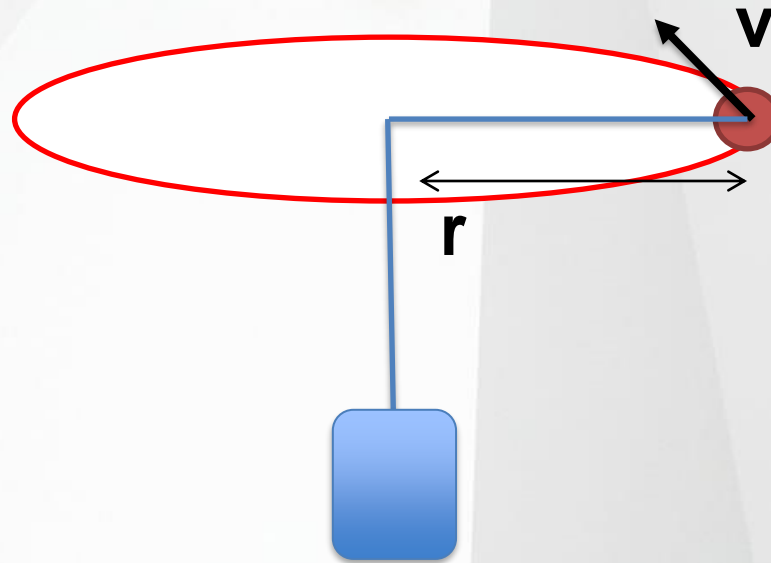
# Δραστηριότητα ομαλής κυκλικής κίνησης

## Συνεργατική έκδοση:

1. Ακτίνα σε μήκος 60 εκ
2. Χρησιμοποιήστε τις εκχωρημένες μάζες
3. Καταγράψτε την περίοδο για 10 τροχιές
4. Συγκρίνετε τα αποτελέσματα
5. Αναφέρετε τα αποτελέσματα



Πώς θα μπορούσατε να μετρήσετε την ταχύτητα του πώμα;



ταχύτητα = απόσταση/χρόνος

$$= (2\pi r)/(\text{περίοδος})$$

$$= (2\pi r)/T$$

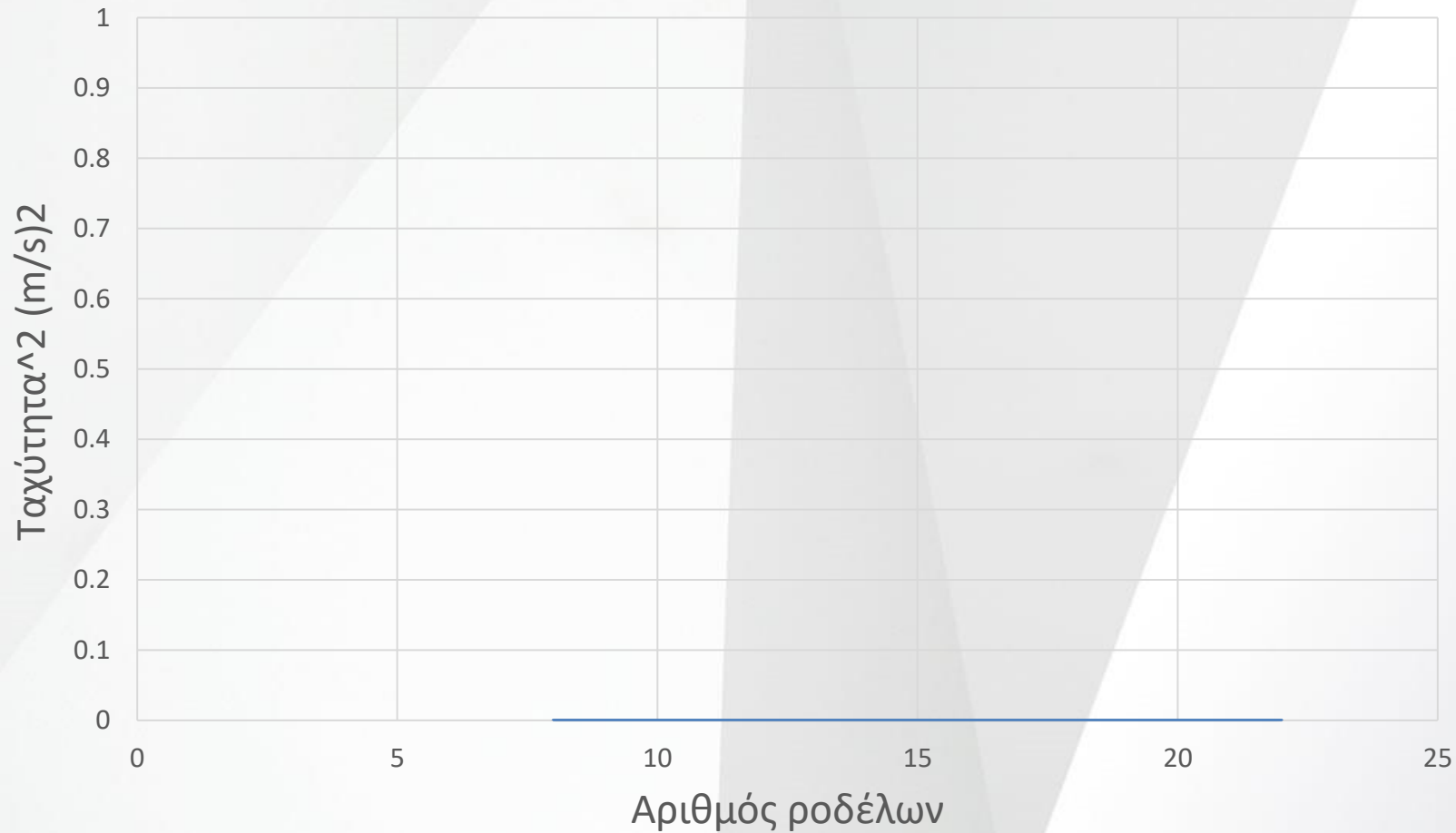
# Αποτελέσματα της δραστηριότητας

αριθμός ροδέλων	10 τροχιές (s)
8	
10	
12	
14	
16	

Πώς σχετίζεται η τροχιακή ταχύτητα με τη μάζα των ροδέλων;

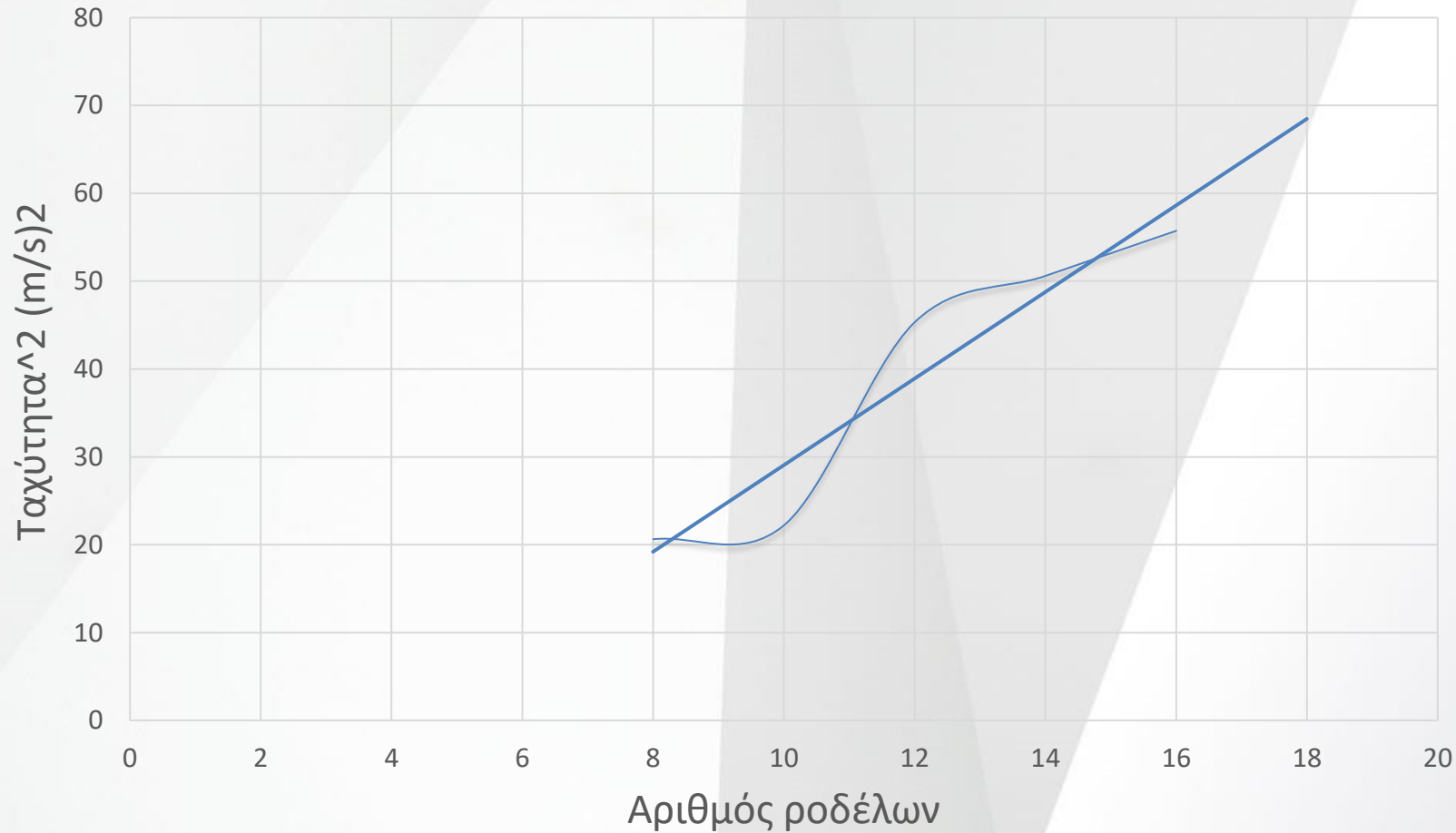
# Αποτελέσματα Ομαλής Κυκλικής Κίνησης

Αριθμός ροδέλων έναντι ταχύτητας<sup>2</sup>



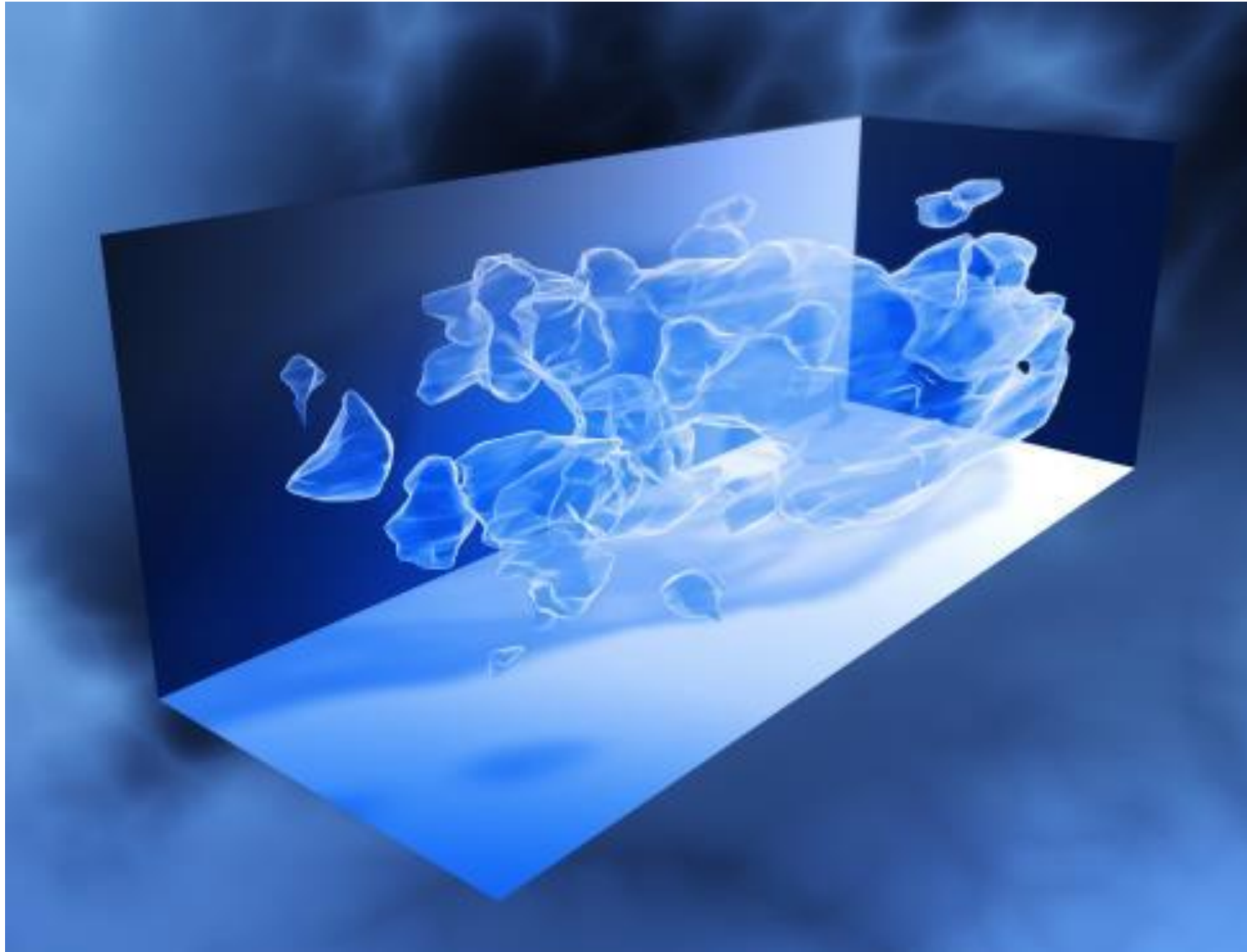
# Αποτελέσματα Ομαλής Κυκλικής Κίνησης

Αριθμός ροδέλων έναντι ταχύτητας<sup>2</sup>





Σύνδεση της τυπικής φυσικής της τάξης με την αιχμή της σκοτεινής ύλης



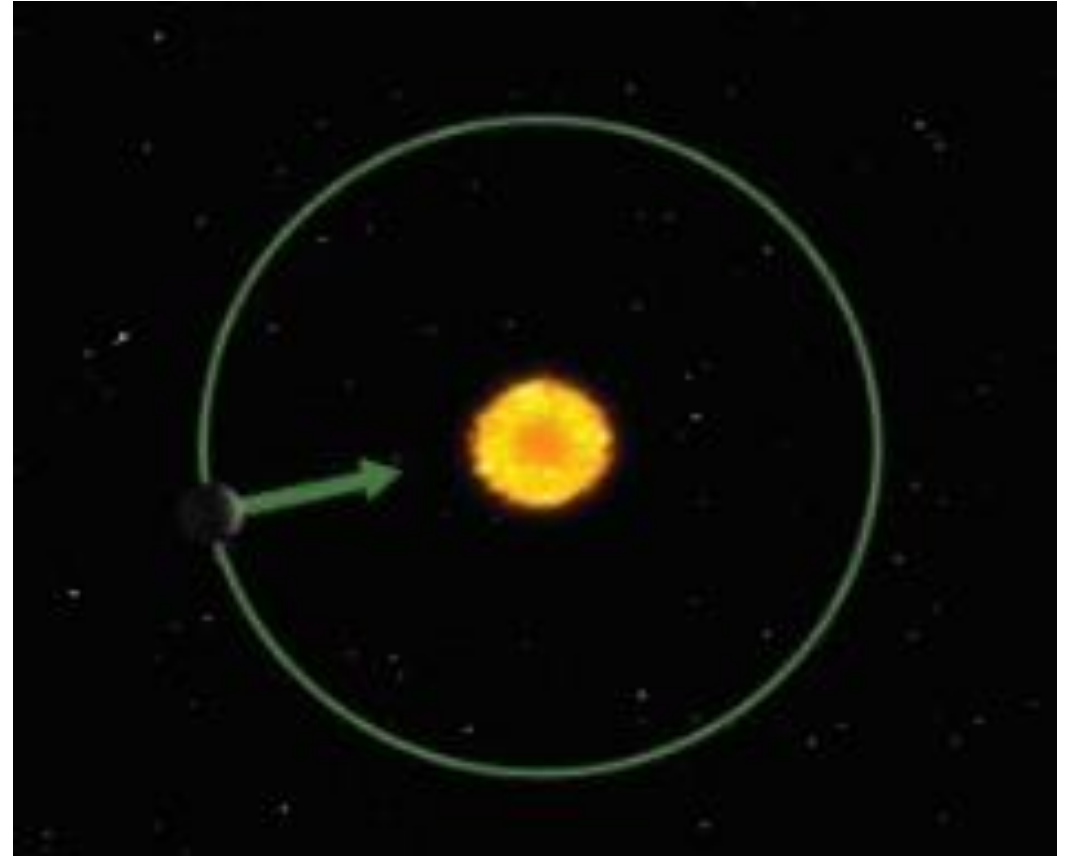
# Η ανακάλυψη της Βέρα Ρούμπιν





Η τροχιακή ταχύτητα  
εξαρτάται από τη  
μάζα του κεντρικού  
αντικειμένου

$$M = \frac{v^2 r}{G}$$



ΕΠΕΚΤΕΙΝΕΤΕ ΑΥΤΟ ΣΤΟΥΣ ΓΑΛΑΞΙΕΣ



Orbital Speed: 123 km/s

---

$$M_{\text{galaxy}} = \frac{v^2 r}{G}$$

---

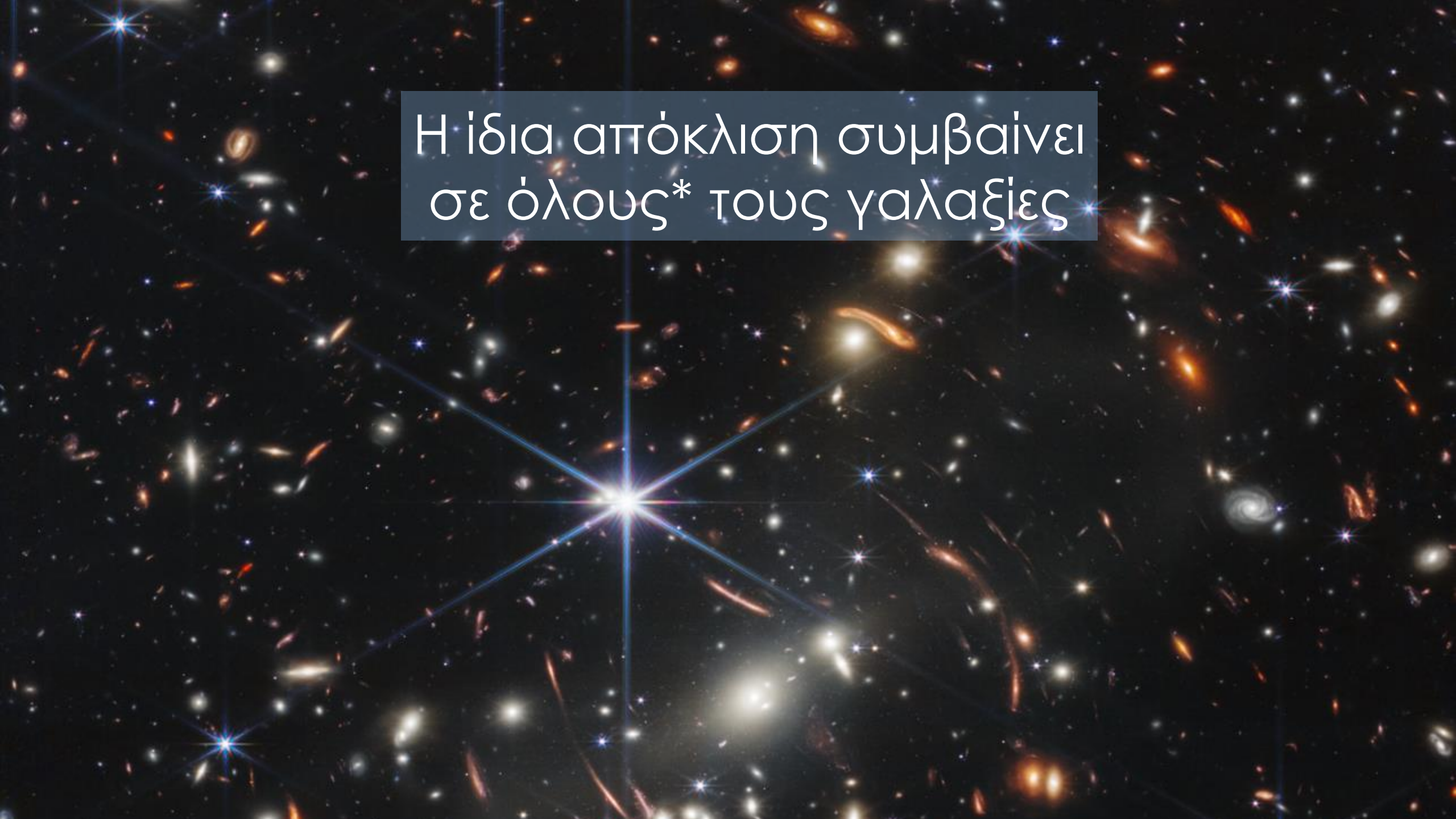
PI

Το Triangulum είναι πιο μαζικό από όσο φαίνεται...

## Διαφορά



Η ίδια απόκλιση συμβαίνει  
σε όλους\* τους γαλαξίες

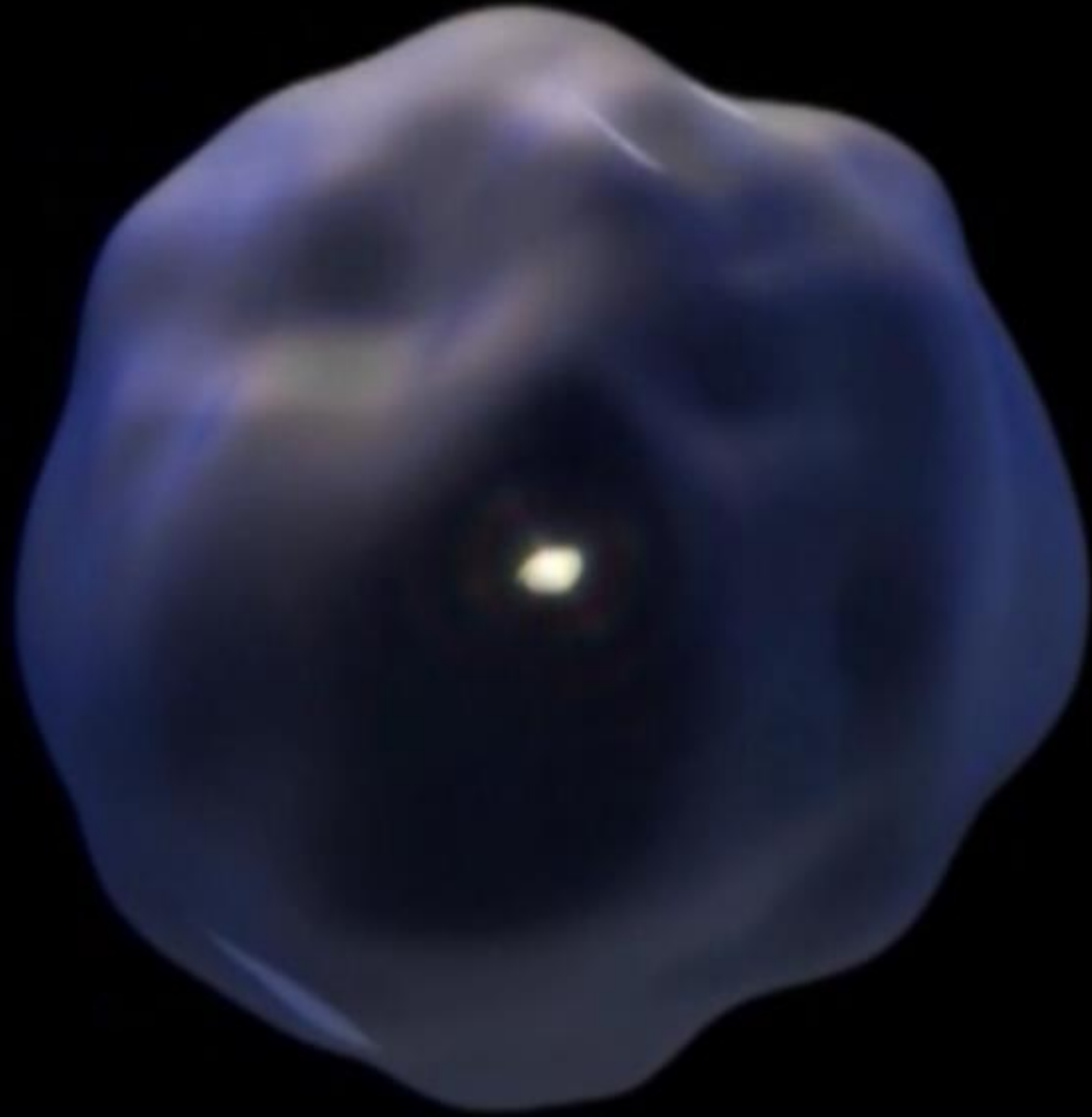


# Παλιά άποψη...





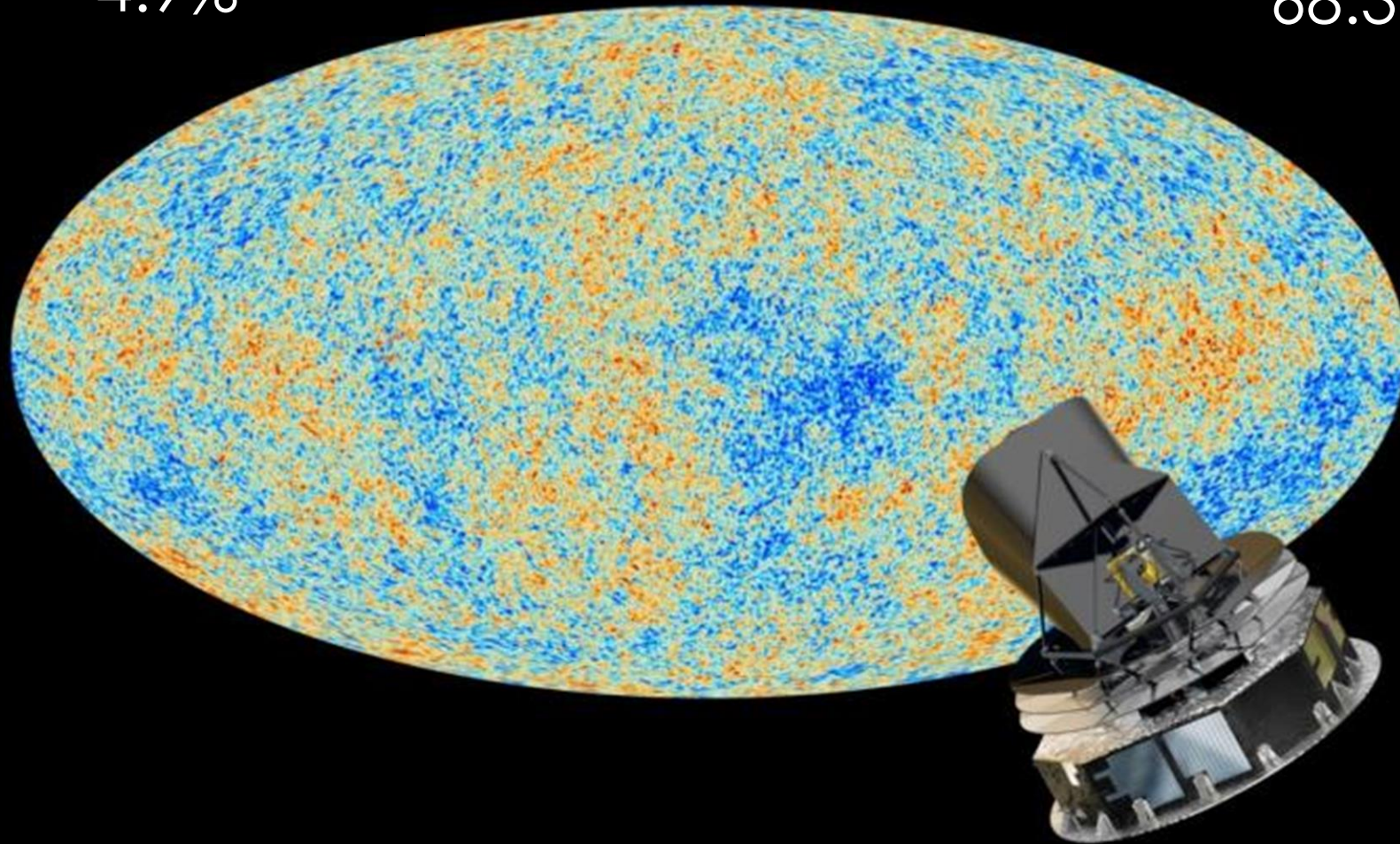
Νέα άποψη



Κανονική ύλη  
4.9%

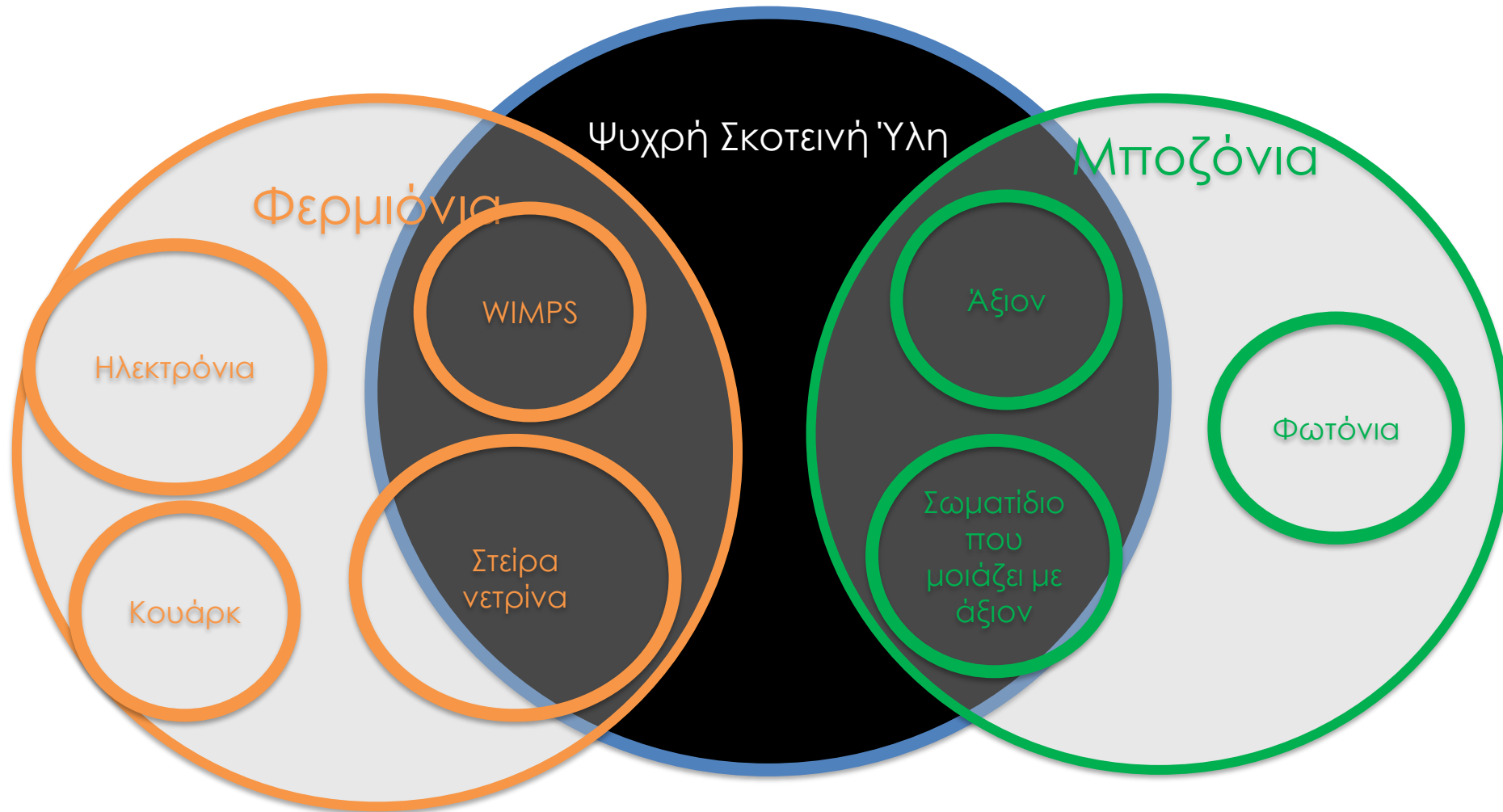
Σκοτεινή ύλη  
26.8%

Σκοτεινή ενέργεια  
68.3%



# Ανταγωνιστικές Θεωρίες για τη σκοτεινή ύλη

- Σωματίδιο που δεν έχει ανακαλυφθεί ακόμα



# Πώς να αναζητήσετε σωματίδια σκοτεινής ύλης

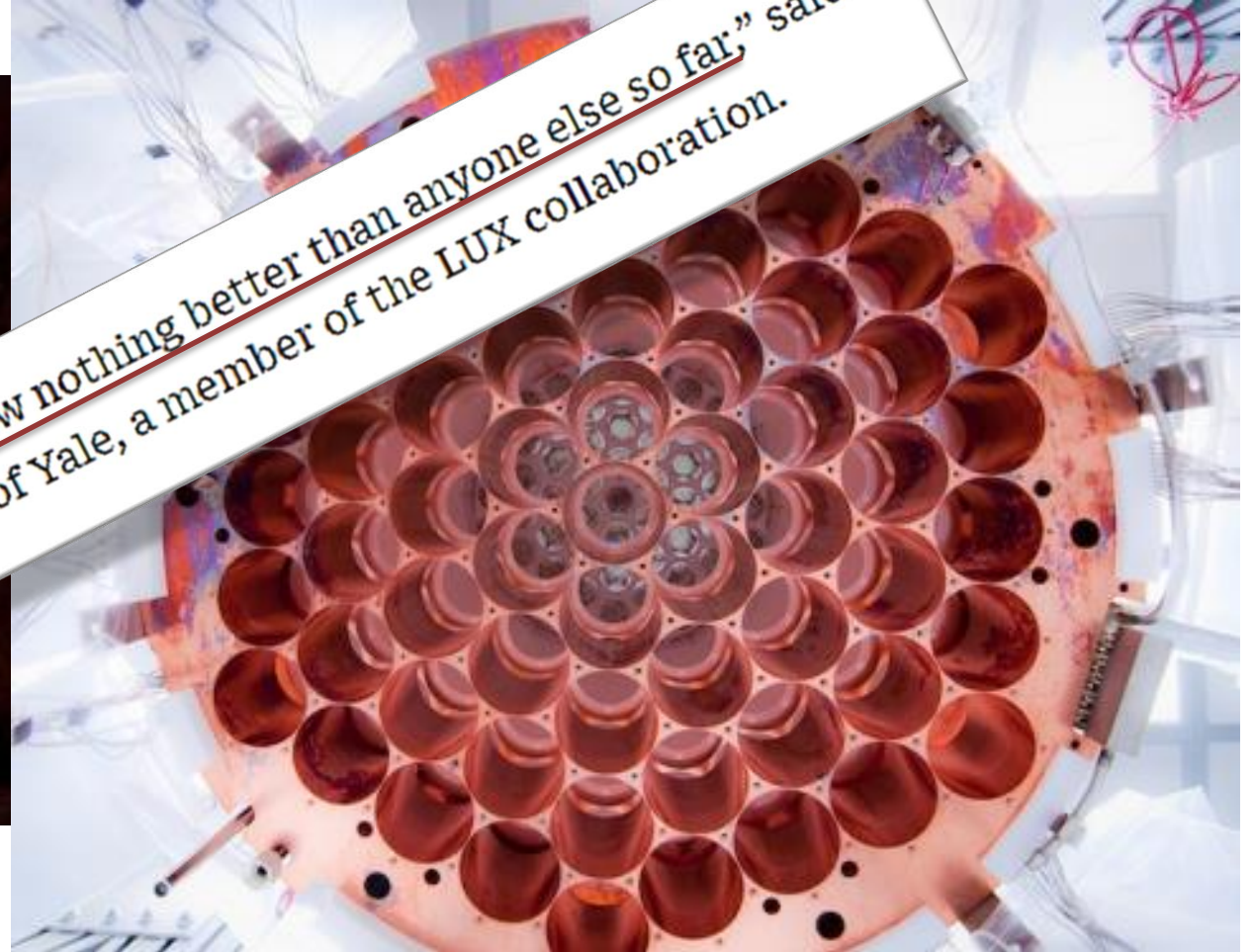
- Άμεση ανίχνευση: περιμένετε να χτυπήσει έναν ανιχνευτή
- Έμμεση ανίχνευση: αναζητήστε άλλες υπογραφές
- Επιταχυντές σωματιδίων: φτιάξτε το

# LUX- Large Underground Xenon Detector



Homestake Mine in South Dakota

“Basically, we saw nothing. But we saw nothing better than anyone else so far,” said particle physicist Daniel McKinsey of Yale, a member of the LUX collaboration.



# LUX update (2017)

With roughly fourfold improvement in sensitivity for high WIMP masses relative to our previous results, this search yields no evidence of WIMP nuclear recoils. [arXiv:1608.07648v3](https://arxiv.org/abs/1608.07648v3)



# LUX-ZEPLIN (LZ) update (2022)

A profile-likelihood ratio analysis shows the data to be consistent with a background-only  
<https://arxiv.org/abs/2207.03764>



# XENON1T most sensitive measurement yet (2018)

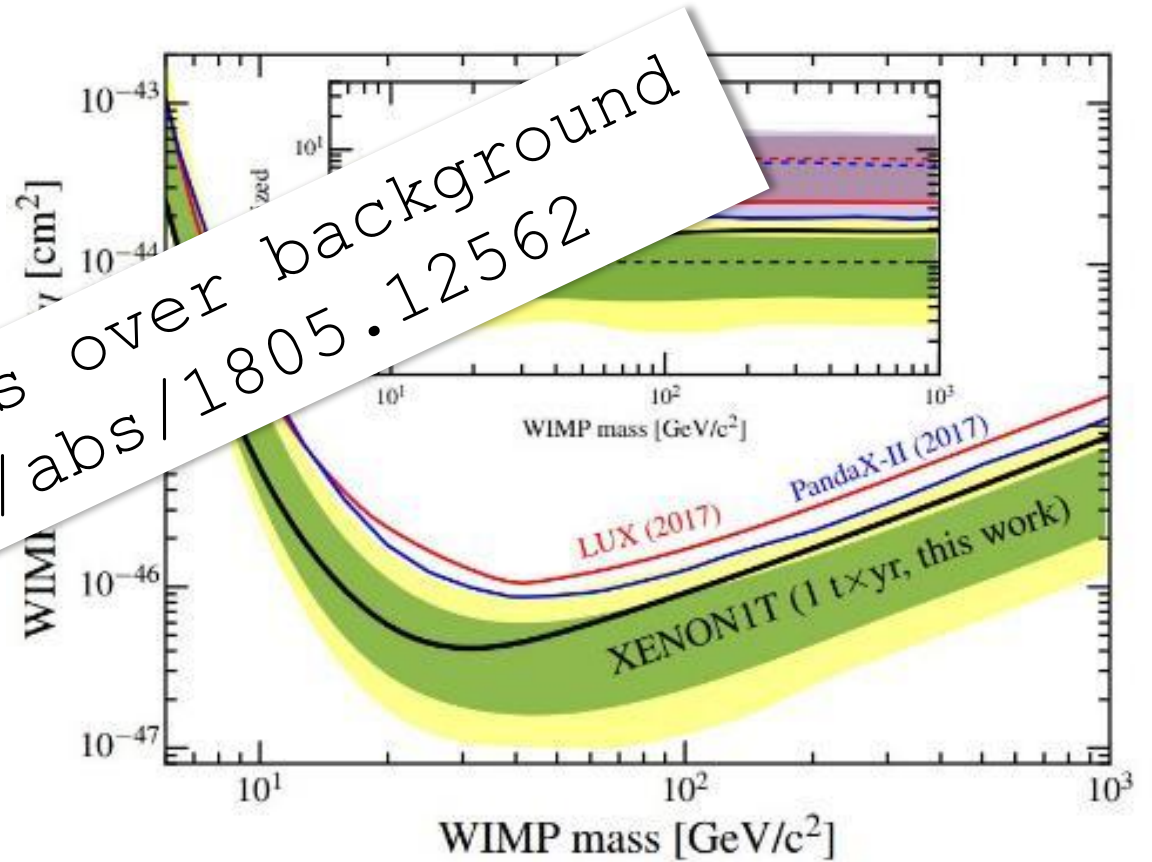


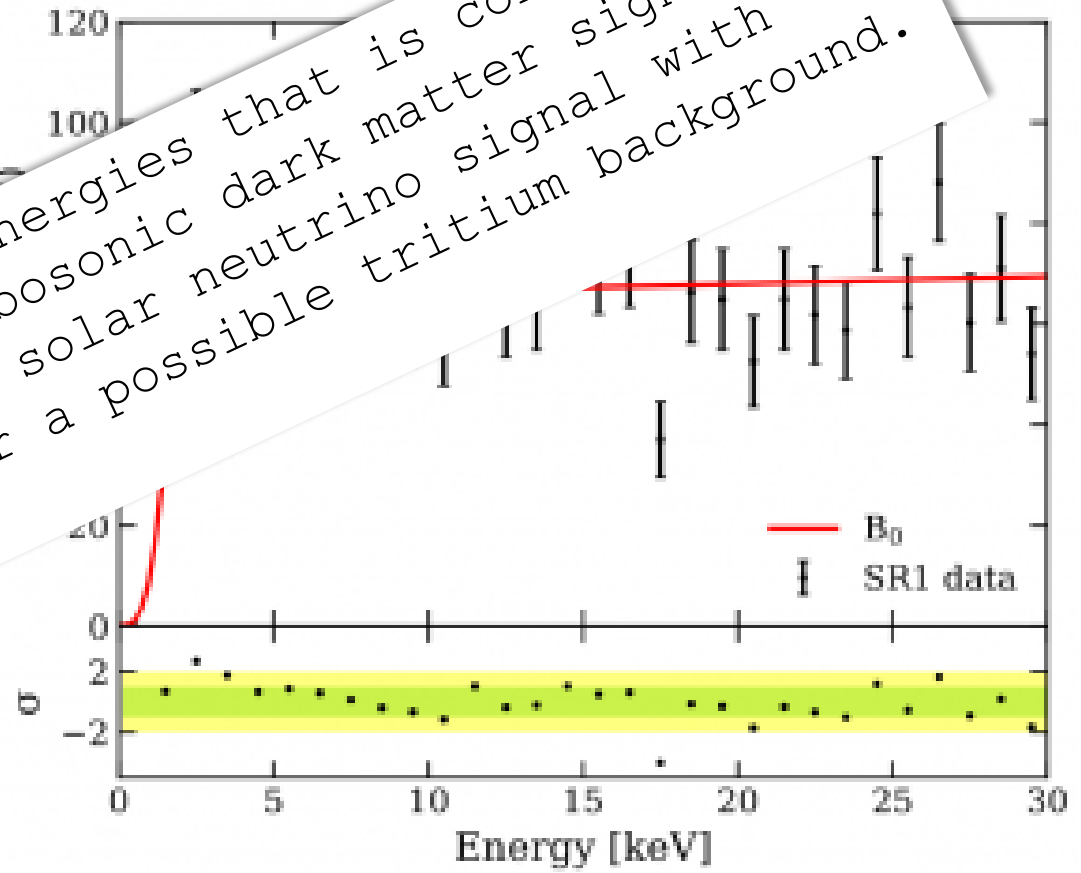
Image credit: Roberto Corrieri and Patrick De Perio



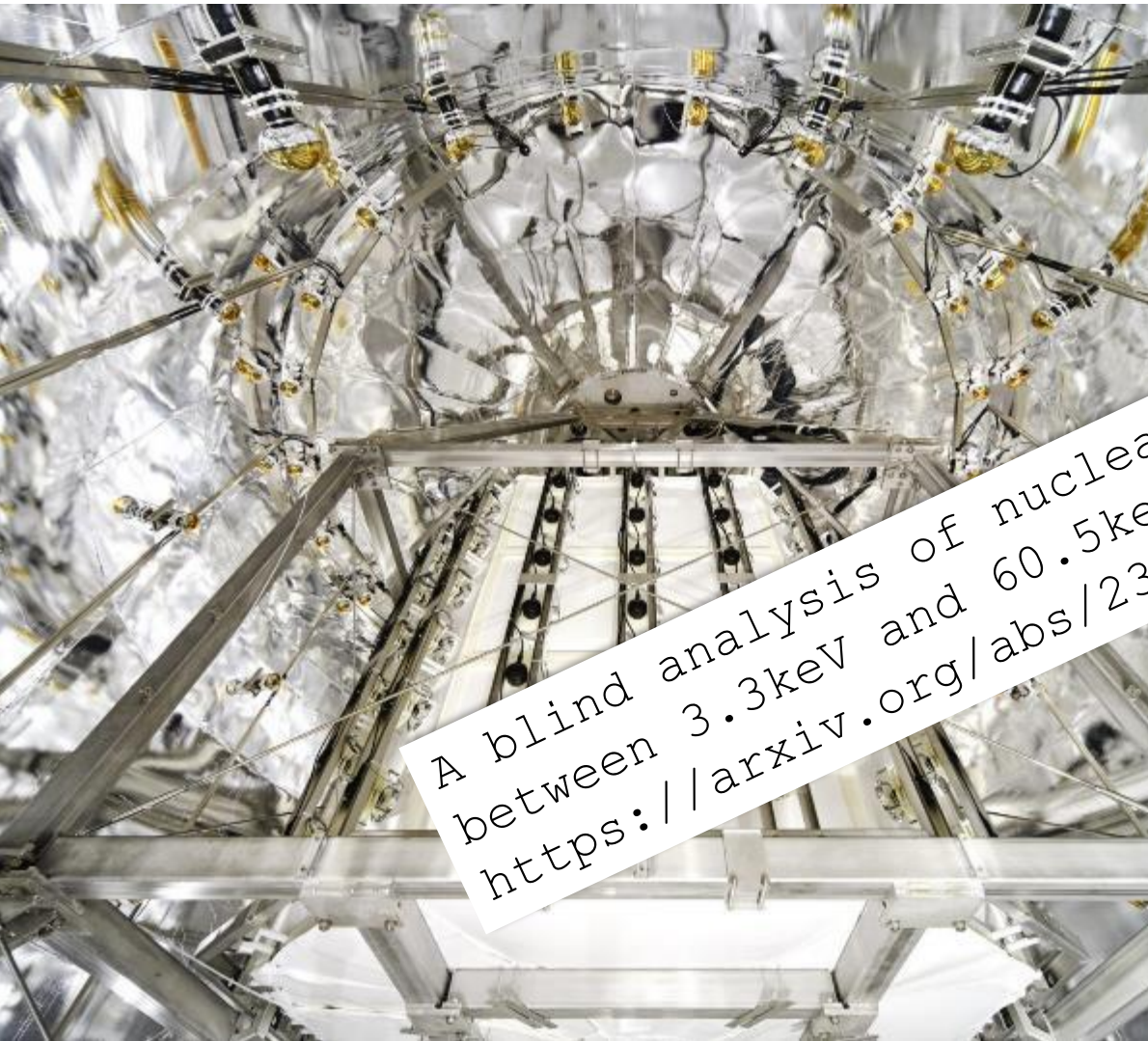
# XENON1T – electronic recoil excess (2020)



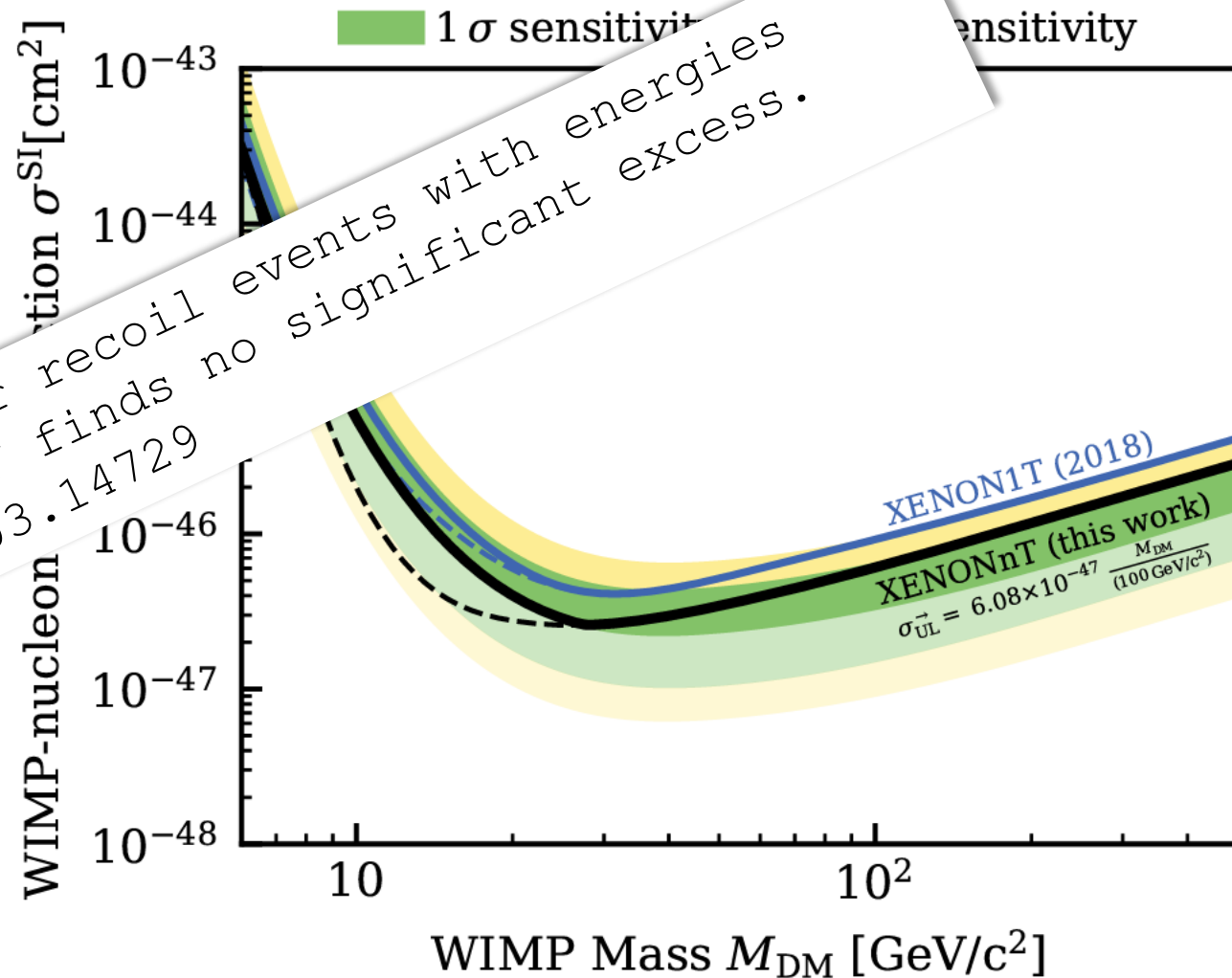
An excess is observed at low energies that is consistent with a solar axion signal, a bosonic dark matter signal with a mass of  $2.3 \text{ keV}/c^2$ , enhanced magnetic moment, a solar neutrino signal with  $\mu = 0.09721$ , or a possible tritium background.



# XENONnT – (2023)



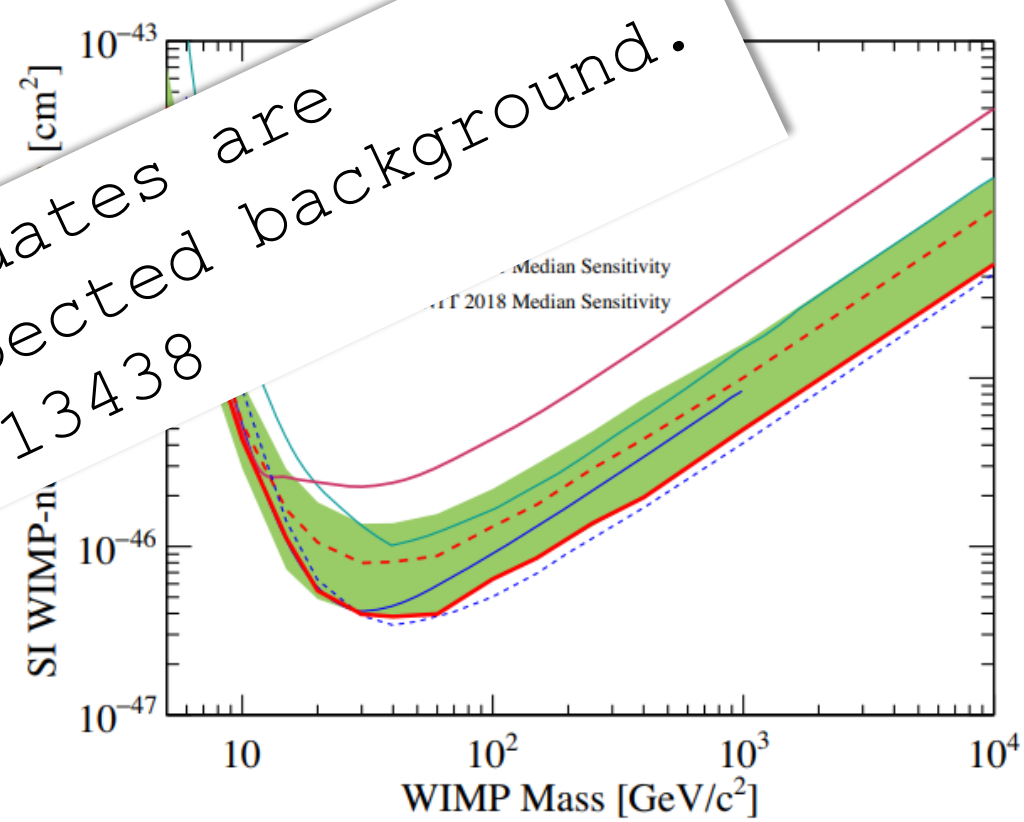
A blind analysis of nuclear recoil events with energies between 3.3keV and 60.5keV finds no significant excess.  
<https://arxiv.org/abs/2303.14729>



# PANDAX- 4T (2021)



No dark matter candidates are identified above expected background.  
[arxiv.org/abs/2107.13438](https://arxiv.org/abs/2107.13438)

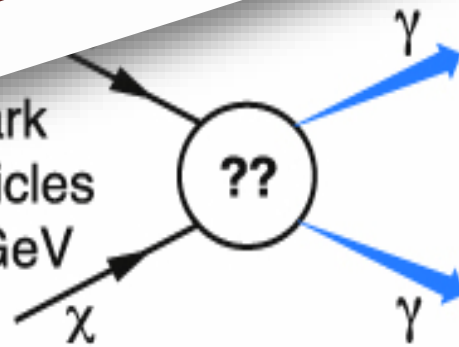


# FERMI

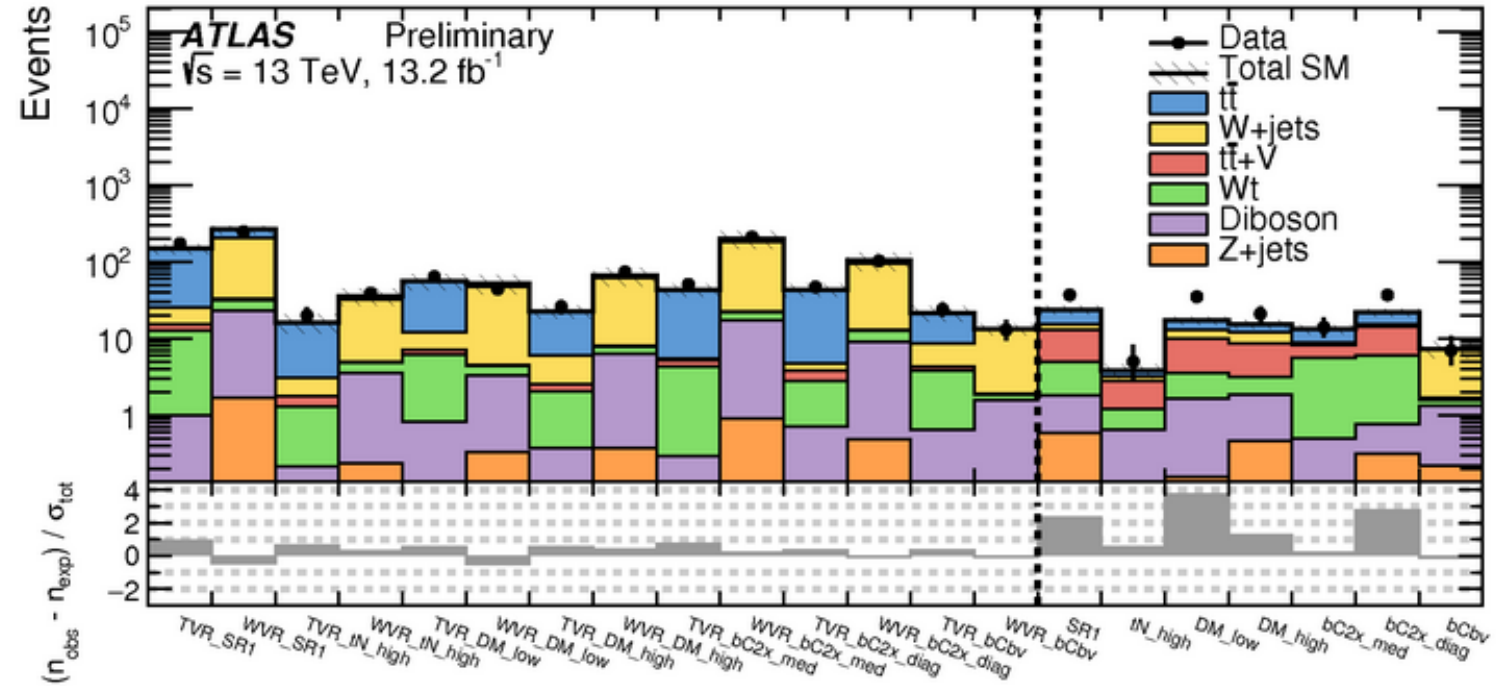
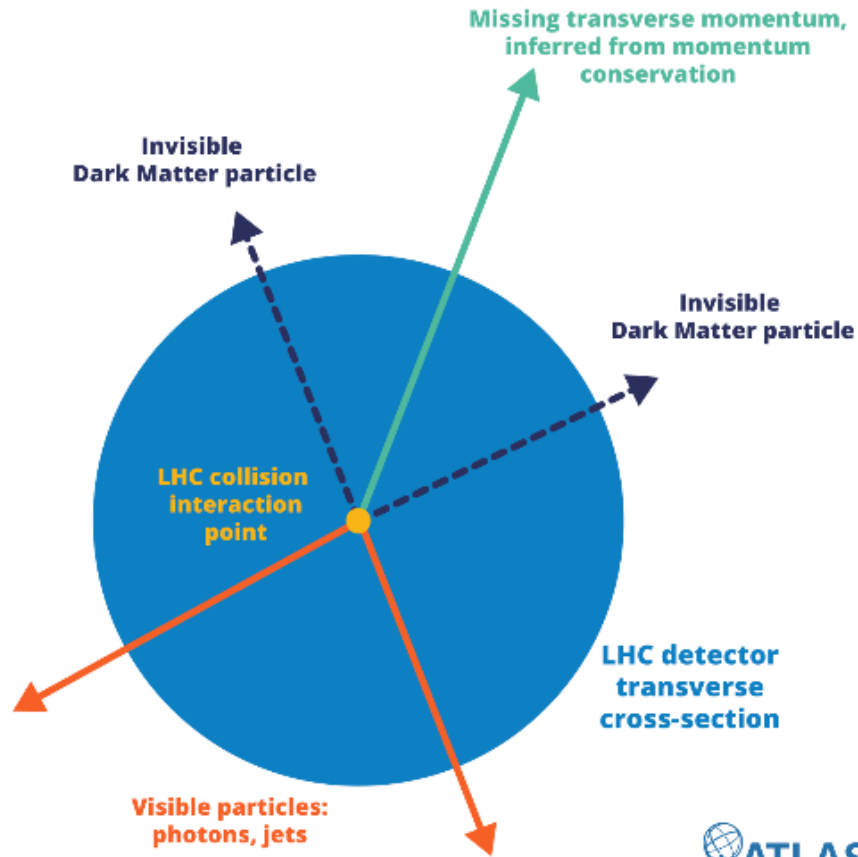
- Detects  $\gamma$ -rays
- DM particle annihilation

'Our measurement complements other search campaigns that used gamma rays to look for dark matter and it confirms that there is little room left for dark matter induced gamma-ray emission in the isotropic gamma-ray background,' says Fornasa.

IMP Dark  
Matter Particles  
 $E_{CM} \sim 100 \text{ GeV}$



# LHC



**Με άδεια χέρια;**



# Τροποποιημένες θεωρίες βαρύτητας



# Στείρα Νετρίνα

all known physics

$$\Psi = \int e^{\frac{i}{\hbar} \int \left( \frac{R}{16\pi G} - \frac{1}{4} F^2 + \bar{\psi} i \not{D} \psi - \lambda H \bar{\psi} \psi + |DH|^2 - V(H) \right)}$$

The equation is annotated with names of physicists and concepts:
 

- Schrödinger (above the integral sign)
- Feynman (above the exponential)
- Euler (below the exponential)
- Planck (below the  $i/\hbar$  term)
- Einstein (above the  $R/16\pi G$  term)
- Newton (below the  $R/16\pi G$  term)
- Maxwell-Yang-Mills (above the  $F^2$  term)
- Dirac (below the  $\bar{\psi} i \not{D} \psi$  term)
- Kobayashi-Maskawa (above the  $\lambda H \bar{\psi} \psi$  term)
- Yukawa (below the  $\lambda H \bar{\psi} \psi$  term)
- Higgs (below the  $|DH|^2$  term)
- Lagrange (above the  $V(H)$  term)

include neutrino masses via  $H \rightarrow H + M$

$$\psi = (q_L, u_R, d_R, l_L, e_R, \nu_R) \times 3$$

dark matter? Boyle, Finn, NT 2018



# Σκοτεινή ύλη

- Λειτουργεί καλά σε κοσμολογική κλίμακα
- Δεν λειτουργεί καλά λεπτομερώς για καμπύλες περιστροφής γαλαξιών (προβλήματα μικρής κλίμακας)
- Ακόμα δεν το βρήκαμε

# Τροποποιημένη Βαρύτητα

- Προβλέπει πολύ καλά τις καμπύλες περιστροφής των γαλαξιών
- Δεν προβλέπει καλά ή αγνοεί τα δεδομένα από CMB ή τα δεδομένα βαρυτικών κυμάτων

# Αδιέξοδο



# Τρέχουσα κατάσταση της σκοτεινής ύλης



$$\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{e} \text{ Part of (the) } \Sigma \text{ equation}^2$$

EDUCATIONAL  
RESOURCES

[resources.perimeterinstitute.ca](https://resources.perimeterinstitute.ca)

Thank You! - Ευχαριστώ!!

[www.perimeterinstitute.ca](http://www.perimeterinstitute.ca)

Damian Pope

[dpope@perimeterinstitute.ca](mailto:dpope@perimeterinstitute.ca)

Olga Michalopoulos

[omichalopoulos@gmail.com](mailto:omichalopoulos@gmail.com)