




# Alla ricerca della Materia Oscura

Giulia D'Imperio - INFN Roma

Seminari Art & Science

29/09/2025 - IIS Gregorio da Catino, Poggio Mirteto

# Mi presento

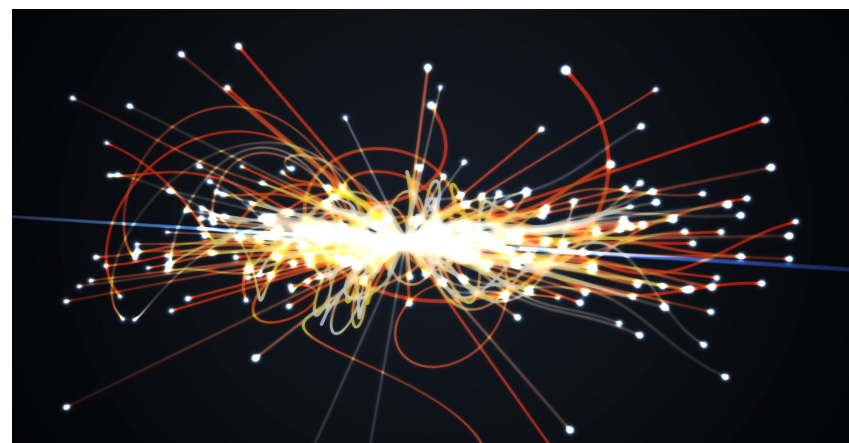
- Sono una **Fisica delle Particelle Sperimentale** e sono ricercatrice dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)
- Interesse scientifico primario: ricerche di **Materia Oscura**
  - sviluppo, test, simulazioni di **detector** per “rivelare” la materia oscura
  - **Ricerche multidisciplinari** (computer quantistici, radiobiologia) nei laboratori sotterranei come i Laboratori Nazionali del Gran Sasso
- Cosa ho studiato:
  - Liceo Classico
  - Laurea Triennale + Laurea Magistrale Fisica Sapienza
  - Dottorato in Fisica Sapienza + CERN
- Contatti:  giulia.dimperio@roma1.infn.it

# L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

L'INFN è l'ente **pubblico nazionale di ricerca** dedicato allo studio dei costituenti fondamentali della materia e delle leggi che li governano

- 5 linee scientifiche
- 20 sezioni e 4 laboratori nazionali
- in area romana 3 sezioni (Roma1, Roma2, Roma3) + Laboratori Nazionali di Frascati

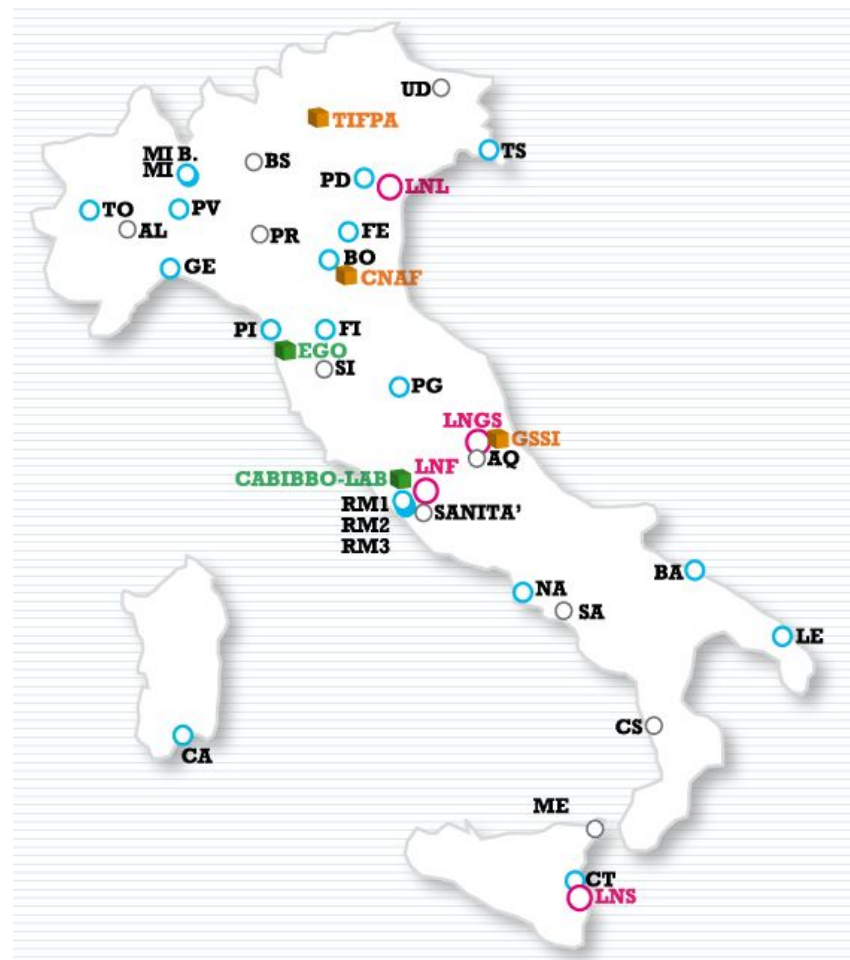
Fisica delle particelle (acceleratori)



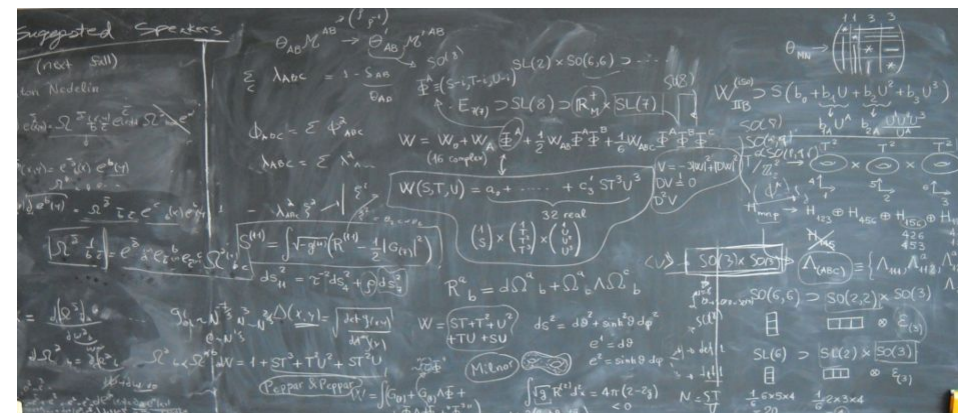
Fisica astroparticellare



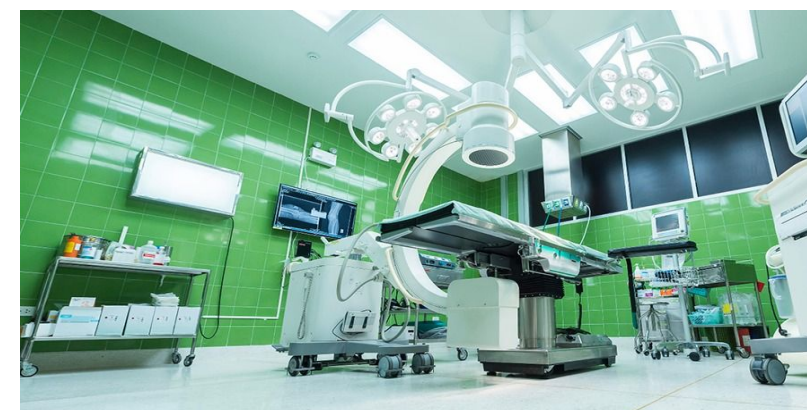
Fisica nucleare



Fisica teorica



Ricerca tecnologica

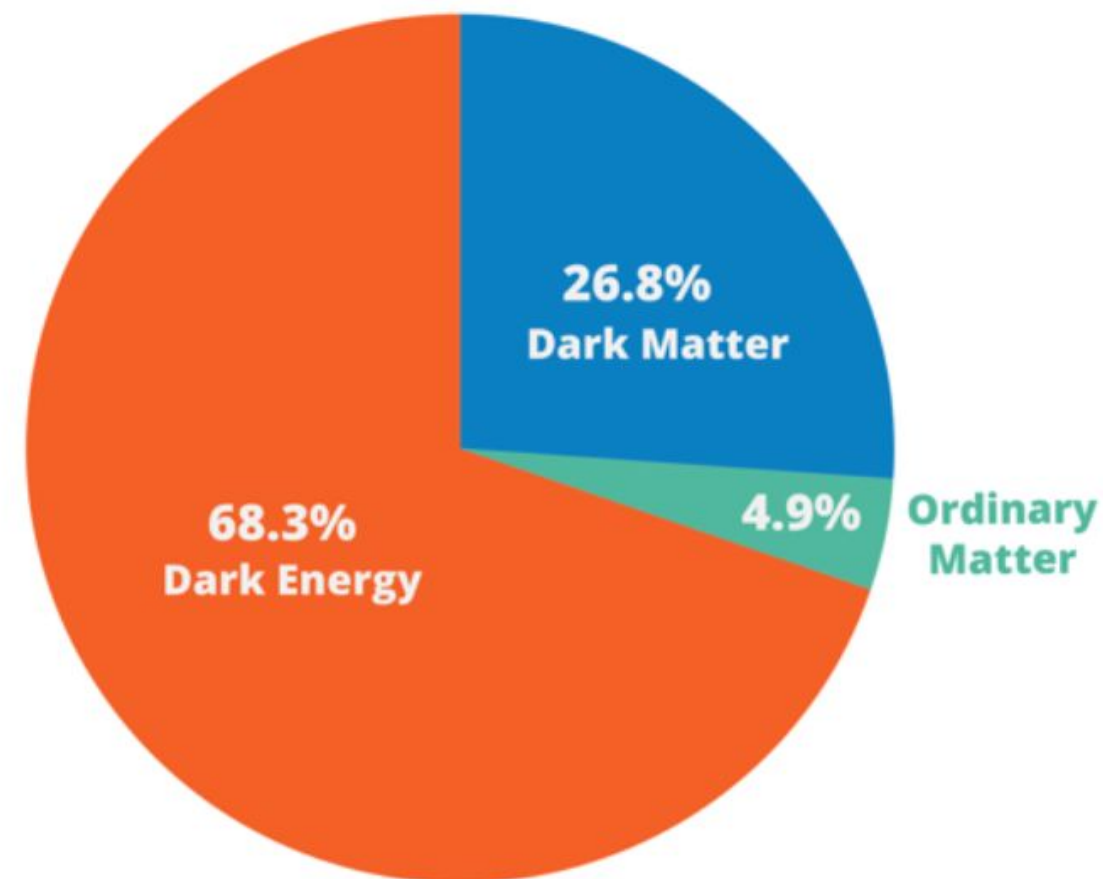


# Cosa sappiamo dell'universo

Oggi sappiamo che **meno del 5% dell'universo è fatto di materia "comune"** (stelle, pianeti, gas, ...)

Tutto il resto è fatto di Materia Oscura (26.8%) e Energia Oscura (68.3%)

- Perché oscura?
- Di cosa è fatta?
- Perché ci interessa?



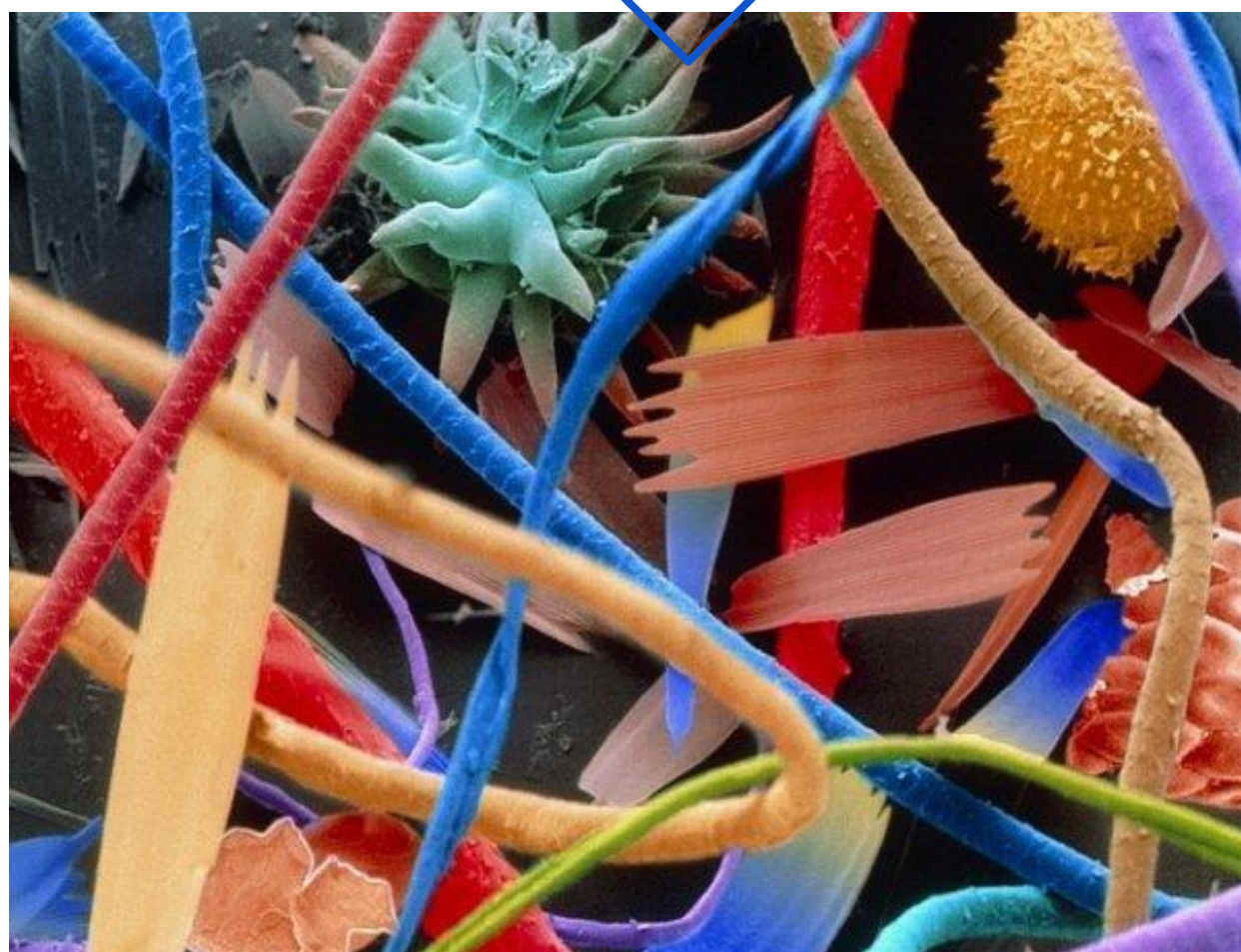
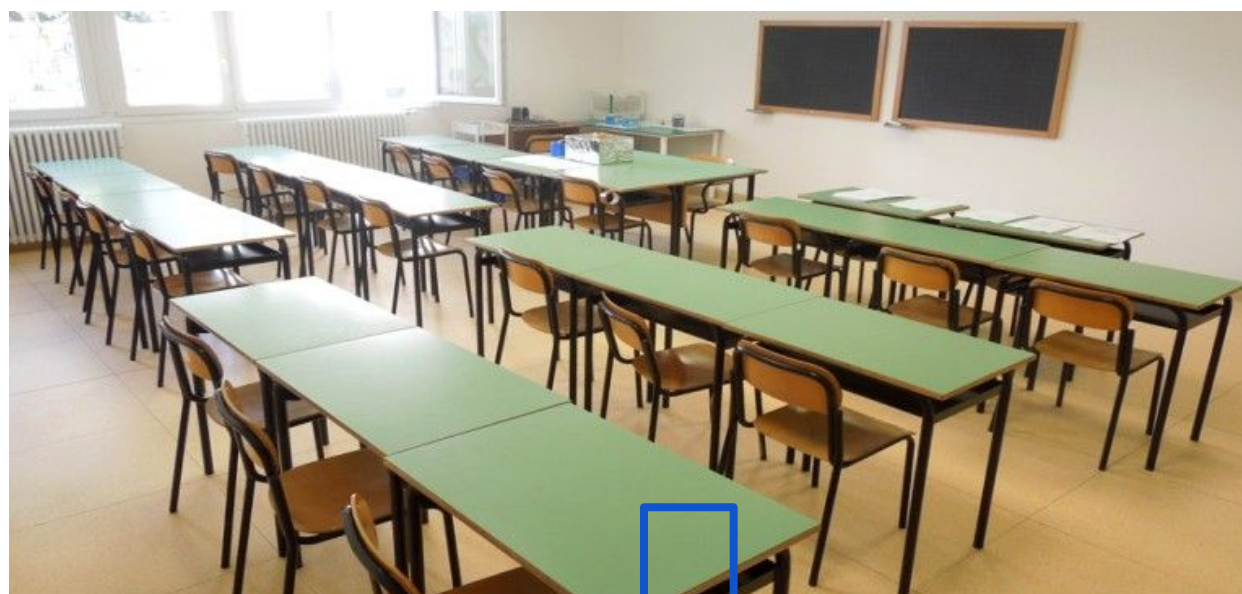
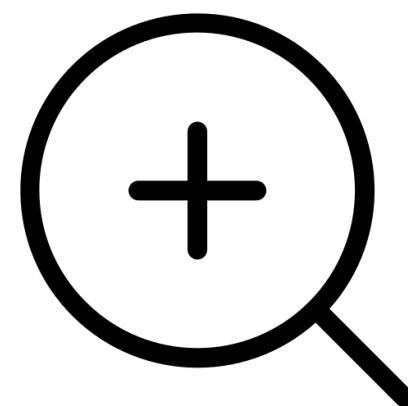
→ Facciamo un passo indietro: cosa è la **materia?**

# La materia

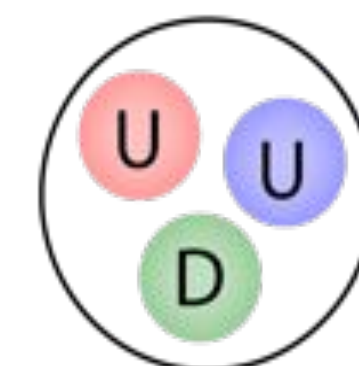
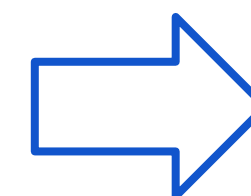
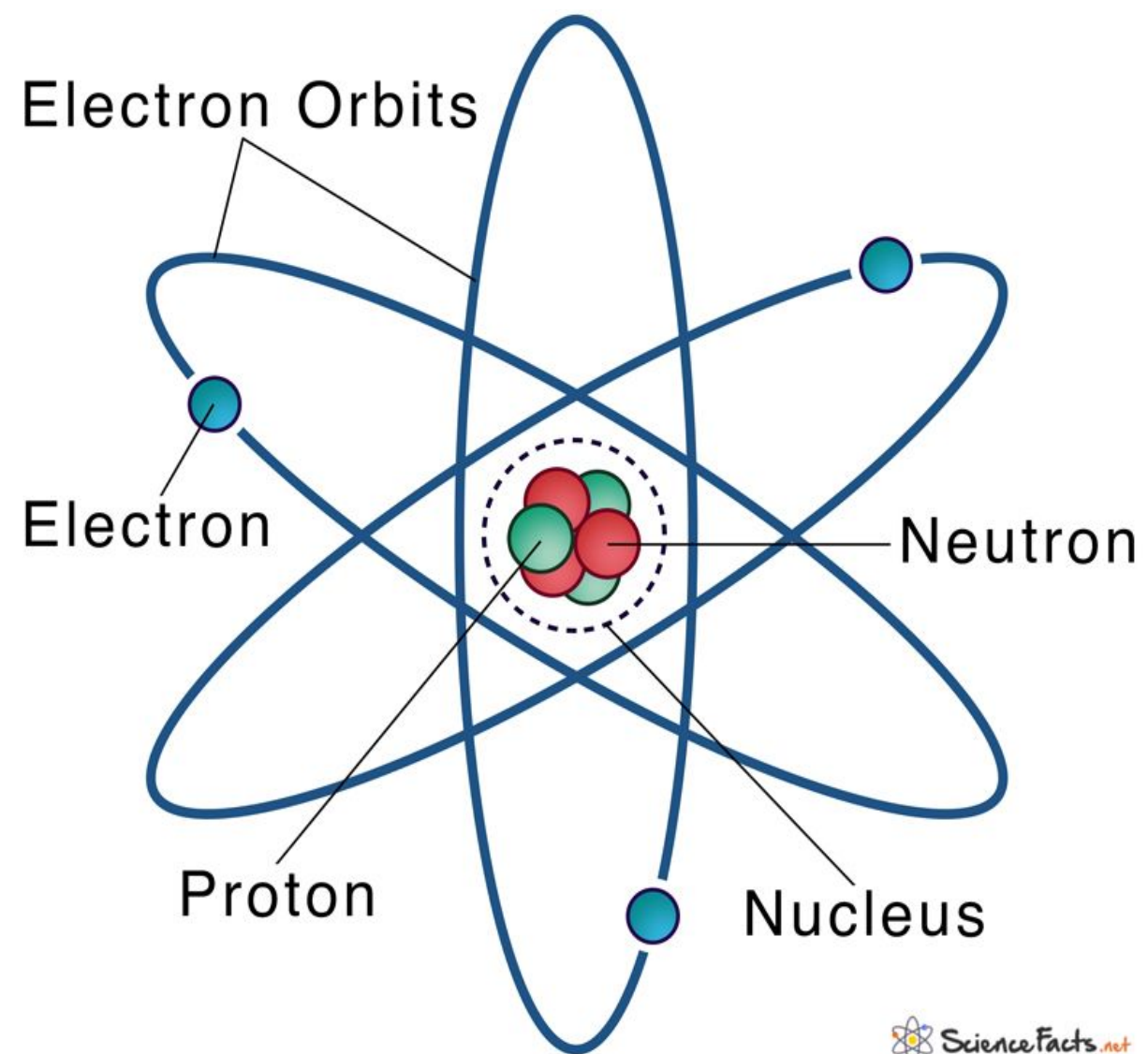
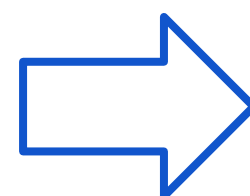
- **Materia** è ciò che ha una **massa**
  - più precisamente la massa è una **proprietà** della materia
- Noi siamo fatti di materia, i banchi, la scuola, ecc..



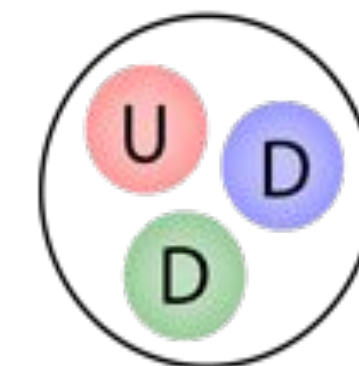
Se facciamo uno zoom



Polvere al microscopio dall'account twitter @microscopicture



Proton



Neutron

# Le particelle elementari

“Elementari” significa che, per quanto ne sappiamo, non sono composte da particelle più piccole

## Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
	I	II	III	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>ū</b> antiup	<b>c̄</b> anticharm	<b>t̄</b> antitop	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>d̄</b> antidown	<b>s̄</b> antistrange	<b>b̄</b> antibottom	<b>γ</b> photon	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>e<sup>+</sup></b> positron	<b>μ̄</b> antimuon	<b>τ̄</b> antitau	<b>Z</b> Z <sup>0</sup> boson	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>ν̄<sub>e</sub></b> electron antineutrino	<b>ν̄<sub>μ</sub></b> muon antineutrino	<b>ν̄<sub>τ</sub></b> tau antineutrino	<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson	<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson

- il gluone “g” media le interazioni forti  
→ quelle responsabili di tenere uniti i nuclei
- il fotone “γ” media le interazioni elettromagnetiche
- i bosoni W,Z sono i mediatori delle forze deboli  
→ quelle responsabili della radioattività
- ne manca una: quale?

# Le particelle elementari

“Elementari” significa che, per quanto ne sappiamo, non sono composte da altre particelle più piccole

- Le particelle del **Modello Standard (MS)** sono **tutte le particelle elementari** che conosciamo ad oggi e descrivono benissimo tutti i fenomeni che osserviamo in laboratorio, ad esempio al Large Hadron Collider al CERN di Ginevra





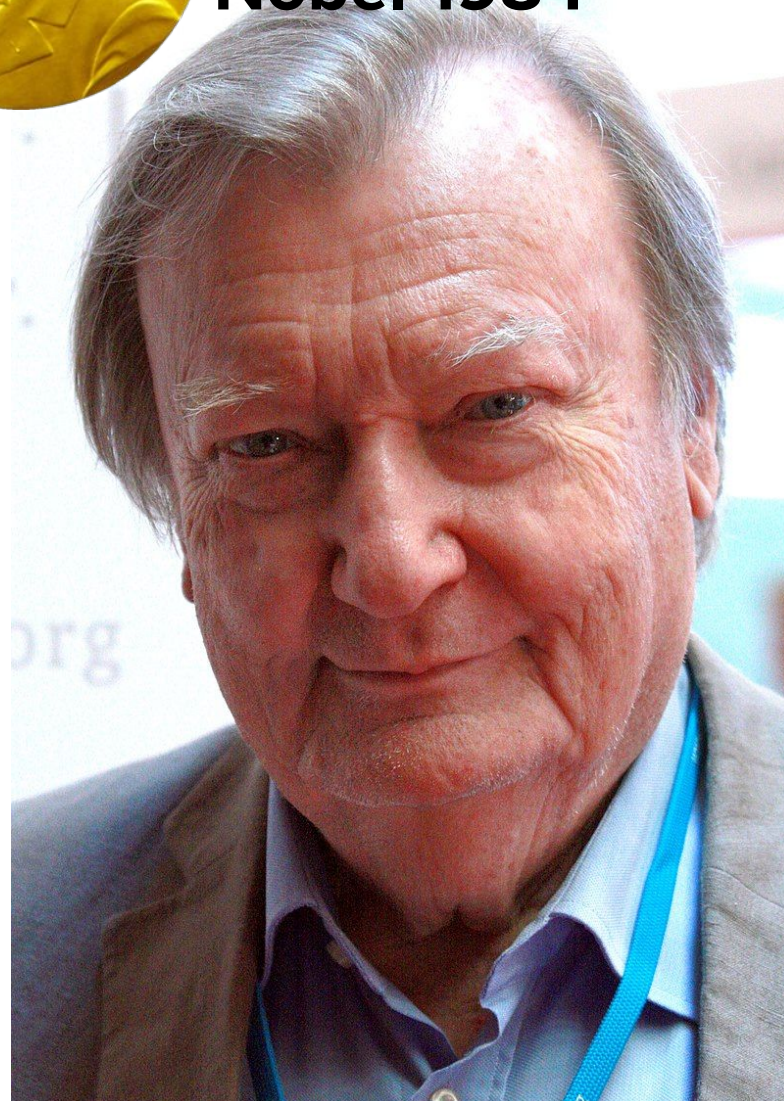
# Il successo del Modello Standard

- Alcune di queste particelle erano solo ipotizzate (il MS nasce negli anni '60) e sono state successivamente scoperte agli acceleratori di particelle (alcune molto recenti)!

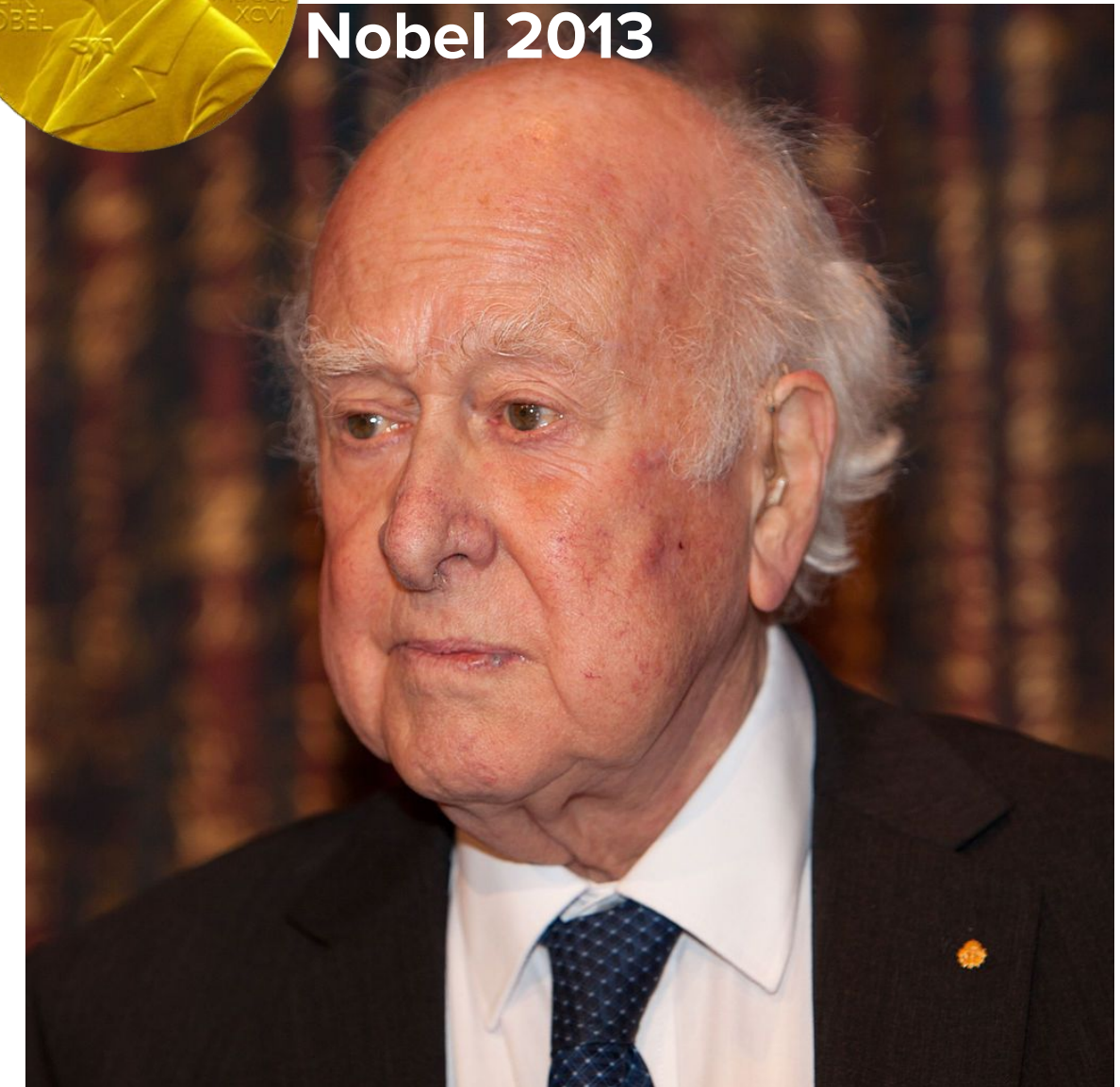
Scoperta del quark "top"  
CDF e DØ al laboratorio Fermilab 1995



Scoperta Bosoni W,Z  
Esperimento UA1, CERN  
**Nobel 1984**



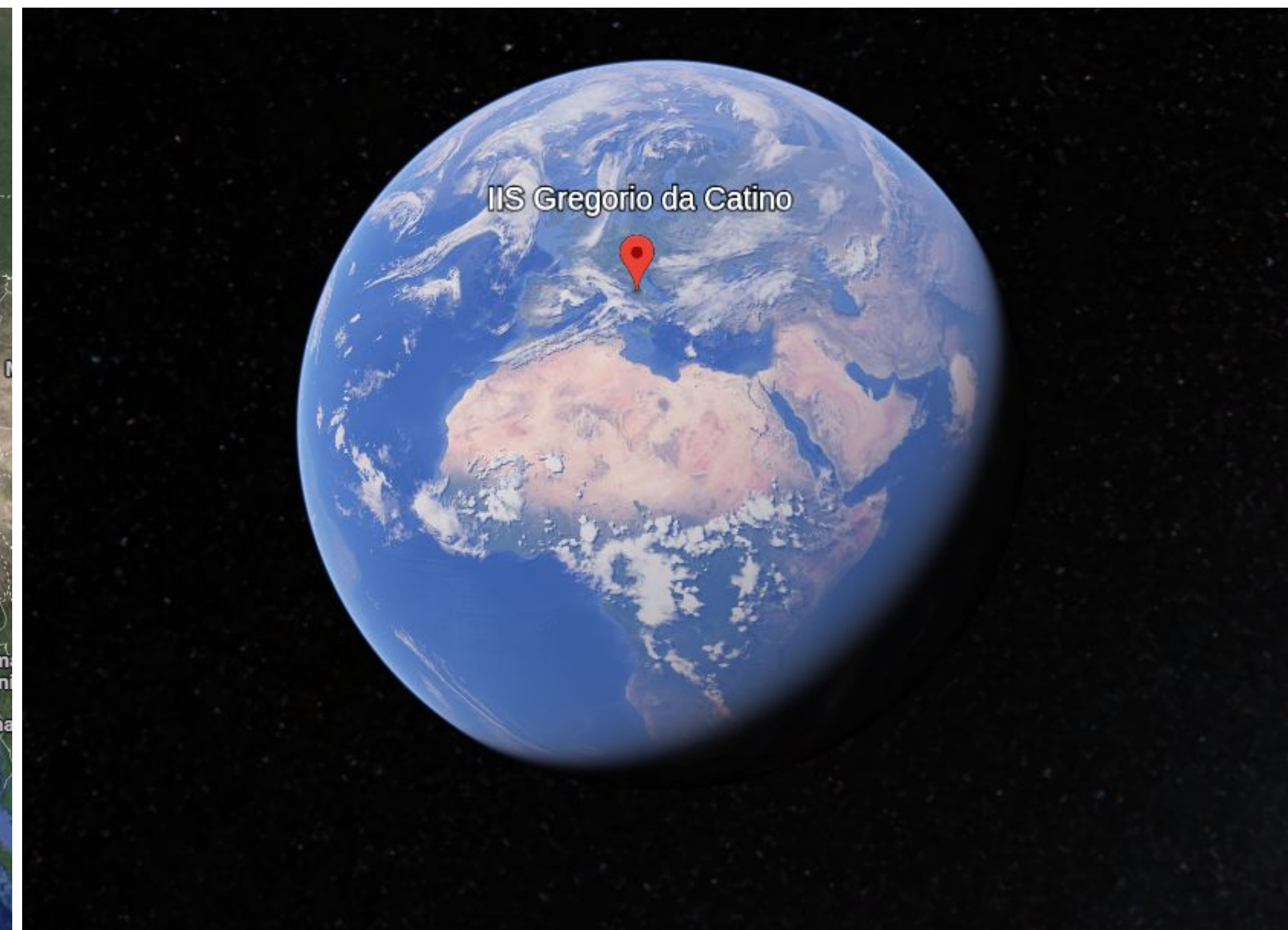
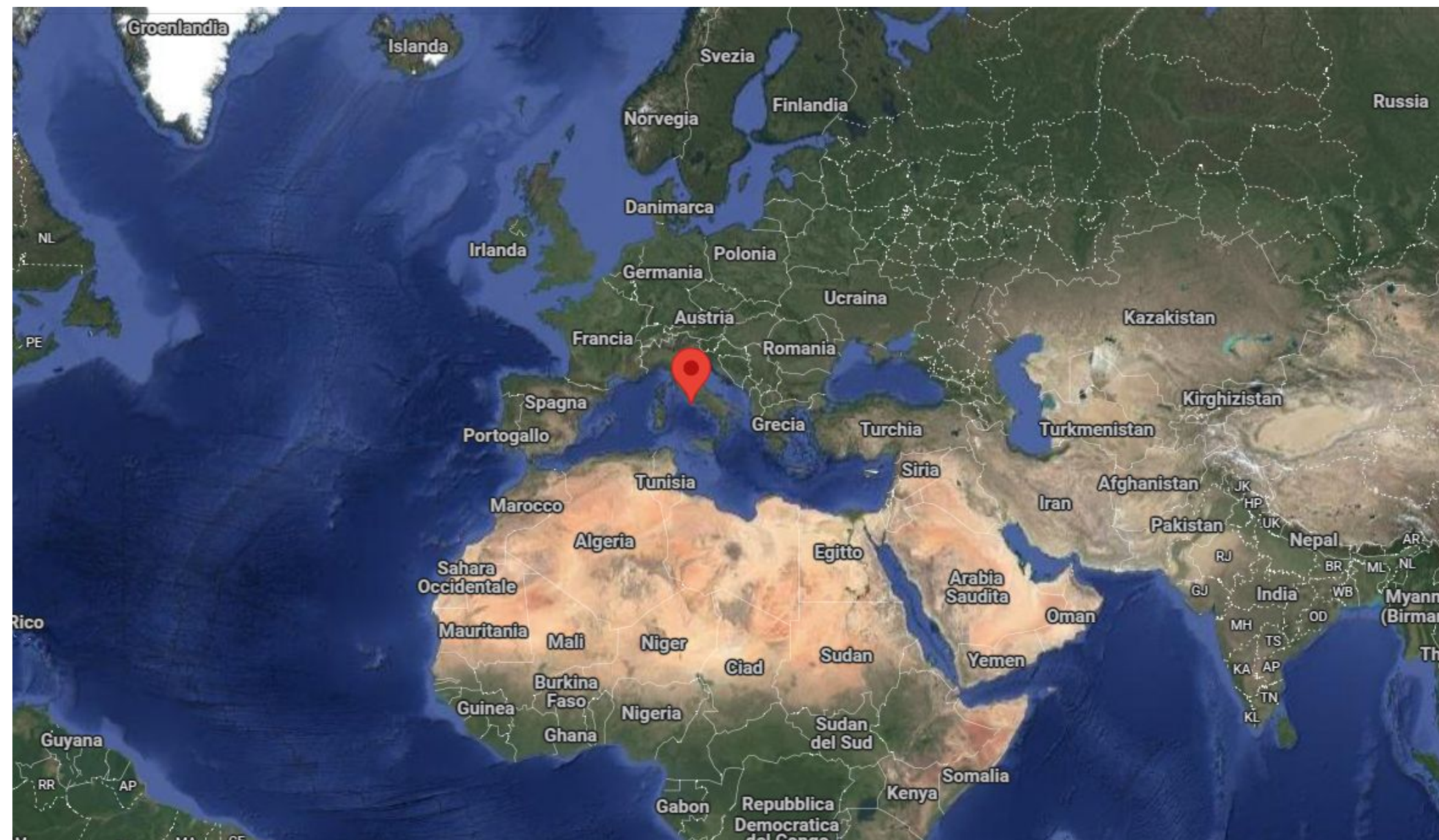
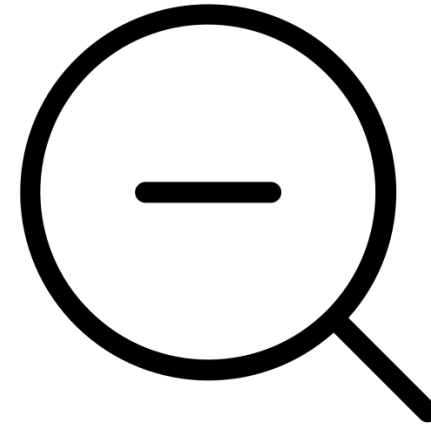
Scoperta Bosone di Higgs  
Collaborazioni ATLAS e CMS, CERN  
**Nobel 2013**



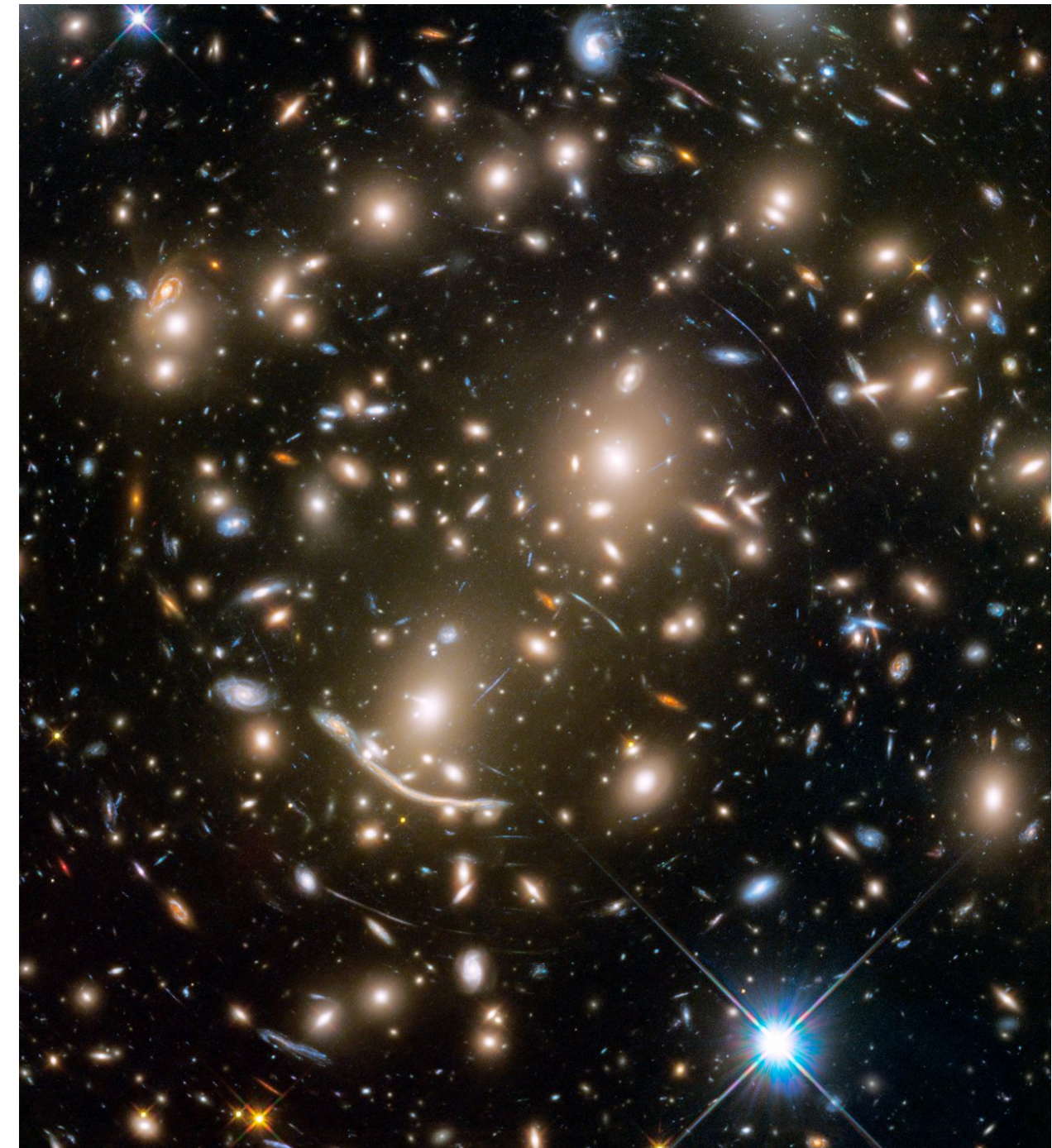
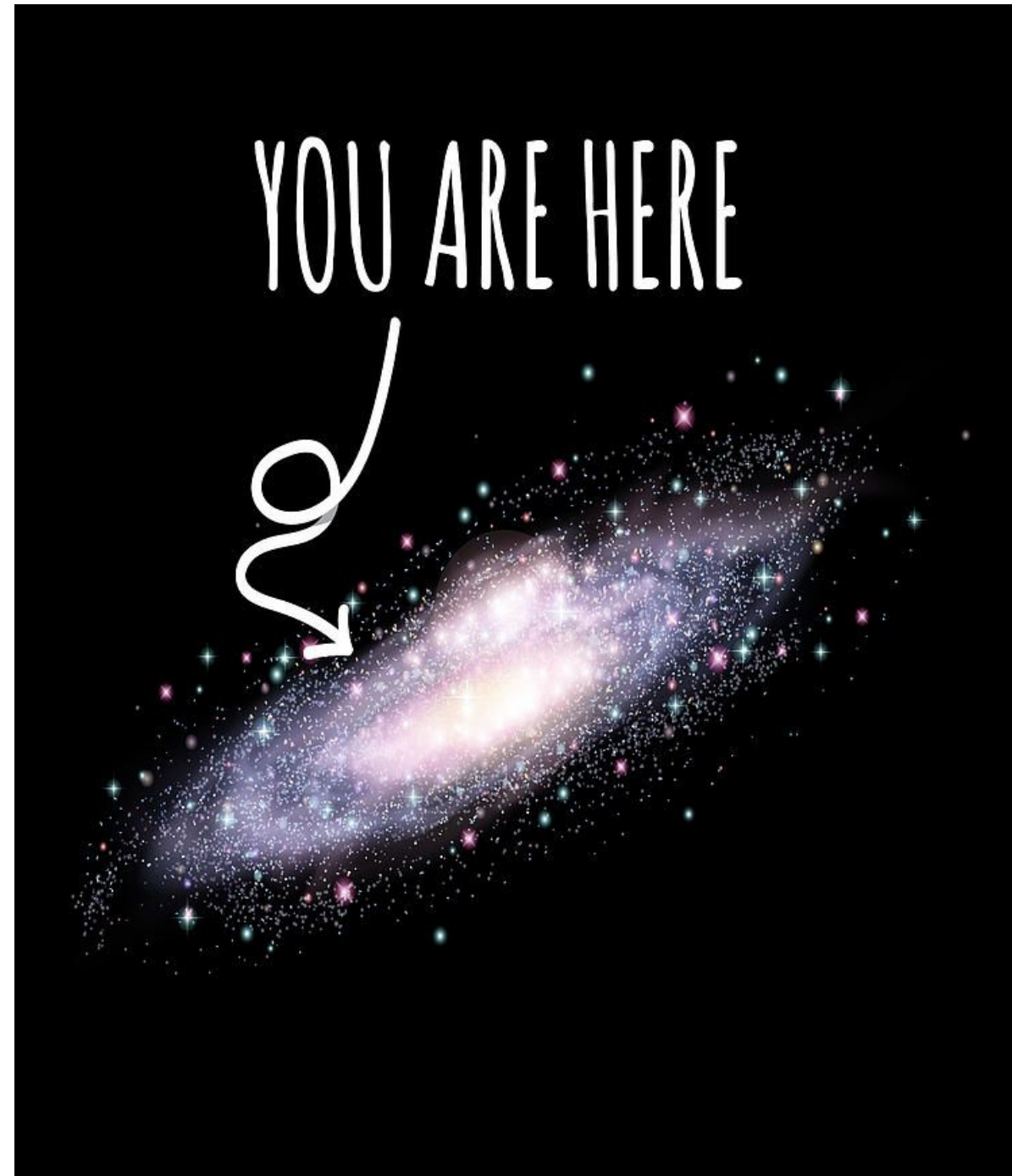
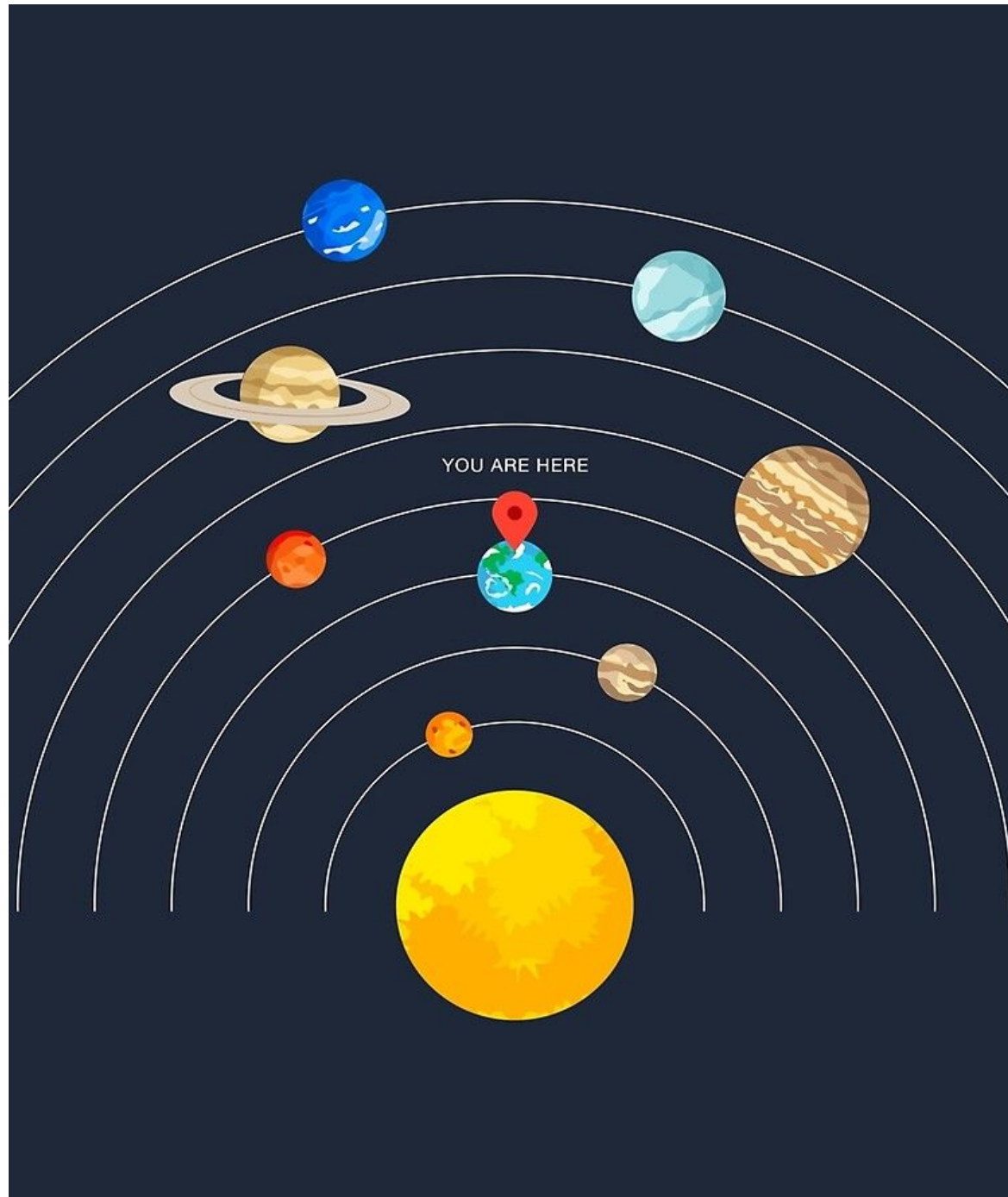
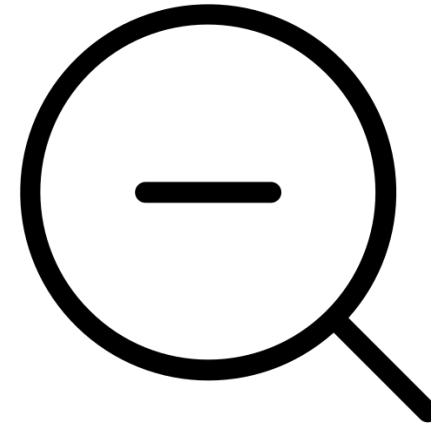
Ma c'è un elefante nella stanza...



Se facciamo uno zoom



Se facciamo uno zoom



# La forza di gravità

- Quando osserviamo oggetti a grandi scale, diventa importante la forza di gravità (che mancava nello schema di prima del MS...)
- Alla scala “umana” abbiamo già esperienza diretta della forza di gravità: è quella che ci tiene ancorati al suolo
- È anche quella responsabile del moto della Terra e dei pianeti intorno al Sole, del Sole nella Via Lattea, ecc...
- Fino ai primi del 1900 si pensava che la gravità fosse una forza a distanza, con intensità proporzionale alle masse e a  $1/r^2$  (distanza)
  - simile alla forza elettrica, ma solo attrattiva (non esistono masse negative)
  - poi è arrivato Einstein (ma ci arriviamo tra un po'...)



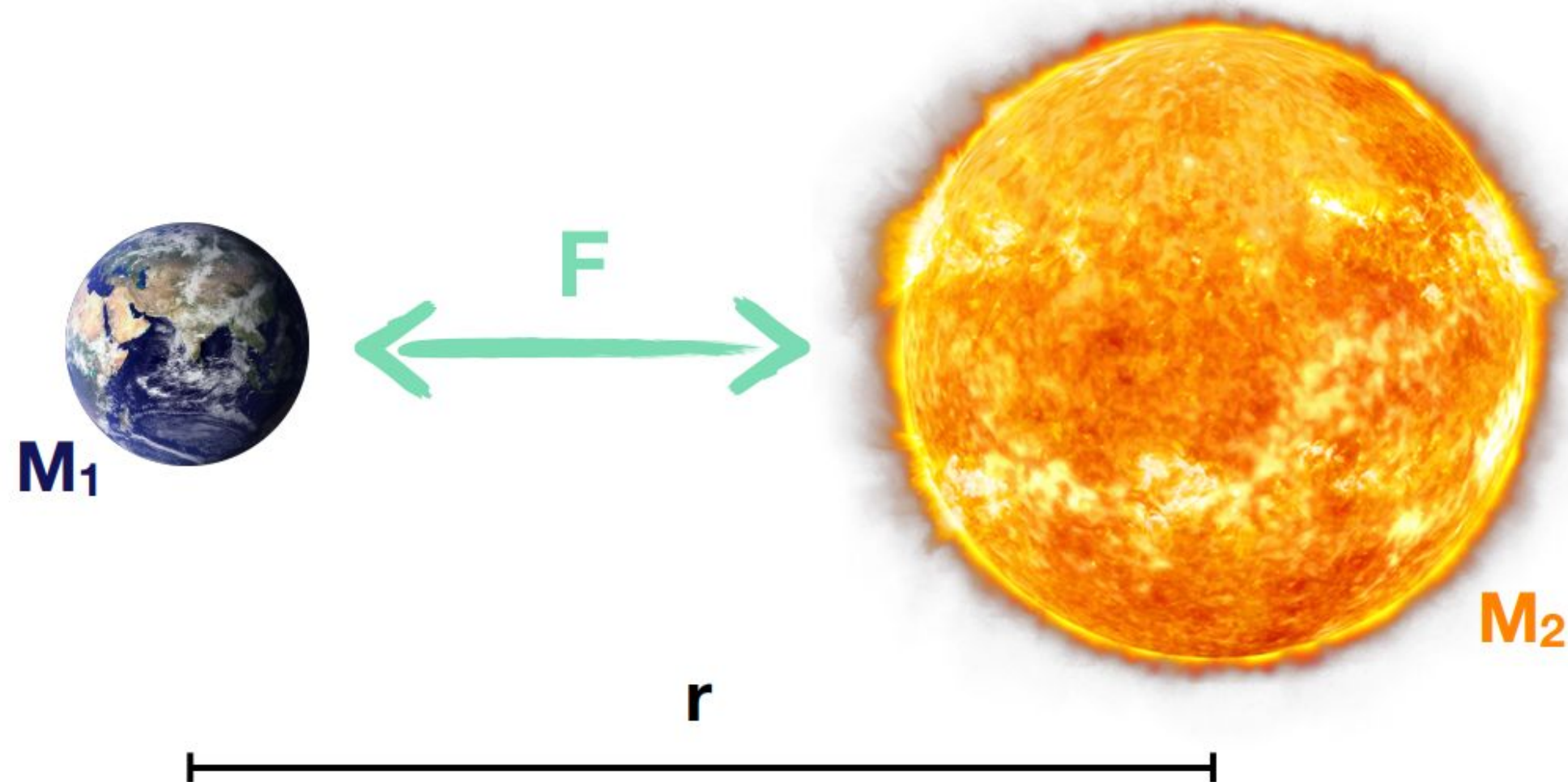
# La forza di gravità

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

**M<sub>1</sub>** e **M<sub>2</sub>** sono le due masse

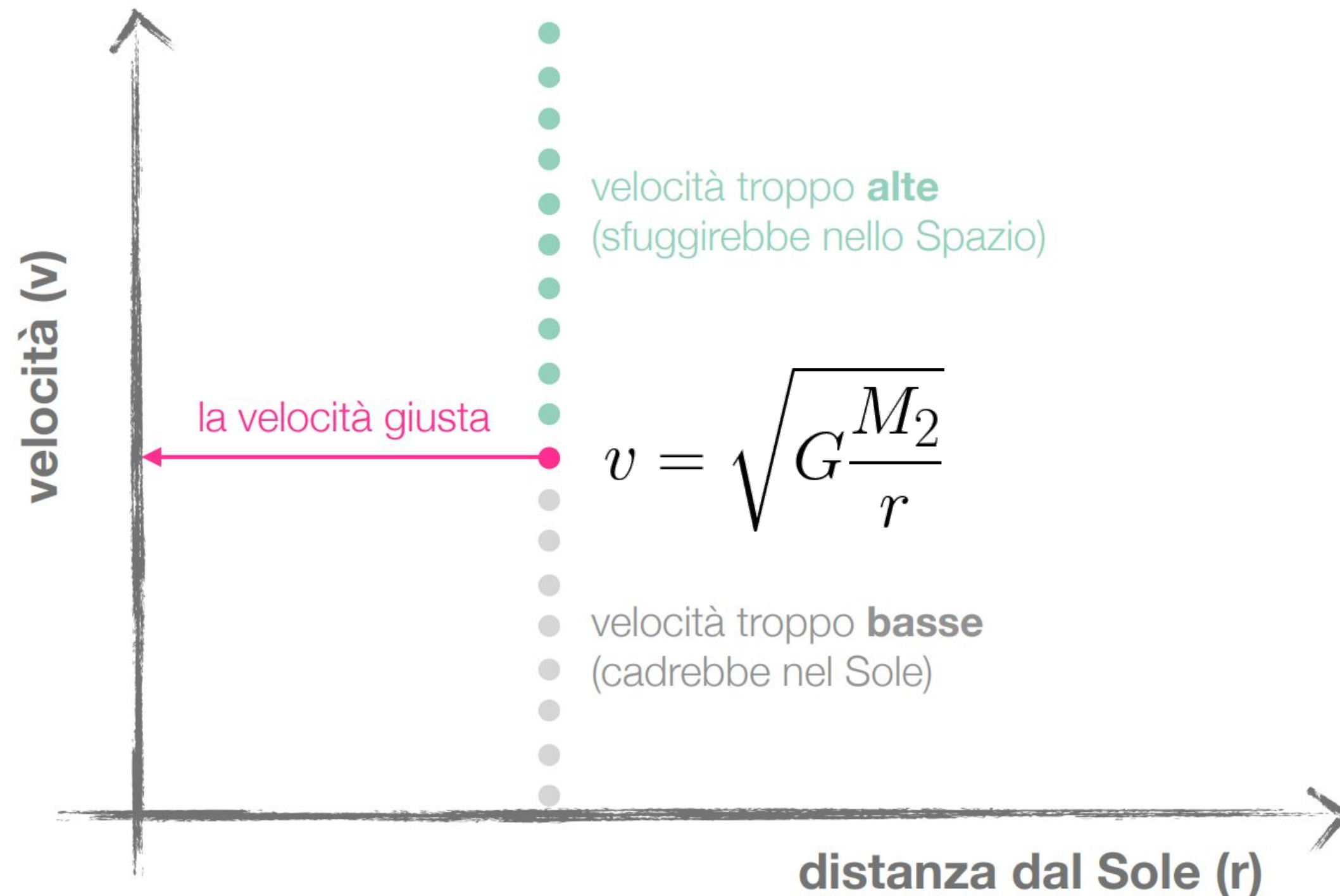
**r** è la distanza

**G** è una costante (non importa)



# Moto dei pianeti intorno al Sole

In un sistema rotante con velocità angolare costante la forza centrifuga ha uguale modulo (ma verso opposto) a quella centripeta.

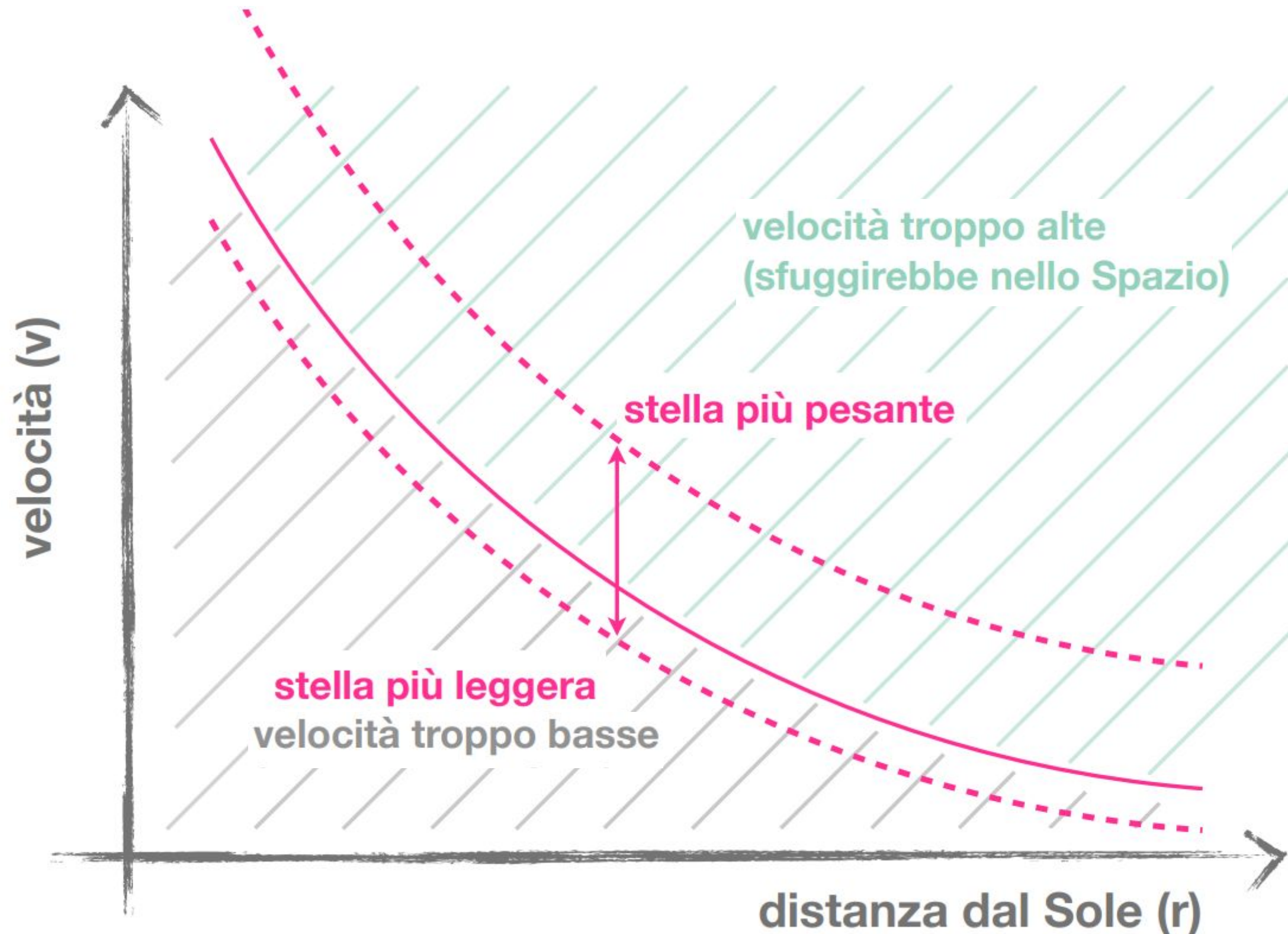


$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

$$F_2 = \frac{M_1 v^2}{r}$$

$$F = F_2$$

# Moto intorno a stella di massa $M_2$



- C'è una sola velocità giusta date  $M_2$  e  $r$
- Data una stella di massa  $M_2$  la velocità giusta ha questo andamento

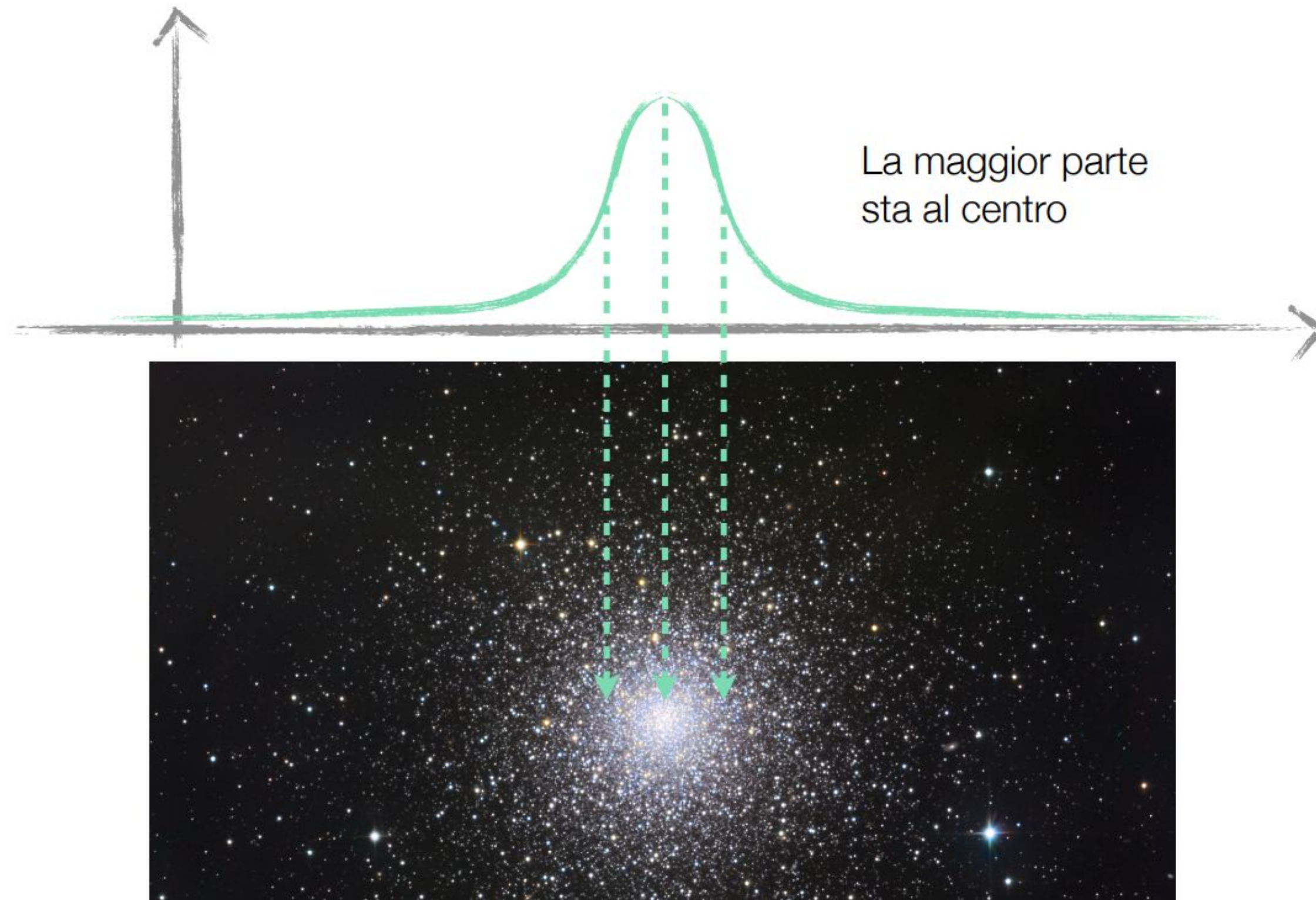
$$v = \sqrt{G \frac{M_2}{r}}$$

- Per stelle più pesanti o più leggere la curva si alza o si abbassa



# Moto delle stelle nelle galassie

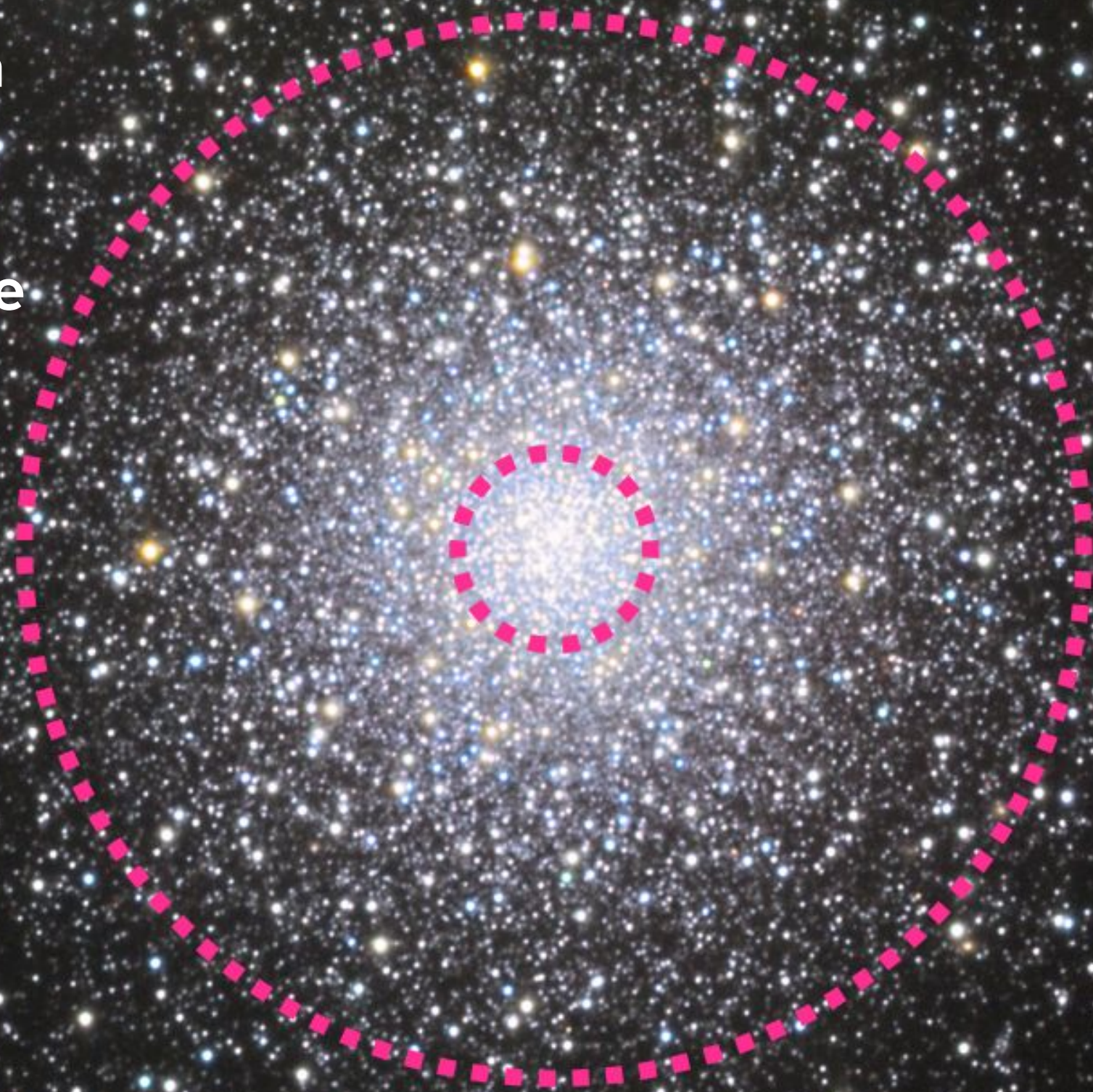
La massa non è puntiforme ma è distribuita in base alla densità di stelle,



# Moto delle stelle nelle galassie

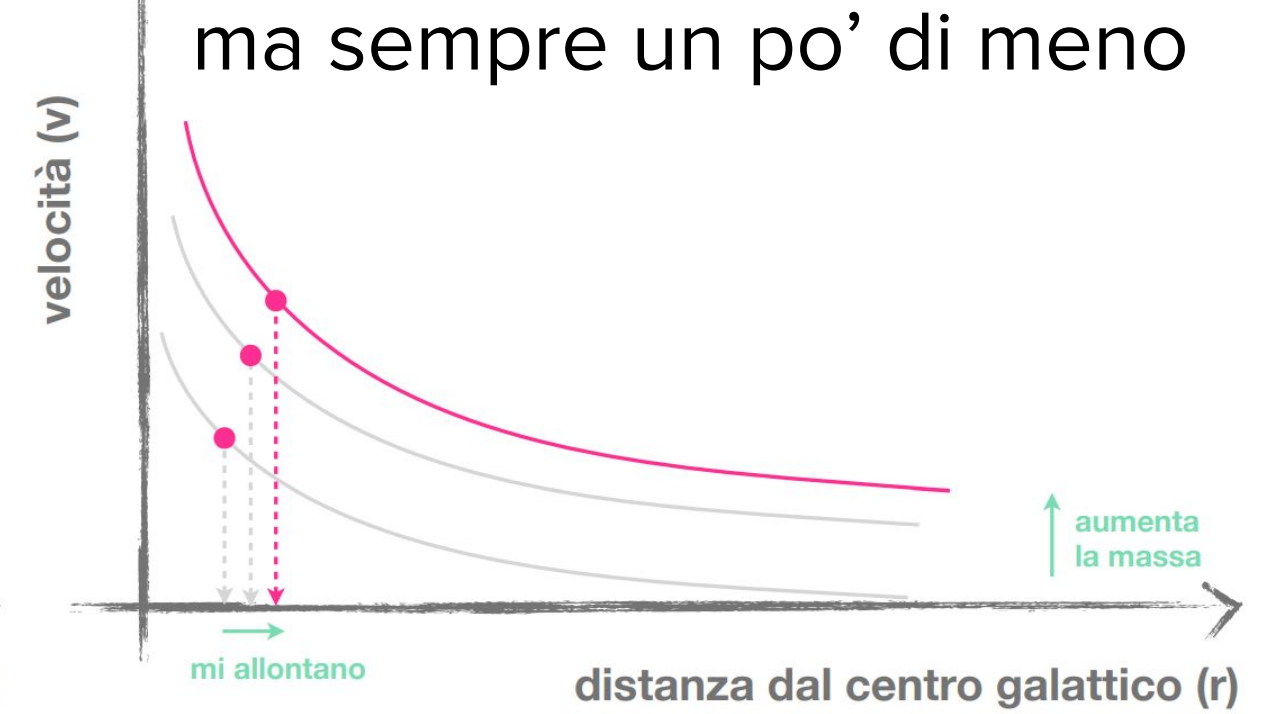
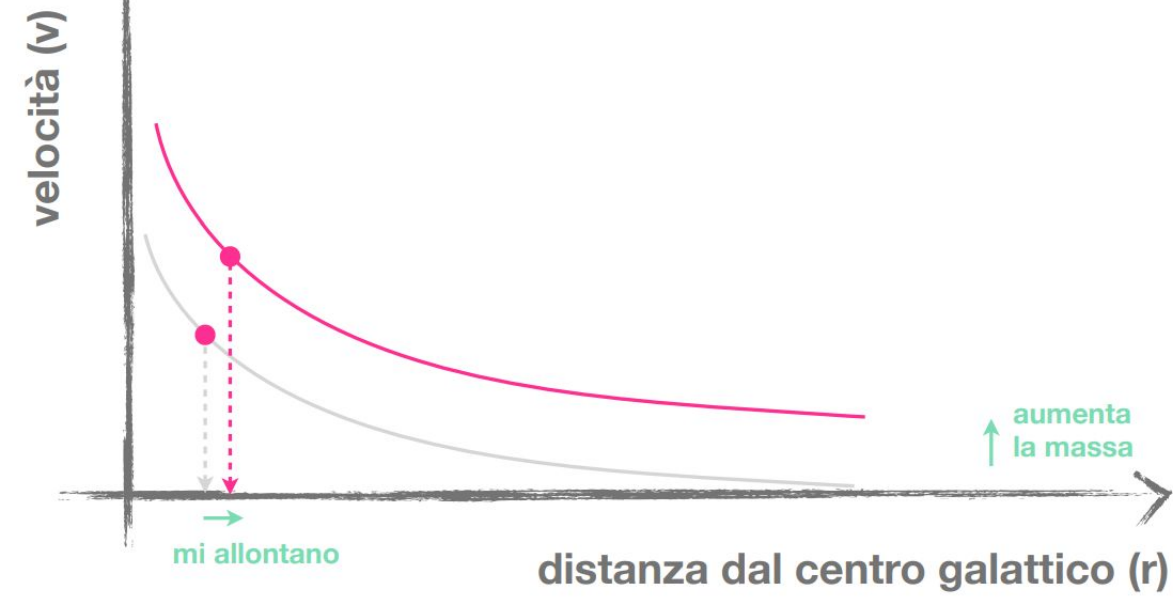
La massa all'interno dell'orbita dipende dalla distanza dal centro galattico

- più le stelle sono periferiche più è grande la massa che esercita attrazione gravitazionale
- la densità di stelle, gas, polveri, ecc... è maggiore nel centro

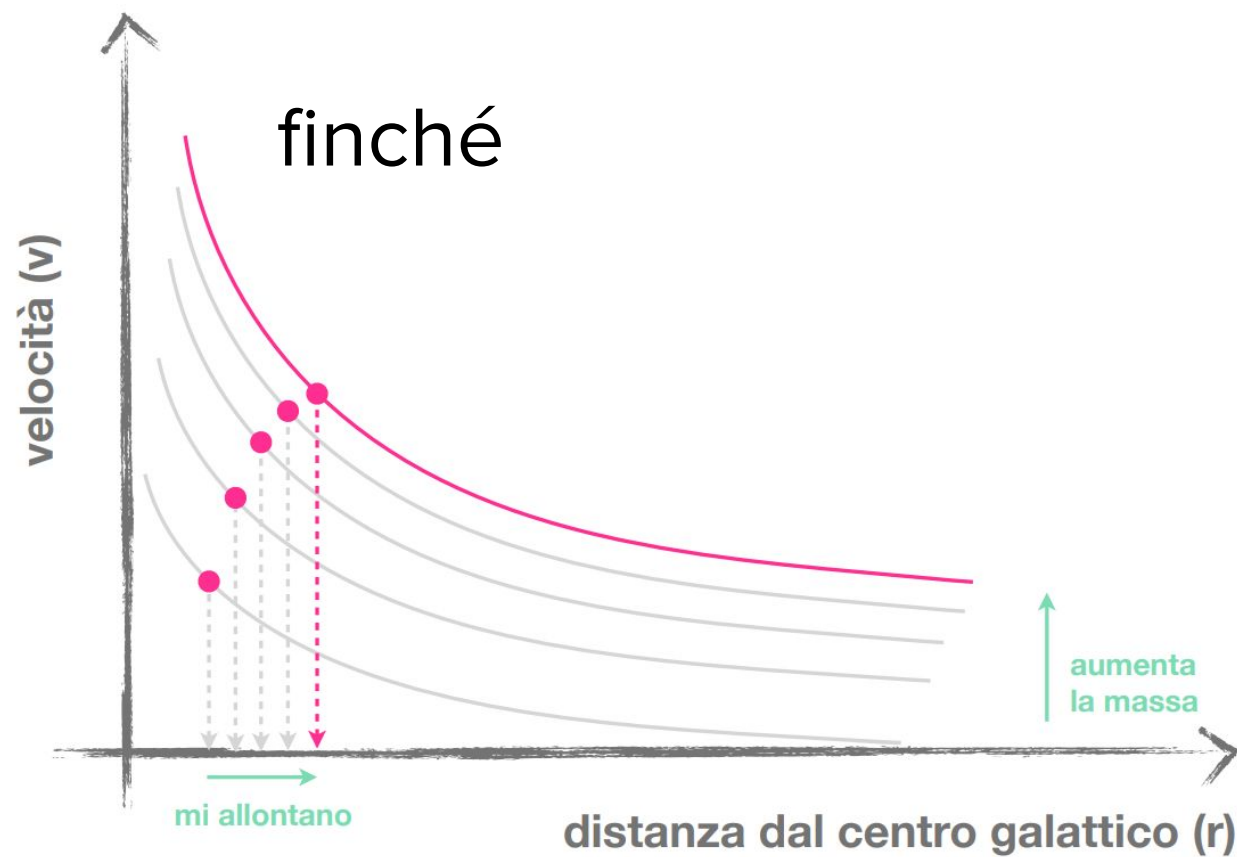


# All'aumentare della distanza

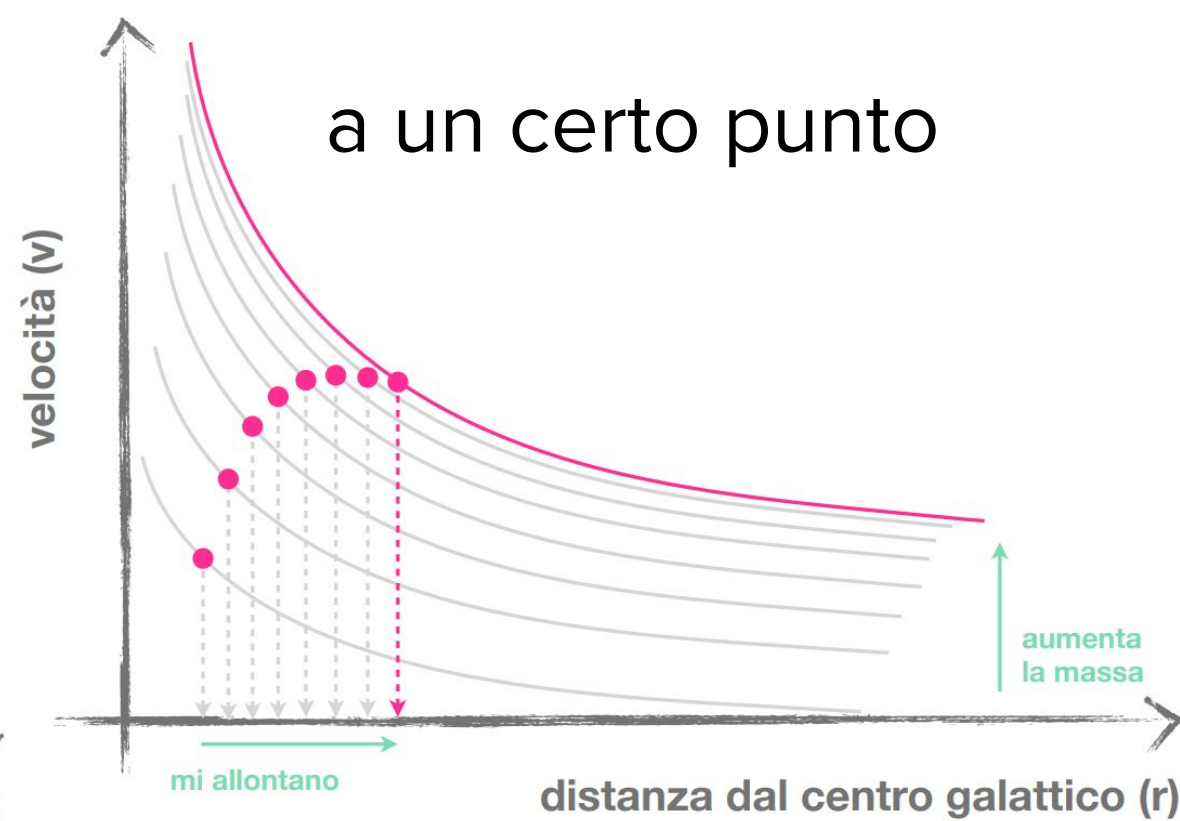
La massa aumenta...



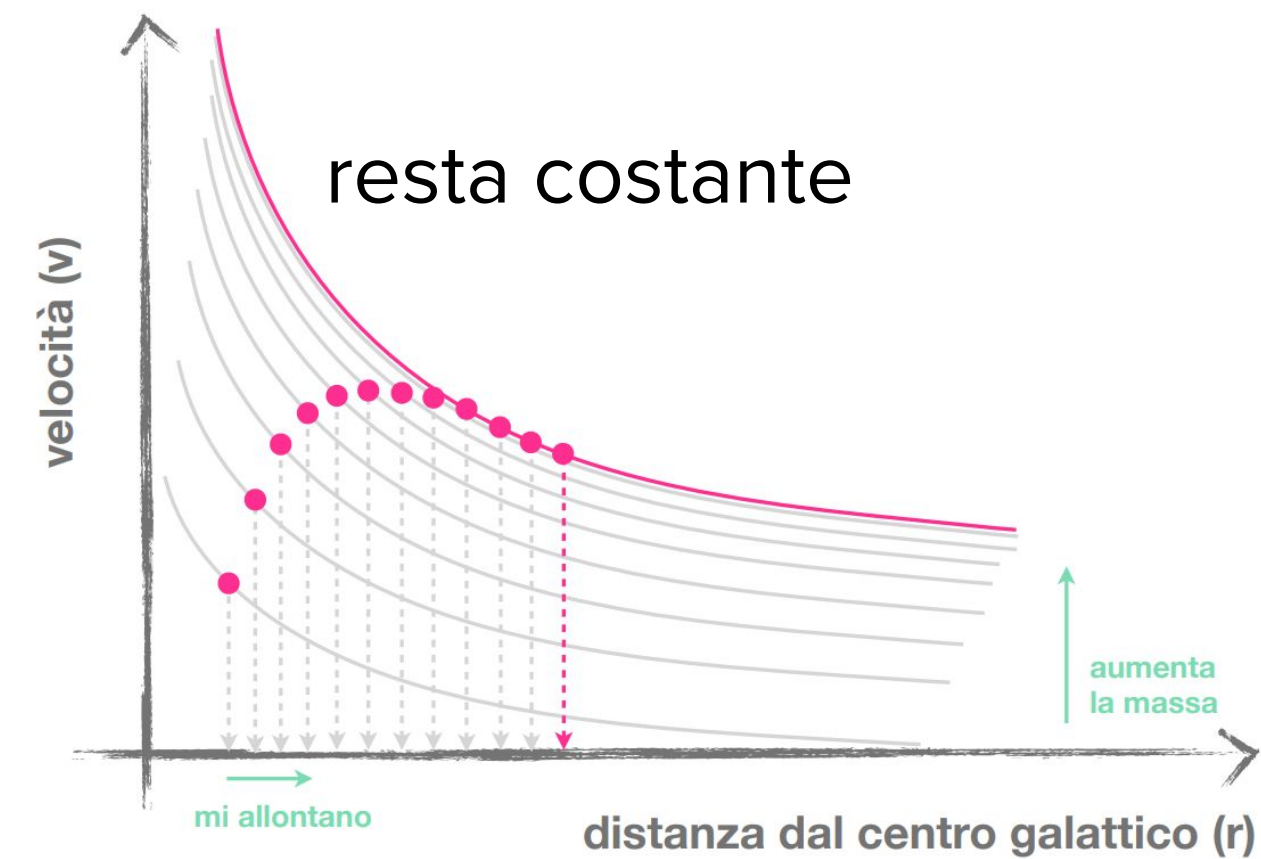
ma sempre un po' di meno



finché



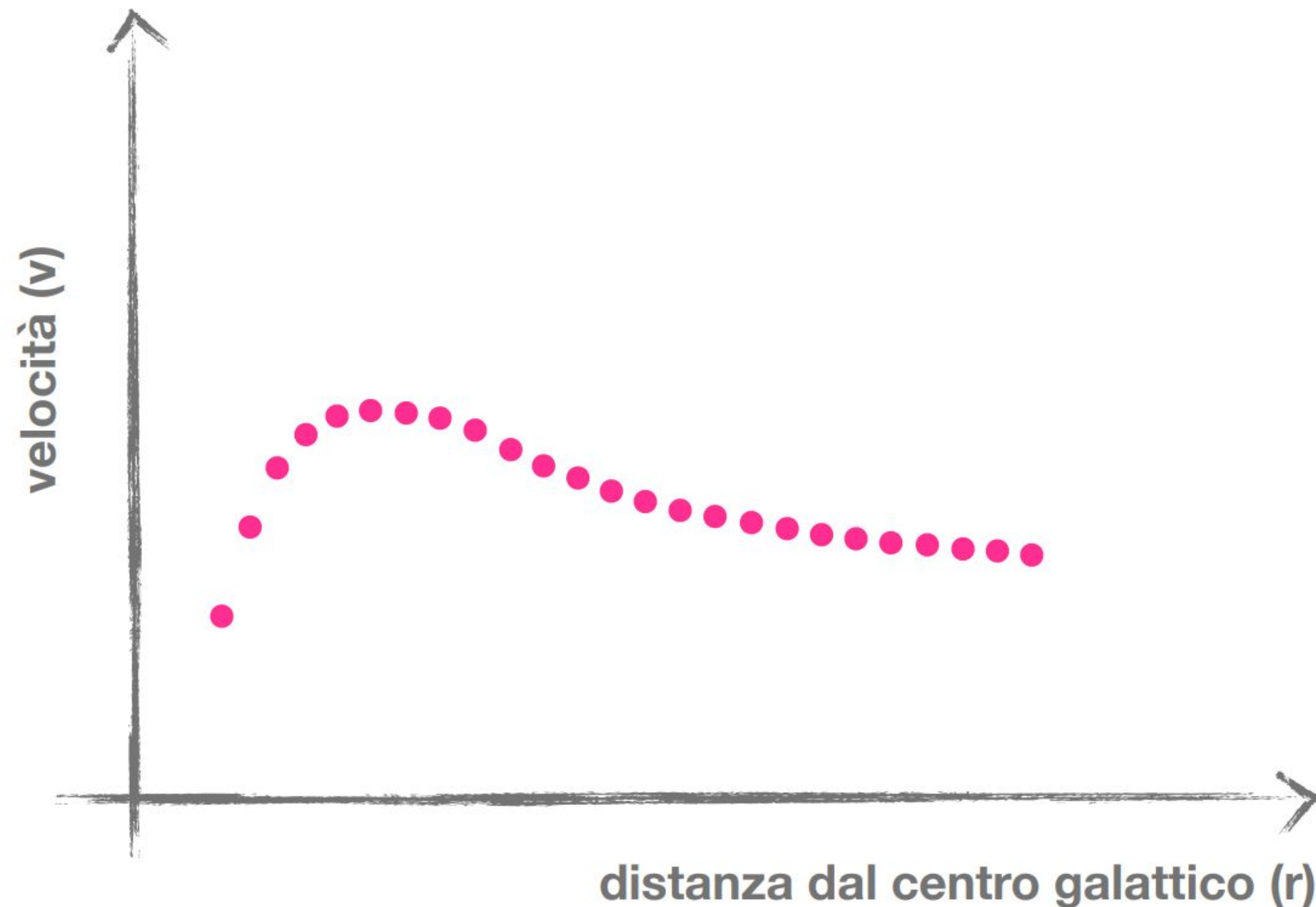
a un certo punto



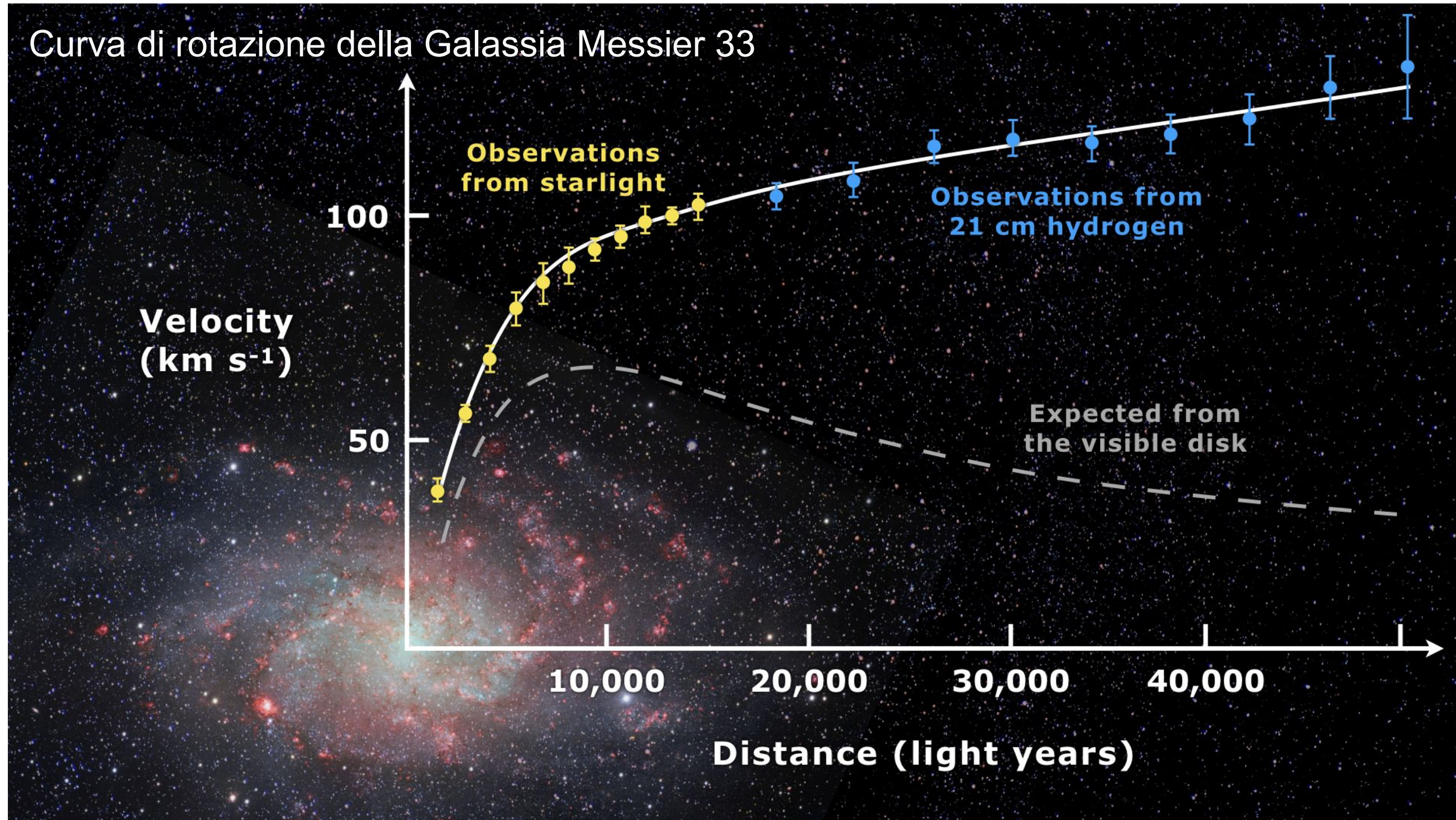
resta costante

# Cosa ci aspettiamo

Ai bordi della galassia, quando la massa interna all'orbita non cresce più al crescere di  $r$ , la distribuzione di velocità delle galassie prende l'andamento discendente che abbiamo visto per il moto dei pianeti



# Cosa osserviamo

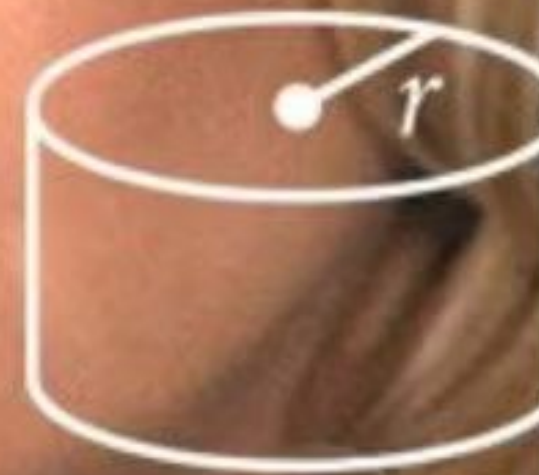
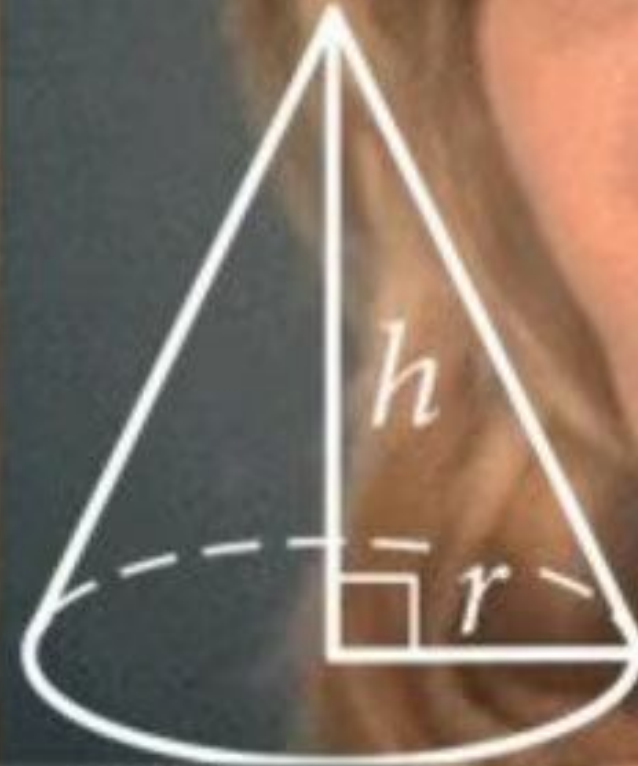




$$A = \pi r^2$$

$$C = 2\pi r$$

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h$$



$$V = \pi r^2 h$$

	30°	45°	60°
sin	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
cos	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$
tan	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$



$$\int \sin x dx = -\cos x + C$$

$$\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \tan x + C$$

$$\int \tan x dx = -\ln|\cos x| + C$$

$$\int \frac{dx}{\sin x} = \ln\left|\tan \frac{x}{2}\right| + C$$

$$\int \frac{dx}{a^2 + x^2} = \frac{1}{a} \arctg \frac{x}{a} + C$$

$$\int \frac{dx}{x^2 - a^2} = \frac{1}{2a} \ln\left|\frac{x-a}{x+a}\right| + C$$



$$ax^2 + bx + c = 0$$

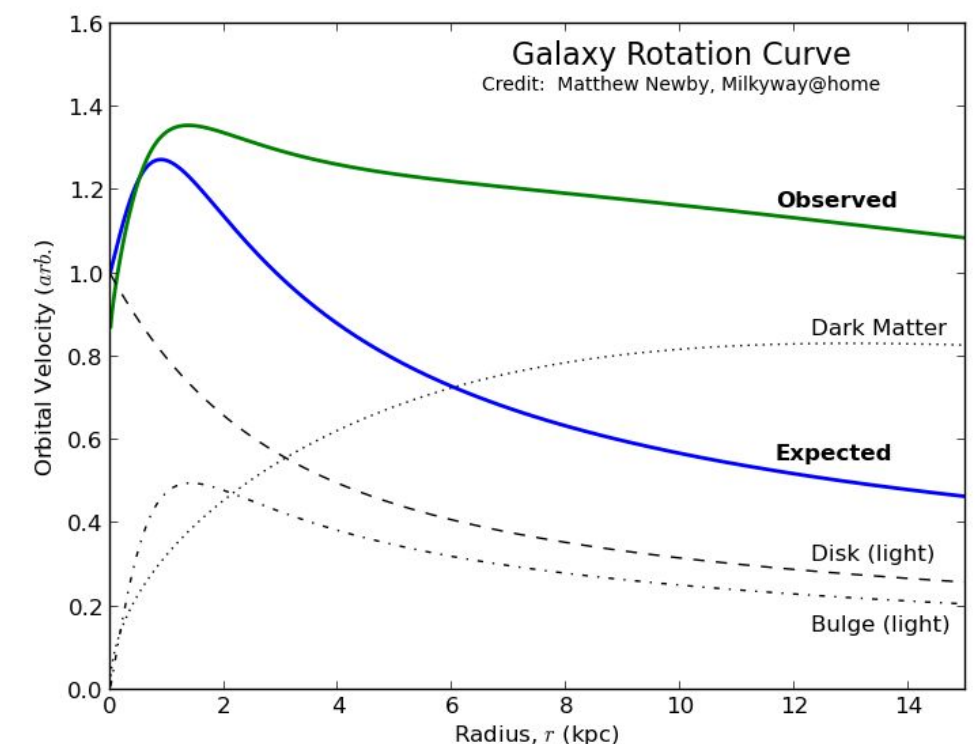
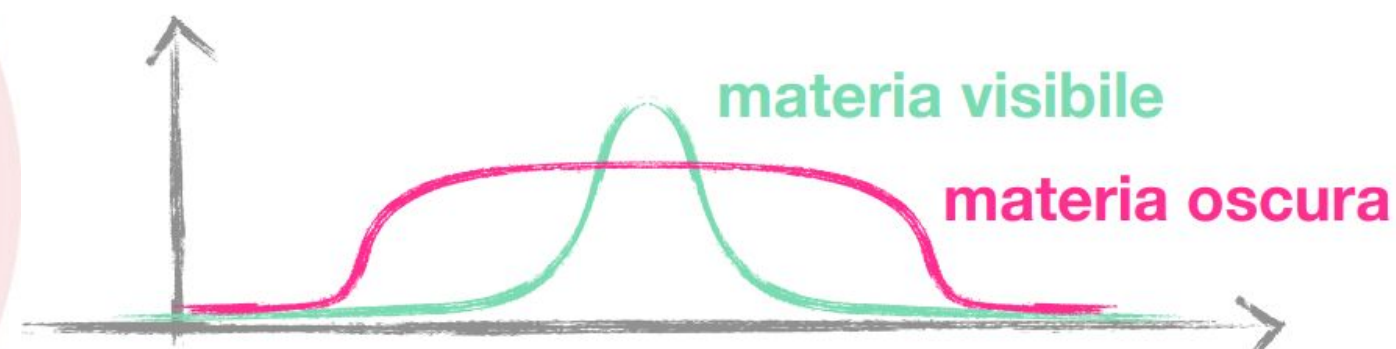
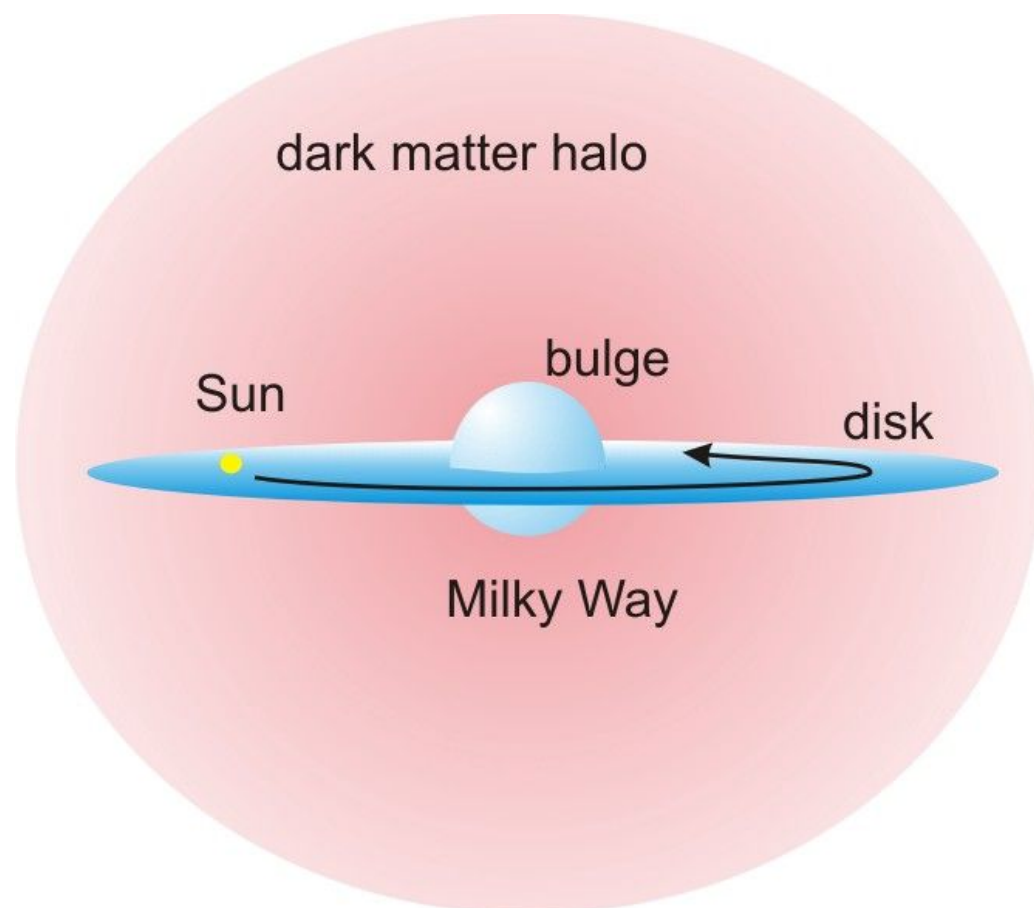
$$a\left(x^2 + \frac{b}{a}x + \frac{c}{a}\right) = 0$$

$$x^2 + 2\frac{b}{2a}x + \left(\frac{b}{2a}\right)^2 - \left(\frac{b}{2a}\right)^2 + \frac{c}{a} - \left(\frac{b}{2a}\right)^2 = 0$$

$$\left(x + \frac{b}{2a}\right)^2 - \frac{b^2 - 4ac}{4a^2} = 0$$

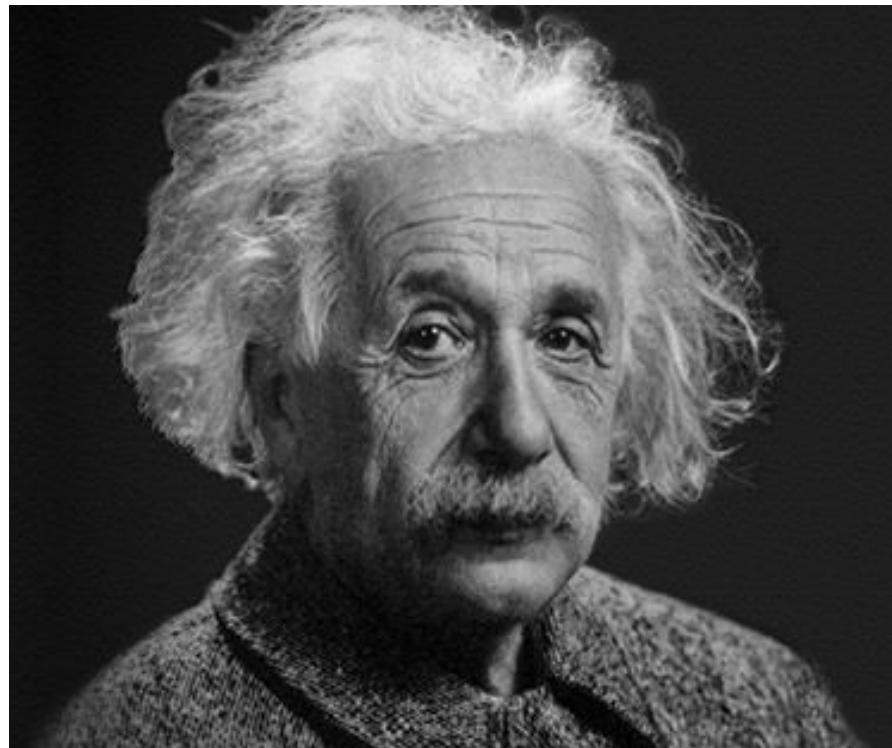
# Qualcosa non torna

- La velocità misurata nelle stelle periferiche è troppo grande!  
Perché rimangono a ruotare intorno al centro e non schizzano fuori dalla galassia?
- Questo è esattamente il motivo per cui nel 1933 l'astronomo svizzero Zwicky teorizzò l'esistenza della Materia Oscura (in realtà lo osservò dalle galassie nel Coma Cluster, ma il ragionamento è del tutto analogo)
- Infatti se ci fosse un "alone" di materia oscura intorno alla galassia visibile, tutto tornerebbe



# La gravità dopo Einstein

Relatività generale (1915): la gravità è una **curvatura dello spazio-tempo**



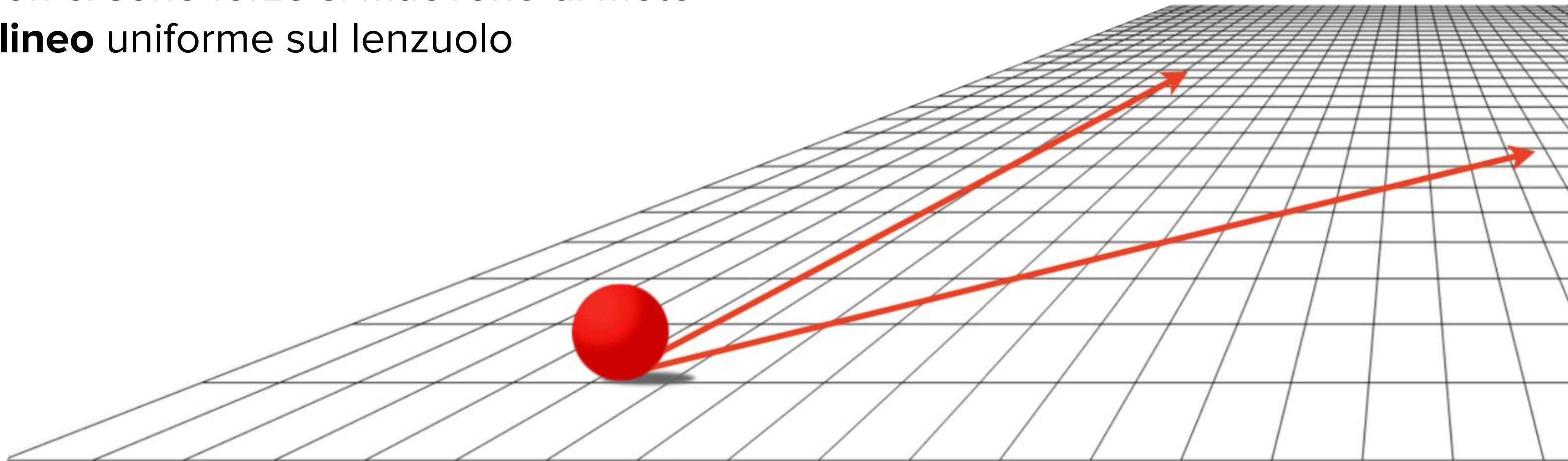
Facciamo un esempio in 2 dimensioni: lo spazio è un piano infinito, come un grosso lenzuolo teso





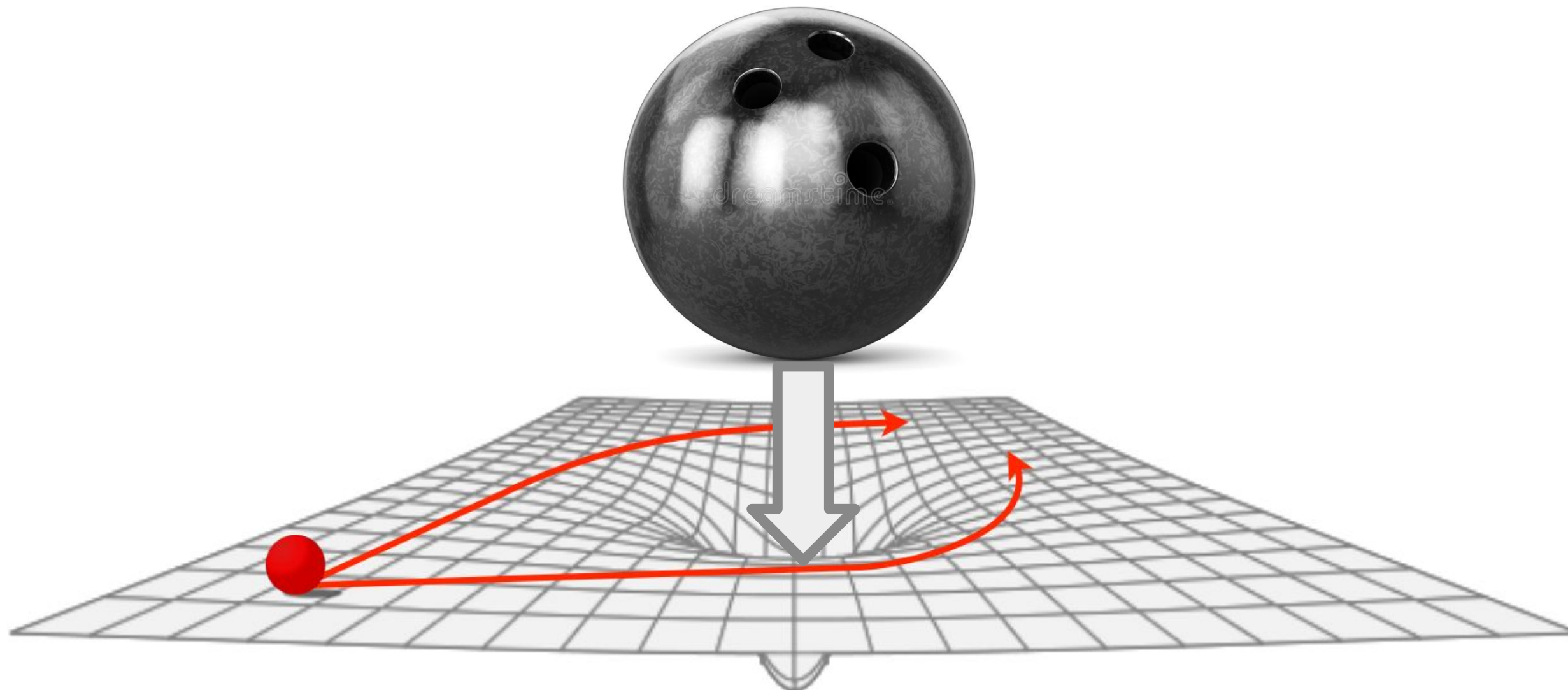
# Lo spazio-tempo piatto

- Gli oggetti si muovono su questo lenzuolo
- Se non ci sono forze si muovono di moto **rettilineo** uniforme sul lenzuolo



# Lo spazio-tempo curvo

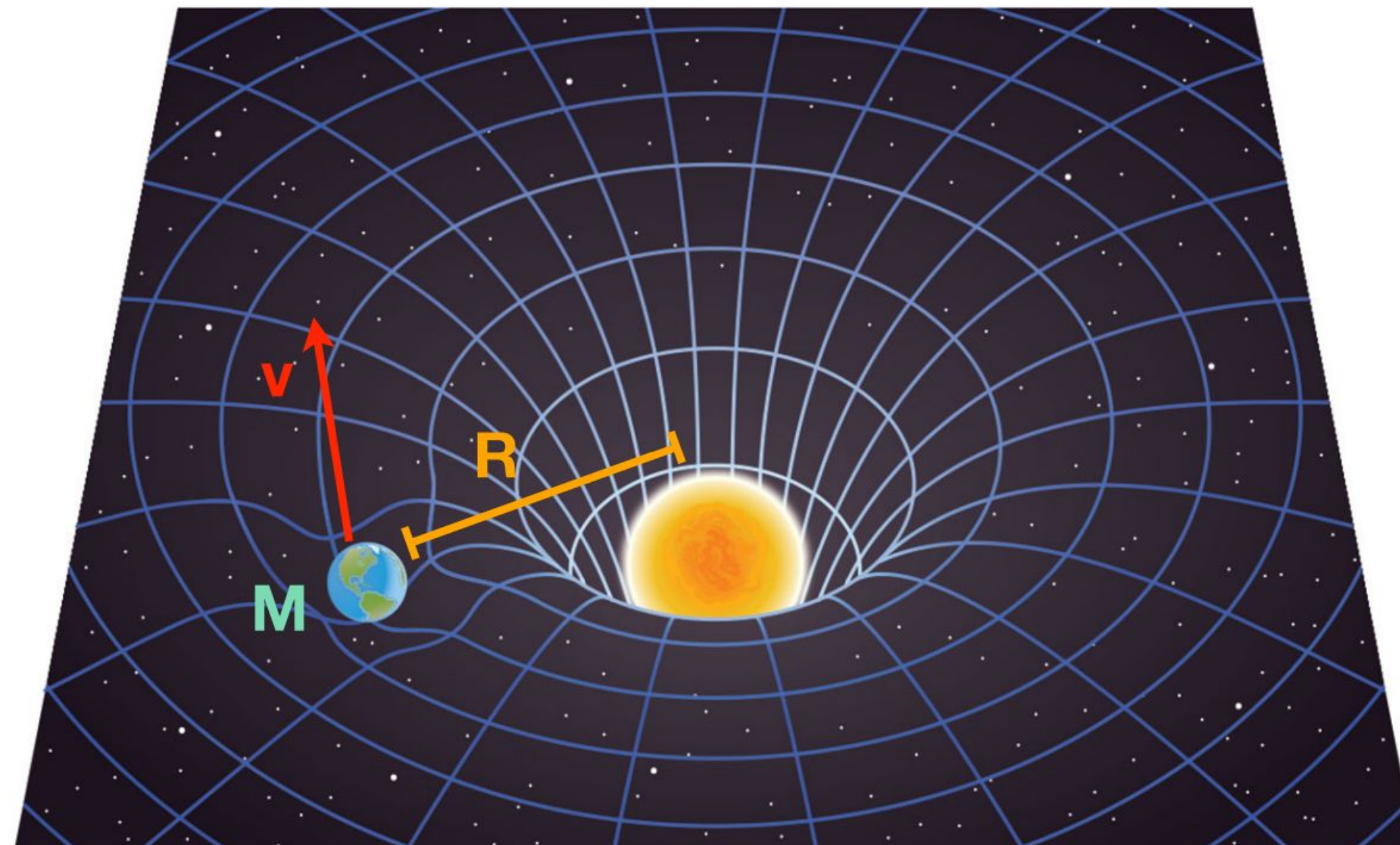
- Ma che succede quando mettiamo una grande massa al centro di questo spazio-lenzuolo?  
 → il lenzuolo si curva e la traiettoria della pallina rossa segue traiettorie rettilinee, ma in uno spazio curvo!



# Il moto dei corpi

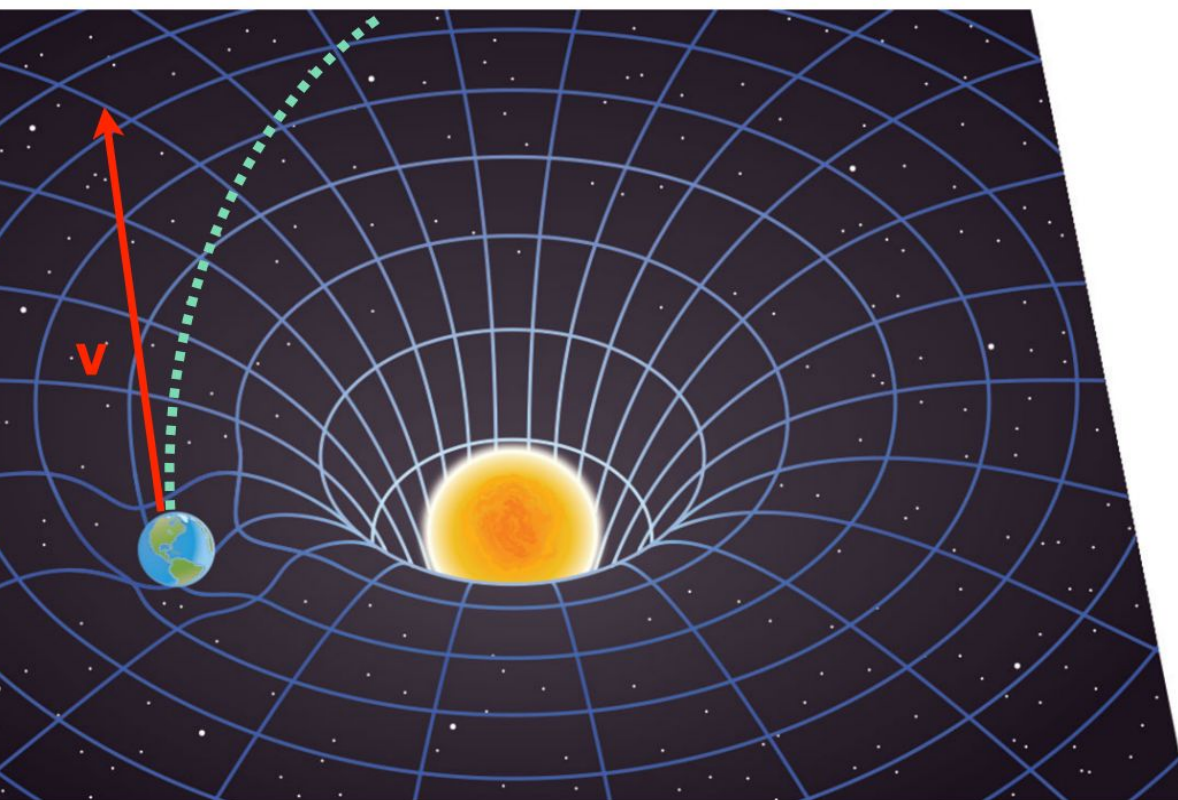
Tornando alla rotazione dei pianeti intorno al Sole

→ quanto detto prima per la teoria classica è sempre valido, ma questo è uno schema di quello che succede: è lo spazio intorno al Sole ad essere curvo!

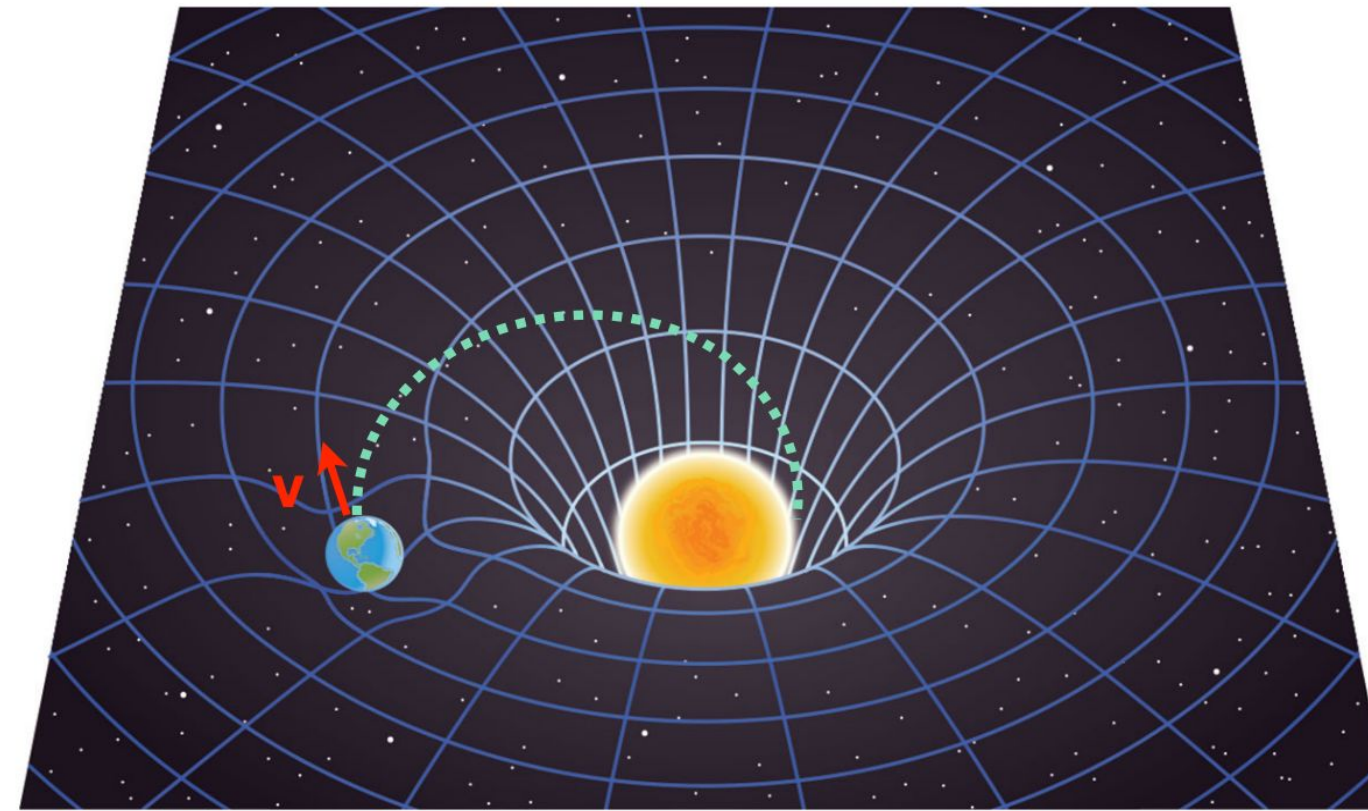


# Il moto dei corpi

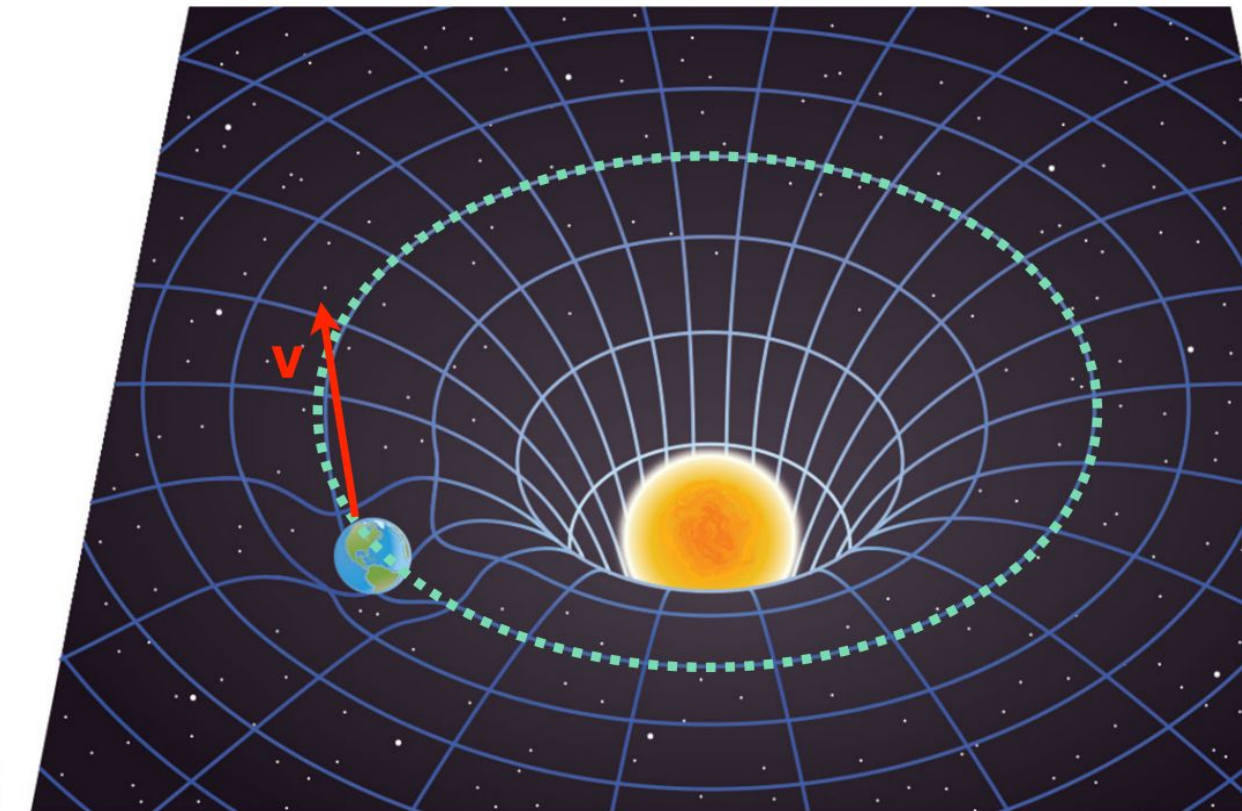
Se la velocità è troppo elevata la Terra esce dall'orbita



Se è troppo bassa cade nel Sole



C'è una velocità giusta, che è la stessa calcolata per il caso classico



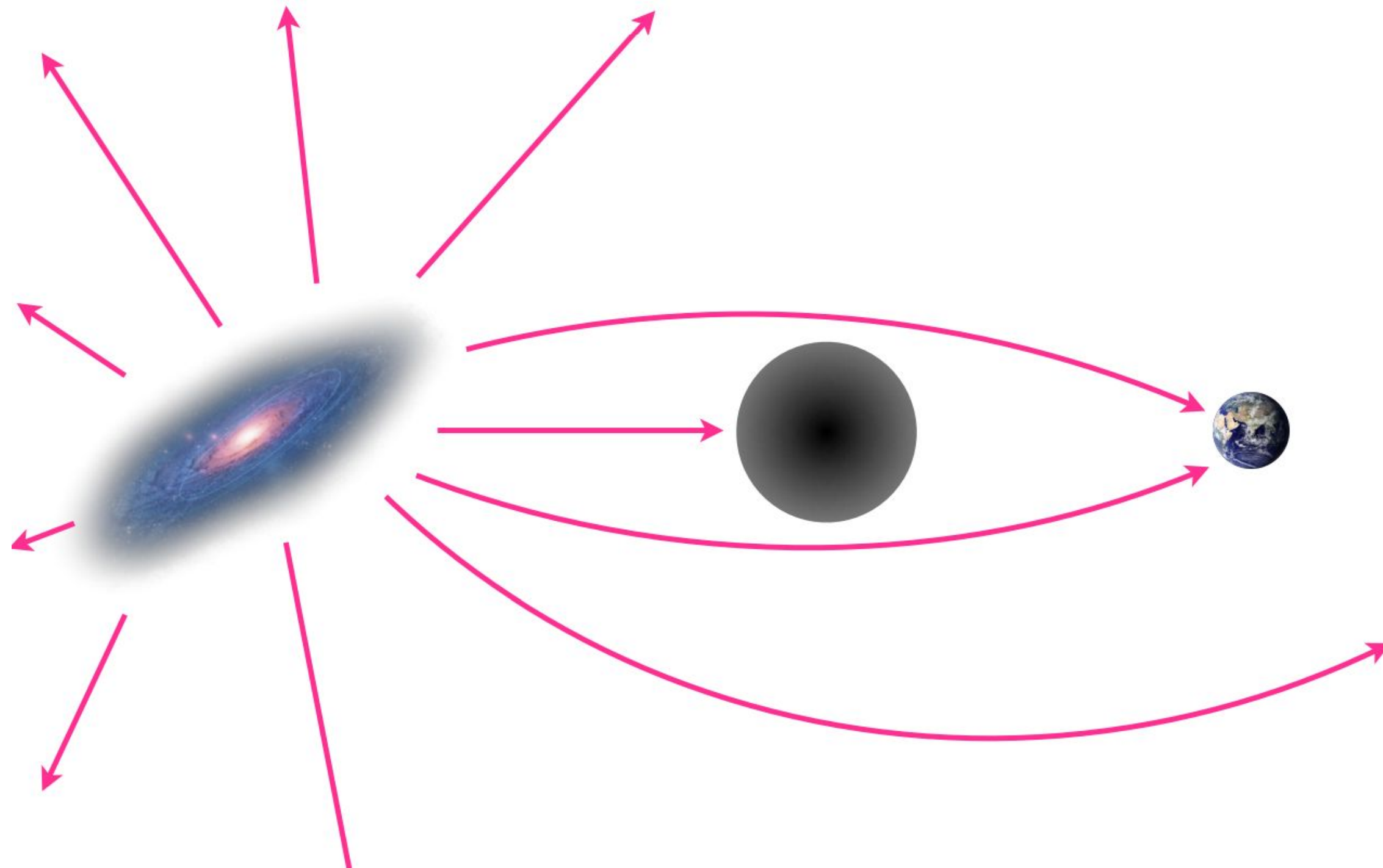
# La luce nello spazio-tempo curvo

- C'è un'altra prova dell'esistenza della materia oscura, questa del tutto legata alla relatività di Einstein
  - non prevista (né spiegabile) in ambito classico
- Una delle conseguenze della Relatività Generale di Einstein è che anche la luce si muove nello spazio-tempo curvo, e quindi segue traiettorie curve!
  - per vedere una galassia la luce deve viaggiare nello spazio e raggiungere il nostro telescopio



# La luce nello spazio-tempo curvo

- Se tra la sorgente luminosa e la Terra c'è una grande massa, allora lo spazio-tempo si curva e anche la luce segue delle traiettorie curve



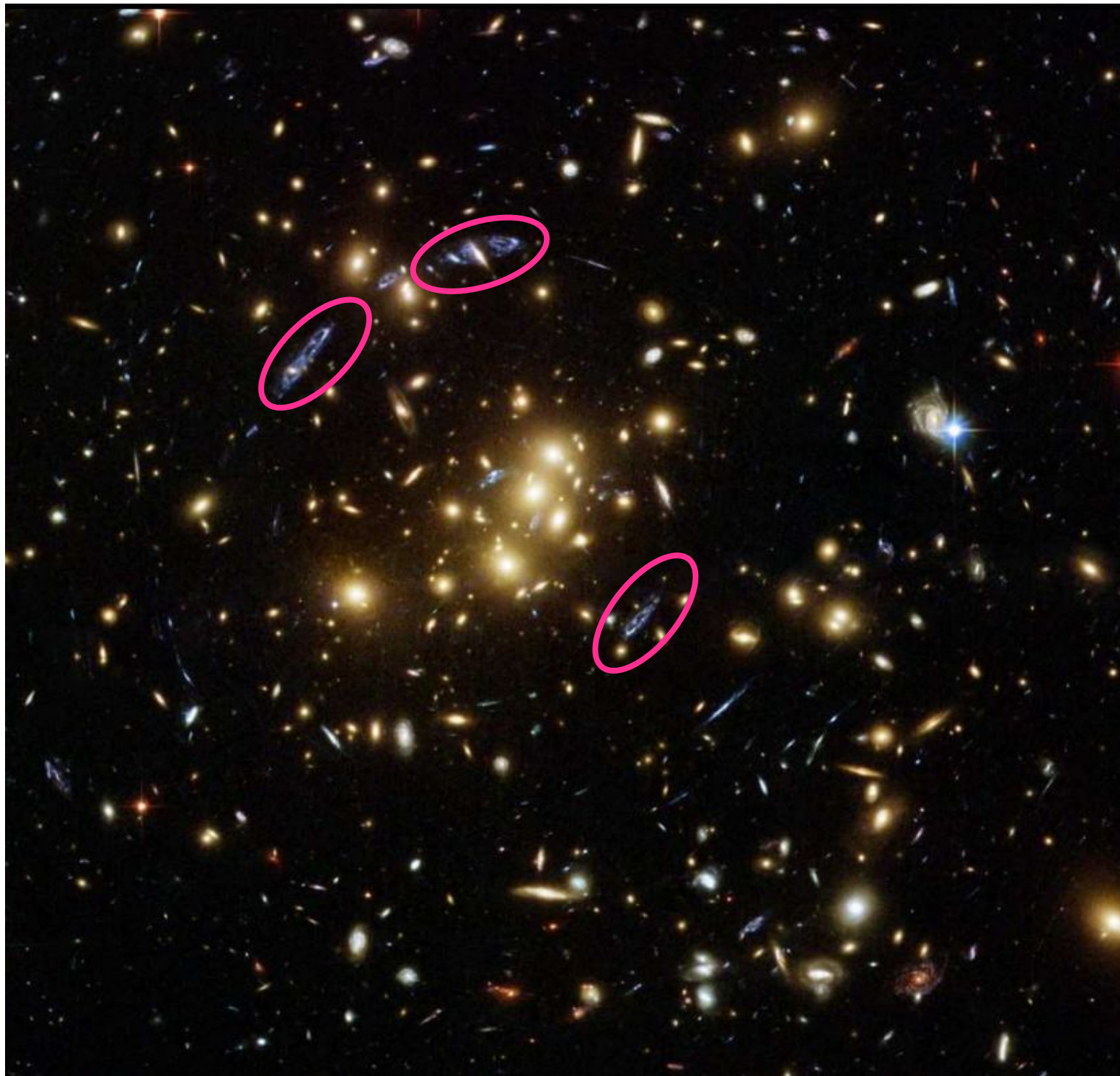
# Le lenti gravitazionali

- Questo effetto ottico, simile alle distorsioni delle lenti, si chiama **lente gravitazionale**



# Lenti gravitazionali nelle foto

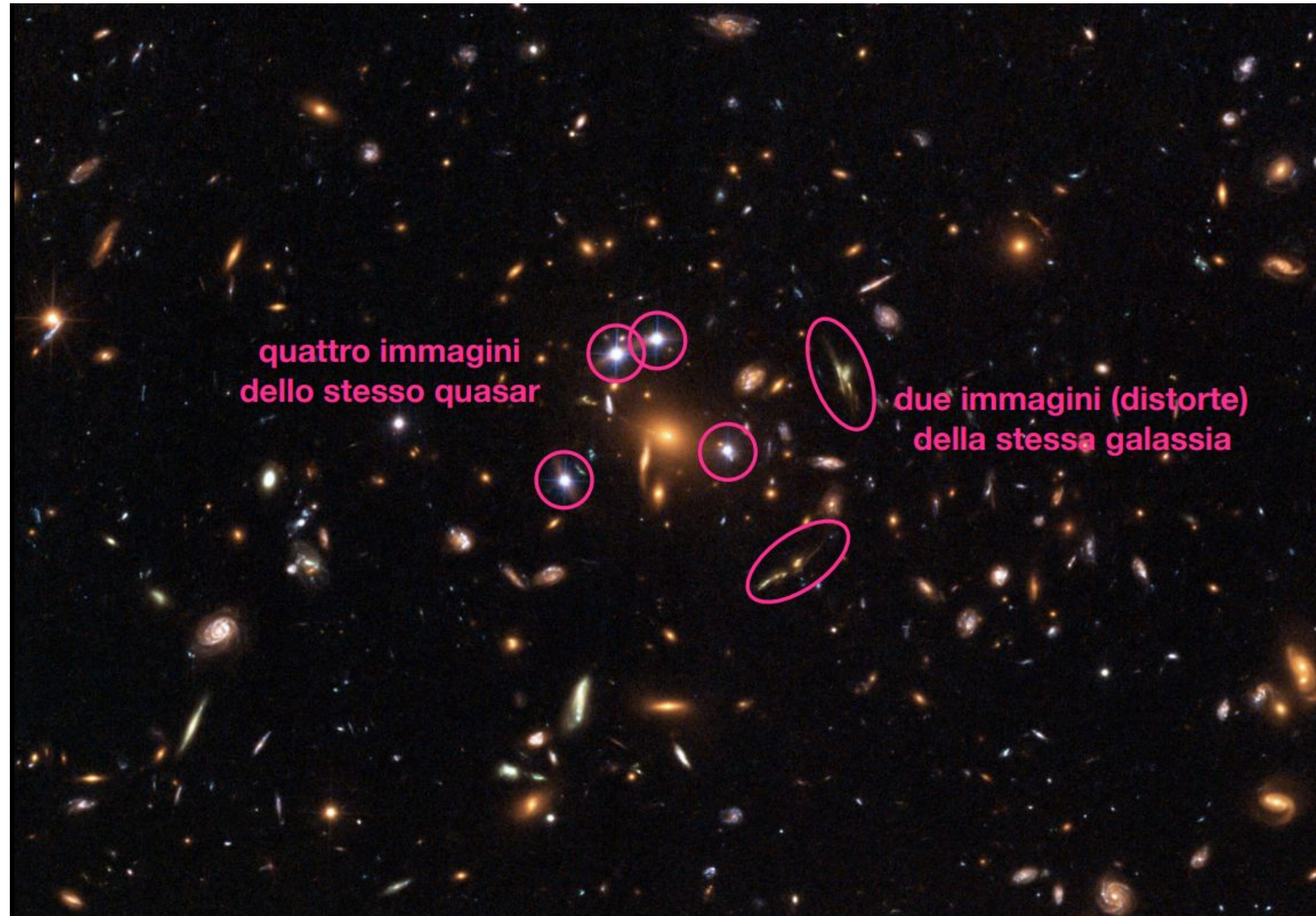
- Guardiamo un'immagine vera



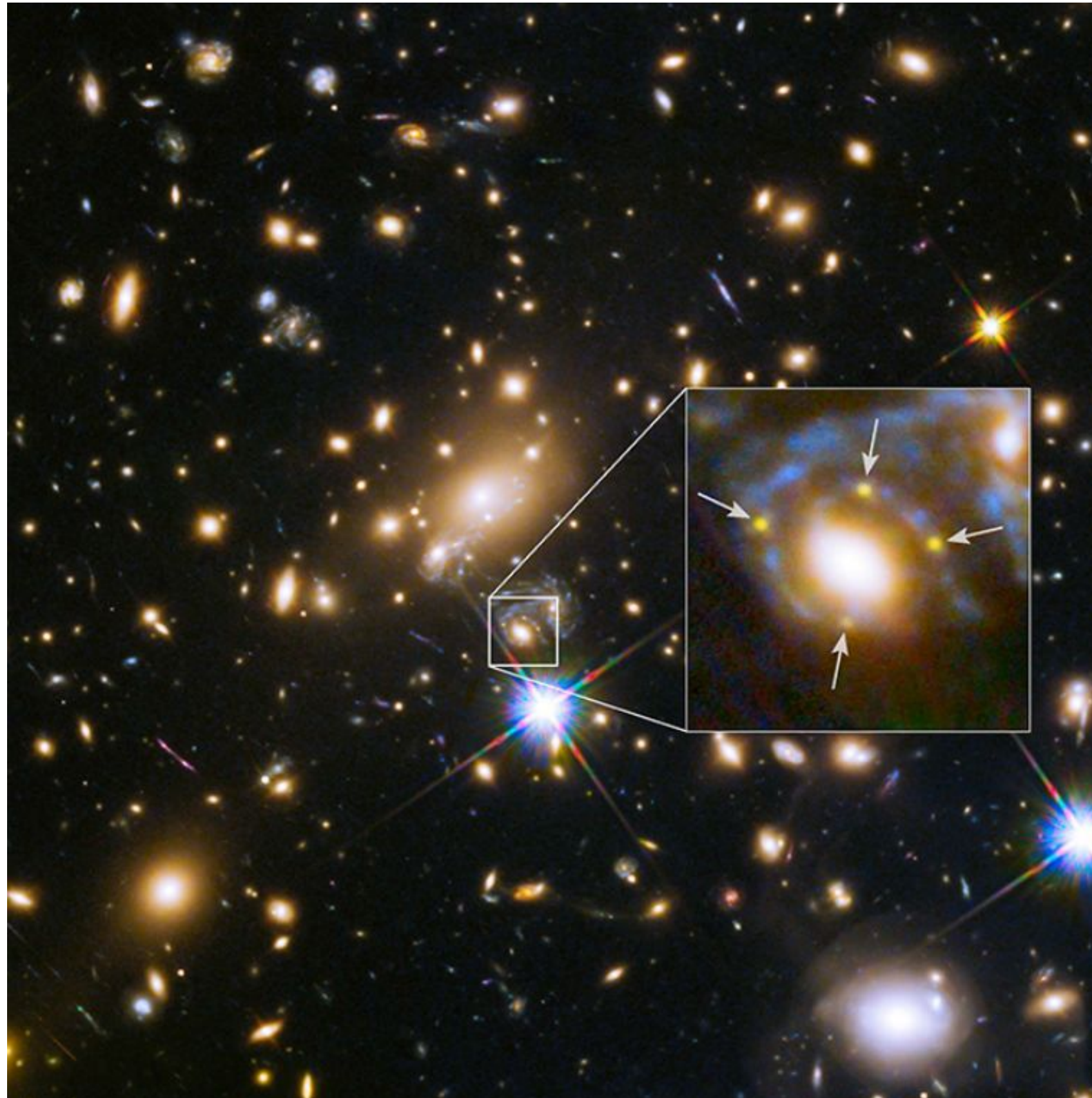
- I punti luminosi gialli fanno parte di un ammasso di galassie
- Le galassie a spirale azzurre sono oggetti molto più lontani e appaiono replicate
- Al centro dell'ammasso c'è una grande massa dovuta alla materia oscura



# Lenti gravitazionali nelle foto



# Lenti gravitazionali nelle foto



- Qui addirittura si vedono 4 immagini ripetute della stessa supernova intorno a una galassia lontana
- Era stata predetta una quinta immagine che poi è stata osservata nel 2015

# La Materia Oscura può essere una di queste?

## Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
		I	II	III	I	II	III		
mass		$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>ū</b> antiup	<b>c̄</b> anticharm	<b>t̄</b> antitop	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>QUARKS</b>	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>d̄</b> antidown	<b>s̄</b> antistrange	<b>b̄</b> antibottom	<b>γ</b> photon	
		<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>e<sup>+</sup></b> positron	<b>μ̄</b> antimuon	<b>τ̄</b> antitau	<b>Z</b> Z <sup>0</sup> boson	
	<b>LEPTONS</b>	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>ν̄<sub>e</sub></b> electron antineutrino	<b>ν̄<sub>μ</sub></b> muon antineutrino	<b>ν̄<sub>τ</sub></b> tau antineutrino	<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson	<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	1	1	1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>Z</b> Z <sup>0</sup> boson							
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	1	1	1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson							
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	1	1	1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson							
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	1	1	1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson							
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	1	1	1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson							
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	1	1	1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson							

GAUGE BOSONS  
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

# La Materia Oscura può essere una di queste?

## Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
	I	II	III	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\bar{u}</math></b> antiup	<b><math>\bar{c}</math></b> anticharm	<b><math>\bar{t}</math></b> antitop	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\bar{d}</math></b> antidown	<b><math>\bar{s}</math></b> antistrange	<b><math>\bar{b}</math></b> antibottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b><math>e^+</math></b> positron	<b><math>\bar{\mu}</math></b> antimuon	<b><math>\bar{\tau}</math></b> antitau	<b>Z</b> Z <sup>0</sup> boson	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b><math>\bar{\nu}_e</math></b> electron antineutrino	<b><math>\bar{\nu}_\mu</math></b> muon antineutrino	<b><math>\bar{\nu}_\tau</math></b> tau antineutrino	<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson	<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson

**QUARKS** (rows 1-3)  
**LEPTONS** (rows 4-6)  
**GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS** (rows 7-8)  
**SCALAR BOSONS** (row 9)

Prima di tutto escludiamo le particelle cariche e i fotoni: tutte le particelle cariche sono soggette a forza elettromagnetica e interagiscono con i fotoni (=luce)

Per definizione la Materia Oscura si chiama così perché non emette né riflette luce

# La Materia Oscura può essere una di queste?

## Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
	I	II	III	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\bar{u}</math></b> antiup	<b><math>\bar{c}</math></b> anticharm	<b><math>\bar{t}</math></b> antitop	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\bar{d}</math></b> antidown	<b><math>\bar{s}</math></b> antistrange	<b><math>\bar{b}</math></b> antibottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b><math>e^+</math></b> positron	<b><math>\bar{\mu}</math></b> antimuon	<b><math>\bar{\tau}</math></b> antitau	<b>Z</b> Z <sup>0</sup> boson	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b><math>\bar{\nu}_e</math></b> electron antineutrino	<b><math>\bar{\nu}_\mu</math></b> muon antineutrino	<b><math>\bar{\nu}_\tau</math></b> tau antineutrino	<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson	<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson

Escludiamo i gluoni che sono portatori delle interazioni forti. Interazioni forti → alta probabilità di interagire con la materia “comune” e essere osservate.

Ma la Materia Oscura è una specie di “fantasma” che c’è ma non si vede e non interagisce

Tra l’altro i gluoni non hanno massa, mentre la materia oscura deve avere massa!

# La Materia Oscura può essere una di queste?

## Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
	I	II	III	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\bar{u}</math></b> antiup	<b><math>\bar{c}</math></b> anticharm	<b><math>\bar{t}</math></b> antitop	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\bar{d}</math></b> antidown	<b><math>\bar{s}</math></b> antistrange	<b><math>\bar{b}</math></b> antibottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b><math>e^+</math></b> positron	<b><math>\bar{\mu}</math></b> antimuon	<b><math>\bar{\tau}</math></b> antitau	<b>Z</b> Z boson	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b><math>\bar{\nu}_e</math></b> electron antineutrino	<b><math>\bar{\nu}_\mu</math></b> muon antineutrino	<b><math>\bar{\nu}_\tau</math></b> tau antineutrino	<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson	<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson

Escludiamo poi le particelle instabili, ovvero quelle particelle che hanno tempi di decadimento molto brevi (frazioni piccolissime di secondo).  
Ma la Materia Oscura è ancora oggi tantissima nell'universo!

Resterebbero i neutrini...

# La Materia Oscura può essere una di queste?

## Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)		
	I	II	III	I	II	III			
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0	0
	u up	c charm	t top	$\bar{u}$ antiup	$\bar{c}$ anticharm	$\bar{t}$ antitop	g gluon	H Higgs	
	d down	s strange	b bottom	$\bar{d}$ antidown	$\bar{s}$ antistrange	$\bar{b}$ antibottom	$\gamma$ photon		
	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$e^+$ positron	$\bar{\mu}$ antimuon	$\bar{\tau}$ antitau	Z Z boson		
	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$\bar{\nu}_e$ electron antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$ muon antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$ tau antineutrino	W <sup>+</sup> W <sup>+</sup> boson	W <sup>-</sup> W <sup>-</sup> boson	

**QUARKS** (rows 1-3)  
**LEPTONS** (rows 4-6)  
**GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS** (rows 7-8)  
**SCALAR BOSONS** (row 9)

Neanche i neutrini possono spiegare la Materia Oscura, perché hanno masse troppo piccole e sono troppo “veloci”.

Questo è legato al nostro modello cosmologico e a come si sono formate le strutture (galassie, cluster, ecc) nell’universo

# Ecco perché un elefante nella stanza!

- La Materia Oscura ha massa (e pure tanta!)
- Il Modello Standard delle particelle elementari (MS) è un modello bellissimo che descrive alla perfezione le osservazioni sperimentali nell'infinitamente piccolo...
- ...ma nessuna delle particelle del MS può spiegare la Materia Oscura
- D'altra parte sappiamo che la Materia Oscura *deve* esserci!
- È il più grosso rompicapo della scienza moderna...





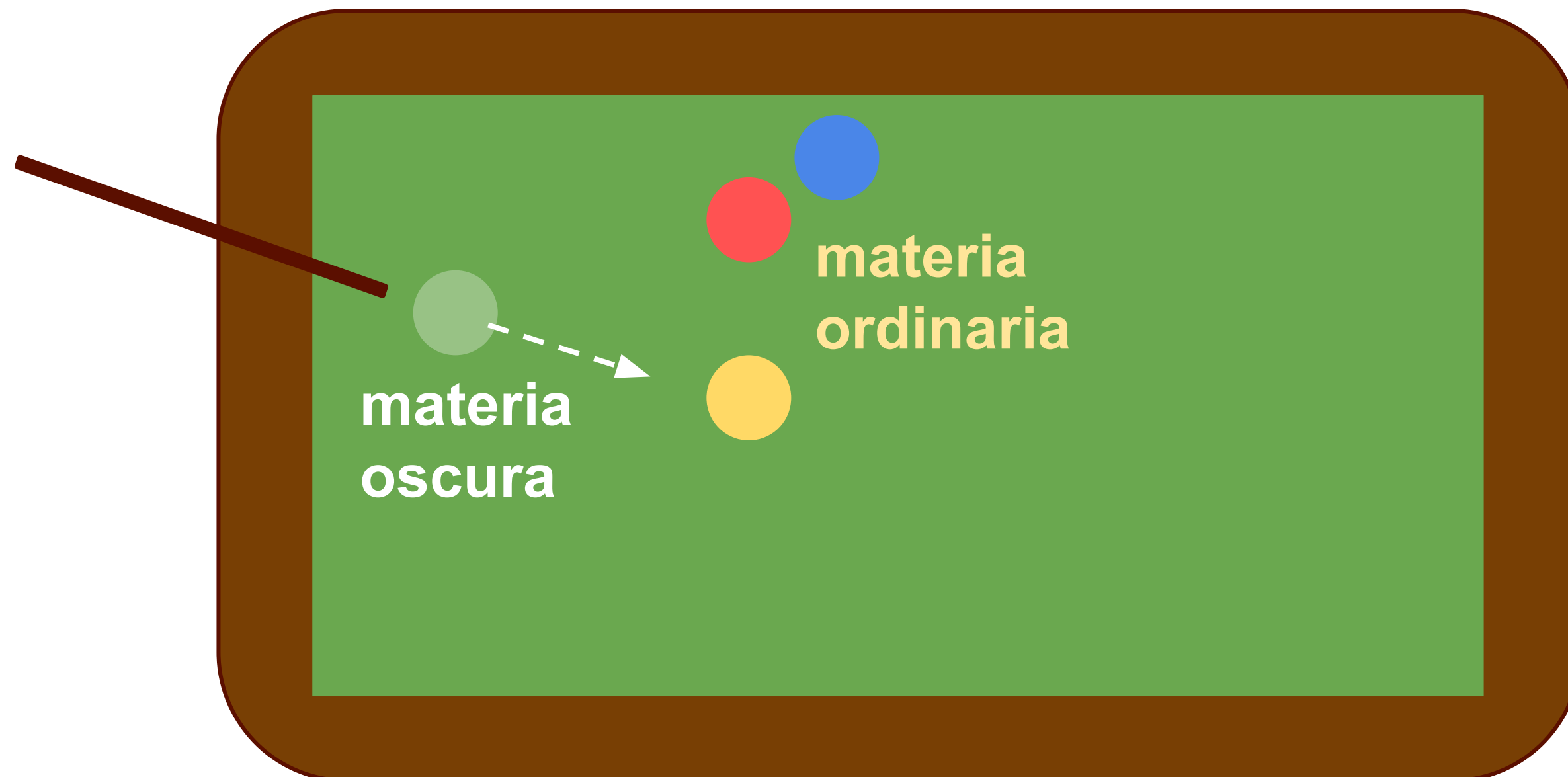
# Come vedere l'invisibile

- Le prove astronomiche sono molto convincenti ma per dimostrare davvero l'esistenza della materia oscura e capire di che particelle è fatta dovremmo trovare il modo di rivelarla
- “Oscura” → non emette luce, non riflette luce
- È una specie di *fantasma*, che passa attraverso alla materia ordinaria (è anche qui adesso) ma non possiamo percepirla



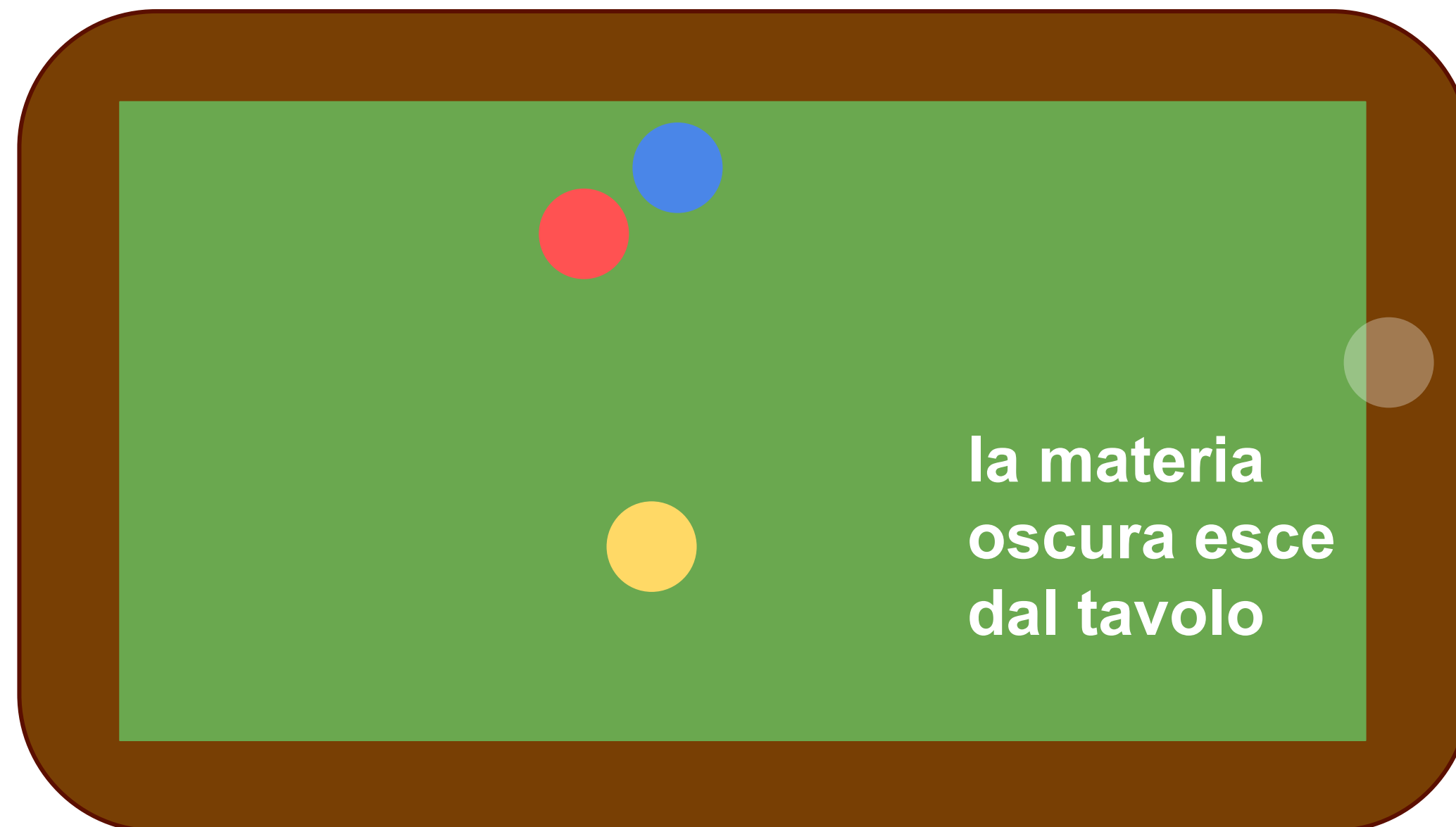
# Come vedere l'invisibile

- In rare occasioni questa particella fantasma potrebbe urtare il nucleo di un atomo e dargli un piccolo “calcio”
- Come in un tavolo da biliardo, supponiamo che ci sia una palla invisibile



# Come vedere l'invisibile

- Non possiamo misurare direttamente la materia oscura (pallina bianca)
- Ma possiamo osservare lo spostamento dell'atomo di materia ordinaria (pallina gialla) un un rivelatore di particelle (tavolo da biliardo)



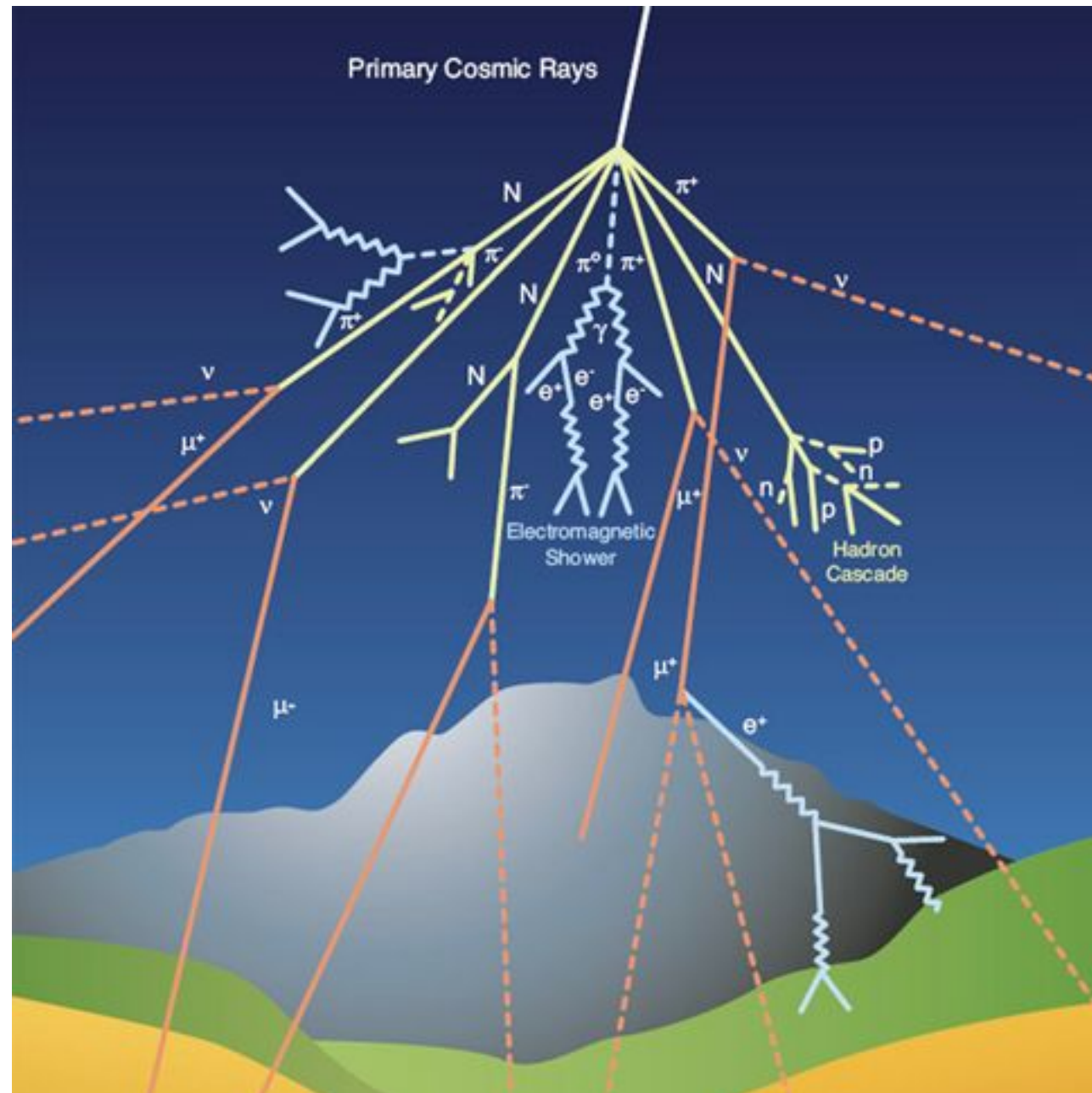
# Come vedere l'invisibile

- Non possiamo essere però sicuri che la pallina gialla (nucleo) non sia stata urtata da un'altra pallina colorata!
- Le particelle che ci attraversano continuamente sono tantissime!
- Sono soprattutto **raggi cosmici** e prodotti della **radioattività naturale**



# I laboratori sotterranei

Come non è possibile guardare le stelle quando c'è il sole o sentire un sussurro quando c'è tanto rumore, per “rivelare” la materia oscura è necessario il “***silenzio cosmico***”



I Laboratori Nazionali del Gran Sasso del INFN, che si trovano nel tunnel autostradale tra L'Aquila e Teramo, sotto a 1400 m di roccia sono un posto quasi unico per la ricerca di Materia Oscura e altri fenomeni rari

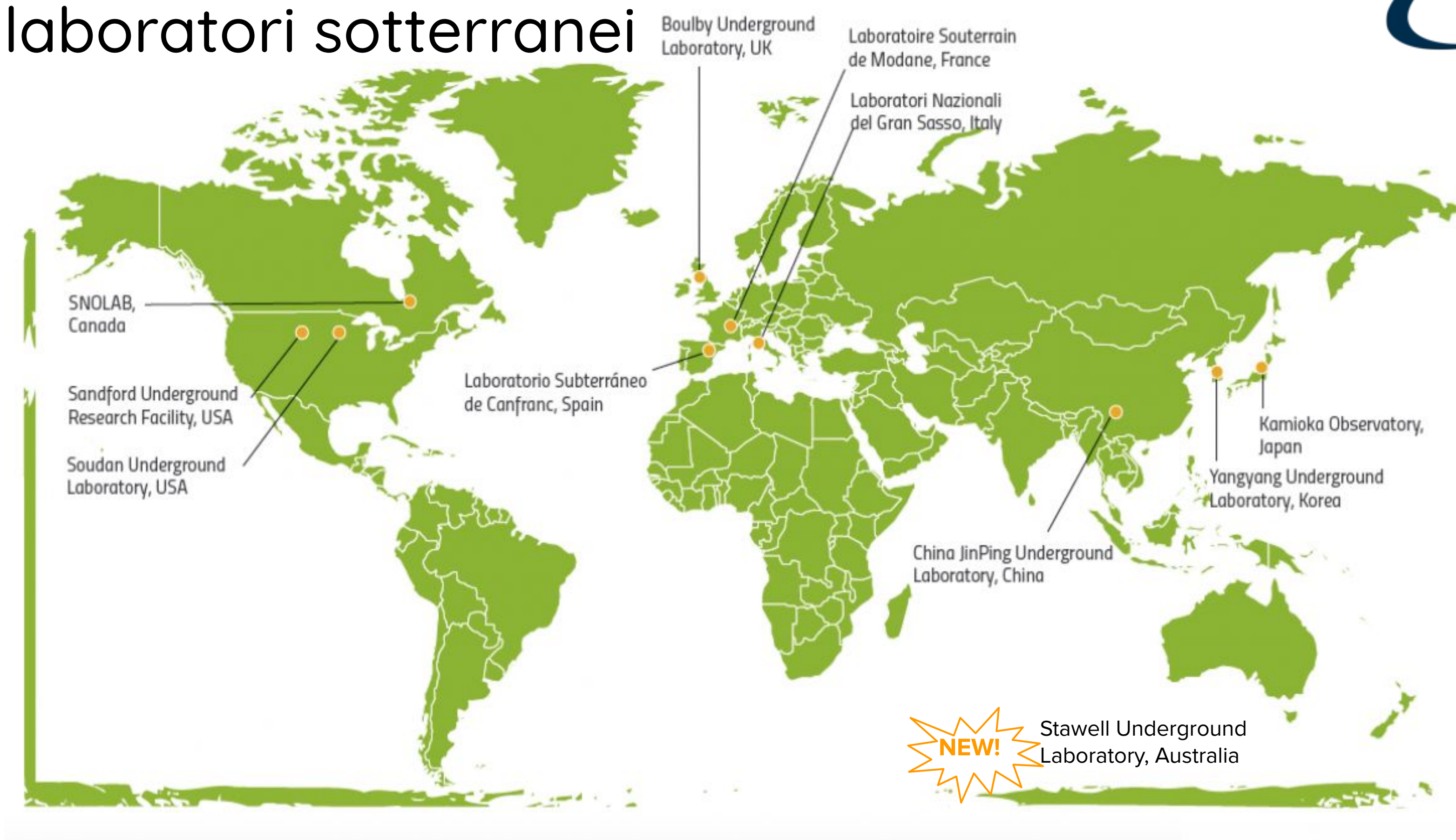


# I laboratori sotterranei

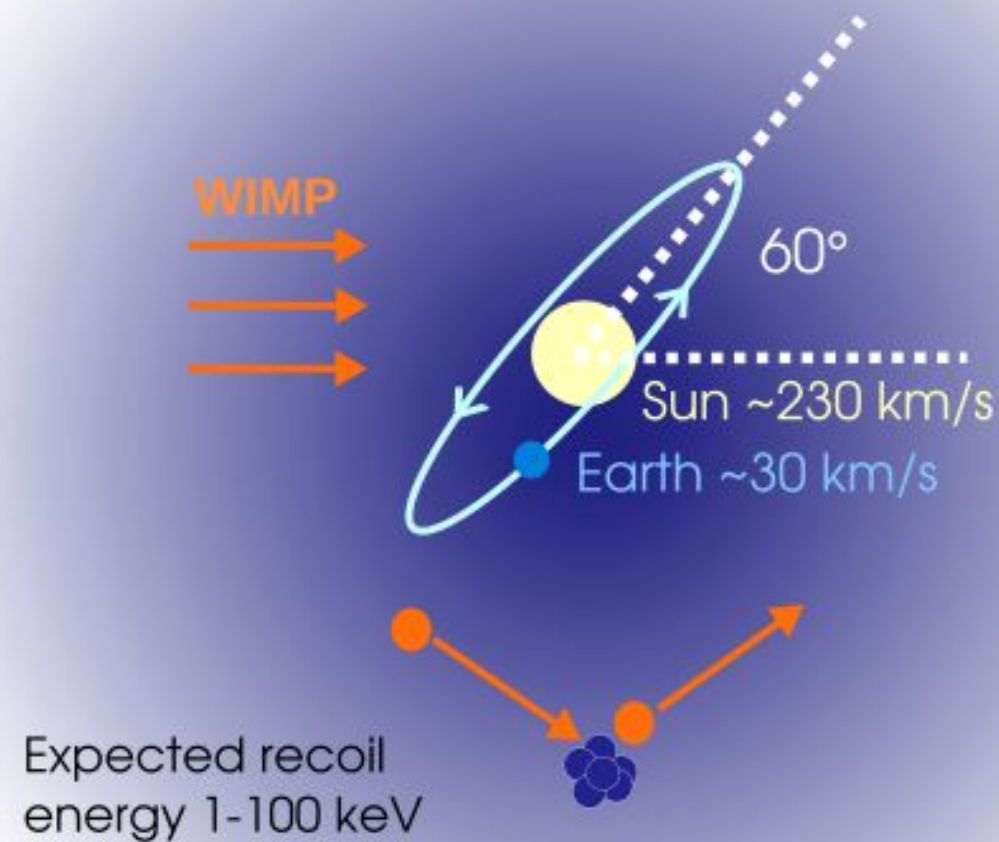
- Laboratori Nazionali del Gran Sasso – [LNGS Vai su Google Maps](#)



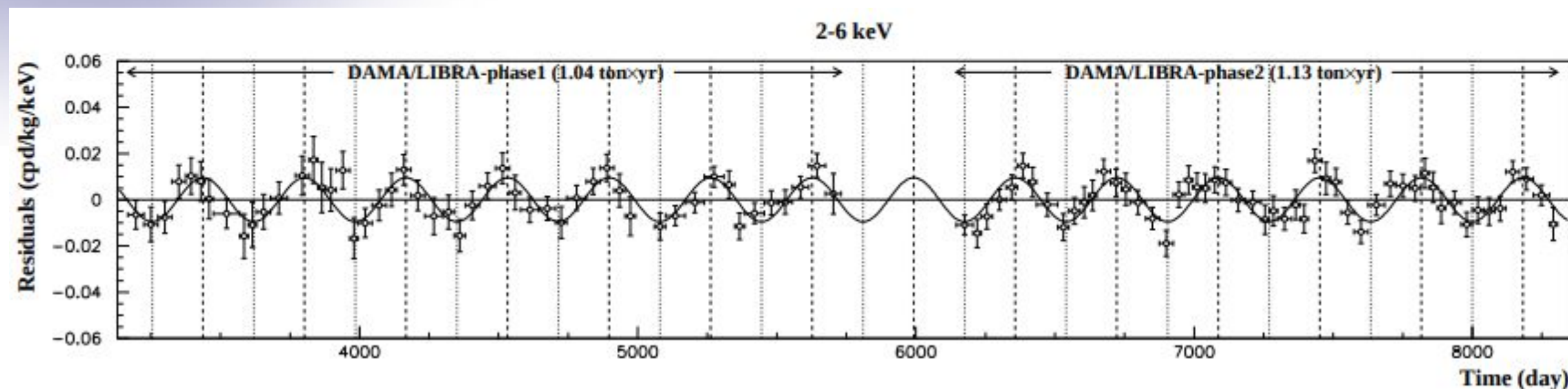
# I laboratori sotterranei



# Un segnale di materia oscura?



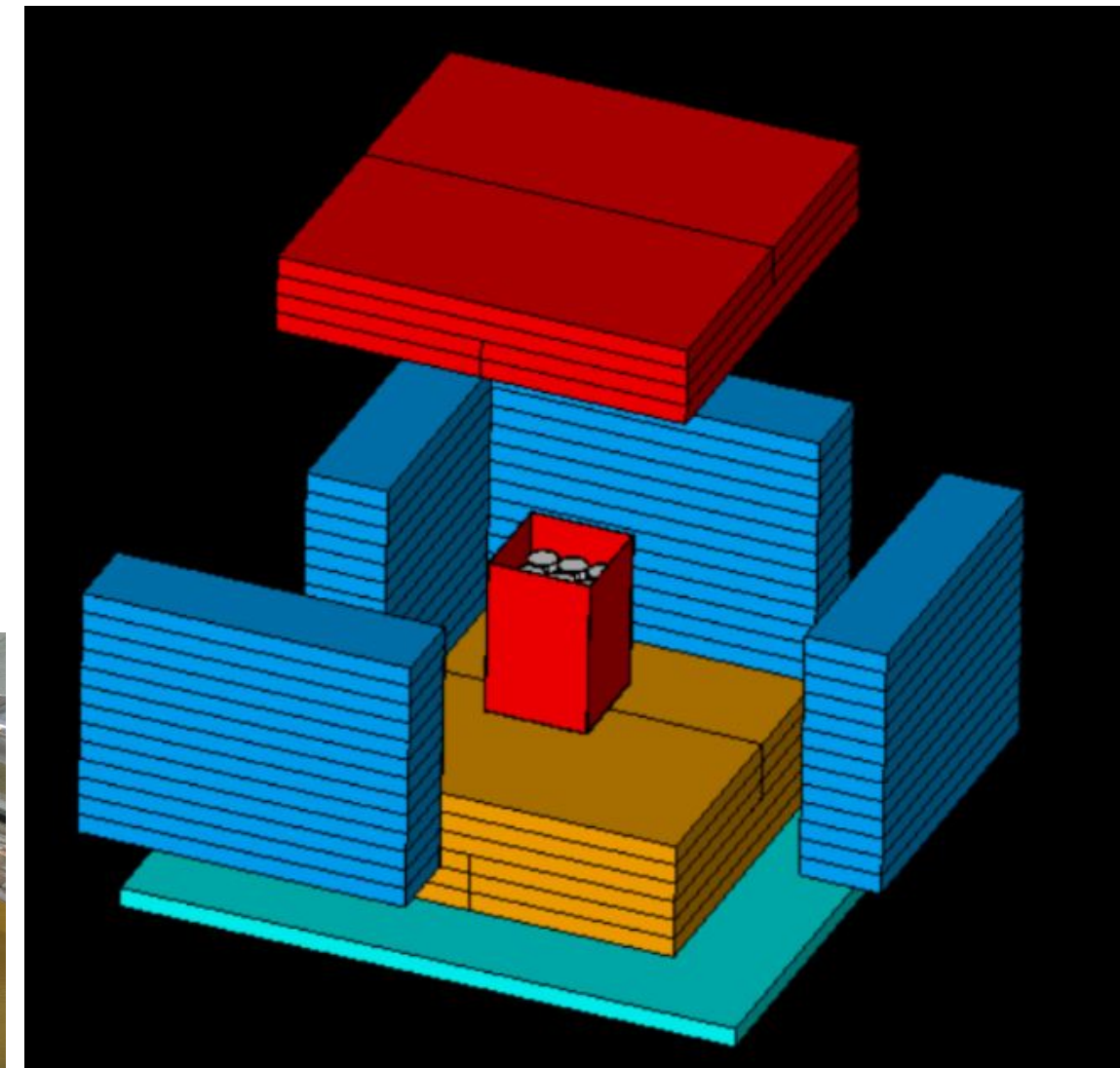
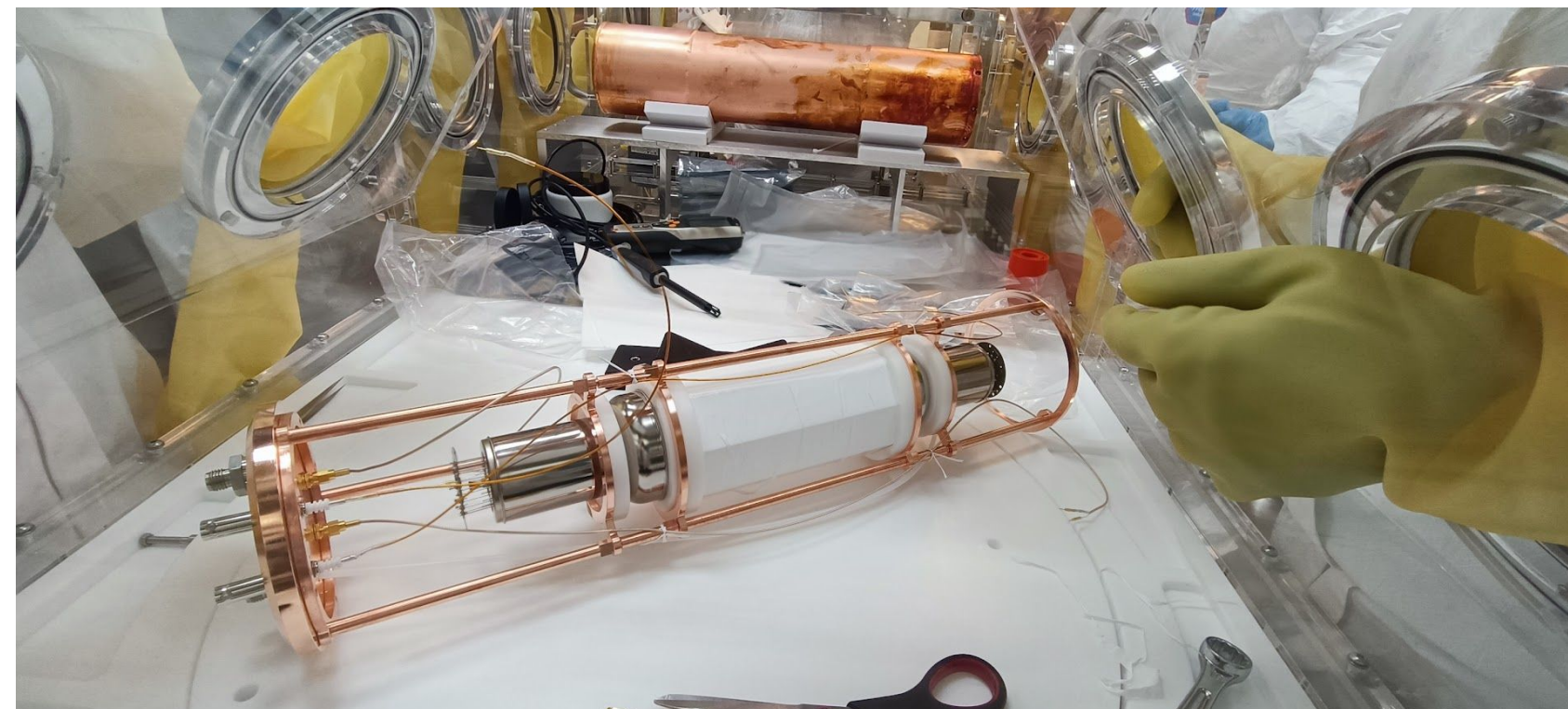
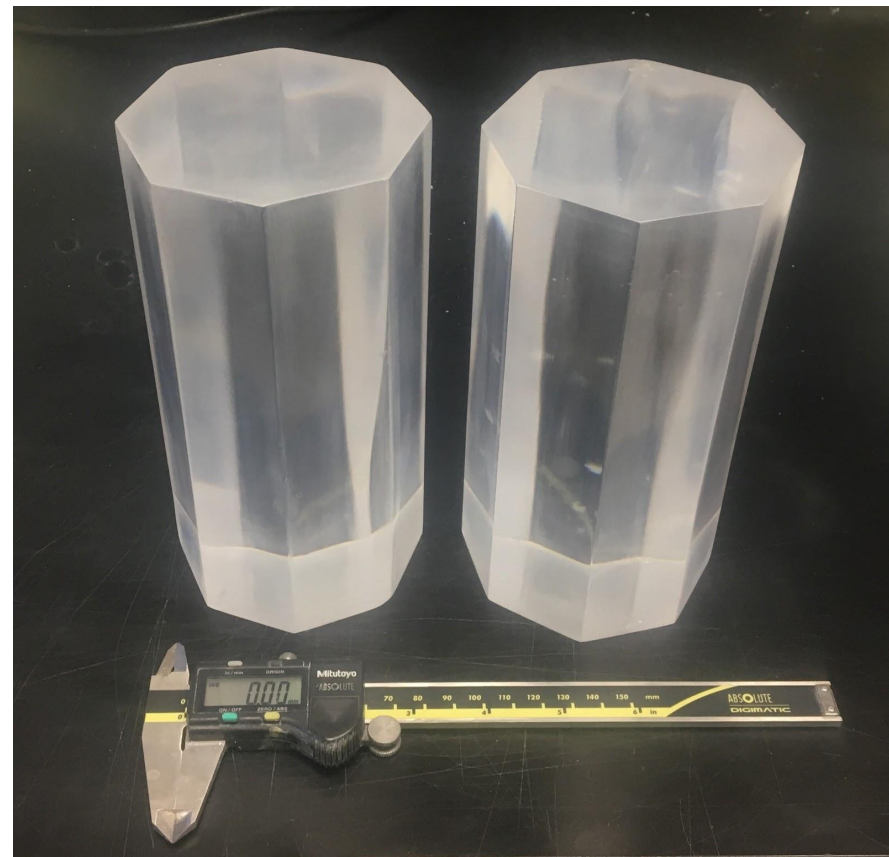
- Il Sole si muove intorno al centro galattico
- La materia oscura forma un alone intorno a tutta la galassia
- Dal punto di vista del Sole è come se arrivasse un “vento” di materia oscura dalla direzione della costellazione del Cigno
- Siccome la Terra a sua volta ruota intorno al Sole, sulla Terra questo vento ha una velocità che modula con un periodo annuale
- L’esperimento DAMA ai LNGS ha misurato un segnale modulato che potrebbe essere materia oscura!





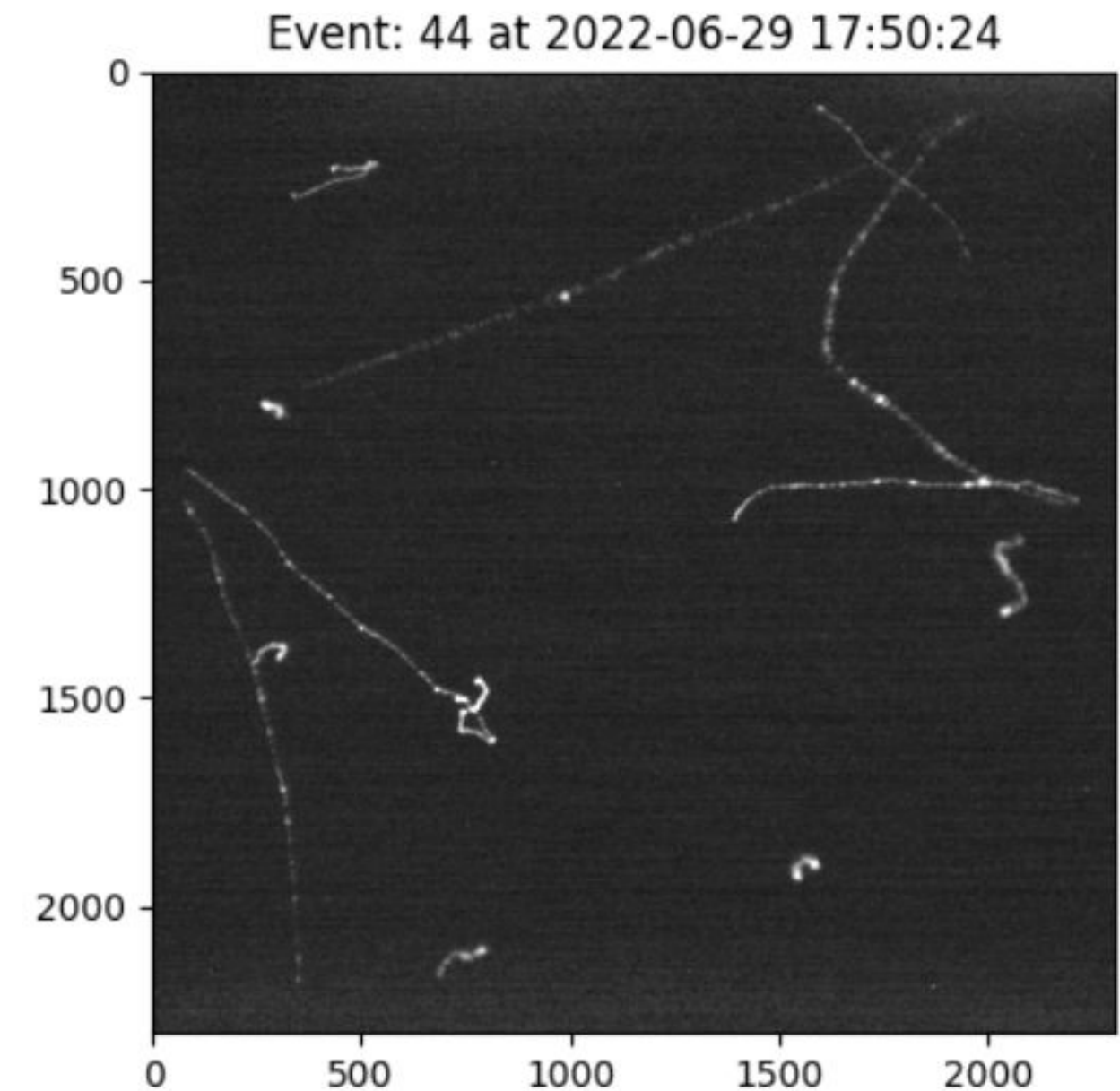
# Esempio di detector

SABRE: rivelatore a cristalli scintillanti, misura la luce emessa al passaggio di particelle nel detector



# Esempio di detector

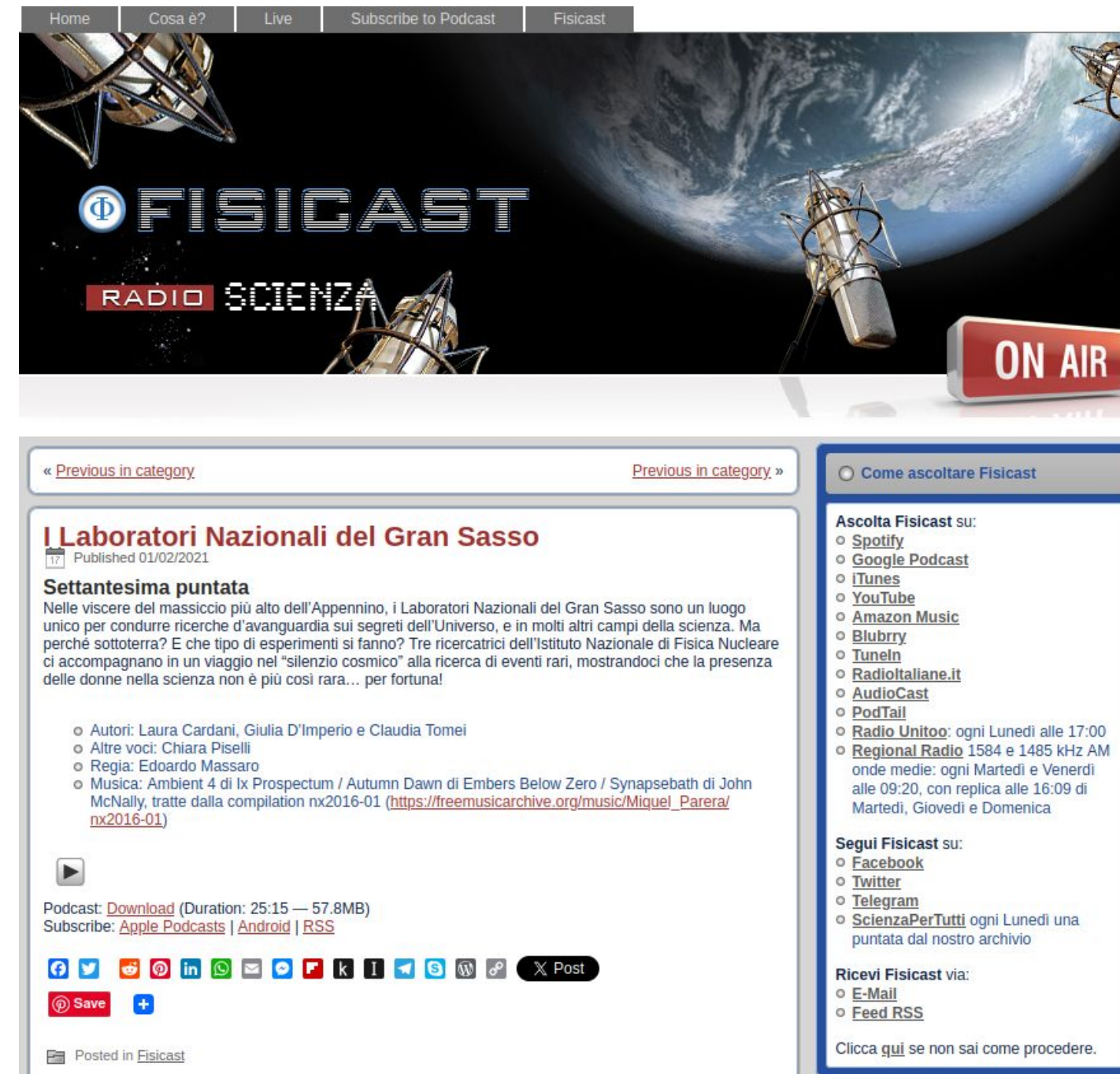
CYGNO: rivelatore a gas, scatta delle “foto” alle particelle che passano nel gas



# Podcast sui laboratori del Gran Sasso



<https://www.radioscienza.it/2021/02/01/i-laboratori-nazionali-del-gran-sasso/>



The screenshot shows the website interface for Fisicast. At the top, there is a navigation bar with links for Home, Cosa è?, Live, Subscribe to Podcast, and Fisicast. The main header features the Fisicast logo (a blue circle with a white Greek letter phi) and the text 'FISICAST RADIO SCIENZA' against a background of a satellite in space. A red 'ON AIR' button is visible in the bottom right of the header.

The article content includes:

- « Previous in category » Previous in category »
- I Laboratori Nazionali del Gran Sasso**
- Published 01/02/2021
- Settantesima puntata**
- Nelle viscere del massiccio più alto dell'Appennino, i Laboratori Nazionali del Gran Sasso sono un luogo unico per condurre ricerche d'avanguardia sui segreti dell'Universo, e in molti altri campi della scienza. Ma perché sottoterra? E che tipo di esperimenti si fanno? Tre ricercatrici dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare ci accompagnano in un viaggio nel "silenzio cosmico" alla ricerca di eventi rari, mostrandoci che la presenza delle donne nella scienza non è più così rara... per fortuna!
- o Autori: Laura Cardani, Giulia D'Imperio e Claudia Tomei
  - o Altre voci: Chiara Piselli
  - o Regia: Edoardo Massaro
  - o Musica: Ambient 4 di Ix Prospectum / Autumn Dawn di Embers Below Zero / Synapsebath di John McNally, tratte dalla compilation nx2016-01 ([https://freemusicarchive.org/music/Miquei\\_Parera/nx2016-01](https://freemusicarchive.org/music/Miquei_Parera/nx2016-01))
- Podcast: [Download](#) (Duration: 25:15 — 57.8MB)
- Subscribe: [Apple Podcasts](#) | [Android](#) | [RSS](#)
- Social sharing icons for Facebook, Twitter, YouTube, LinkedIn, WhatsApp, Telegram, Email, Print, and a 'Post' button.
- Posted in [Fisicast](#)

On the right side, there is a sidebar titled 'Come ascoltare Fisicast' with the following options:

- Ascolta Fisicast su:
  - o [Spotify](#)
  - o [Google Podcast](#)
  - o [iTunes](#)
  - o [YouTube](#)
  - o [Amazon Music](#)
  - o [Blubrry](#)
  - o [TuneIn](#)
  - o [RadioItaliane.it](#)
  - o [AudioCast](#)
  - o [PodTail](#)
  - o [Radio Unitoo](#): ogni Lunedì alle 17:00
  - o [Regional Radio](#) 1584 e 1485 kHz AM onde medie: ogni Martedì e Venerdì alle 09:20, con replica alle 16:09 di Martedì, Giovedì e Domenica
- Segui Fisicast su:
  - o [Facebook](#)
  - o [Twitter](#)
  - o [Telegram](#)
  - o [ScienzaPerTutti](#) ogni Lunedì una puntata dal nostro archivio
- Ricevi Fisicast via:
  - o [E-Mail](#)
  - o [Feed RSS](#)
- Clicca [qui](#) se non sai come procedere.

Grazie e in bocca al lupo a tutti per l'opera di Art&Science!

# Extra slides



# Laboratori sotterranei



LNGS, Italy



SUPL, Australia



Sudbury, Canada

SURF, South Dakota, USA

Canfranc, Spain

