

# La Materia Oscura



Francesco Pandolfi  
(INFN Roma)  
Seminario Liceo Giulio Cesare  
31.01.2019

# Fatemi dire due cose organizzative

Oltre a questo seminario dovete organizzare **un'altra** uscita scolastica scientifica di un paio d'ore. Ad esempio:

Una visita a un laboratorio scientifico

Una visita al museo del dipartimento di fisica della Sapienza

Altro...?

Martedì 5/2 alle 15:15 incontro nell'aula magna dell'Accademia

Dove si parlerà di progettazione artistica, di cosa rende un'opera 'd'arte'

Assolutamente **da non perdere**

# Fatemi dire due cose organizzative

Dovrete concordare con il tutor dell'Accademia data del suo seminario

L'equivalente di questo seminario, ma artistico

Per favore **fatemi sapere** la data! Voglio essere presente

Dopo Pasqua riceverete il **modulo** con cui presentare il progetto

Da consegnare entro la fine dell'anno scolastico

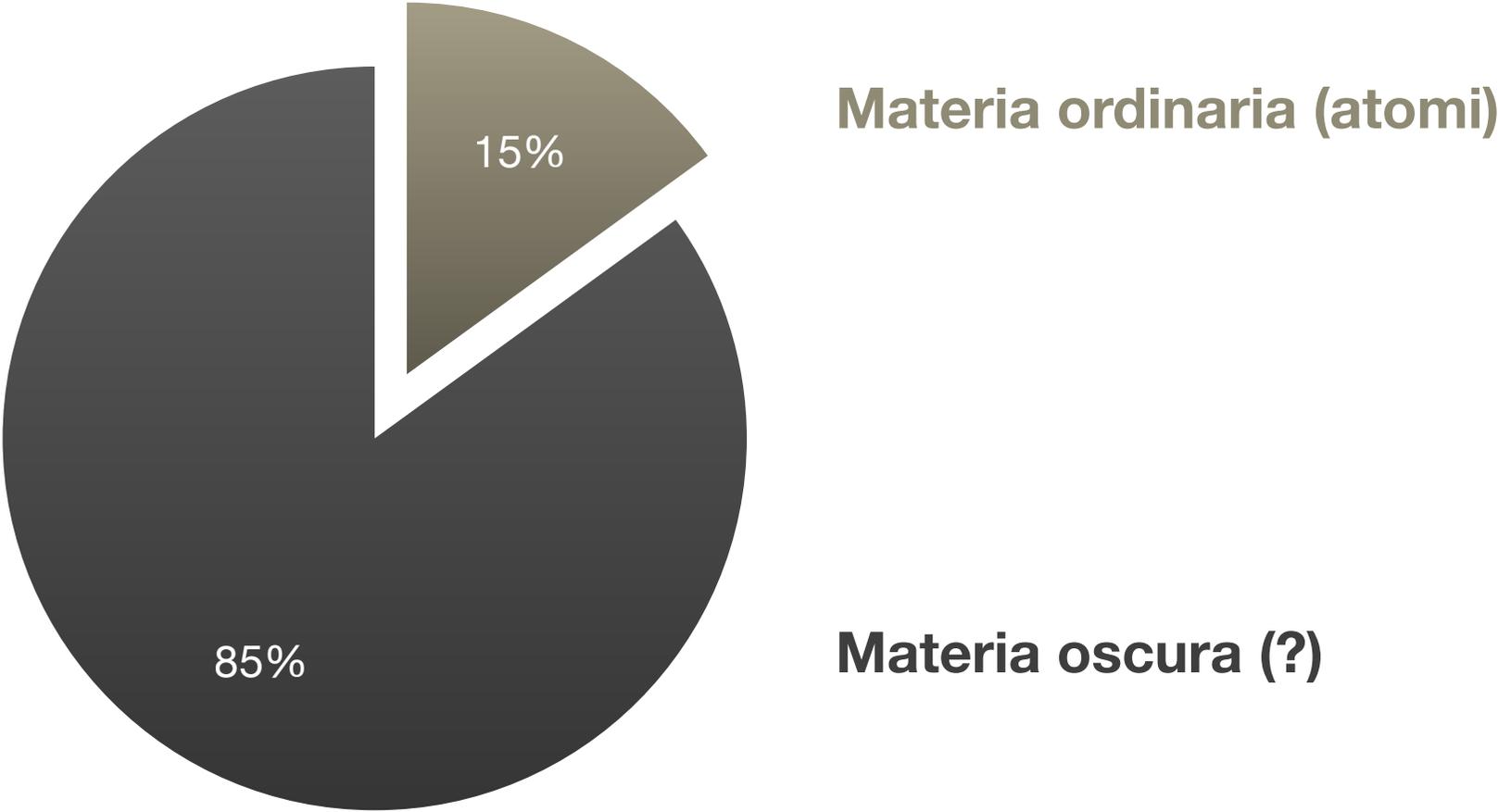
Nel modulo ci dovrà essere una breve descrizione del vostro progetto

# La Materia Oscura



Adesso cominciamo davvero

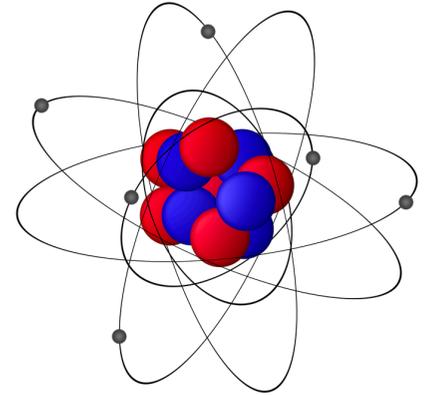
# La maggior parte dell'Universo è fatto di materia oscura



# Cominciamo dalla Terra



Fatta di atomi



Atomi fatti di particelle (note):  
**protone** **neutrone** elettrone

Queste particelle hanno **massa**

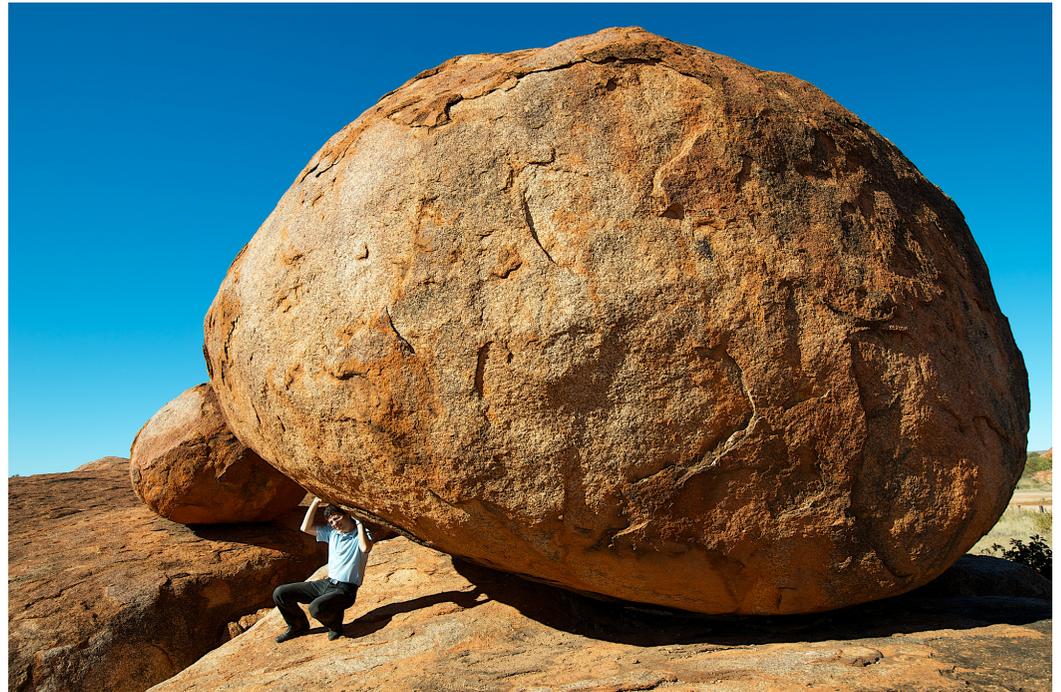
# Due definizioni di massa

1. La massa è quanto gli scoccia a una cosa mettersi in moto  
(se la spingo)
2. La massa è quello che conta nella **forza di gravità**

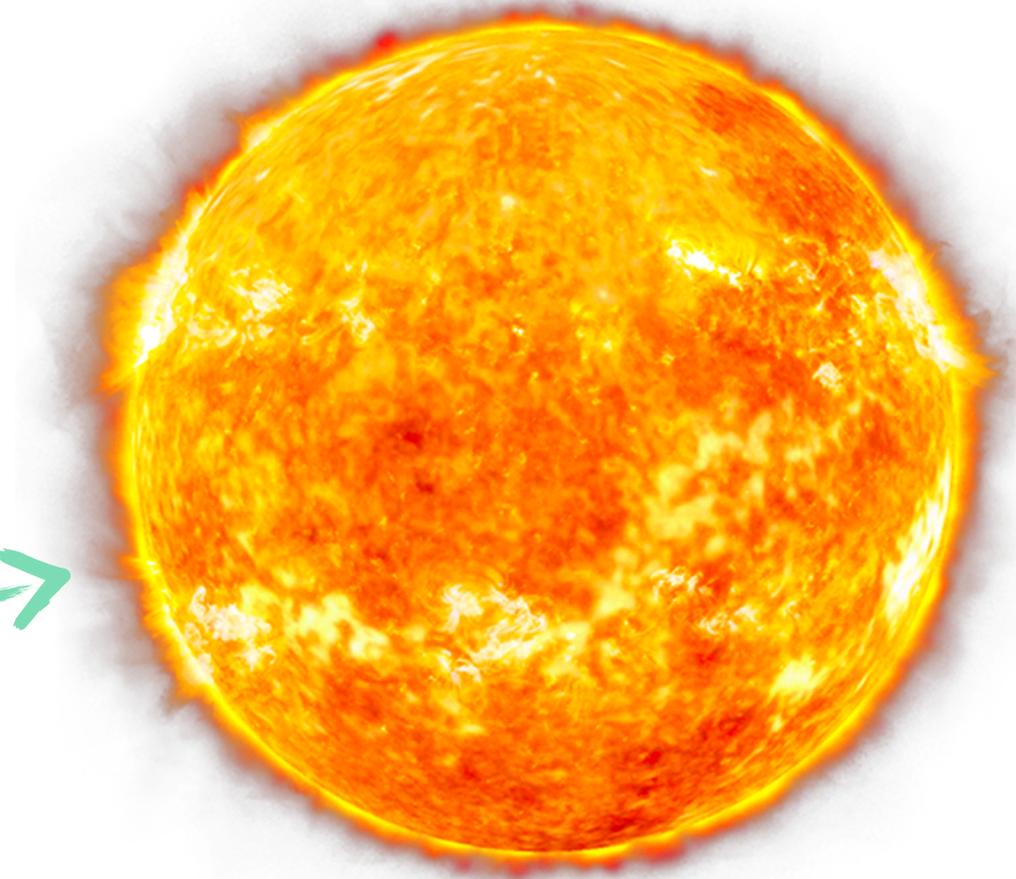
# La gravità ci tiene ancorati al terreno



Oggetti pesanti sono 'più ancorati'

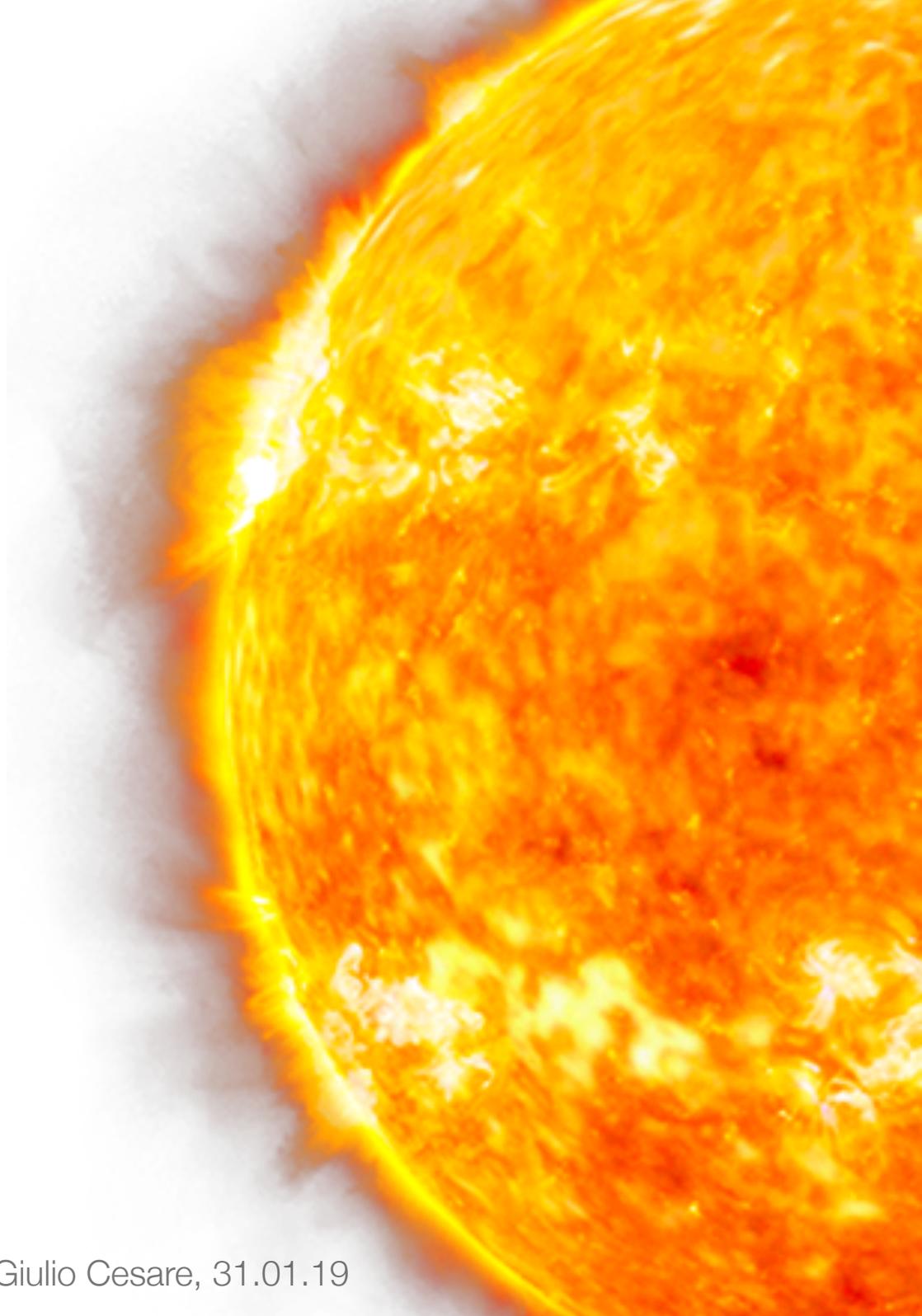


# E tiene la Terra ancorata al Sole



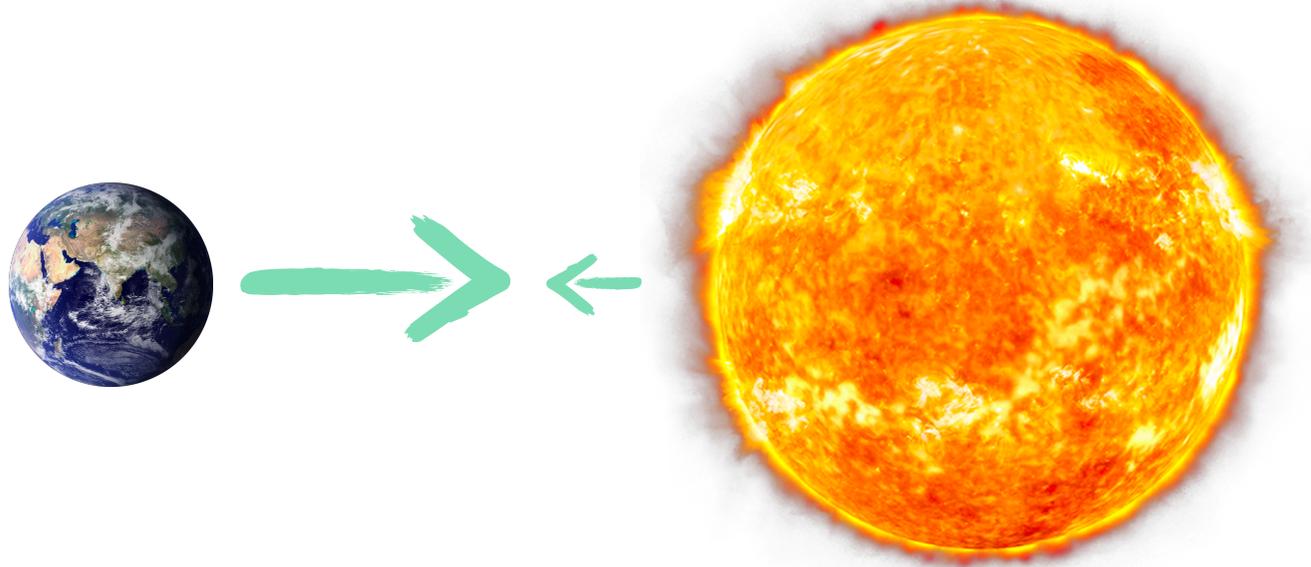
(non in scala)

In scala

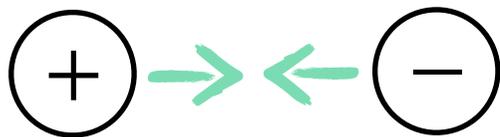


# Come funziona la gravità?

Fino all'inizio del 1900 si pensava fosse una forza fra due corpi



Simile alla forza elettrica fra due cariche elettriche, ma **solo attrattiva**



(non esiste  
massa negativa)

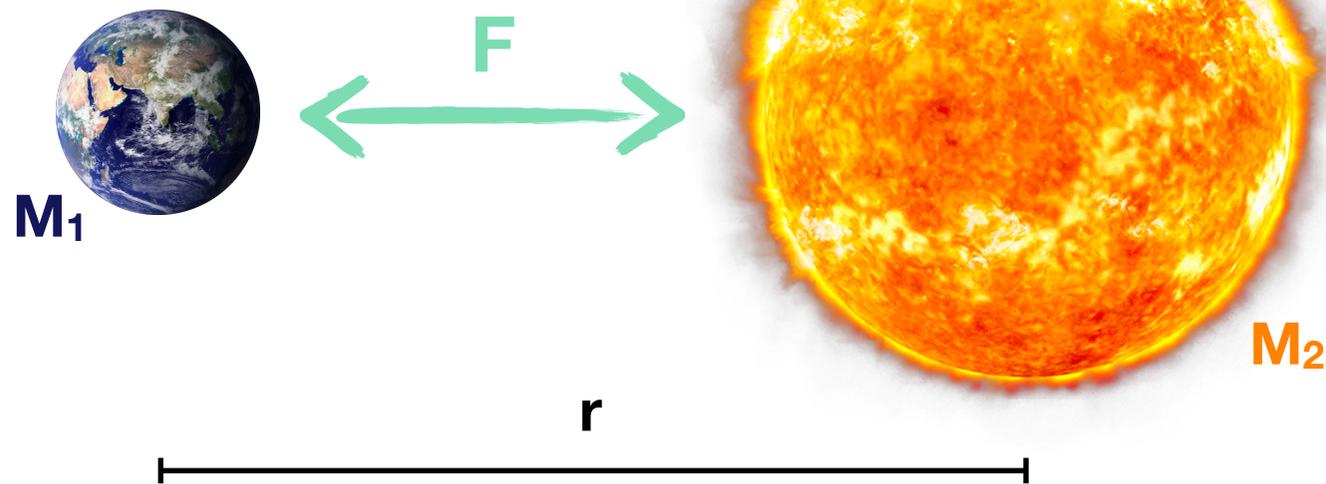
Questa è l'unica formula di oggi (quindi cerchiamo di capirla)

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

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

**r** è la distanza

**G** è una costante (non importa)



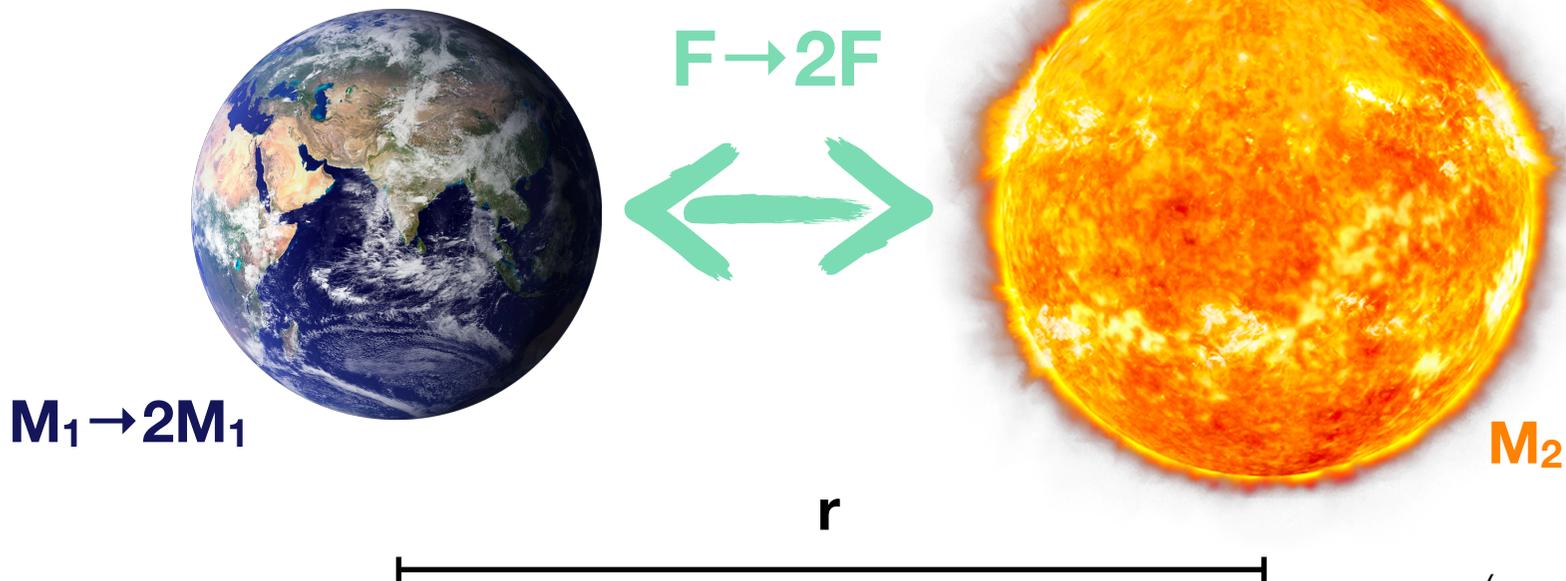
Questa è l'unica formula di oggi (quindi cerchiamo di capirla)

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

$M_1$  e  $M_2$  sono le due masse

$r$  è la distanza

$G$  è una costante (non importa)



(ma **anche** se  
raddoppia  $M_2$ !)

Questa è l'unica formula di oggi (quindi cerchiamo di capirla)

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

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

**r** è la distanza

**G** è una costante (non importa)



**M<sub>1</sub>**

**F → F/4**



**r → 2r**

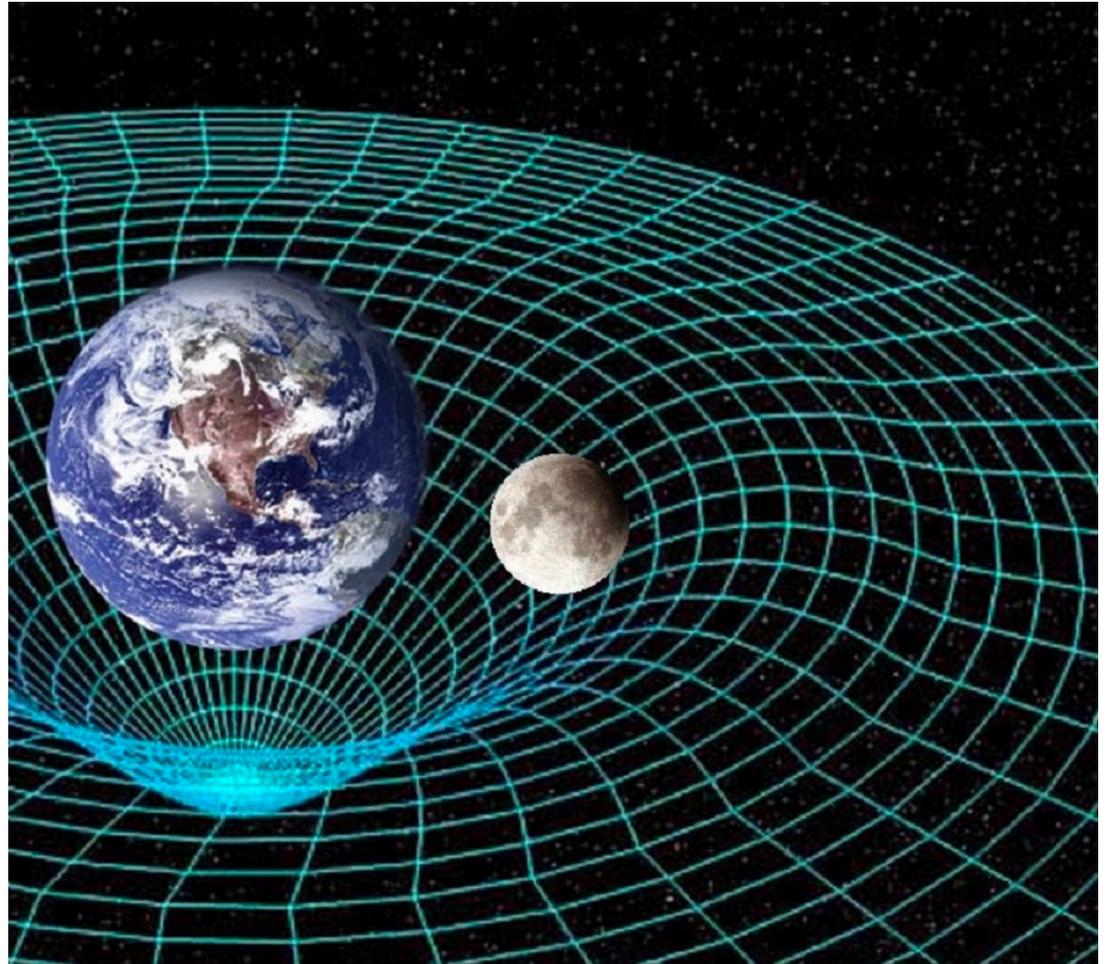
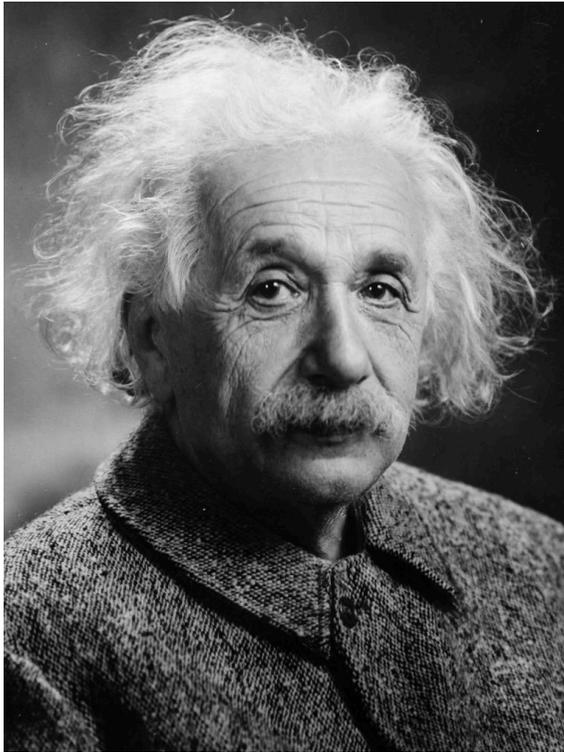


**M<sub>2</sub>**



# Poi arriva Einstein

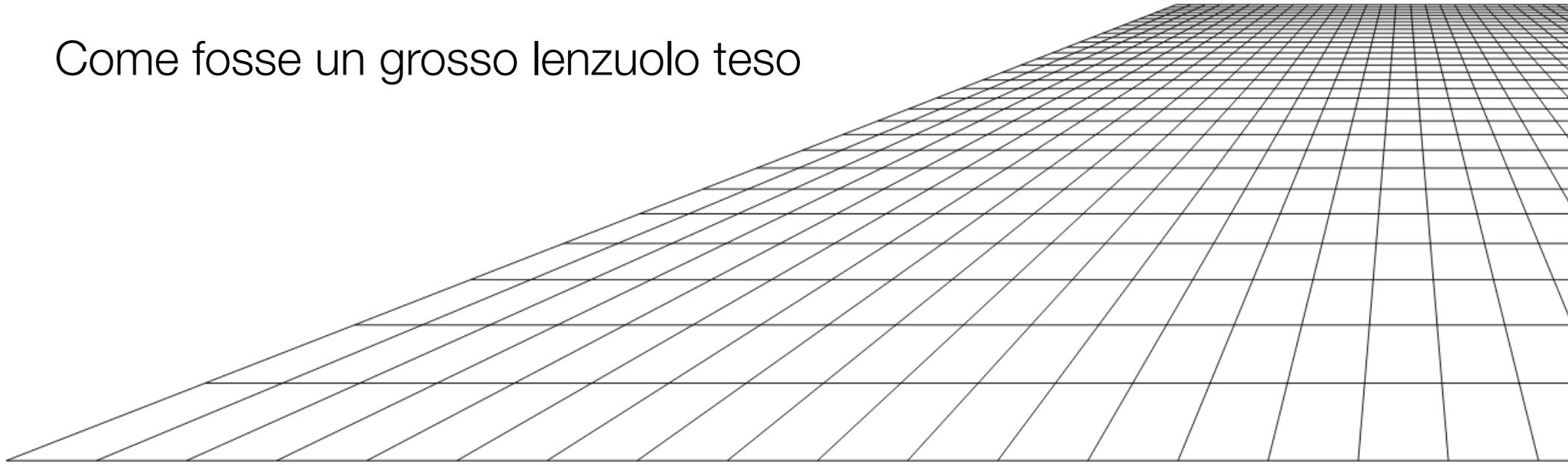
Relatività generale (1915): la gravità non è una forza,  
è una **curvatura** dello spazio



# Come funziona davvero la gravità

Facciamo un esempio in due dimensioni:  
facciamo finta che l'Universo sia un **piano** infinito

Come fosse un grosso lenzuolo teso



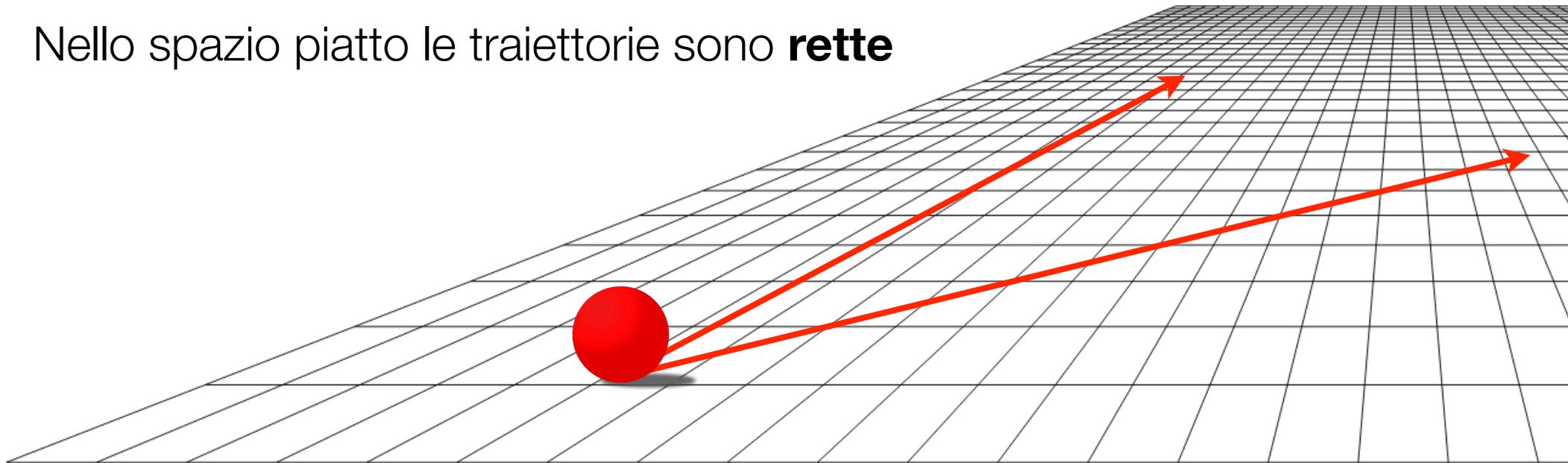
# Come funziona davvero la gravità

In questo universo 2D ci si può muovere solo sulla superficie del lenzuolo

Se lanciamo una biglia sulla superficie del lenzuolo, lei continua **dritta**

Il lenzuolo **piatto** rappresenta lo spazio **vuoto**

Nello spazio piatto le traiettorie sono **rette**



# La presenza di massa curva lo spazio

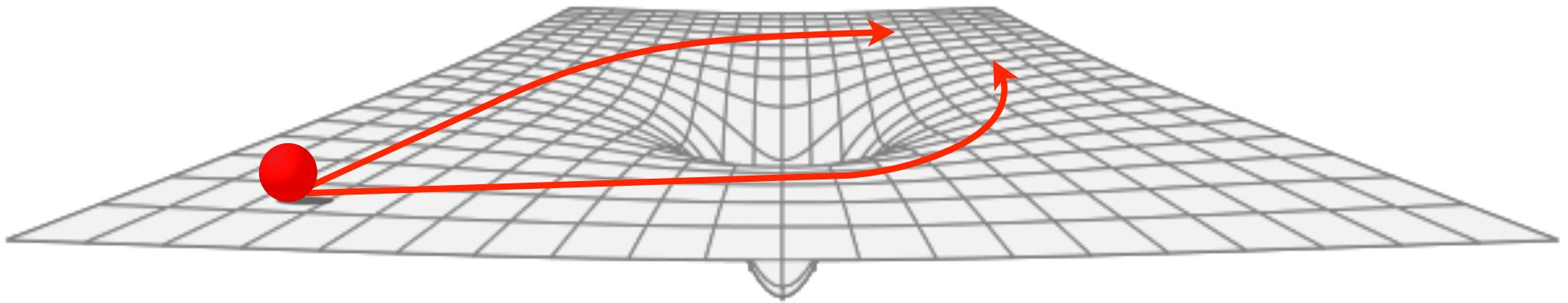
Adesso mettiamoci  
una palla da bowling



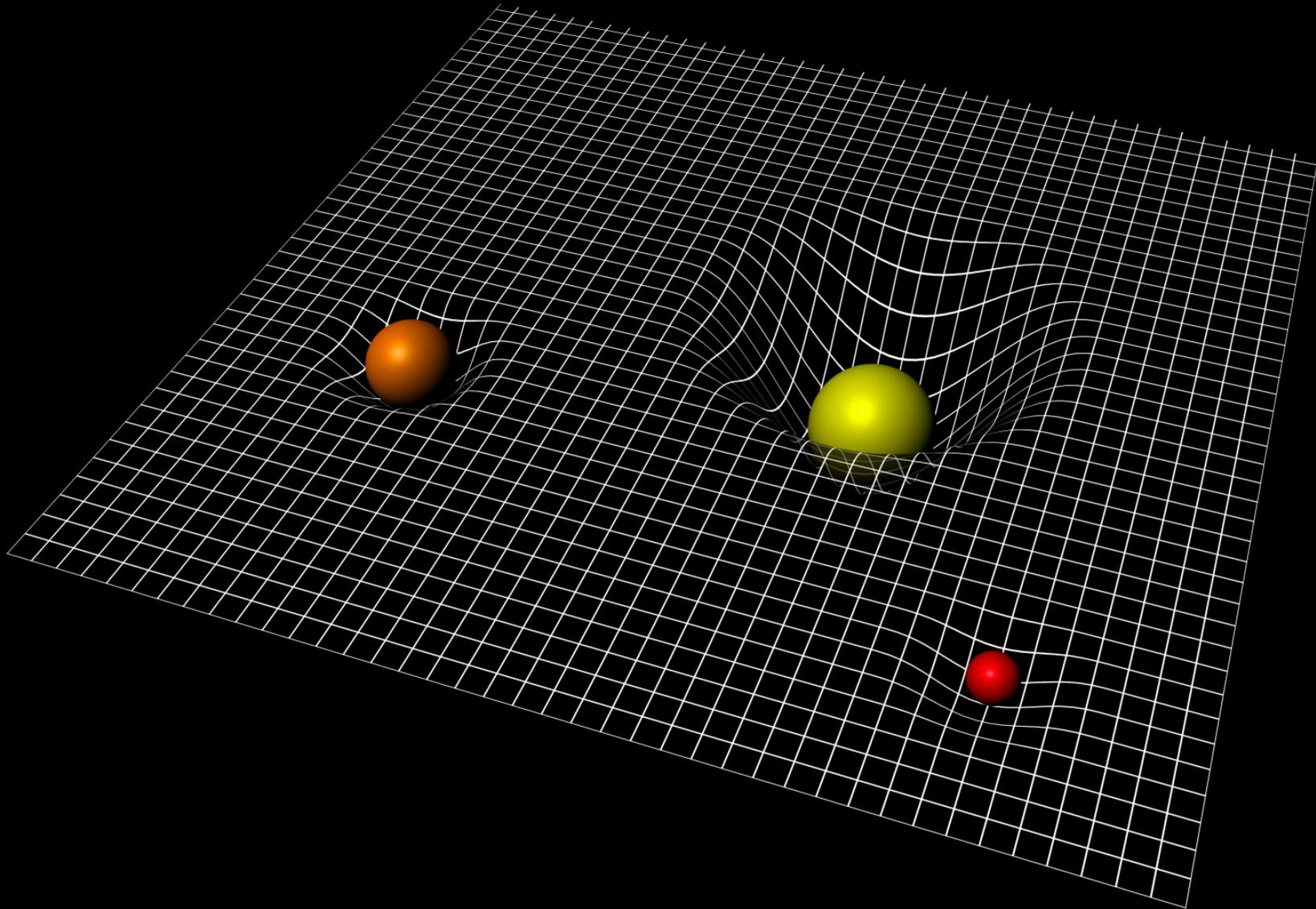
Se lancio una biglia  
fa una traiettoria curva

Lo spazio si **curva**

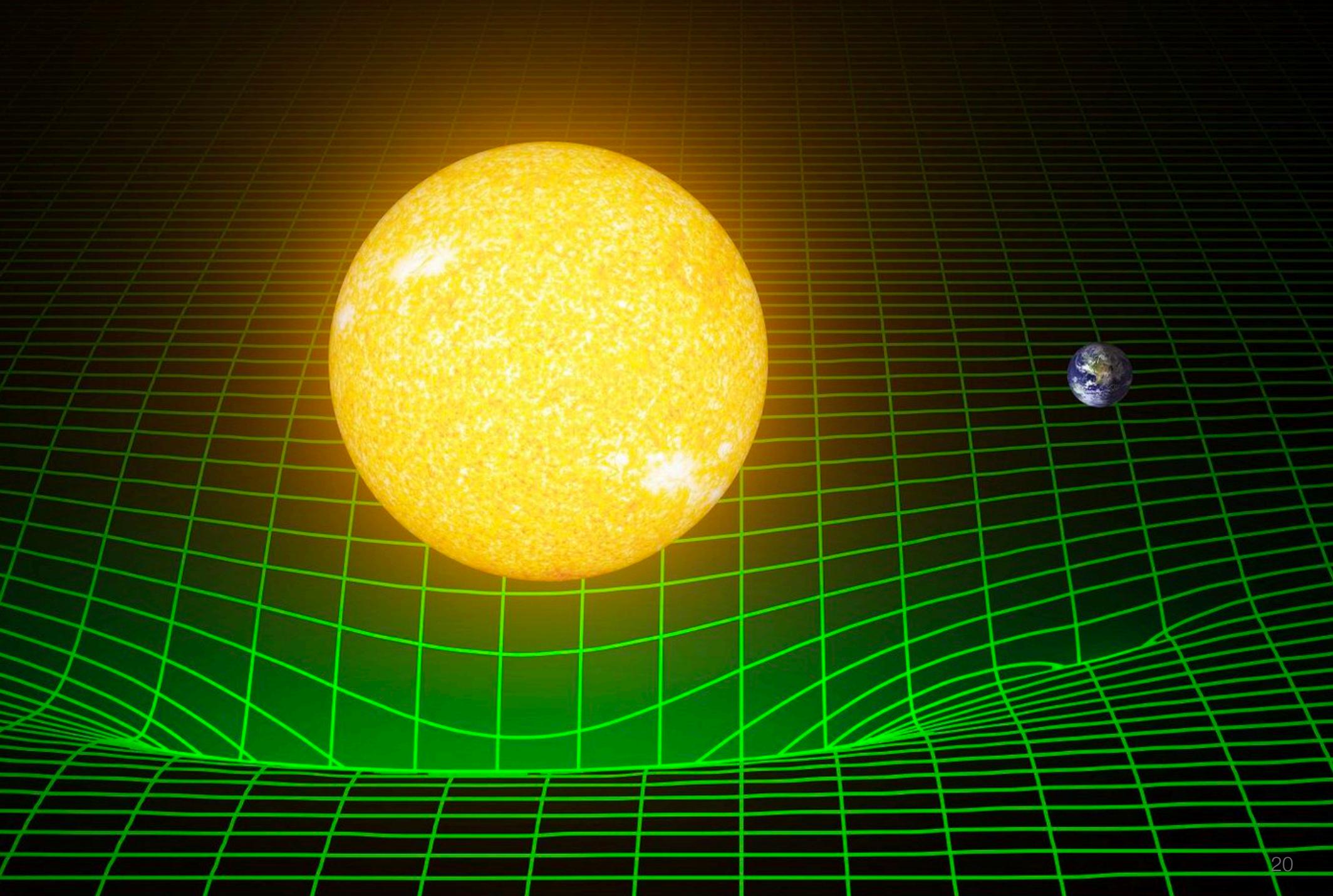
Ma **è andata dritta**  
(in uno spazio curvo)



# Più grande la massa, più grande la curvatura

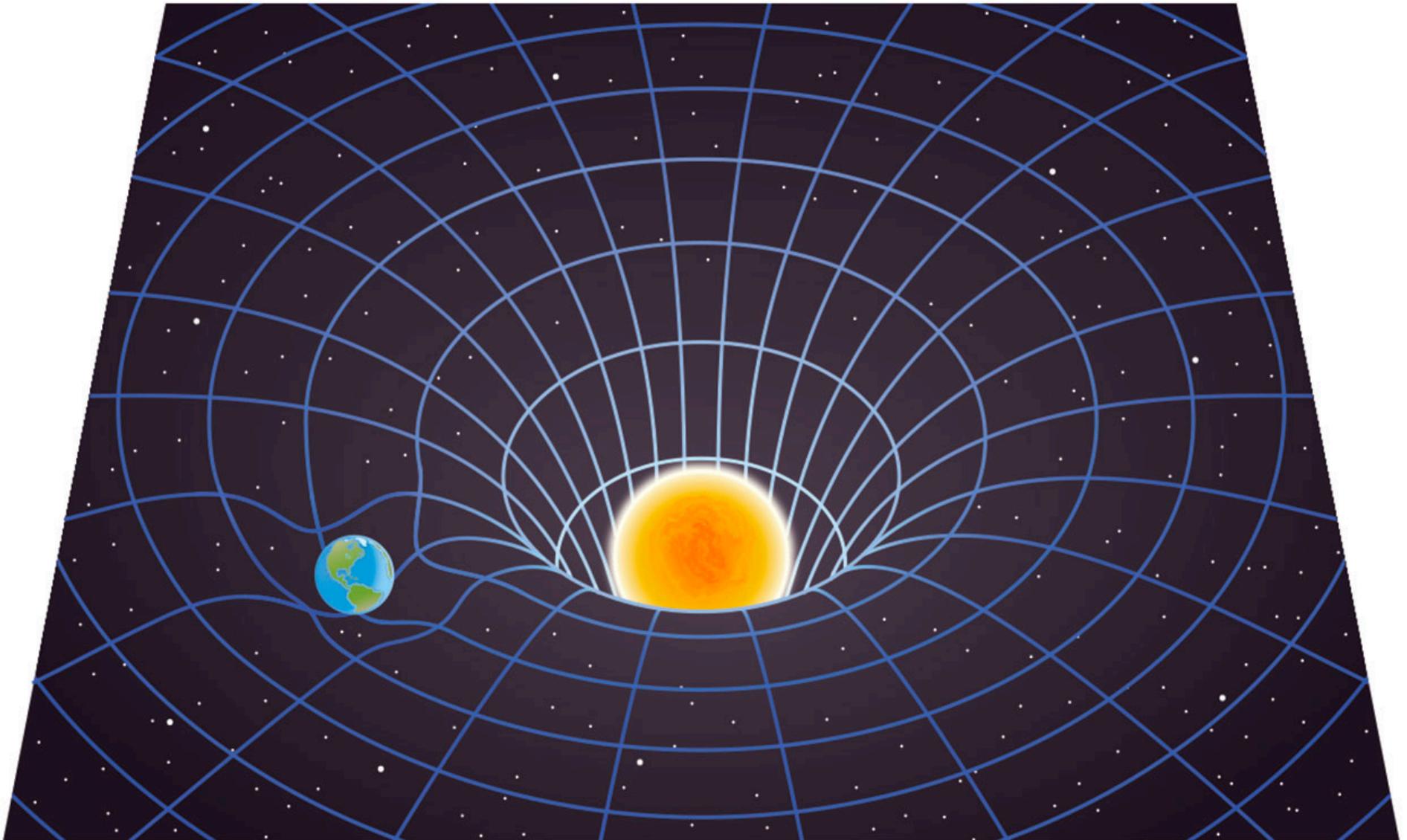


L'Universo è curvo in tre dimensioni



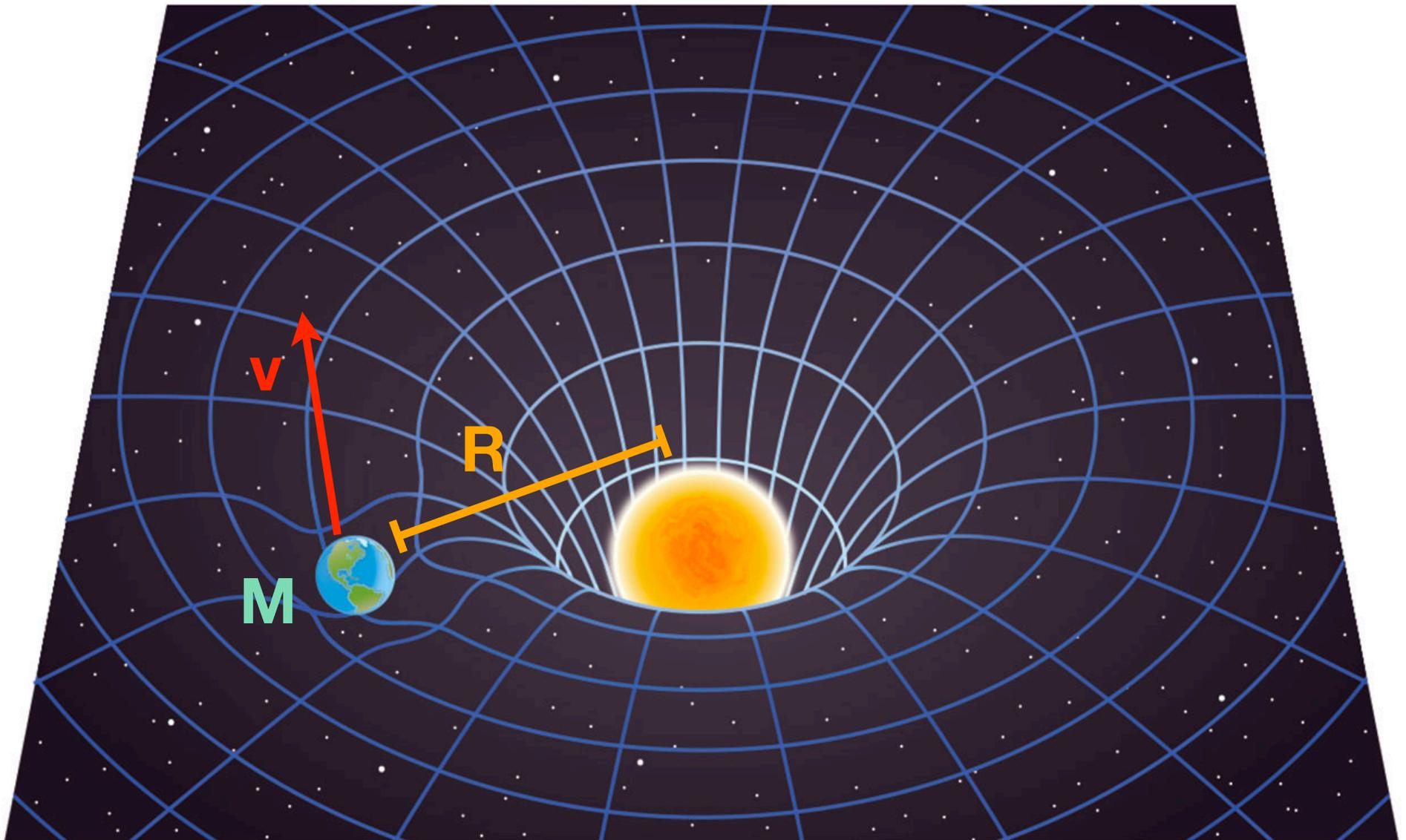
# Come fa la Terra a rimanere in orbita?

Grazie a una precisa combinazione di  $M$ ,  $v$ ,  $R$



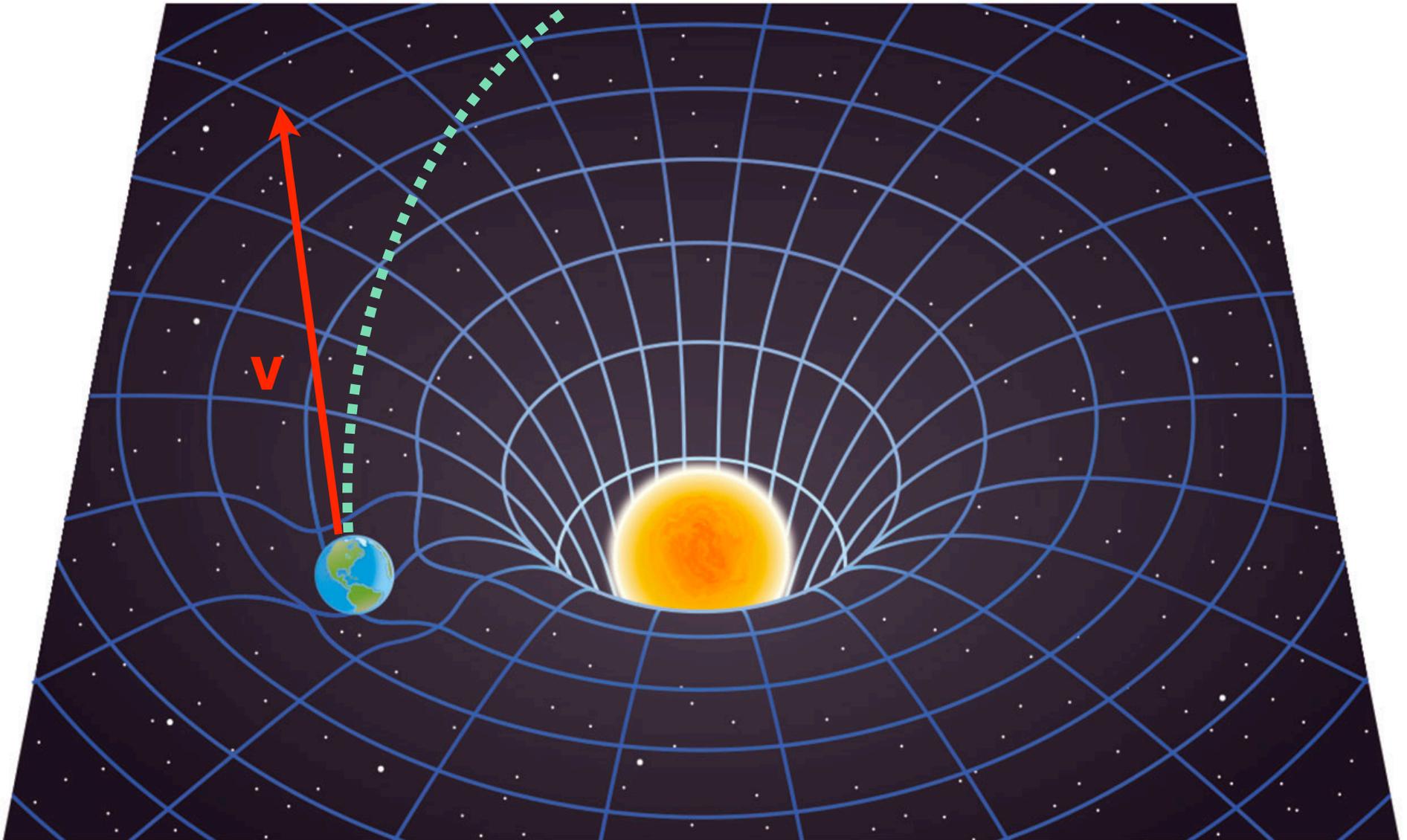
# Come fa la Terra a rimanere in orbita?

Grazie a una precisa combinazione di  $M$ ,  $v$ ,  $R$



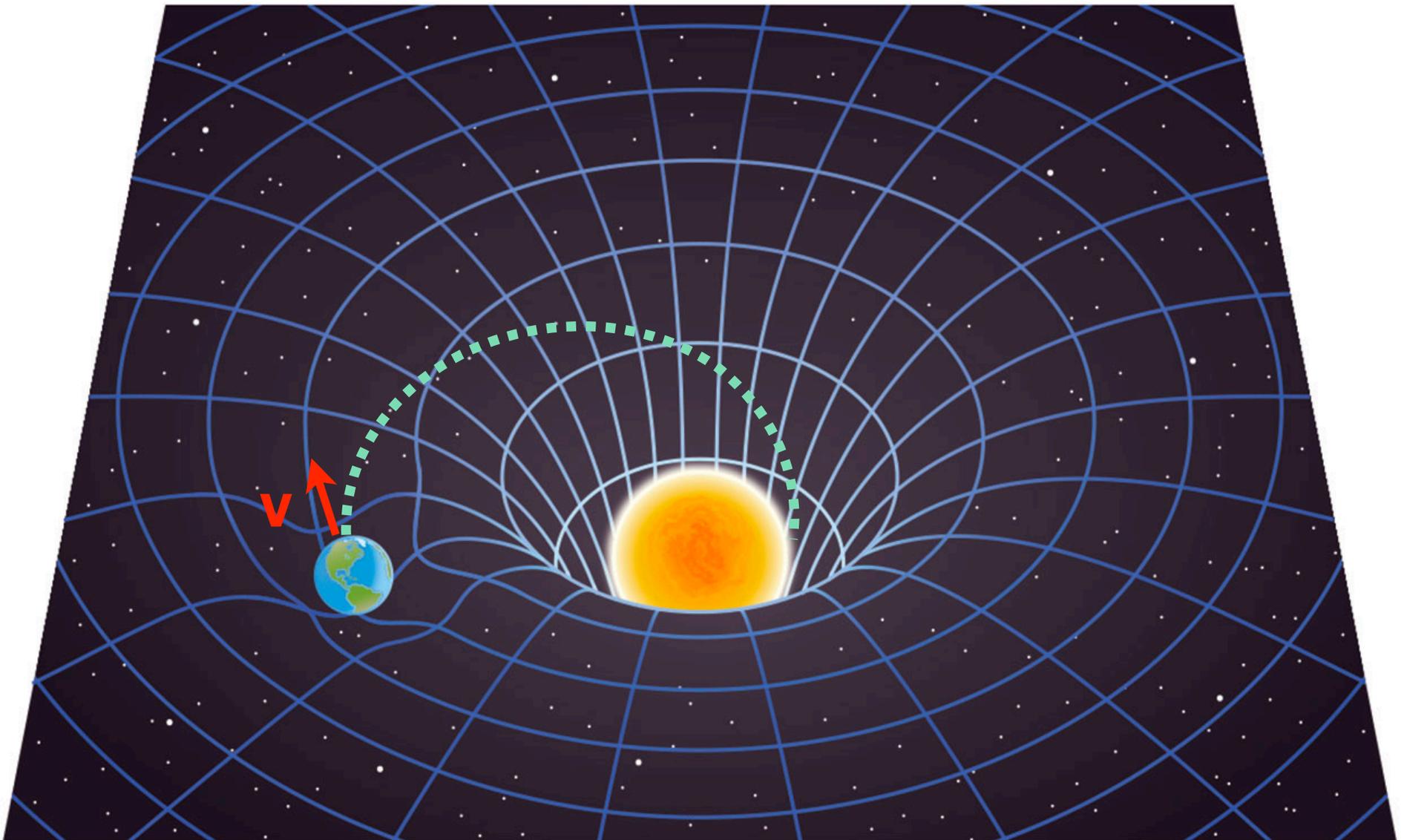
# Come fa la Terra a rimanere in orbita?

Se velocità troppo **elevata**, sfugge all'attrazione solare



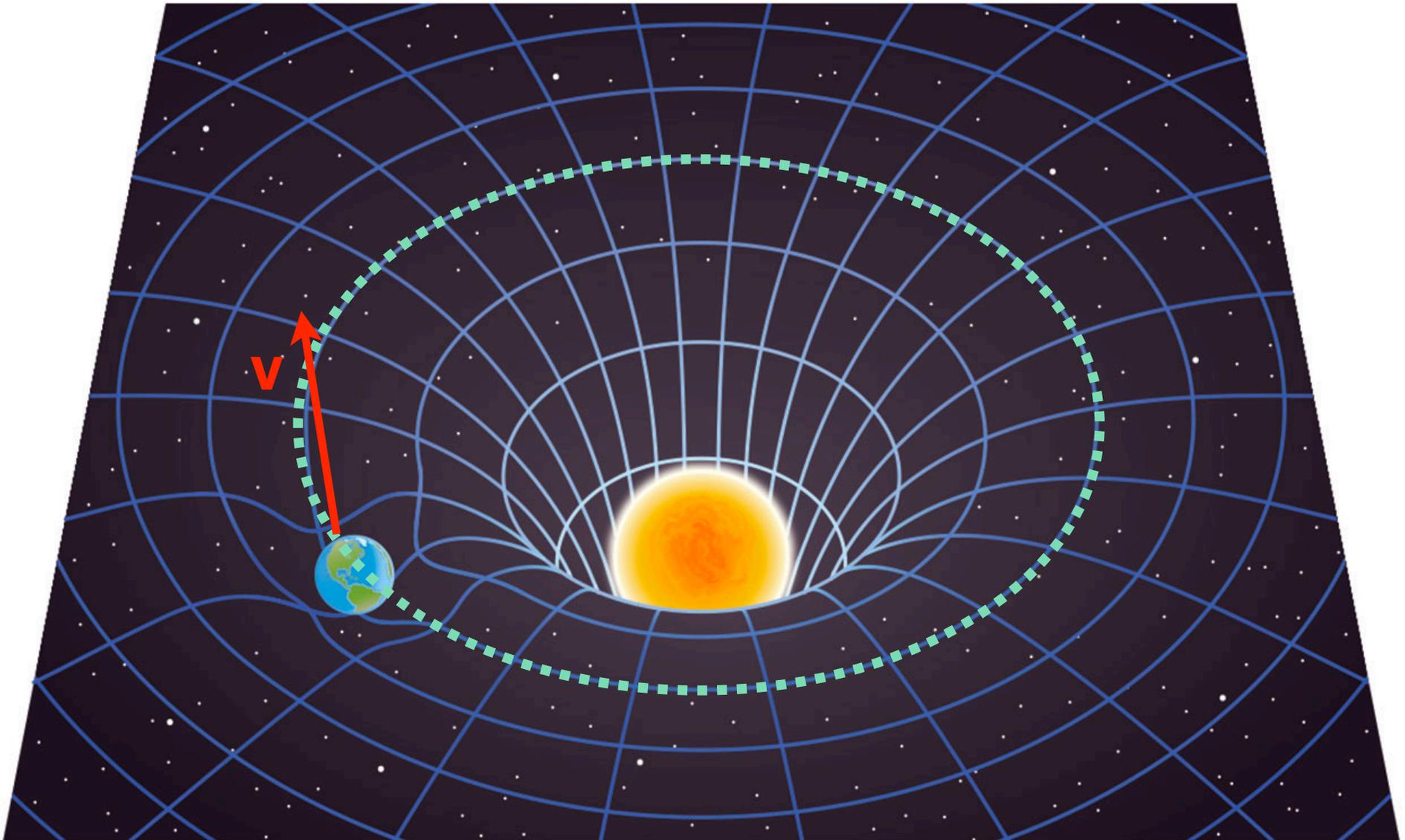
# Come fa la Terra a rimanere in orbita?

Se velocità troppo **bassa**, cade nel Sole

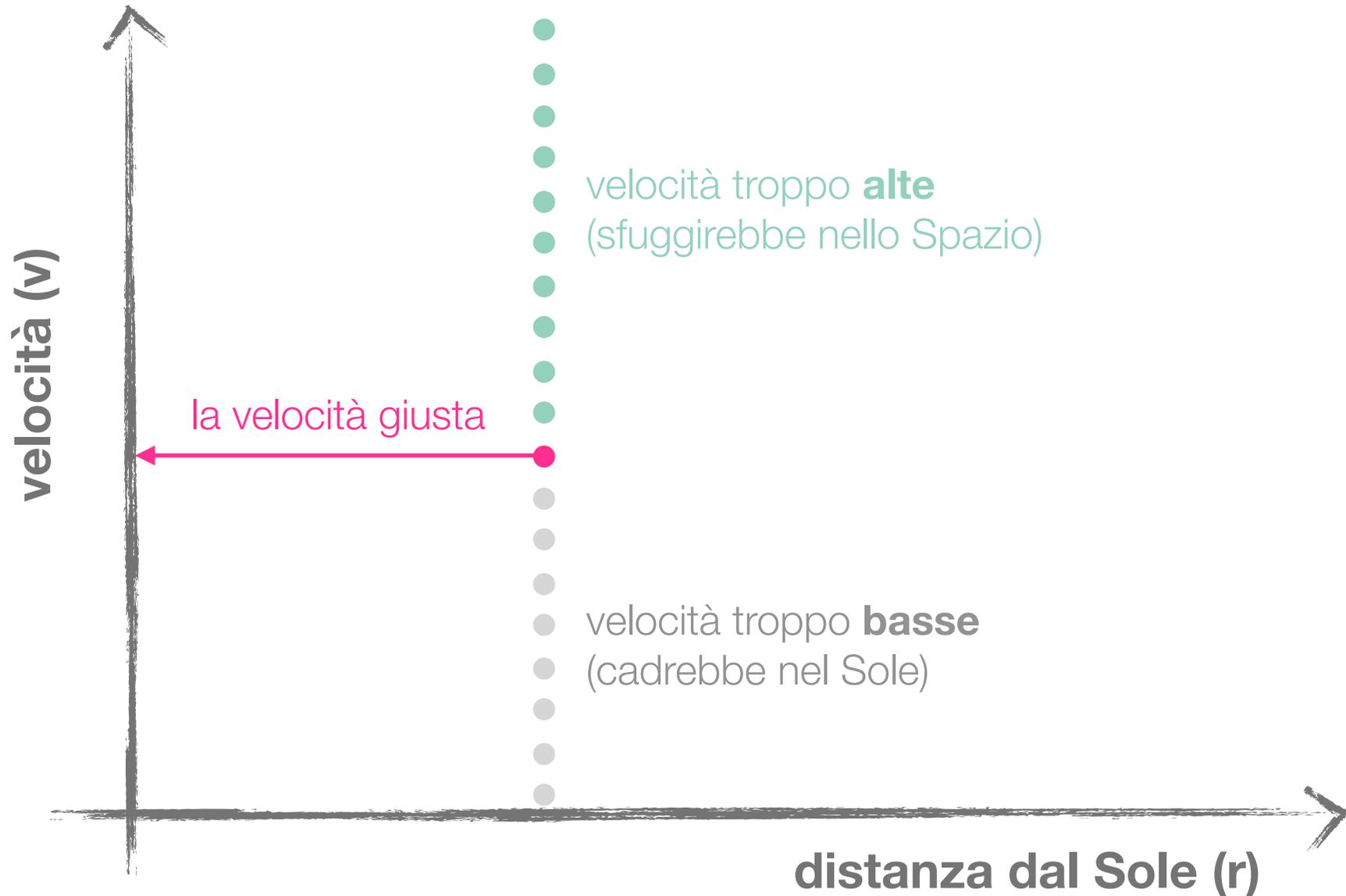


# Come fa la Terra a rimanere in orbita?

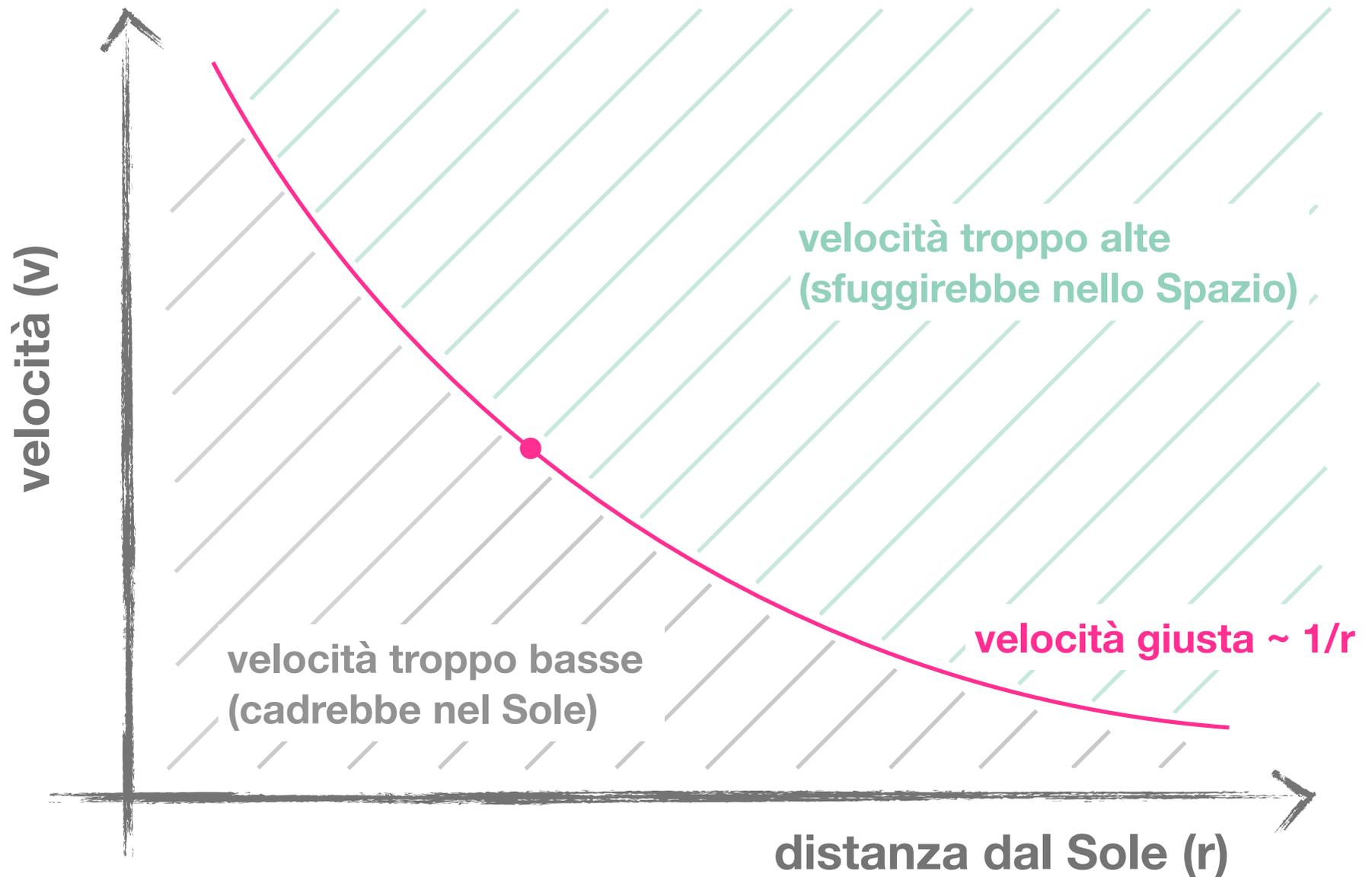
Con velocità **giusta**, la forza centrifuga bilancia l'attrazione di gravità



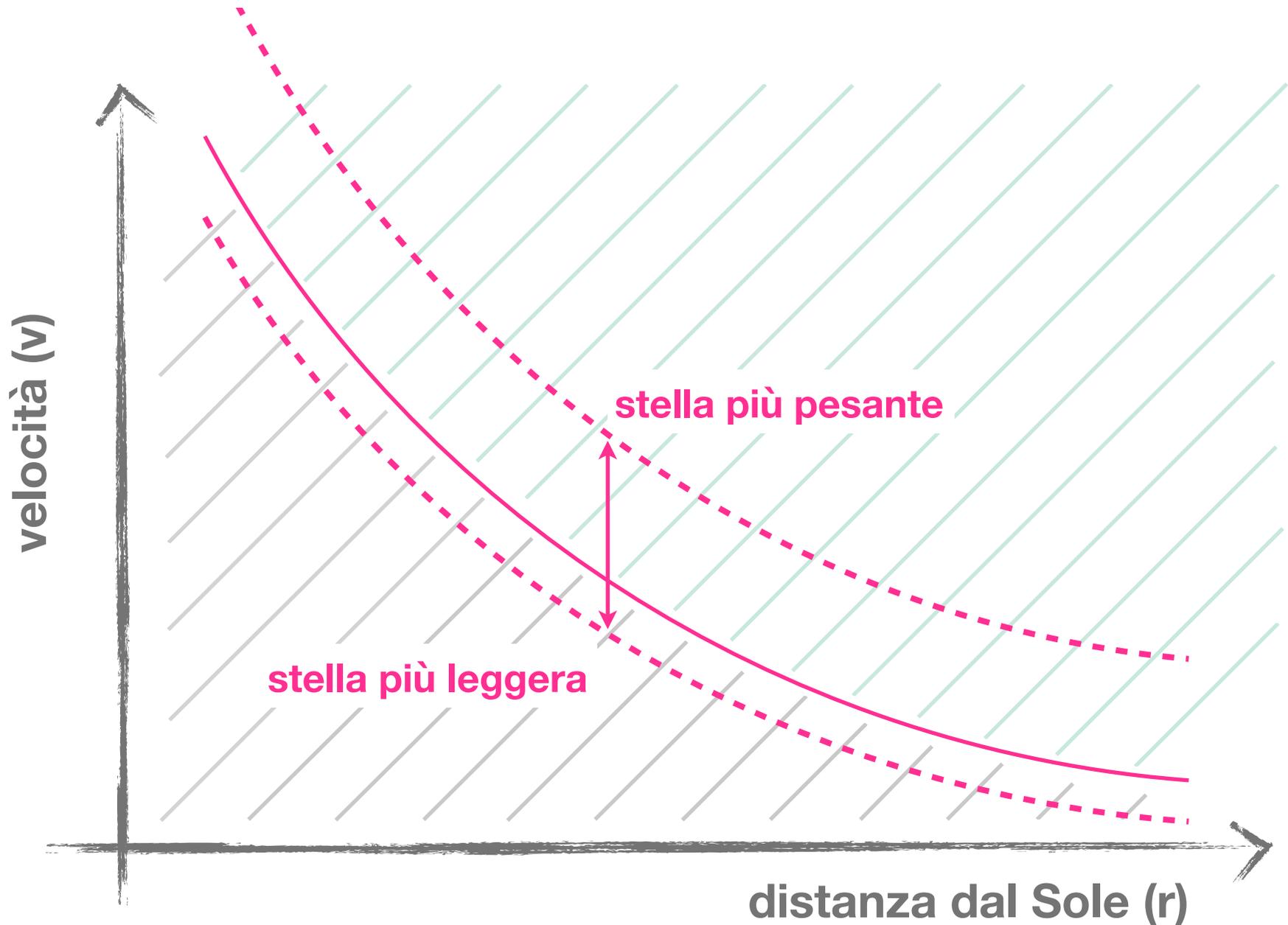
C'è solo **una** velocità giusta, a ogni distanza



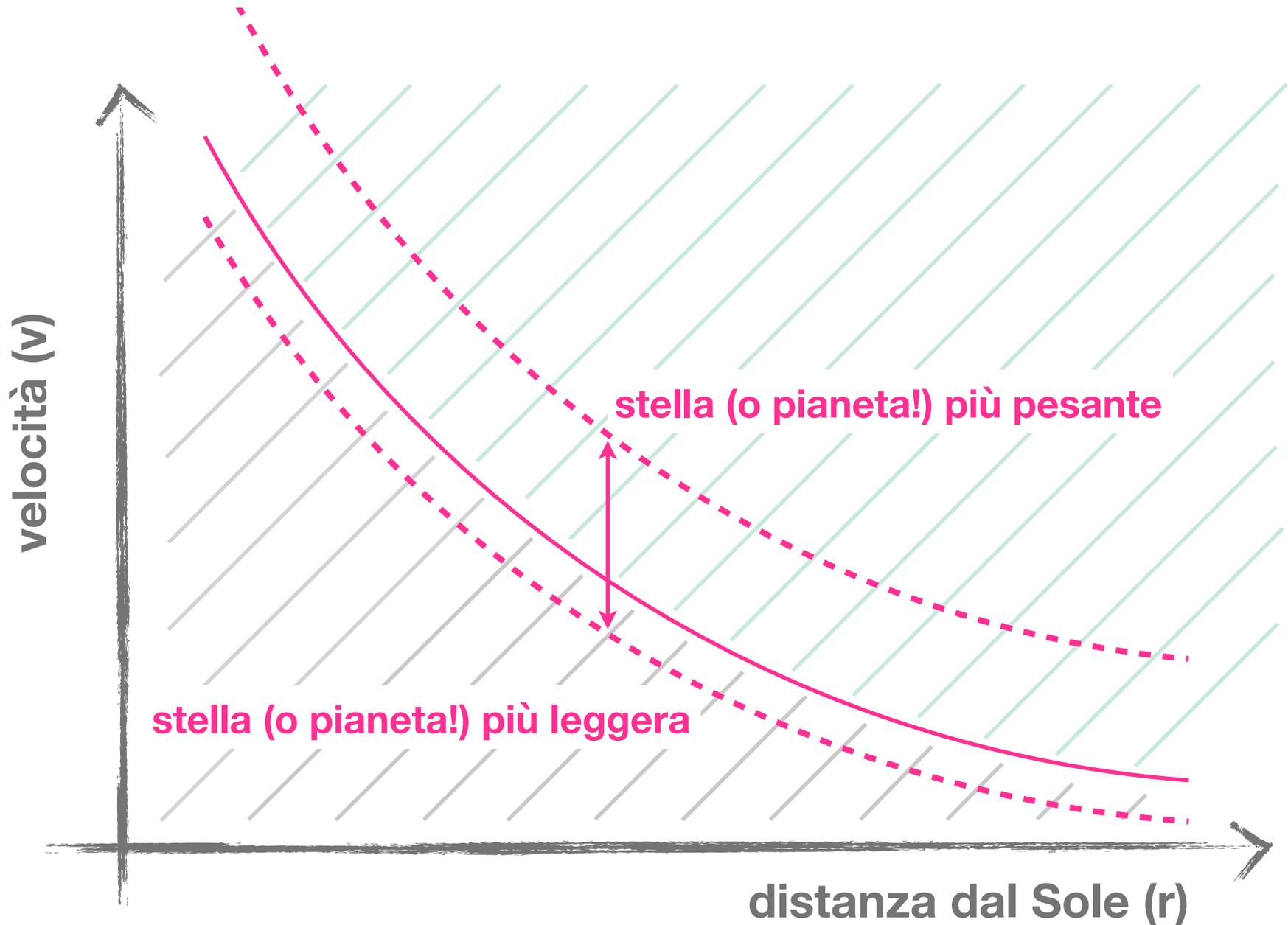
C'è solo **una** velocità giusta, a ogni distanza



C'è solo **una** velocità giusta, a ogni distanza



C'è solo **una** velocità giusta, a ogni distanza



Ogni pianeta ha la velocità giusta (dati M e r)



Chi orbita più veloce fra Giove e Saturno?

$$M(\text{Giove}) > M(\text{Saturno})$$

$$r(\text{Giove}) < r(\text{Saturno})$$

Ogni pianeta ha la velocità giusta (dati M e r)



Chi orbita più veloce fra Giove e Saturno?

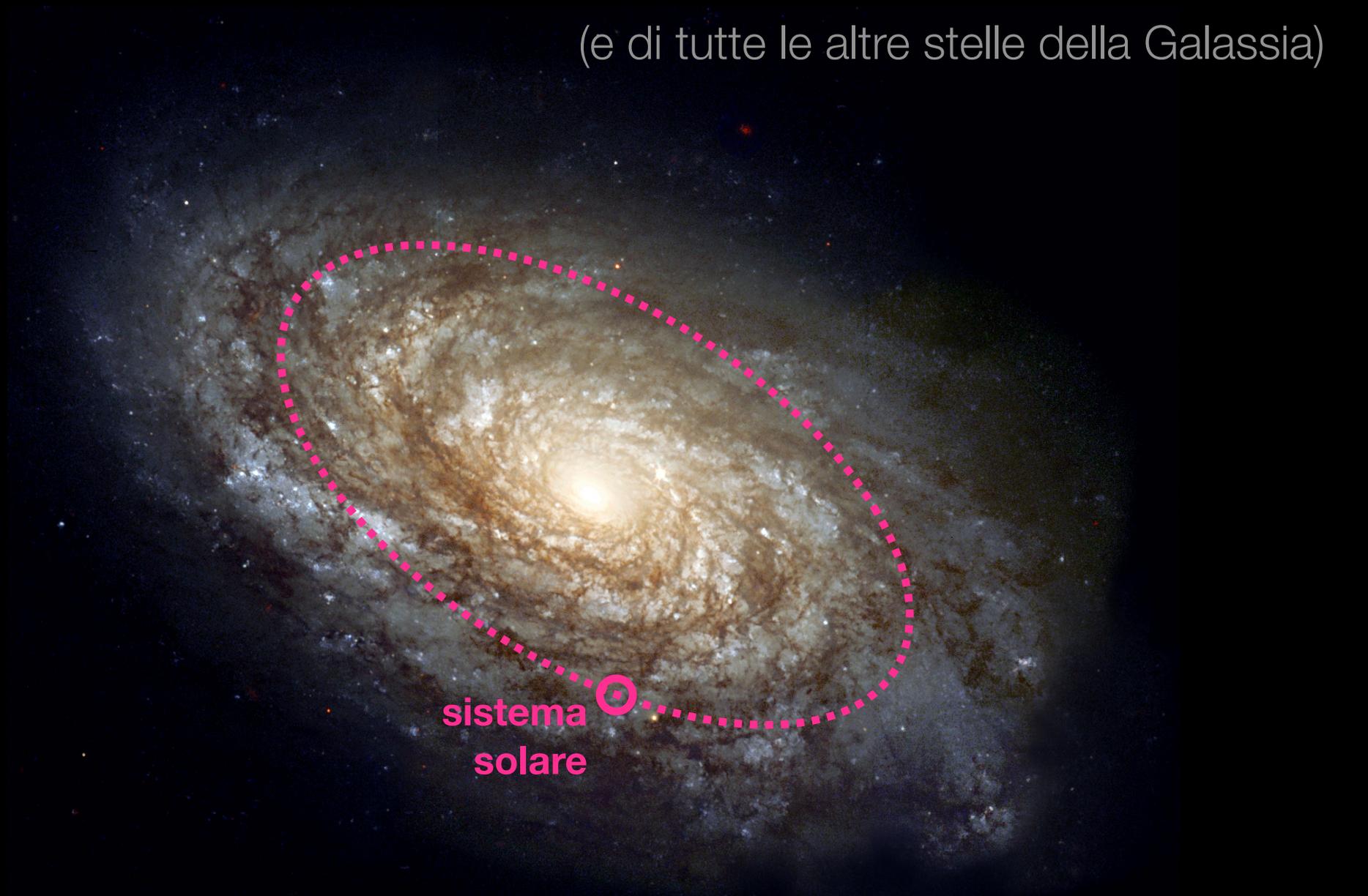
$$M(\text{Giove}) > M(\text{Saturno})$$

$$r(\text{Giove}) < r(\text{Saturno})$$

Risposta: Giove

# Lo stesso vale per l'orbita del sistema solare

(e di tutte le altre stelle della Galassia)

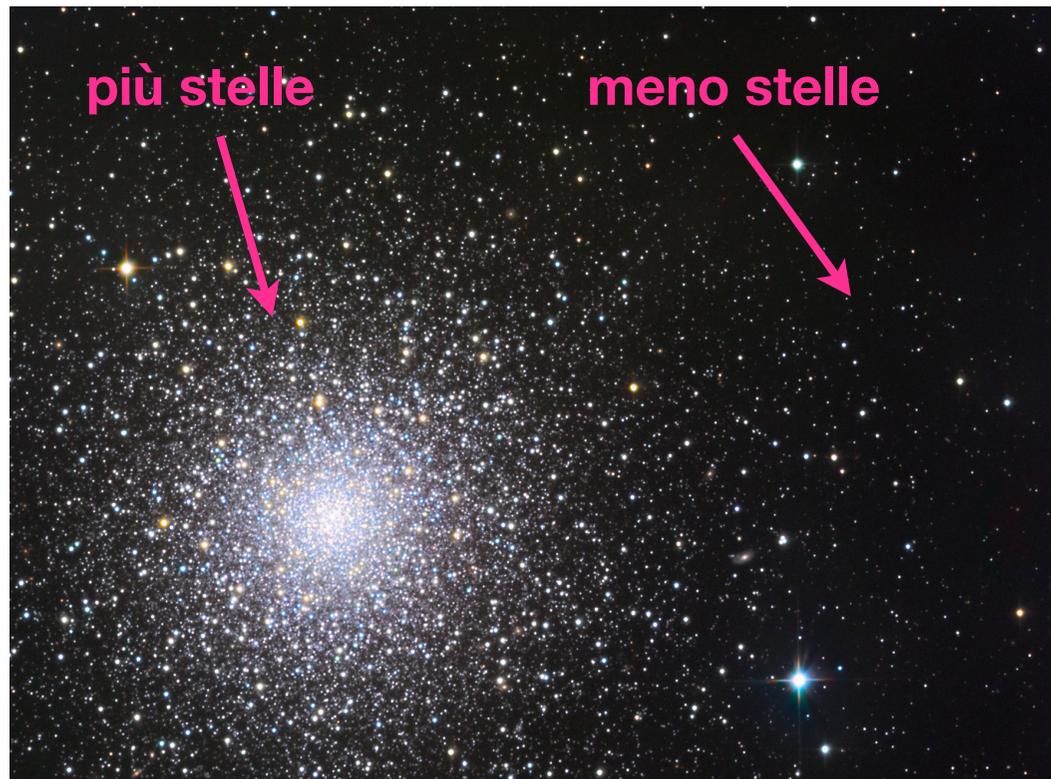


c'è però una differenza importante...

# Di cosa sono fatte le galassie?

Per quel che ne sappiamo noi: **stelle**, **gas** e **pianeti**

Le stelle sono **luminose**: sappiamo dove stanno

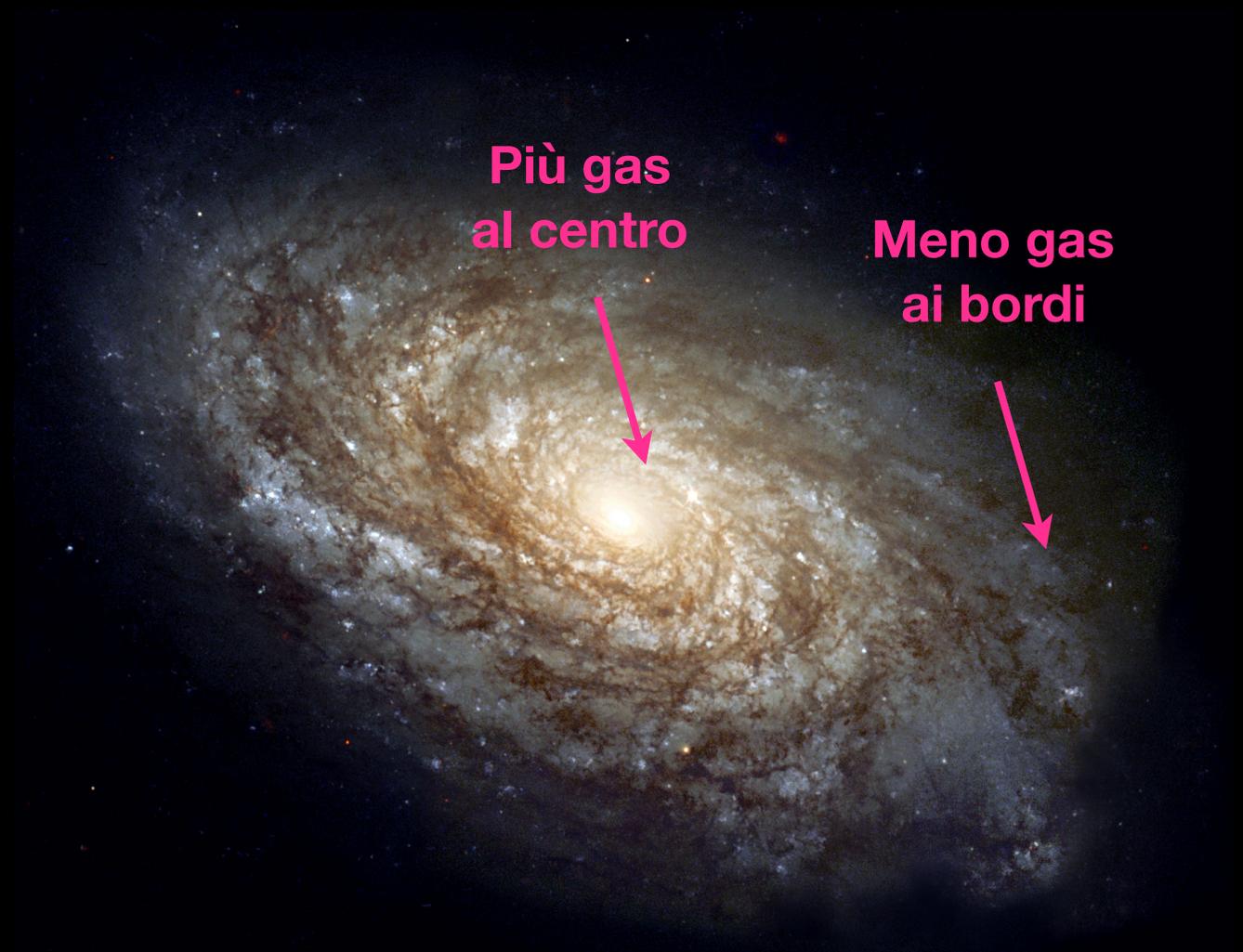


# Anche il gas sappiamo localizzarlo

**Si vede anche 'a occhio':  
riflette la luce stellare**

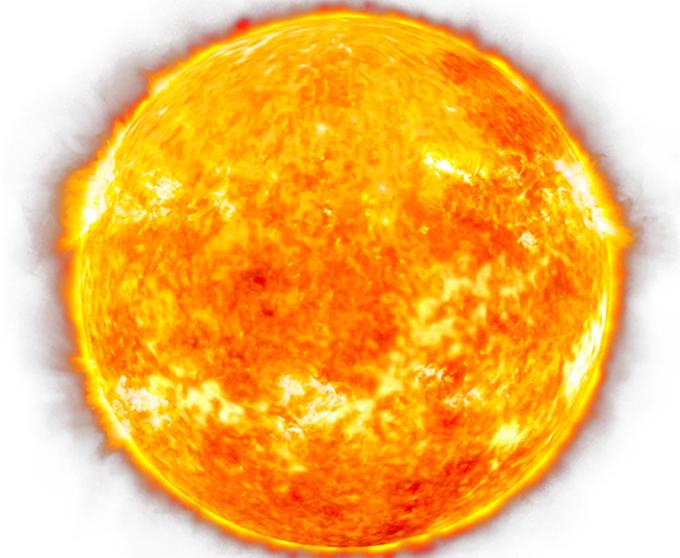
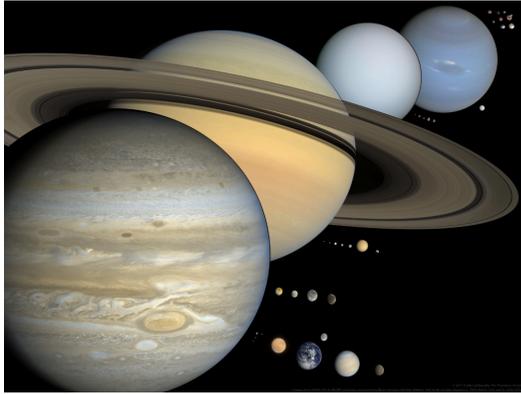
**Misure più precise  
sono fatte con  
le microonde**

**La sua distribuzione  
'segue' le stelle**



**stelle+gas = materia visibile**

# Possiamo tranquillamente dimenticarci dei pianeti



<b>Pianeta</b>	<b>M (in masse terrestri)</b>
Mercurio	0.055
Venere	0.815
Terra	1
Marte	0.107
Giove	318
Saturno	95.2
Urano	14.5
Nettuno	17.1
<b>M (totale)</b>	<b>446.8</b>

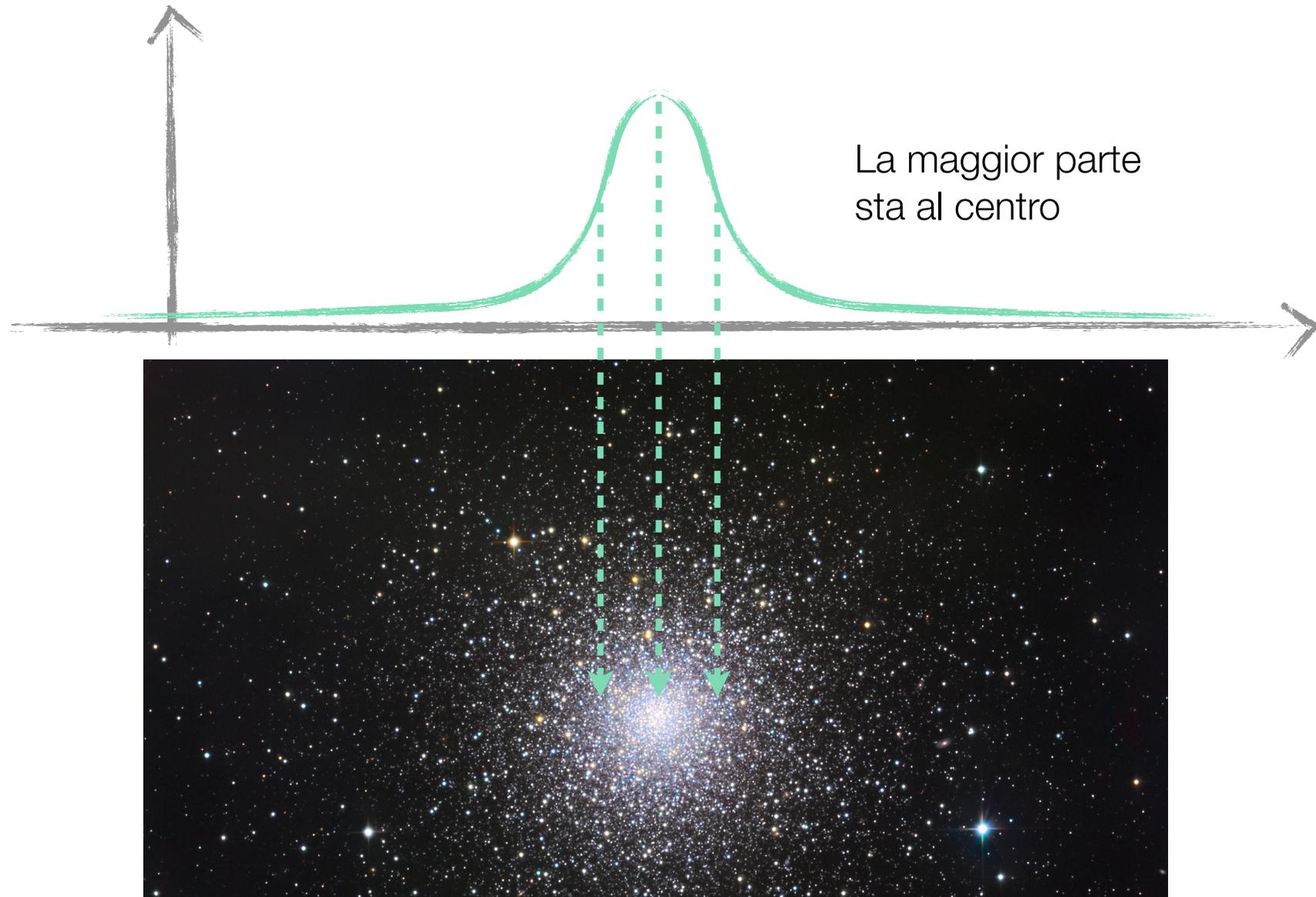
**M(Sole) = 330000**

Quindi il 99.9% della massa del sistema solare è il Sole

Quindi i pianeti **non contano** nella massa della galassia

# Come è distribuita la materia visibile nelle galassie

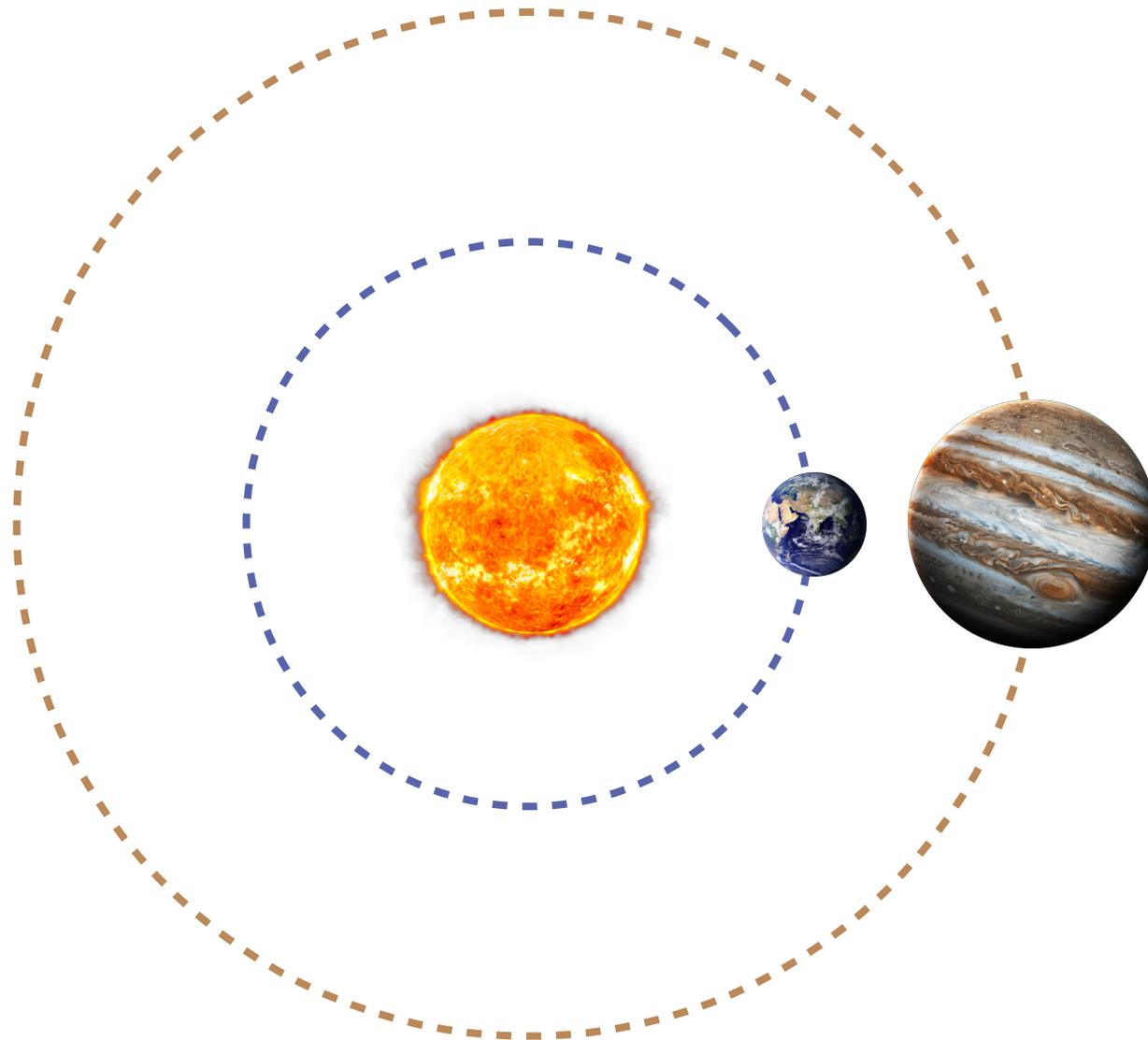
Una distribuzione fortemente **non** uniforme



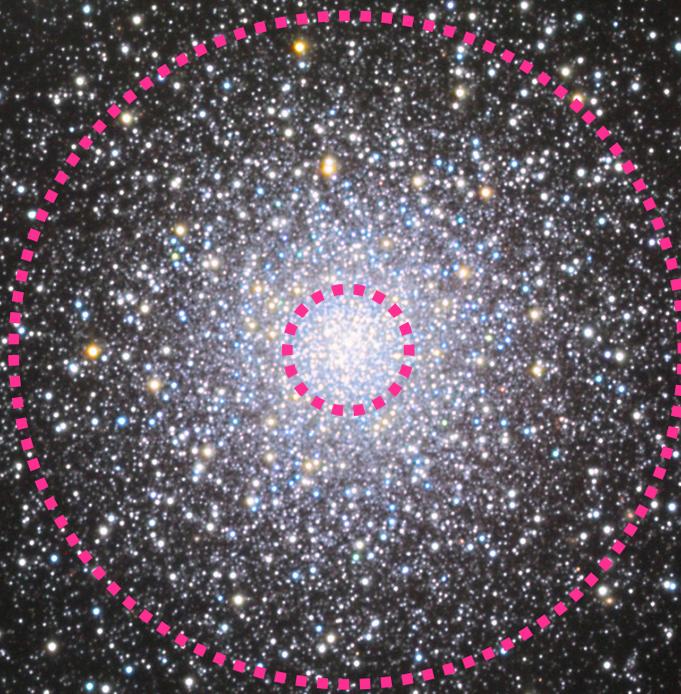
# Quindi non è come il sistema solare

Dove pianeti con orbite diverse orbitano attorno alla stessa massa

(il Sole)

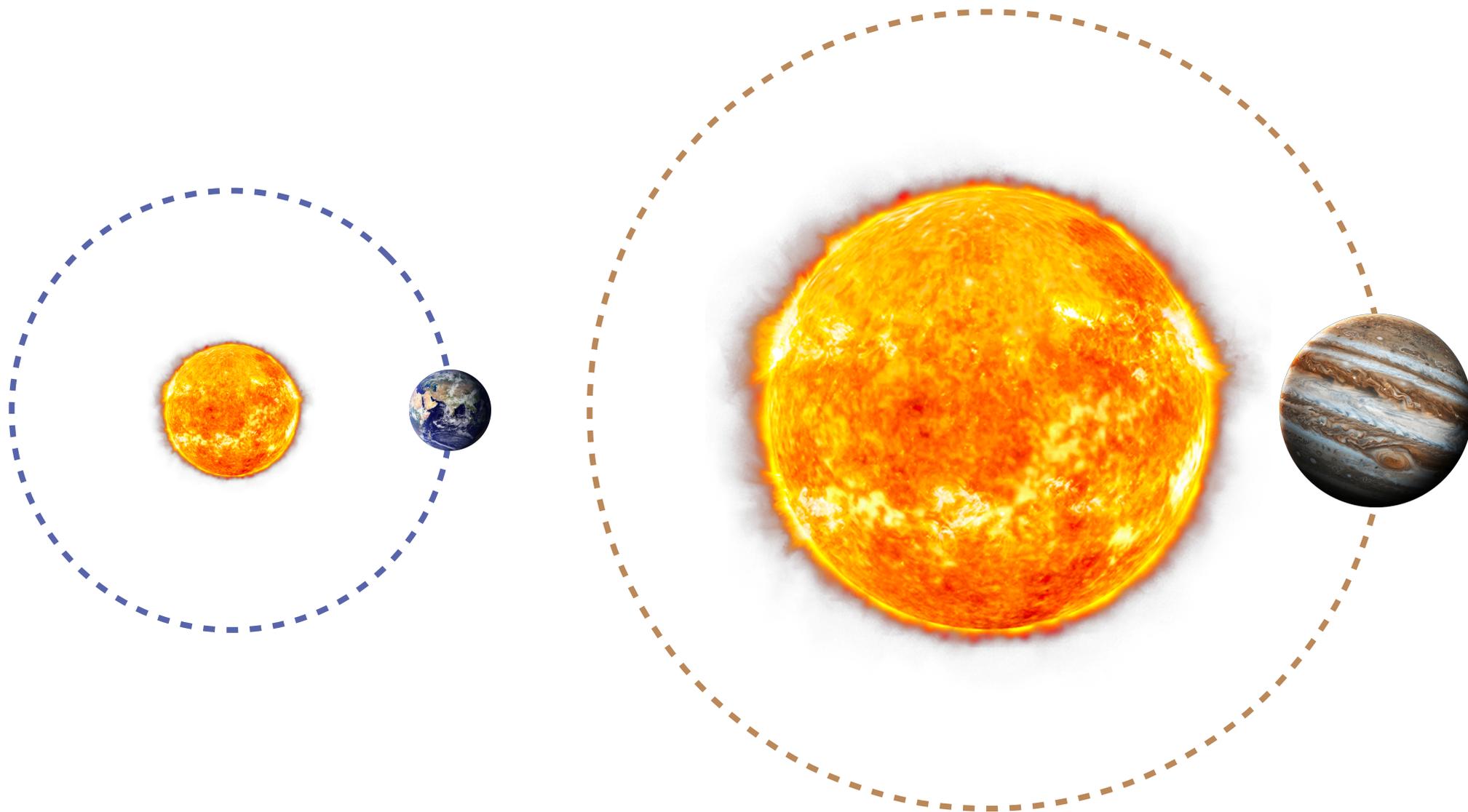


Nelle galassie la distanza conta!

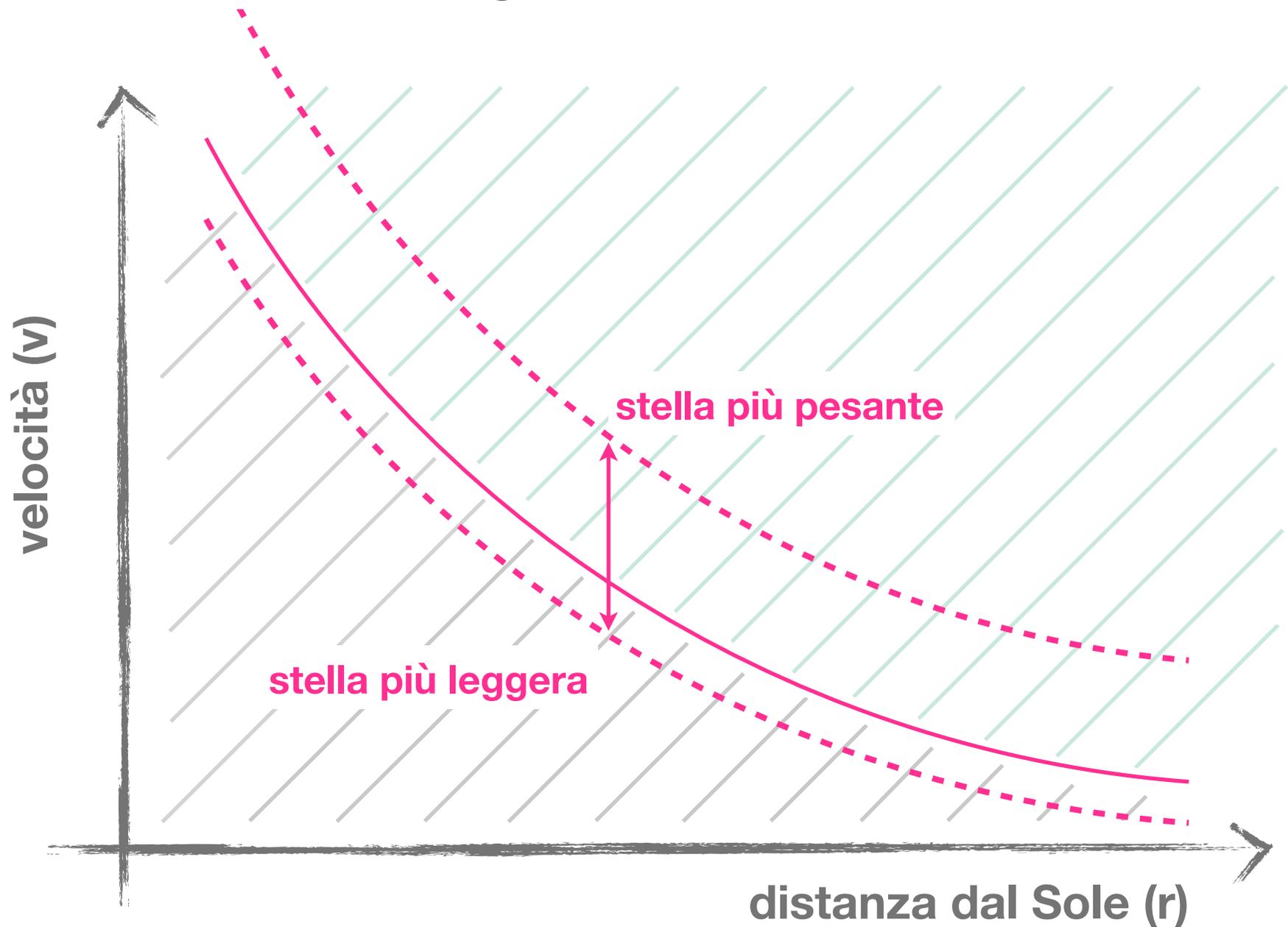


**Una stella lontana  
orbita attorno a più massa  
di una stella vicina**

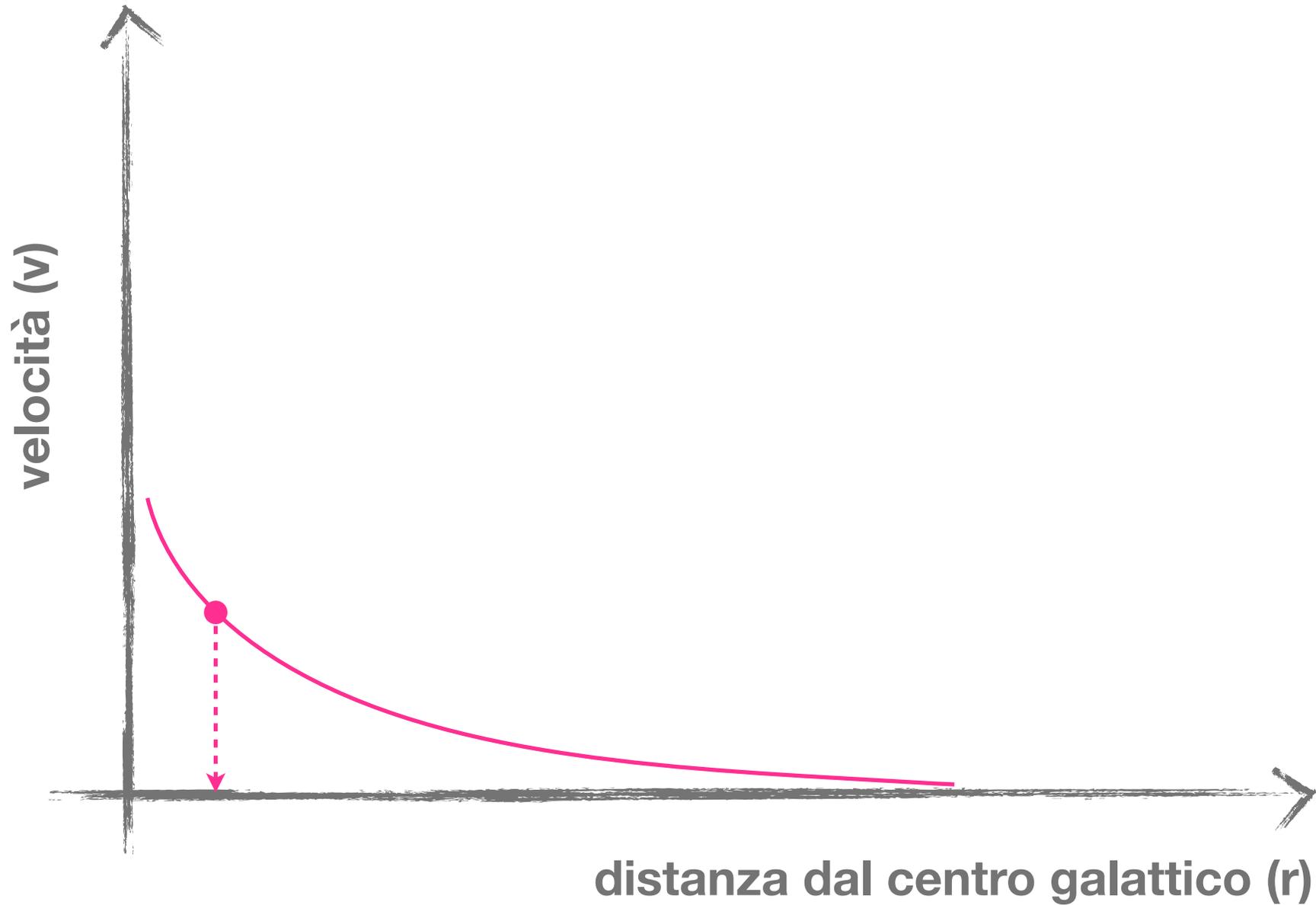
Un po' come orbitare attorno a un Sole  
con massa che aumenta con la distanza



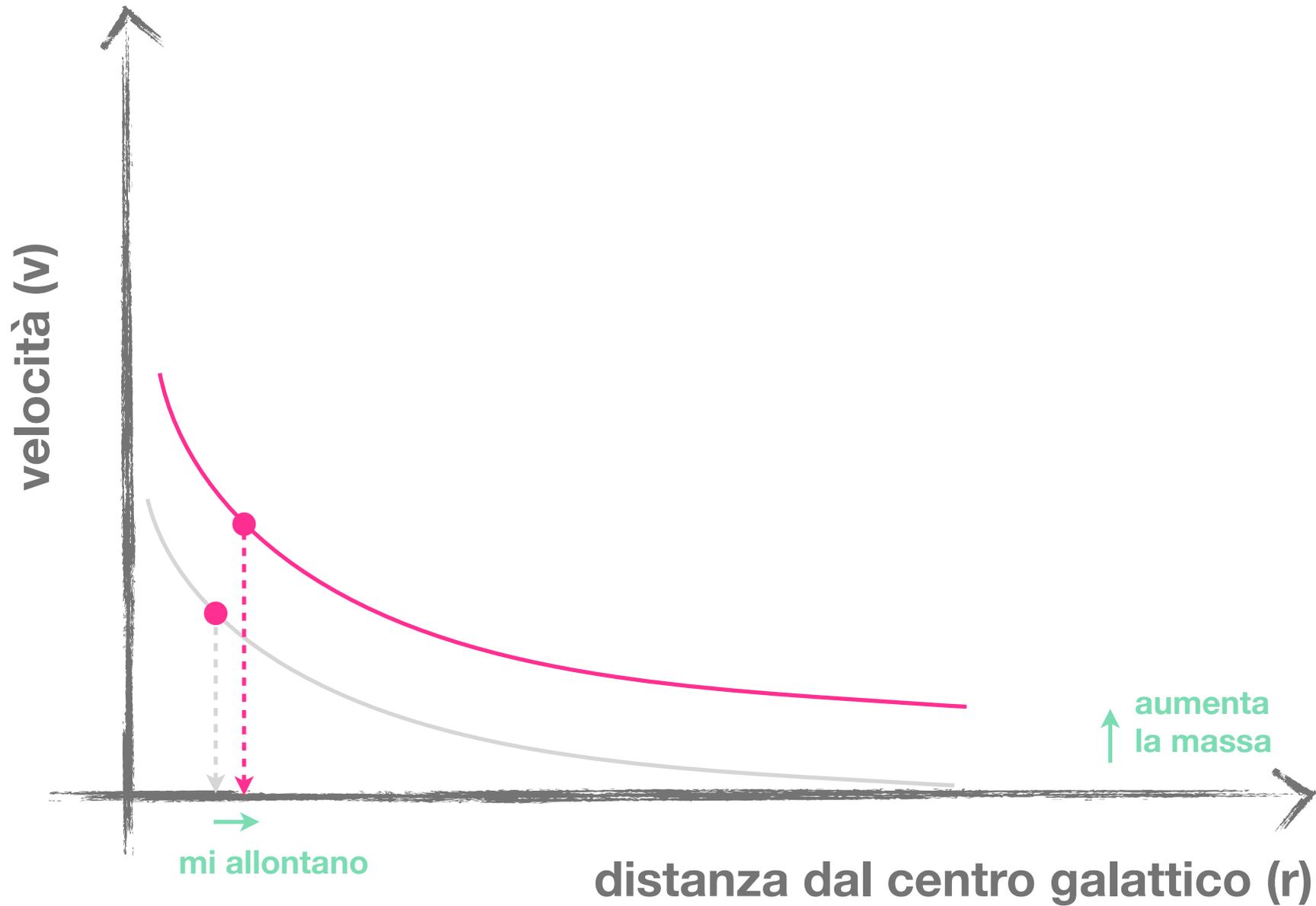
Vi ricordate questo grafico?



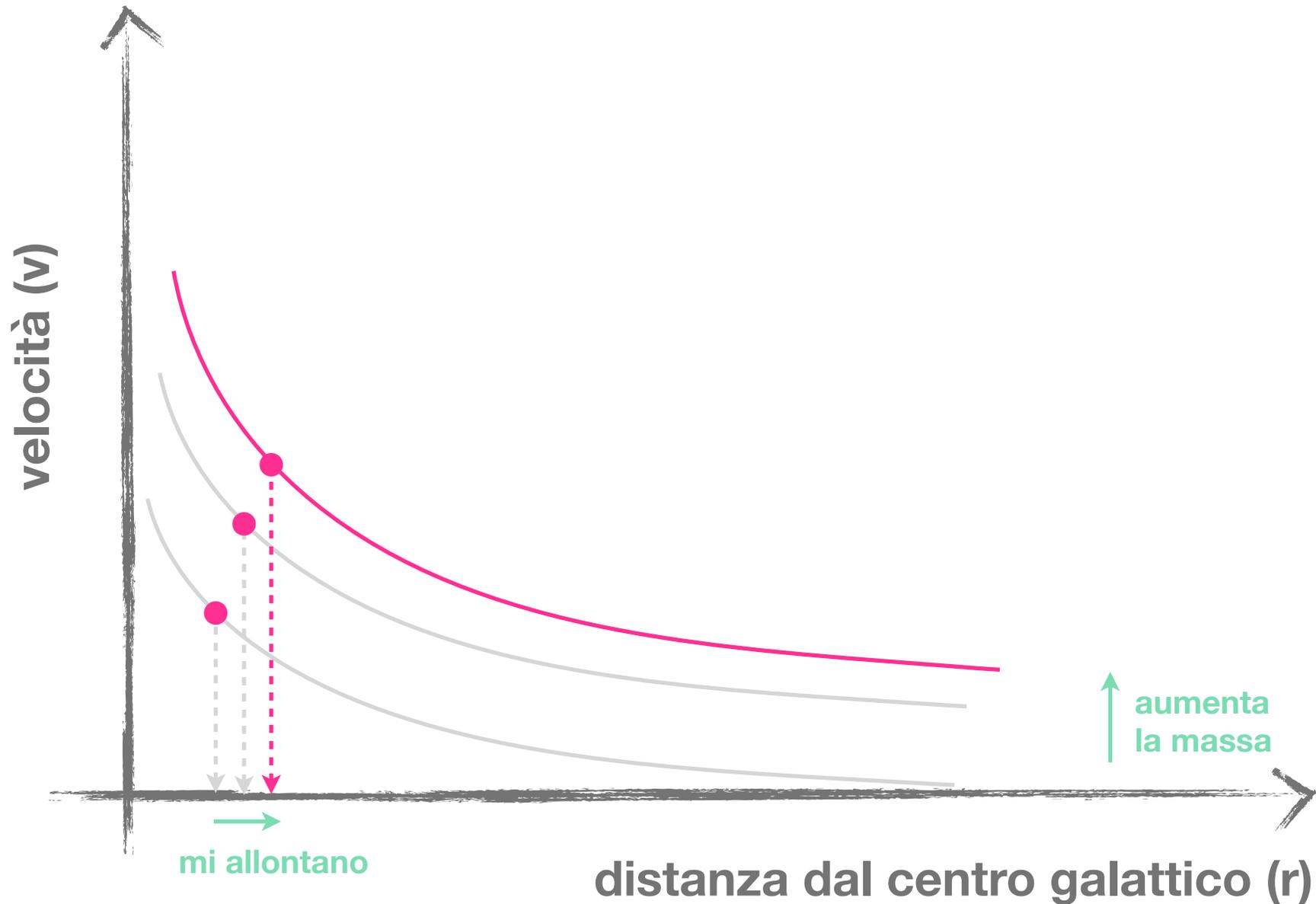
# Capiamo la velocità di rotazione nelle galassie



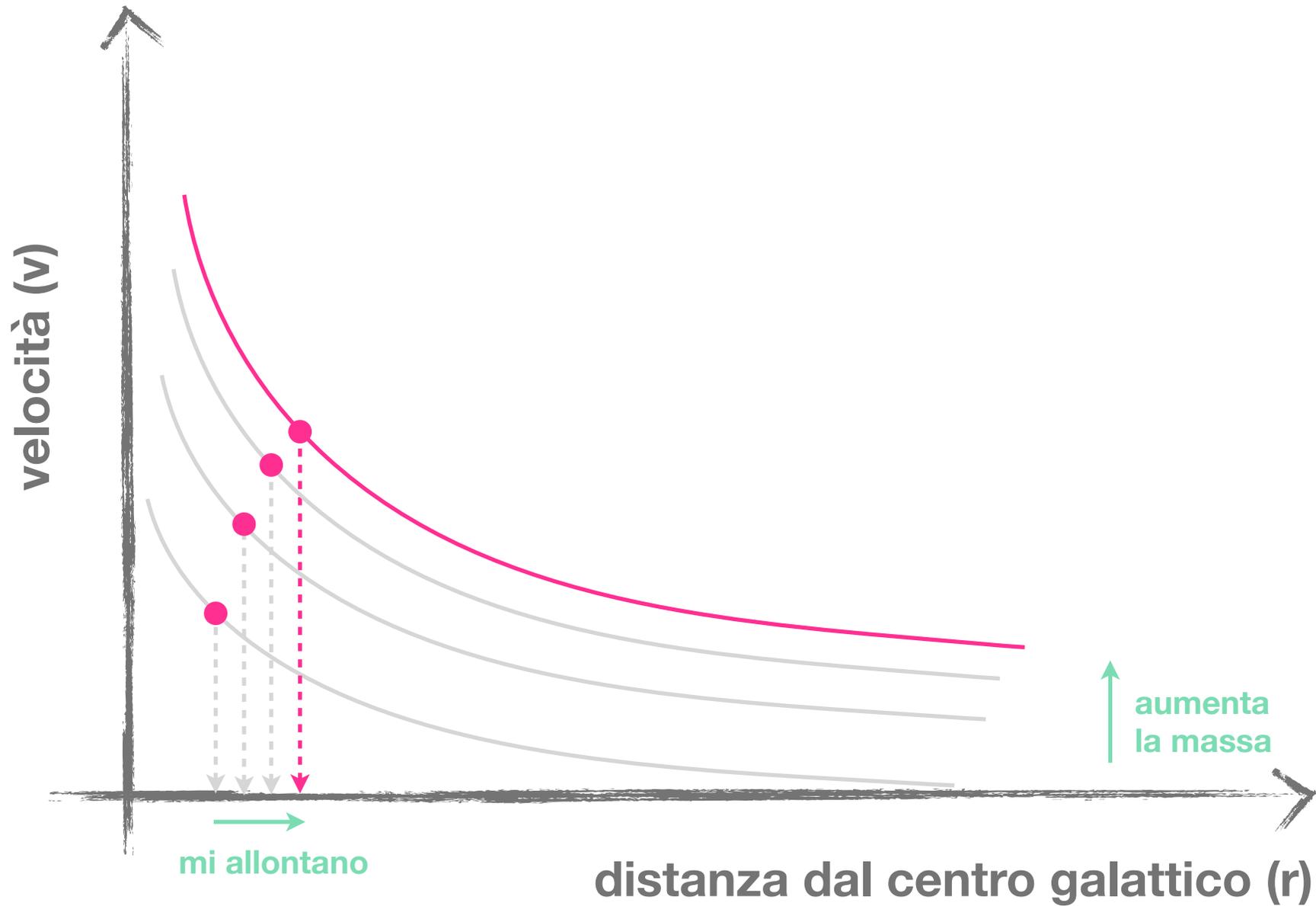
# Capiamo la velocità di rotazione nelle galassie



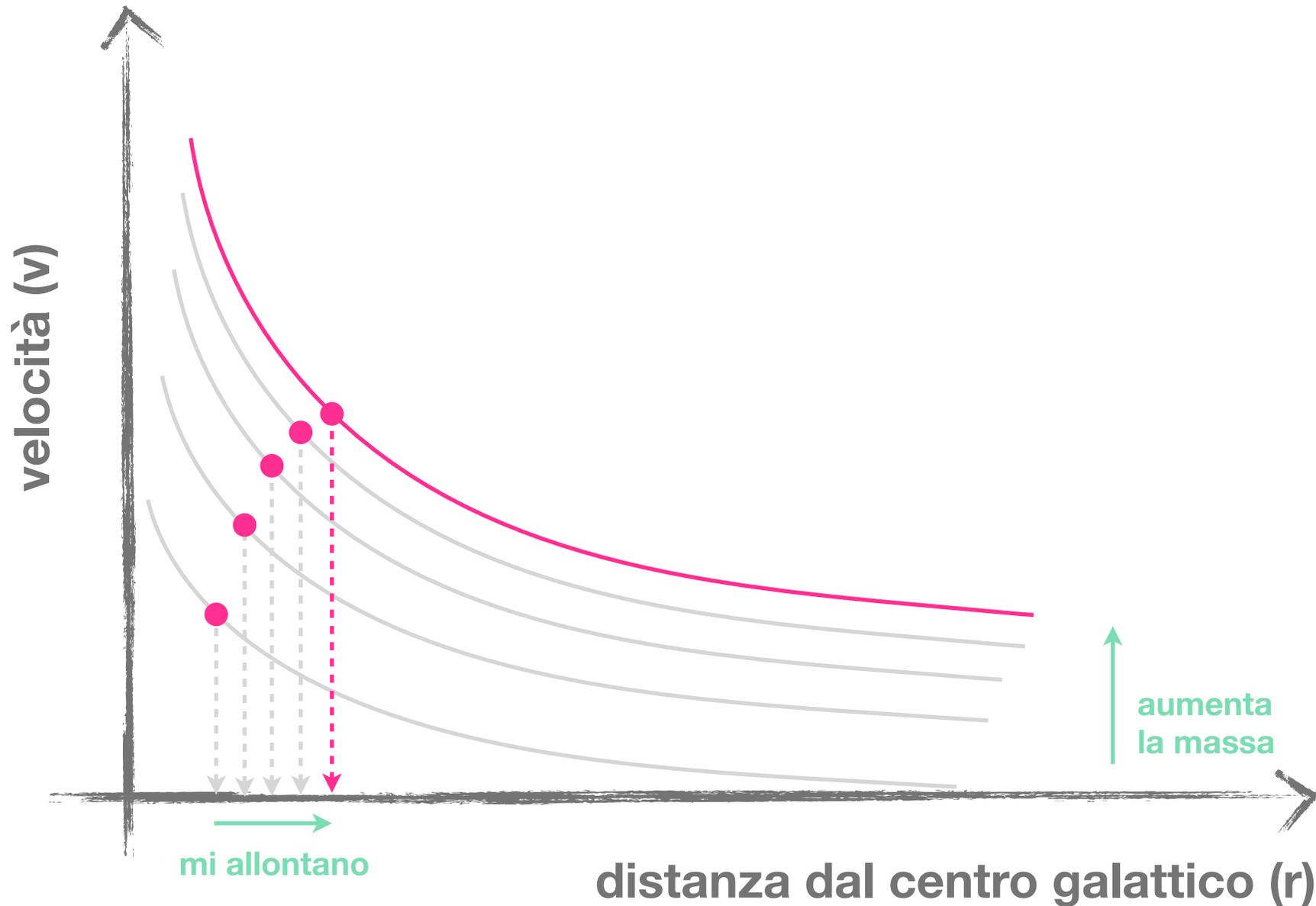
# Capiamo la velocità di rotazione nelle galassie



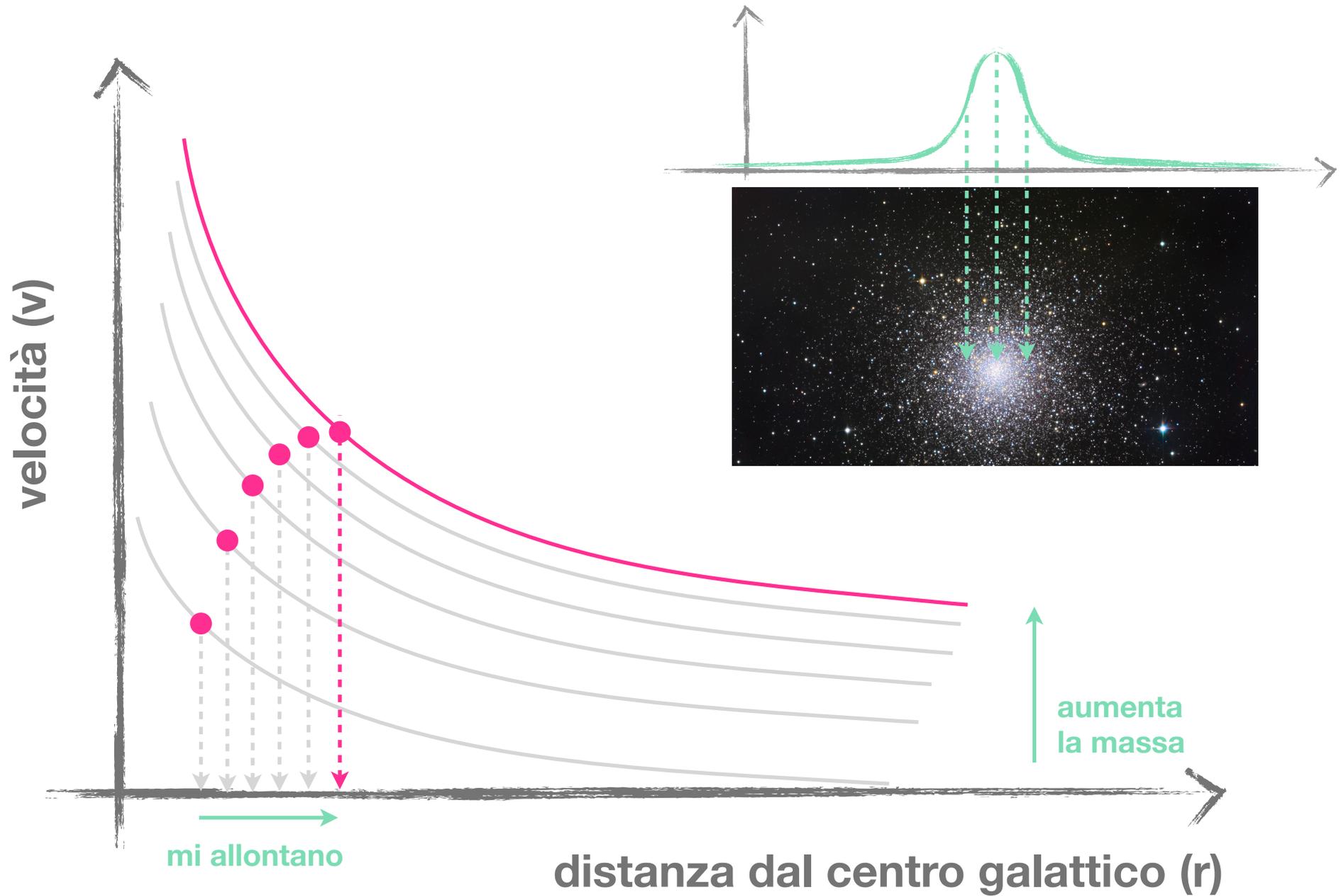
# Capiamo la velocità di rotazione nelle galassie



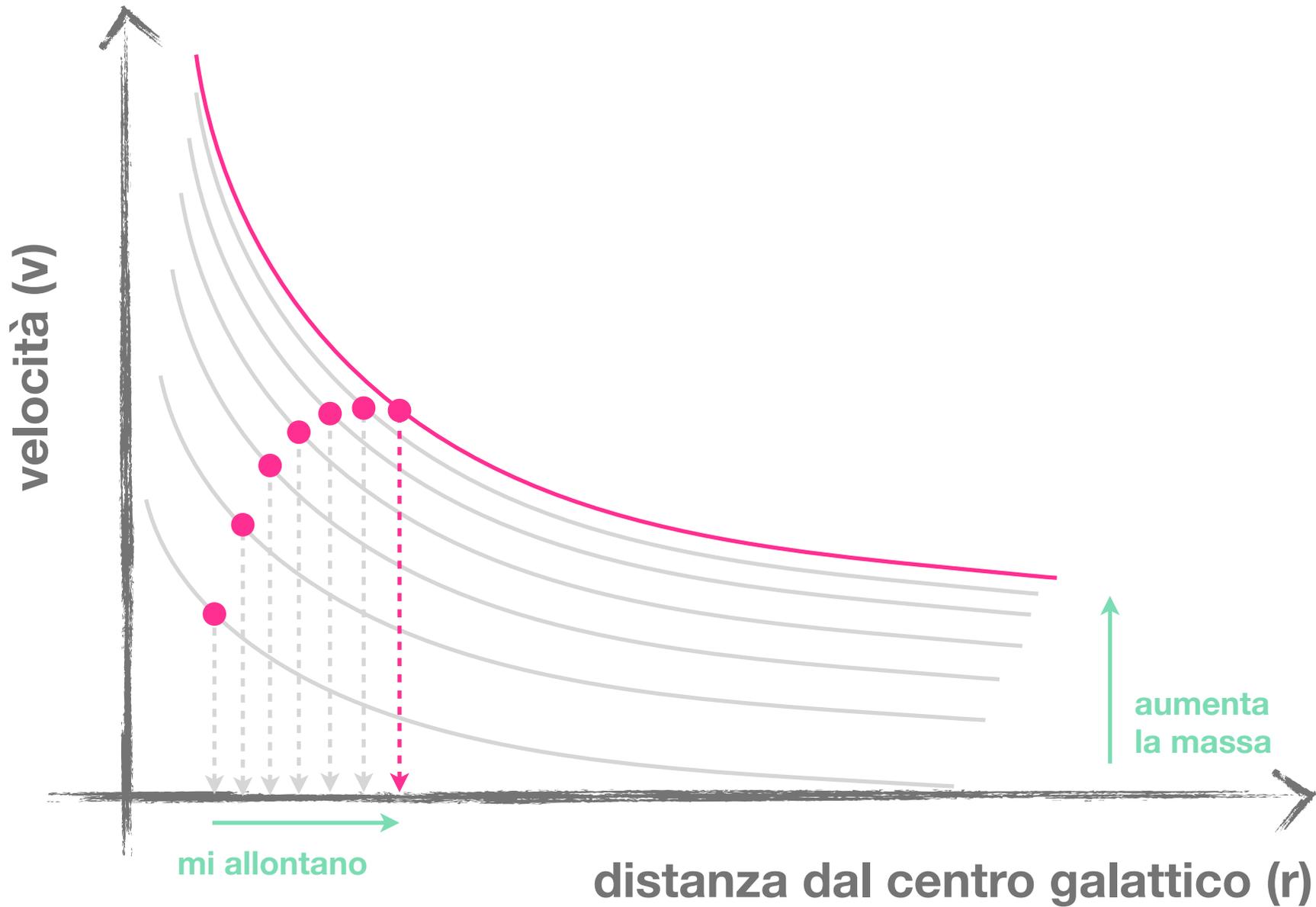
# Capiamo la velocità di rotazione nelle galassie



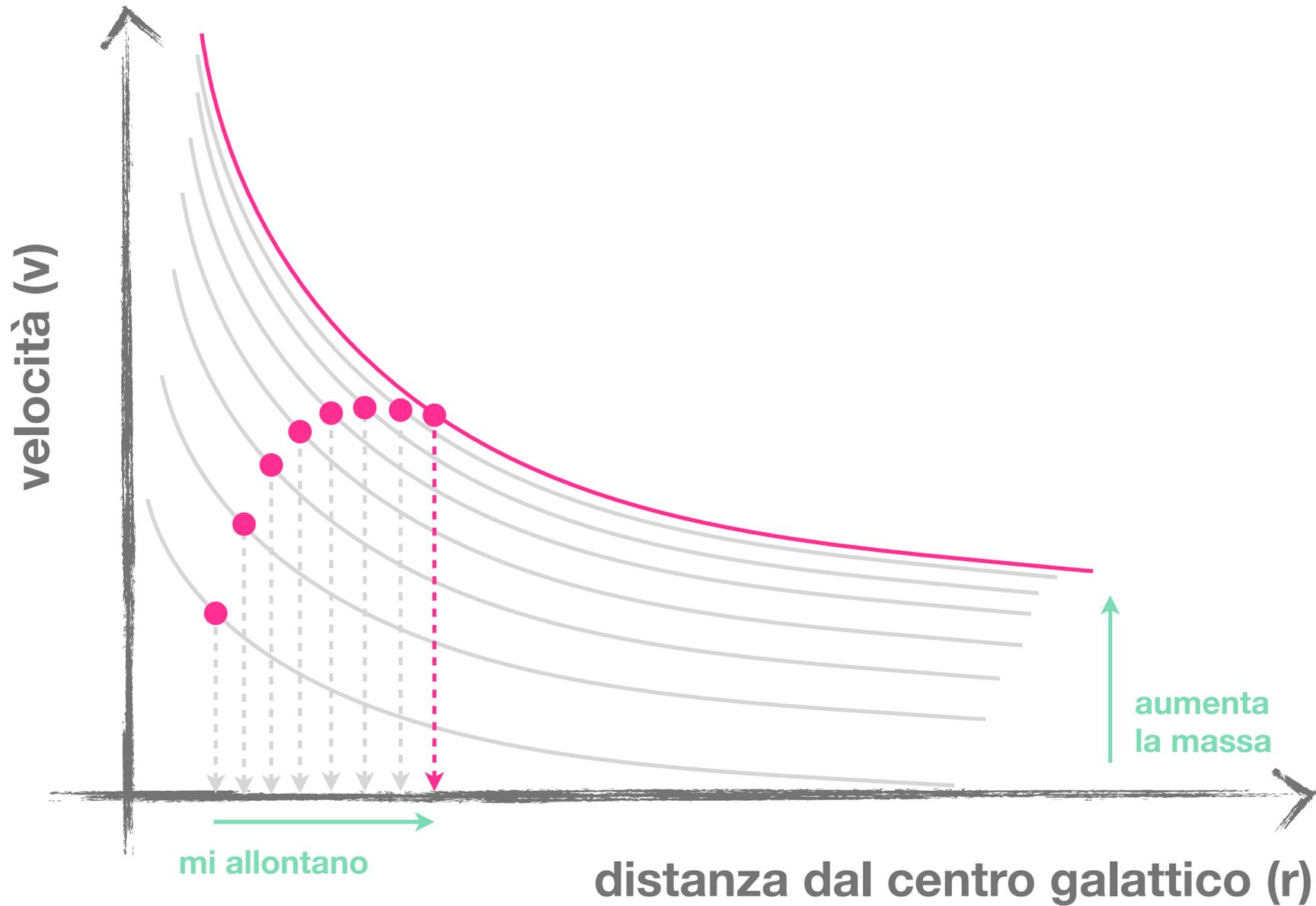
A un certo punto la massa aumenta meno



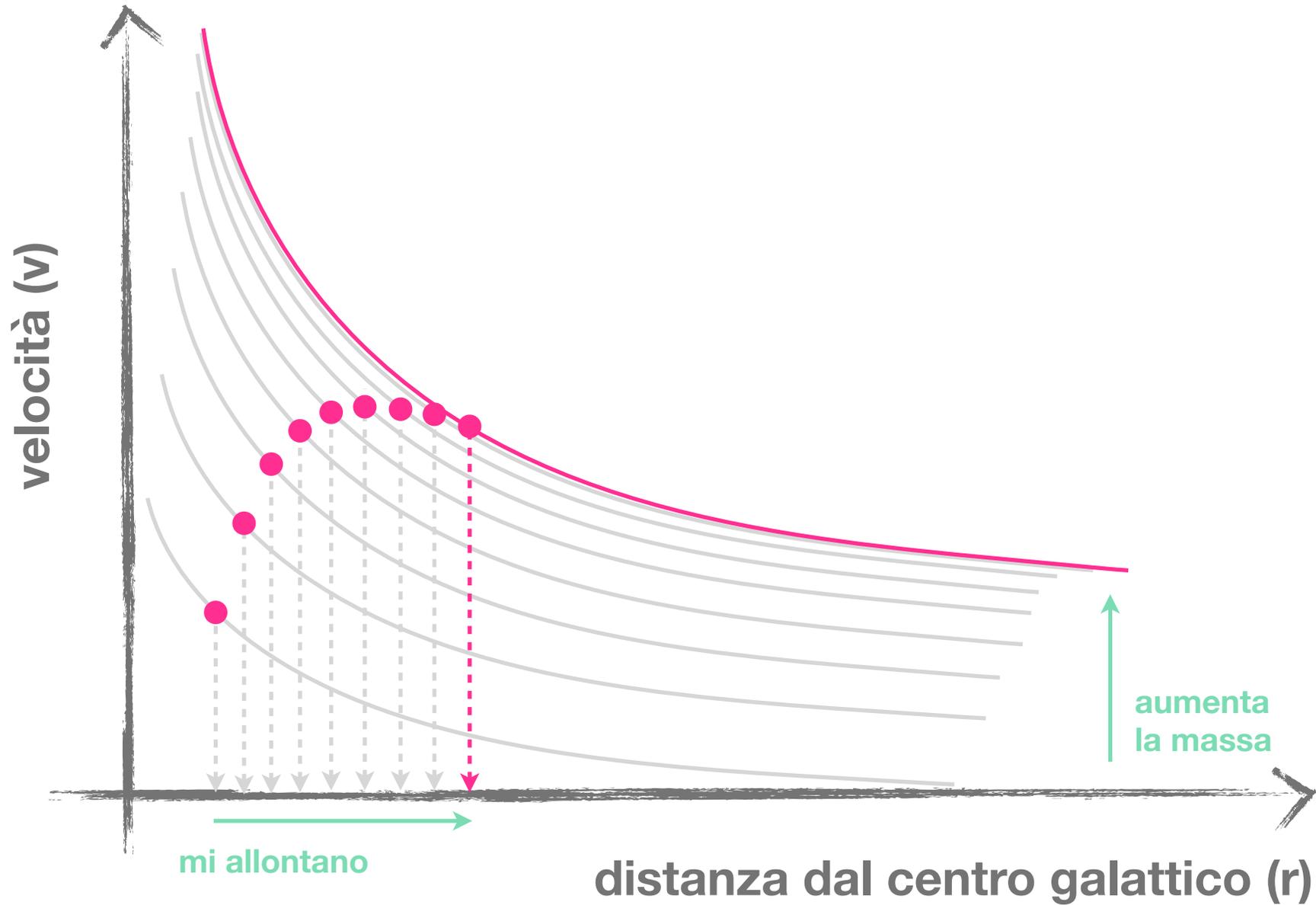
A un certo punto la massa aumenta meno



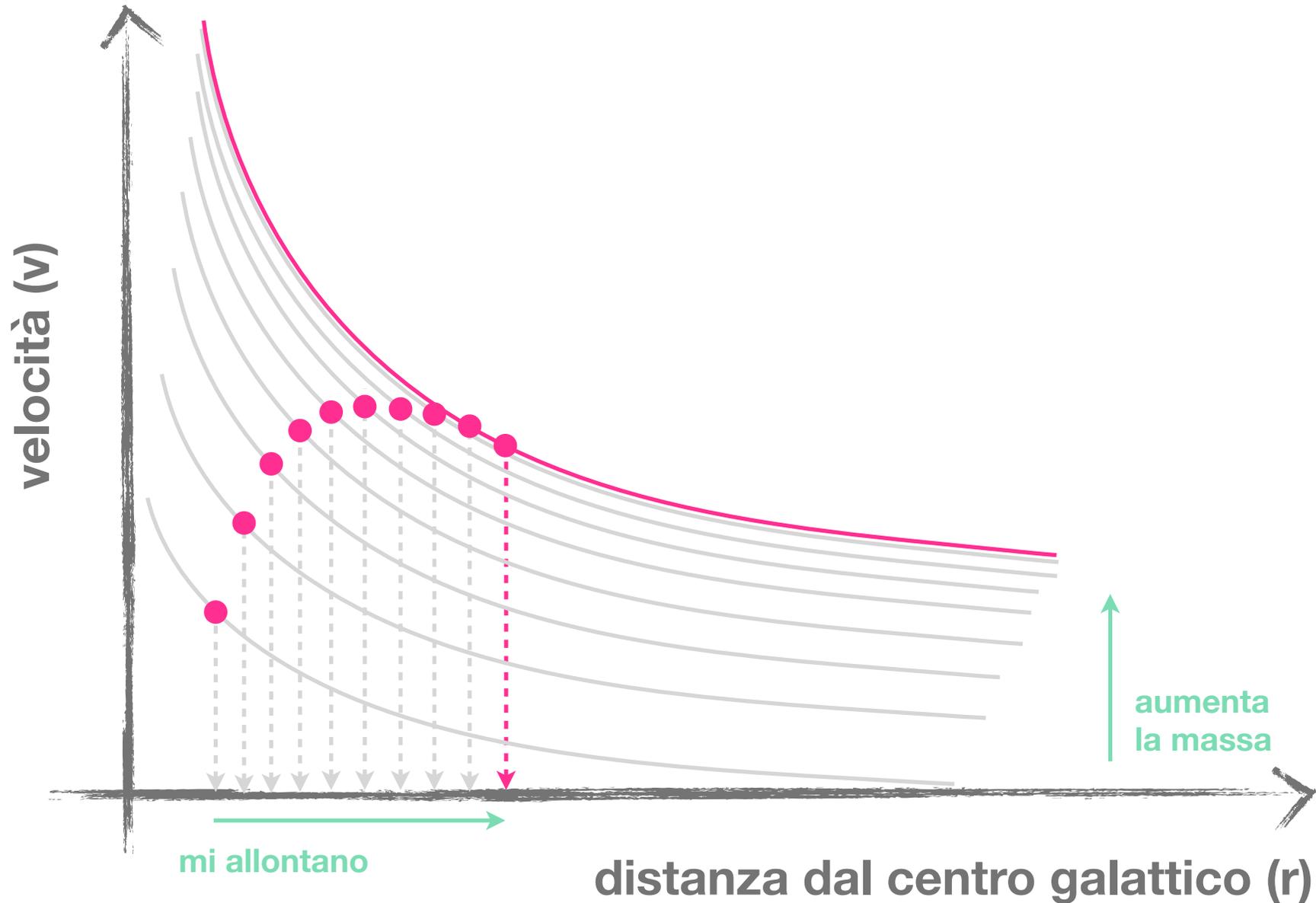
A un certo punto la massa aumenta meno



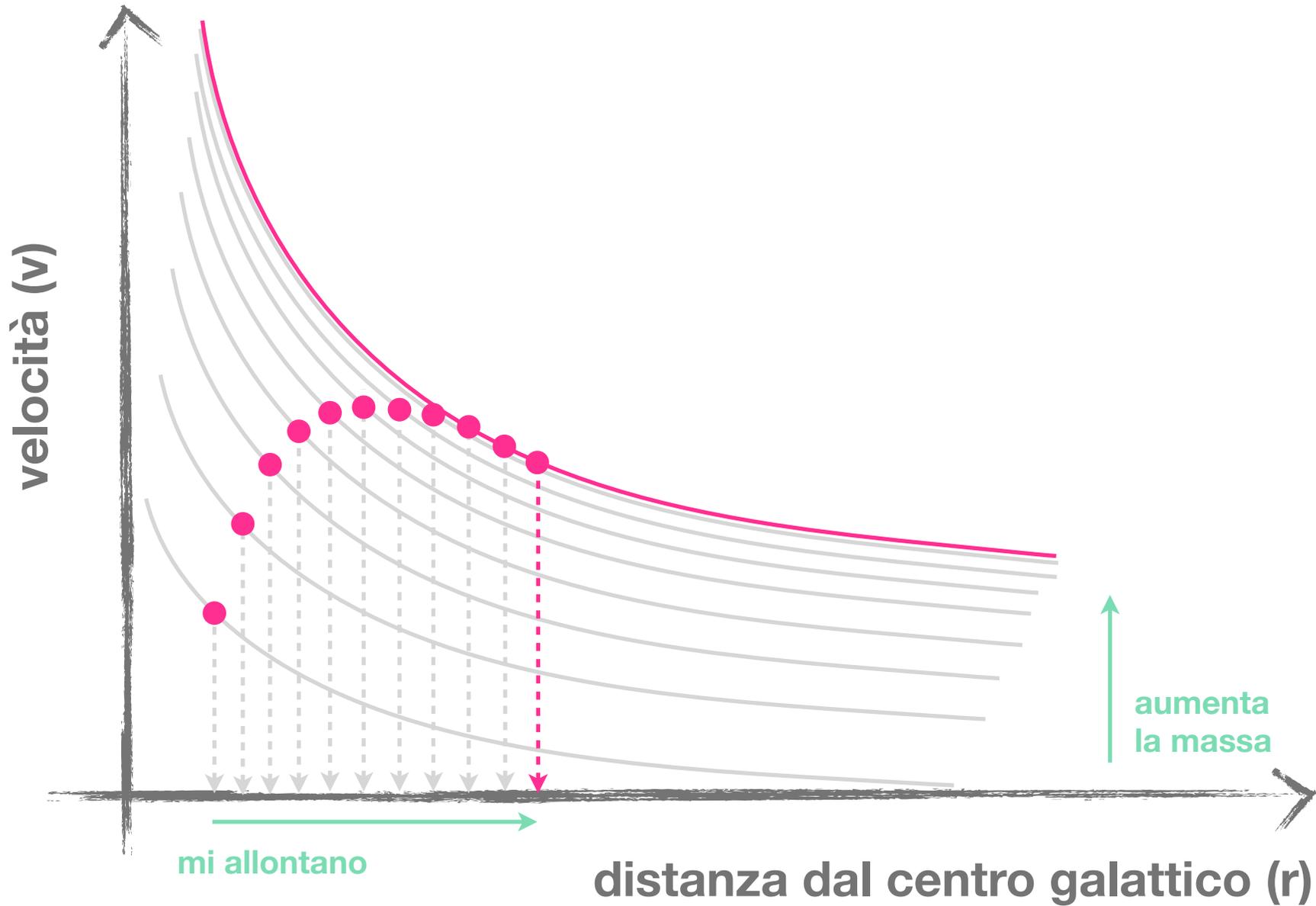
Fino al punto in cui non aumenta quasi più



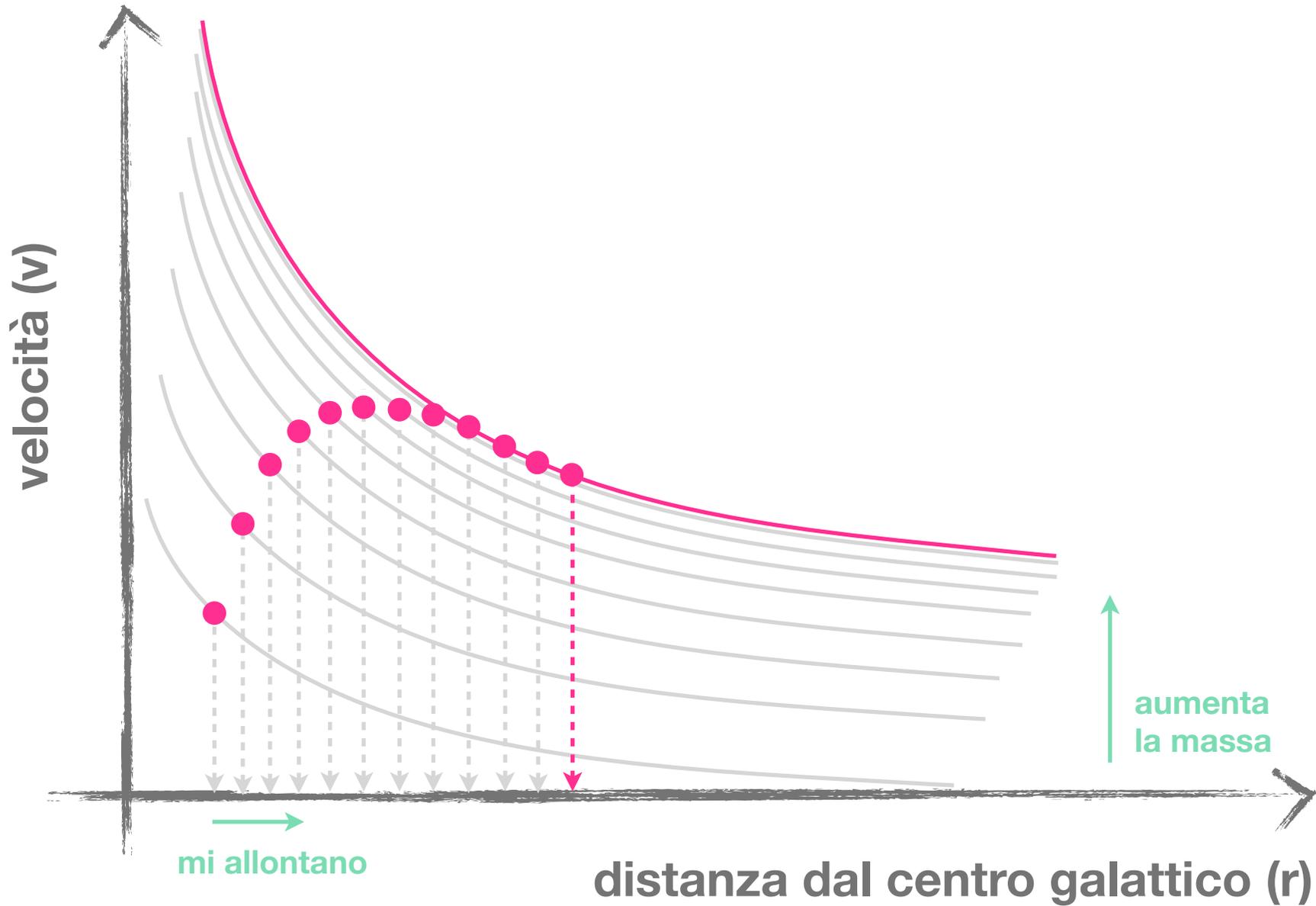
Fino al punto in cui non aumenta quasi più



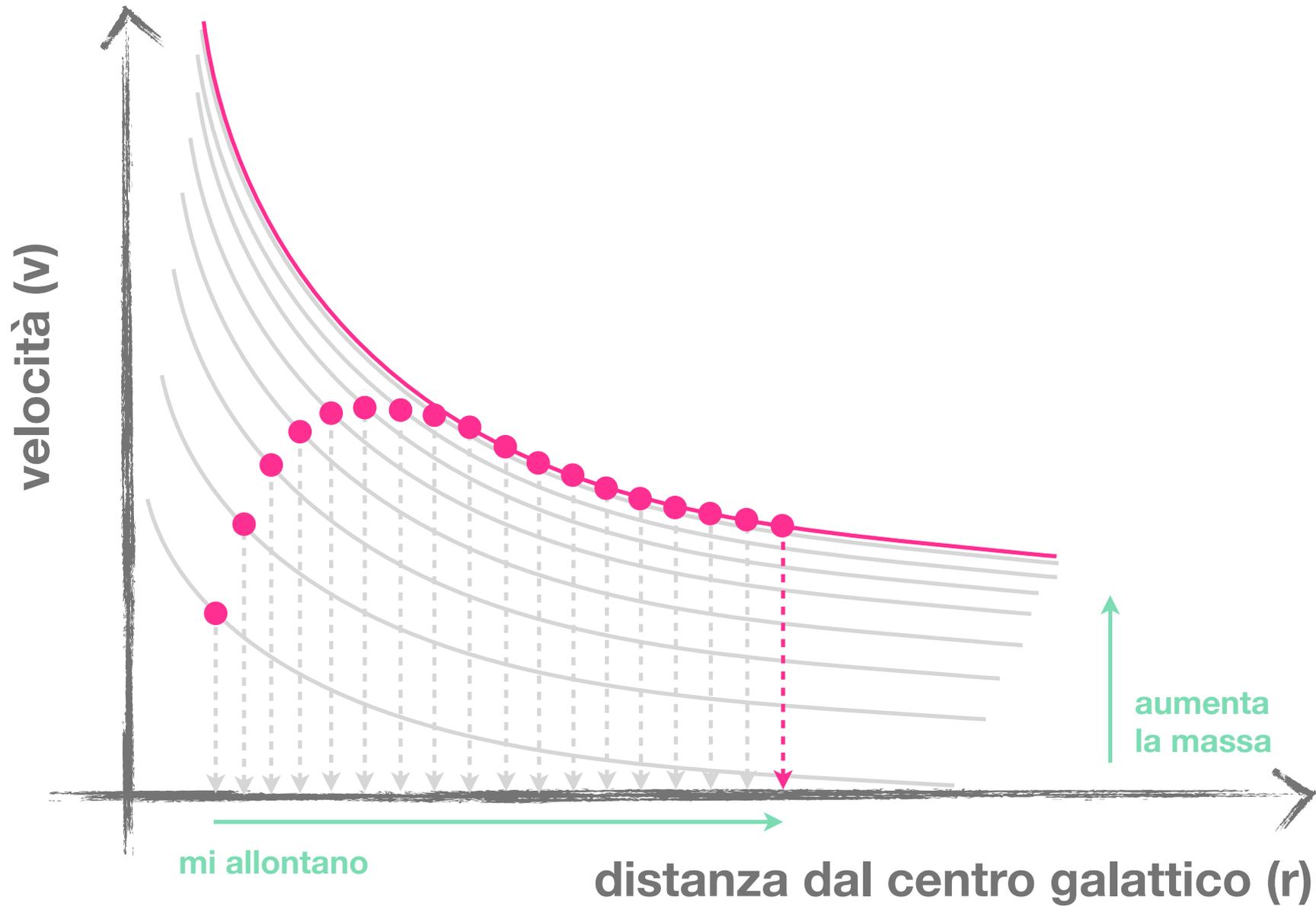
Fino al punto in cui non aumenta quasi più



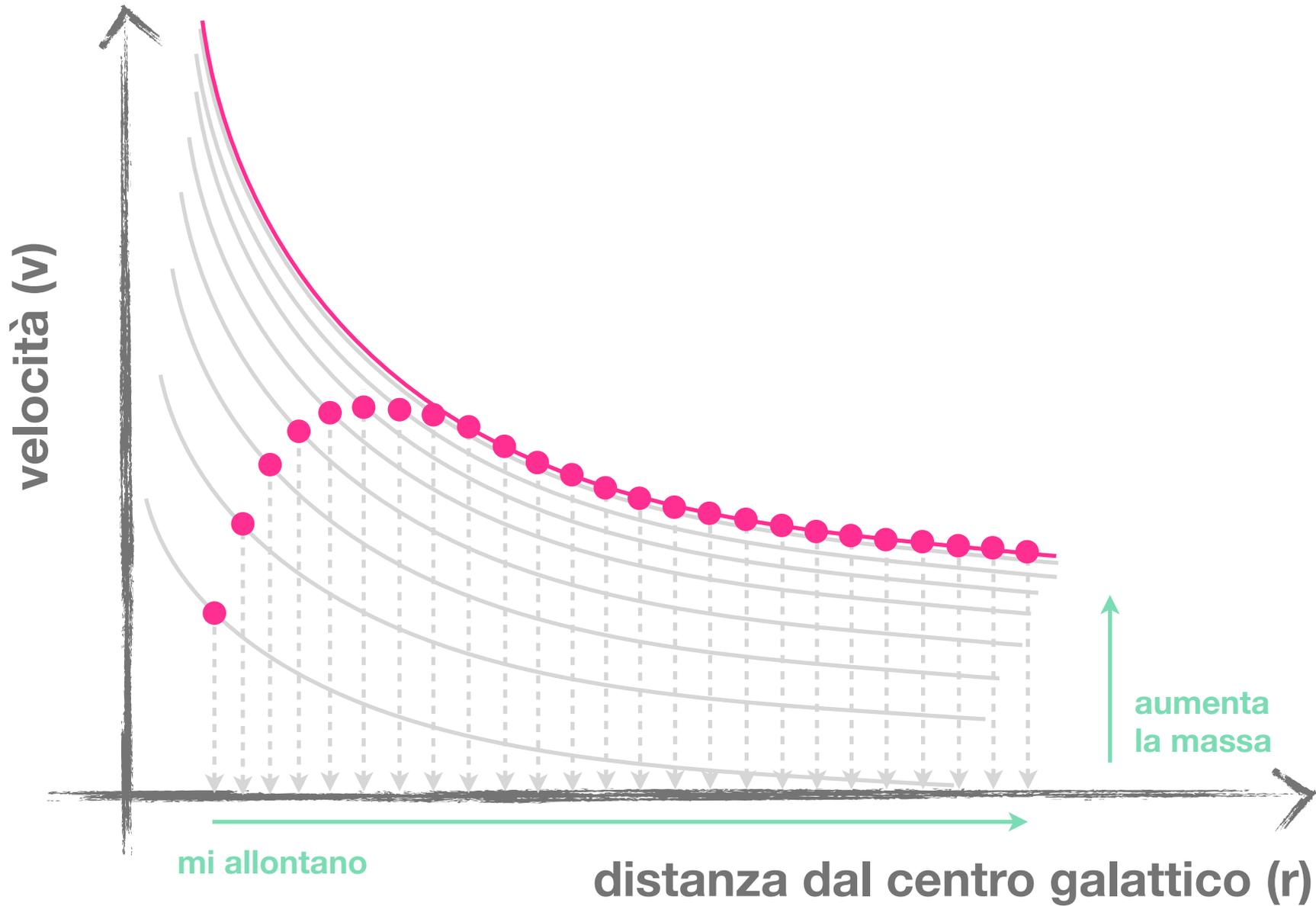
Fino al punto in cui non aumenta quasi più



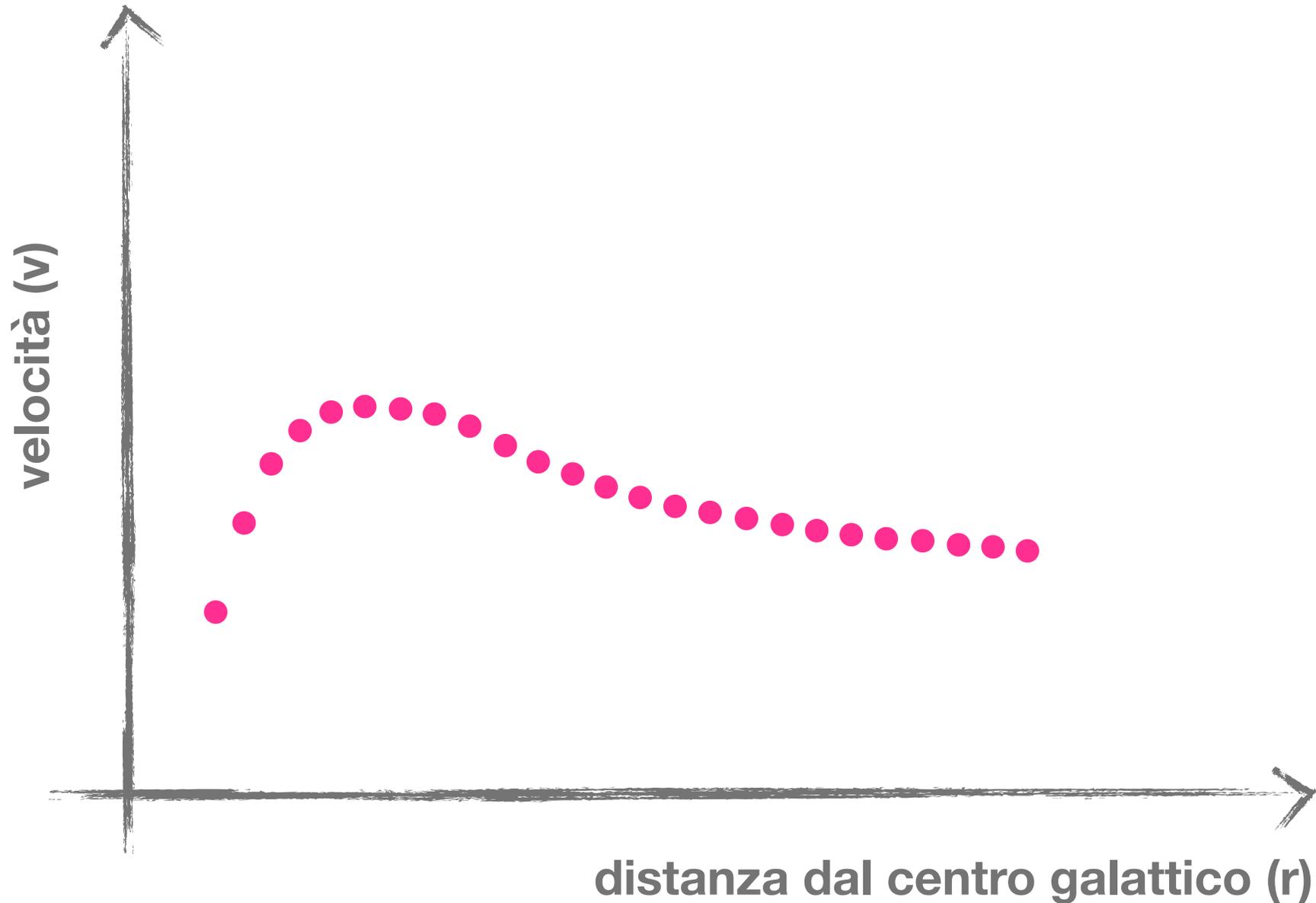
Fino al punto in cui non aumenta quasi più



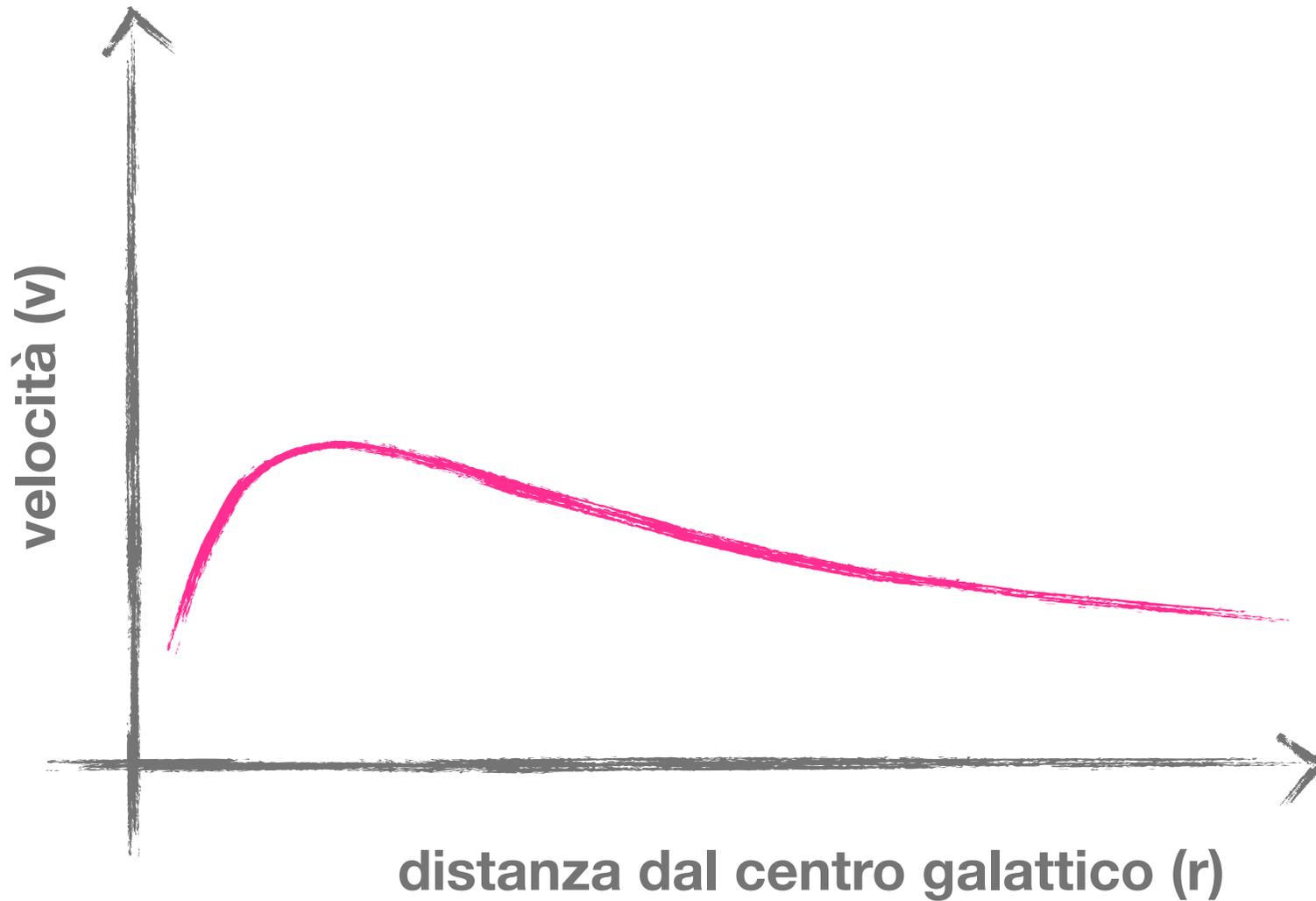
Fino al punto in cui non aumenta quasi più



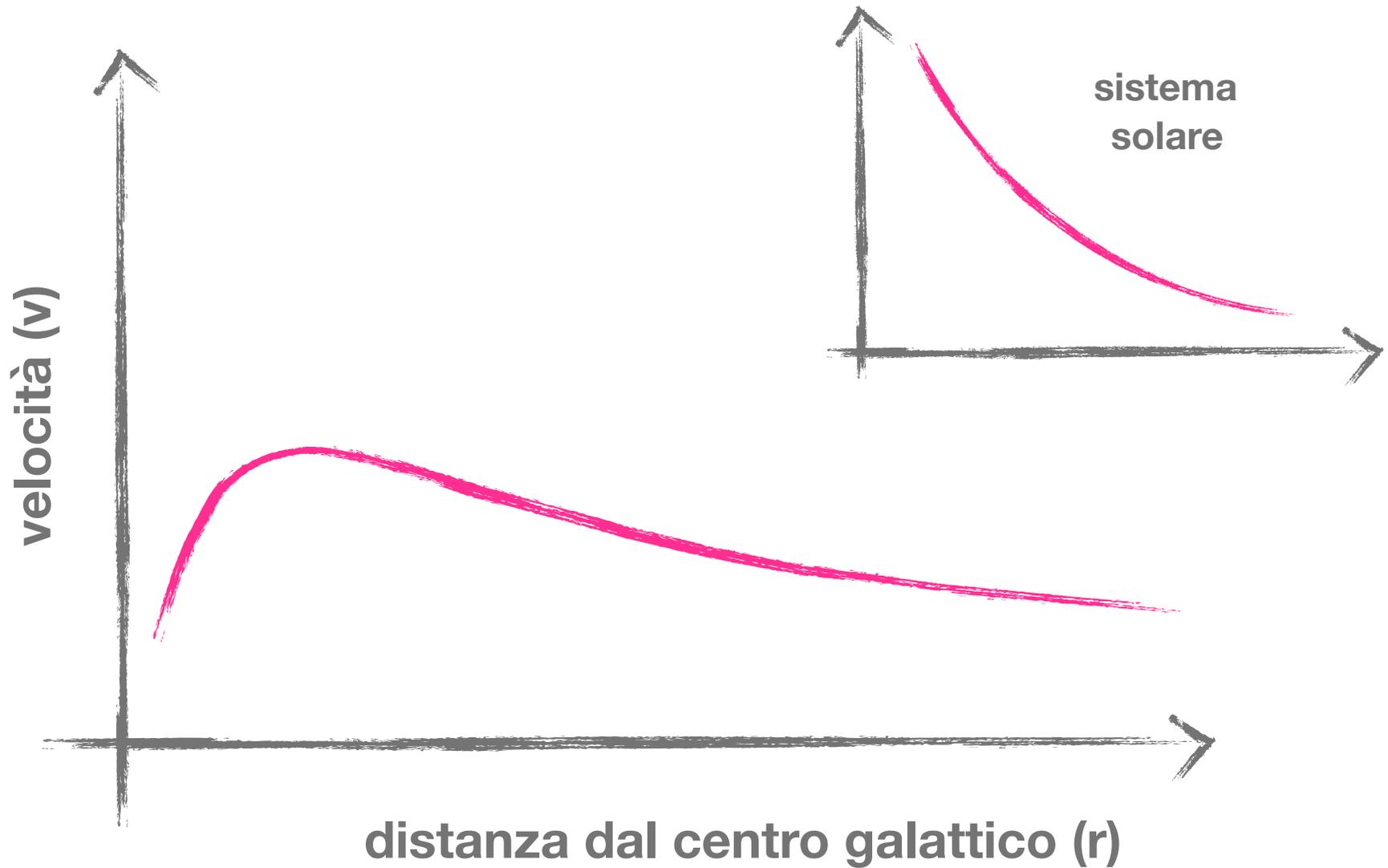
La curva delle velocità delle galassie ha una gobba



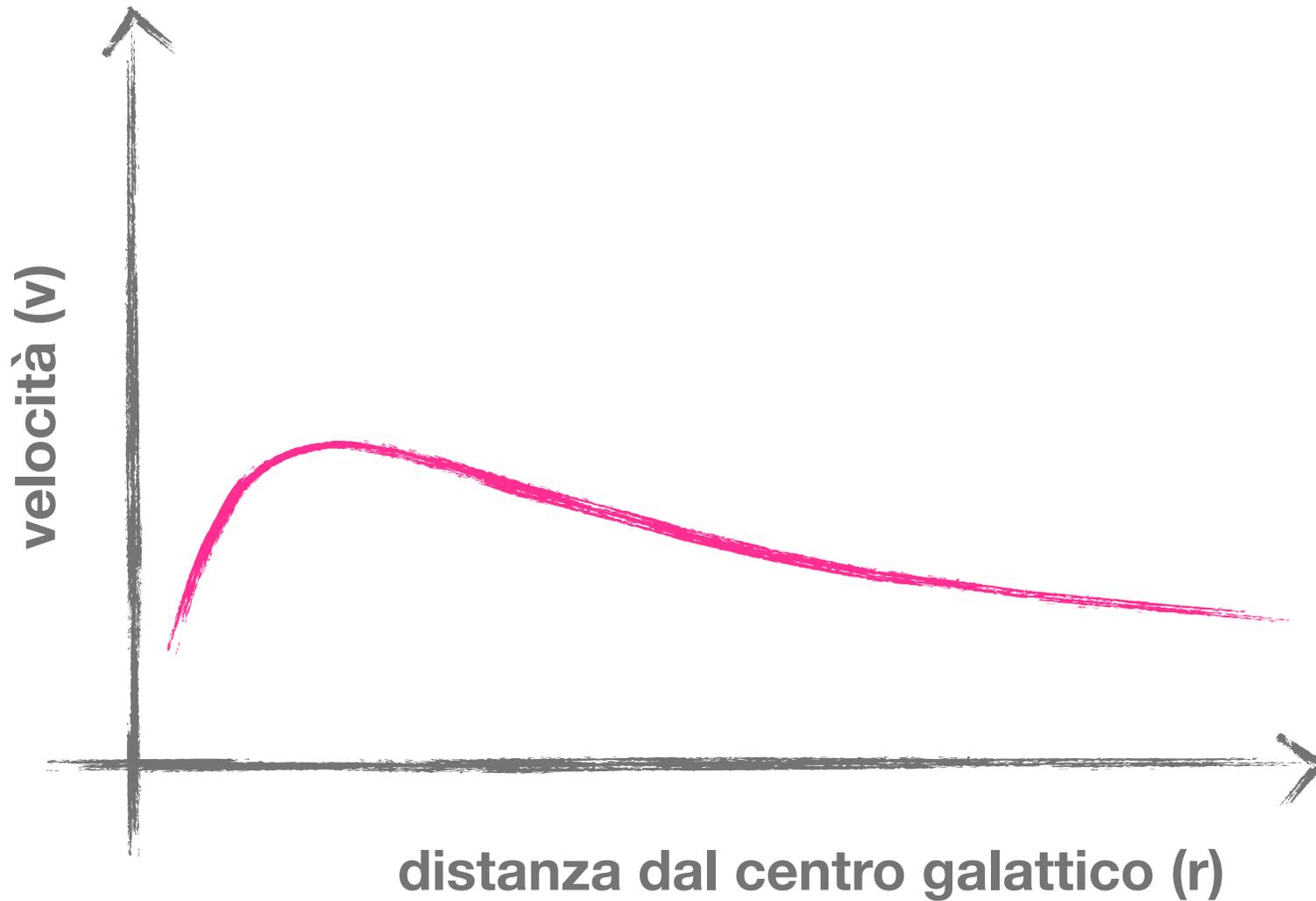
# La curva di rotazione per le galassie



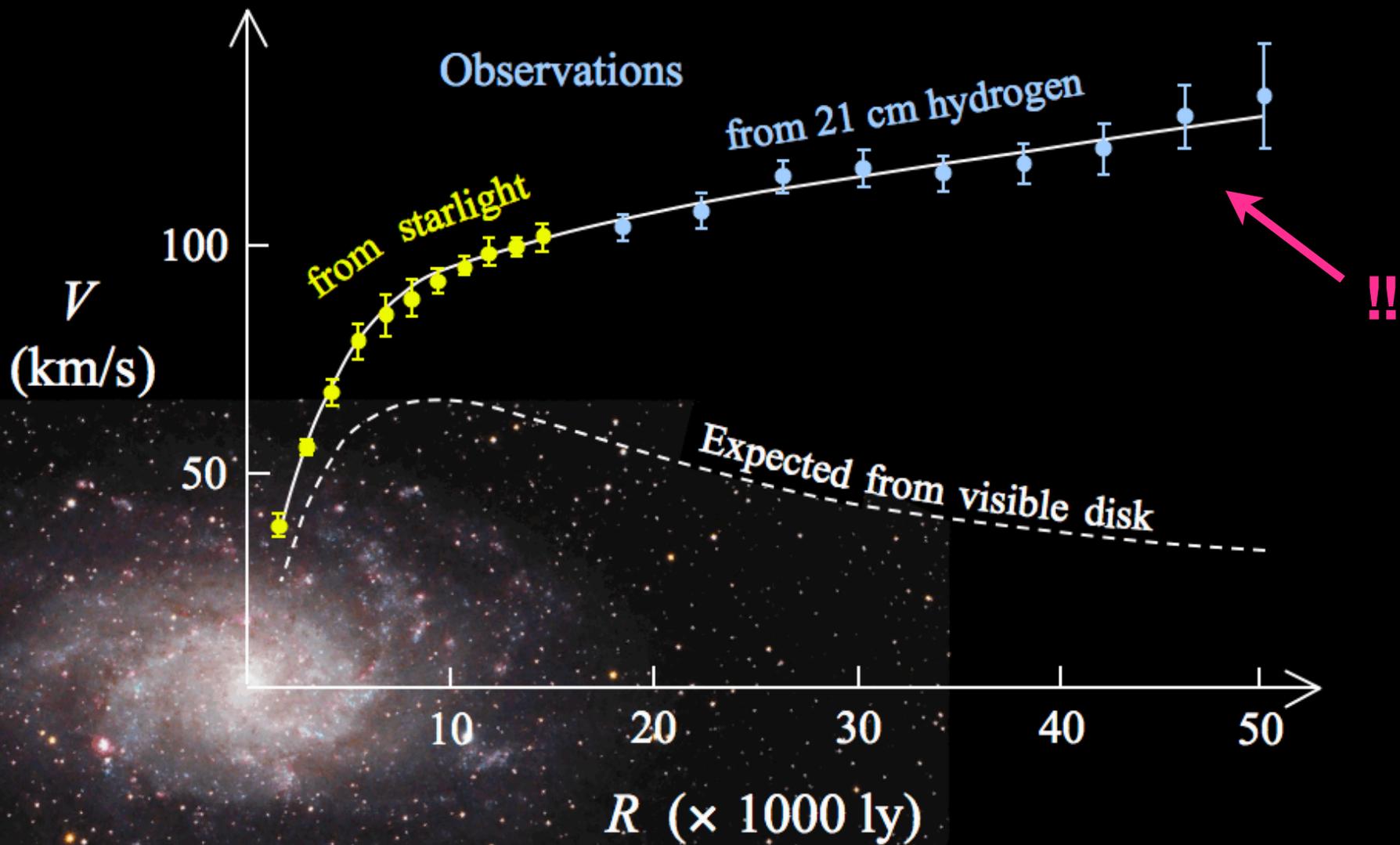
# La curva di rotazione per le galassie



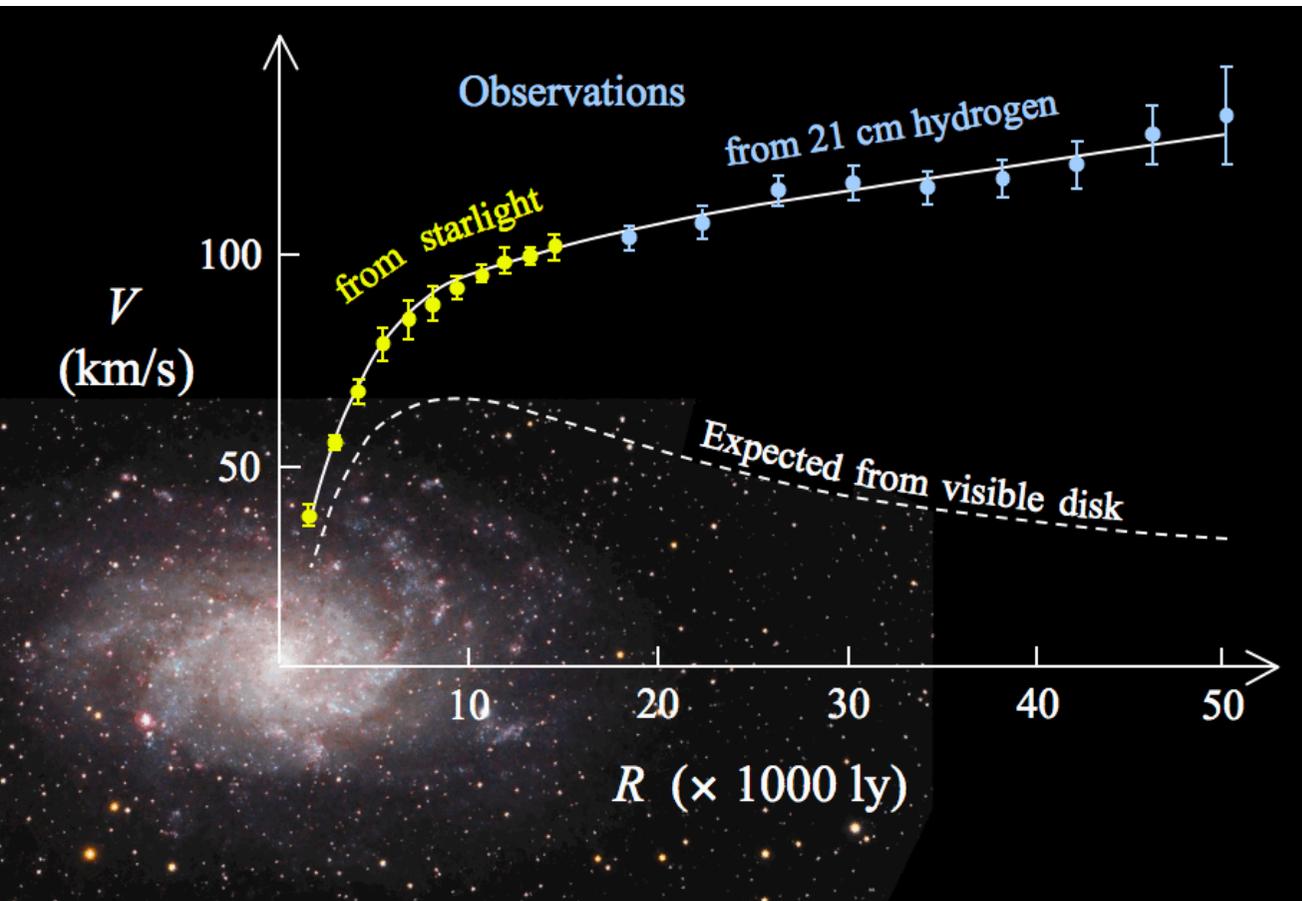
# La curva di rotazione per le galassie



E invece le stelle più lontane vanno più veloci!



# Com'è possibile che la velocità aumenti?



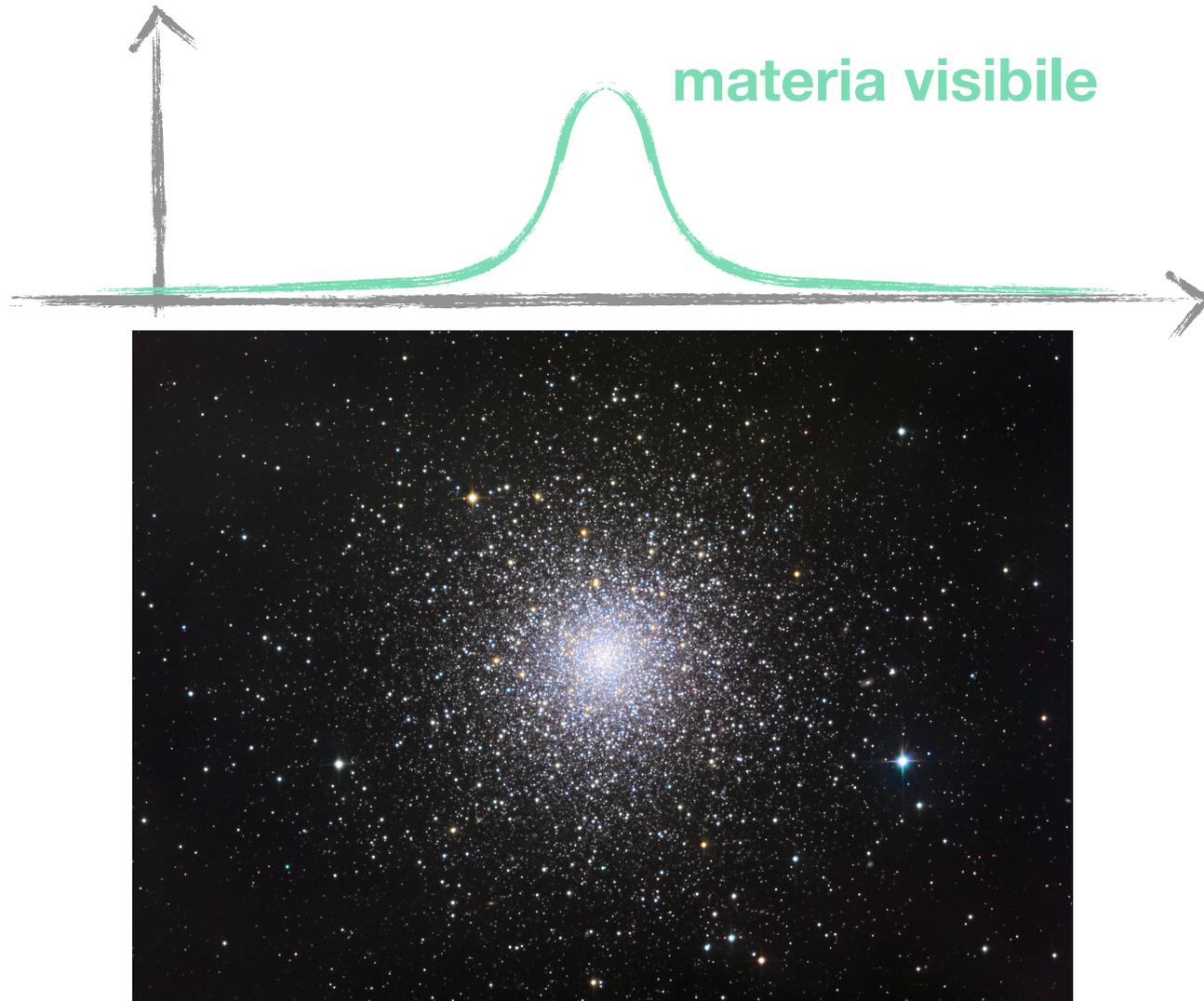
Significa che la massa attorno a cui orbitano sta **aumentando**... molto!

Stelle e gas **non bastano**: creerebbero una gobba

Dev'esserci **un'altra** massa che non vediamo e che non è concentrata attorno al centro

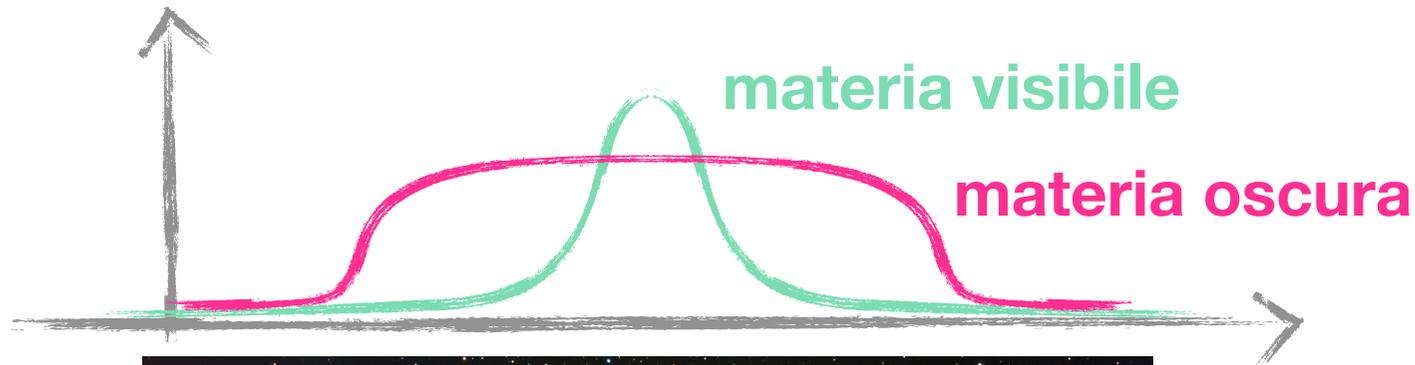
**Materia oscura**

# Nelle galassie non c'è solo materia visibile



# Nelle galassie non ci sono solo stelle e gas

C'è anche un alone di materia oscura



E ce n'è **tanta!**  
Per far tornare i conti  
la materia oscura  
dev'essere **5.6 volte**  
di più della materia  
visibile

# Non abbiamo idea di cosa sia

**Nessuna** delle particelle note può spiegare questo effetto

E le abbiamo provate **tutte**

Deve essere qualcosa di **sconosciuto**



# Che significa 'oscura'?

Innanzitutto che non brilla

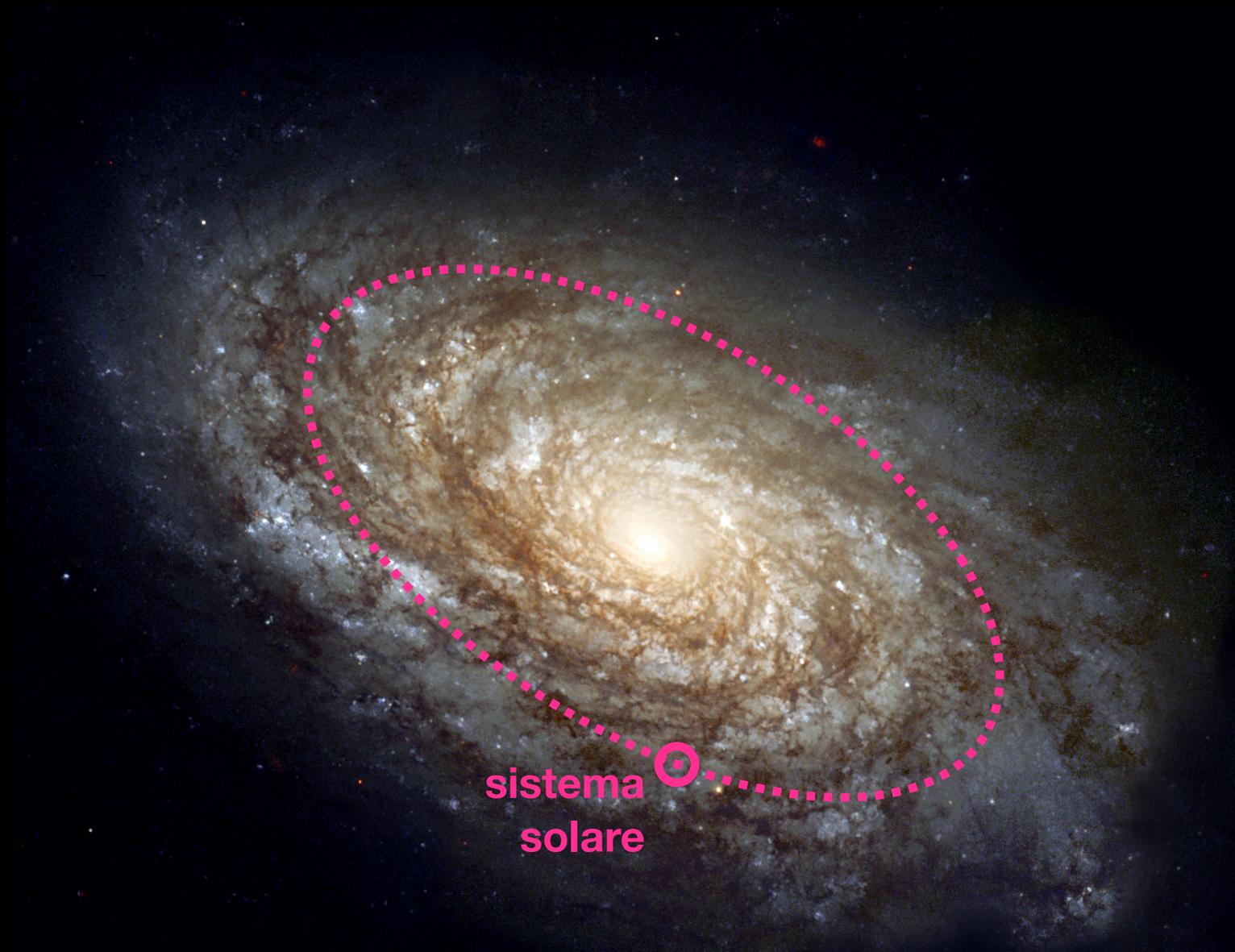
(come le stelle)

Ma anche che non riflette/assorbe la luce

(sennò in qualche modo l'avremmo vista, come il gas)

Non interagisce in nessun modo con la luce

A pensarci bene non sembra interagire con niente



A pensarci bene non sembra interagire con niente



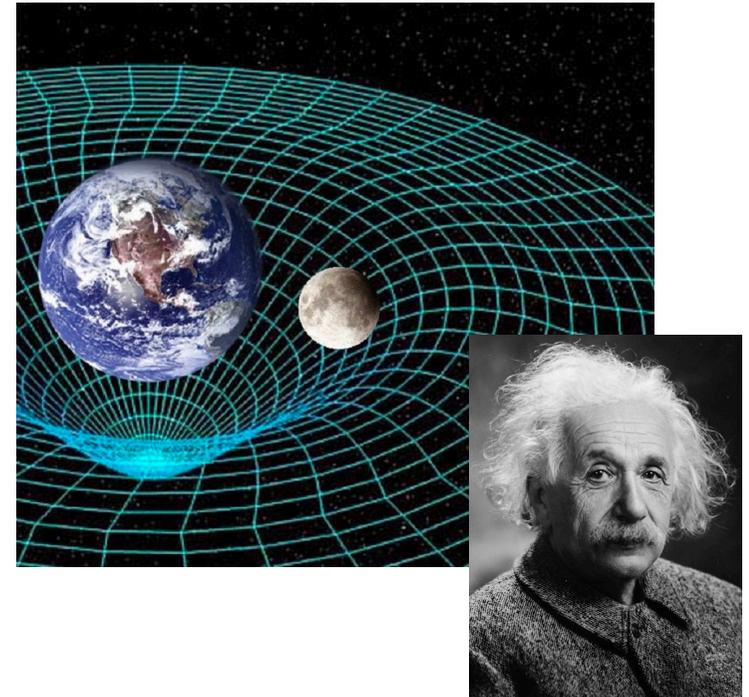
A pensarci bene non sembra interagire con niente



# Fino ad ora visto effetti di gravità (quasi) classica

Le curve di rotazione non hanno 'bisogno' della relatività

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



Ora invece vediamo un fenomeno **puramente** relativistico...

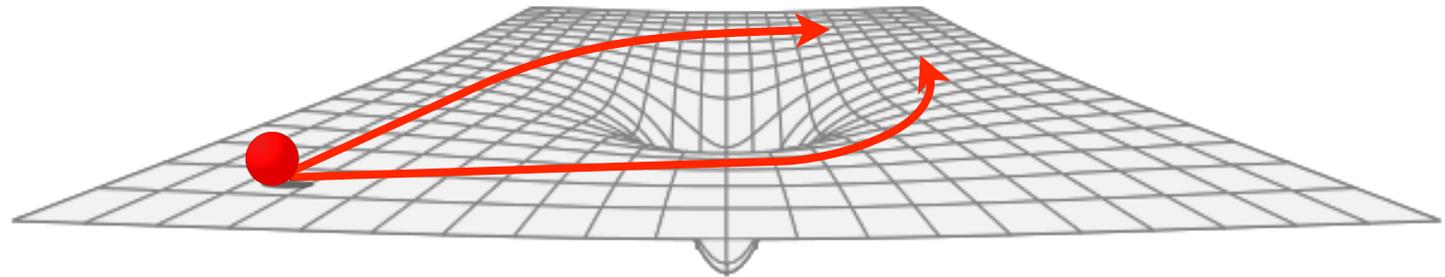
# La gravità può curvare la luce

In gravità classica non è possibile: la luce non ha massa

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2} \quad \text{se } M_1=0 \text{ allora } F=0$$

In relatività generale la gravità curva lo spazio, quindi le traiettorie

Anche i fotoni curvano: viaggiano **dritti** ma in uno spazio **curvo**

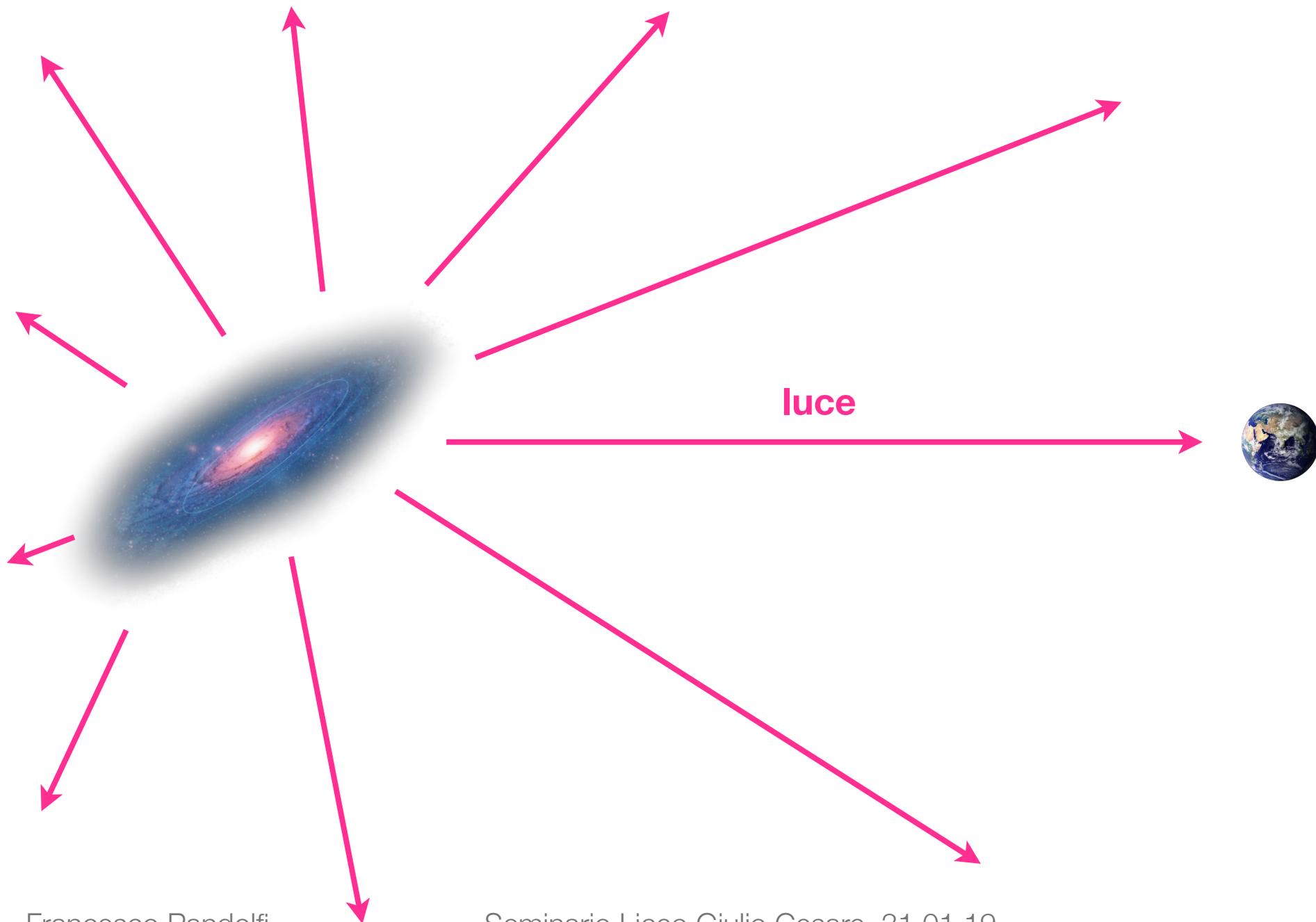


# Cosa significa 'vedere' una galassia?

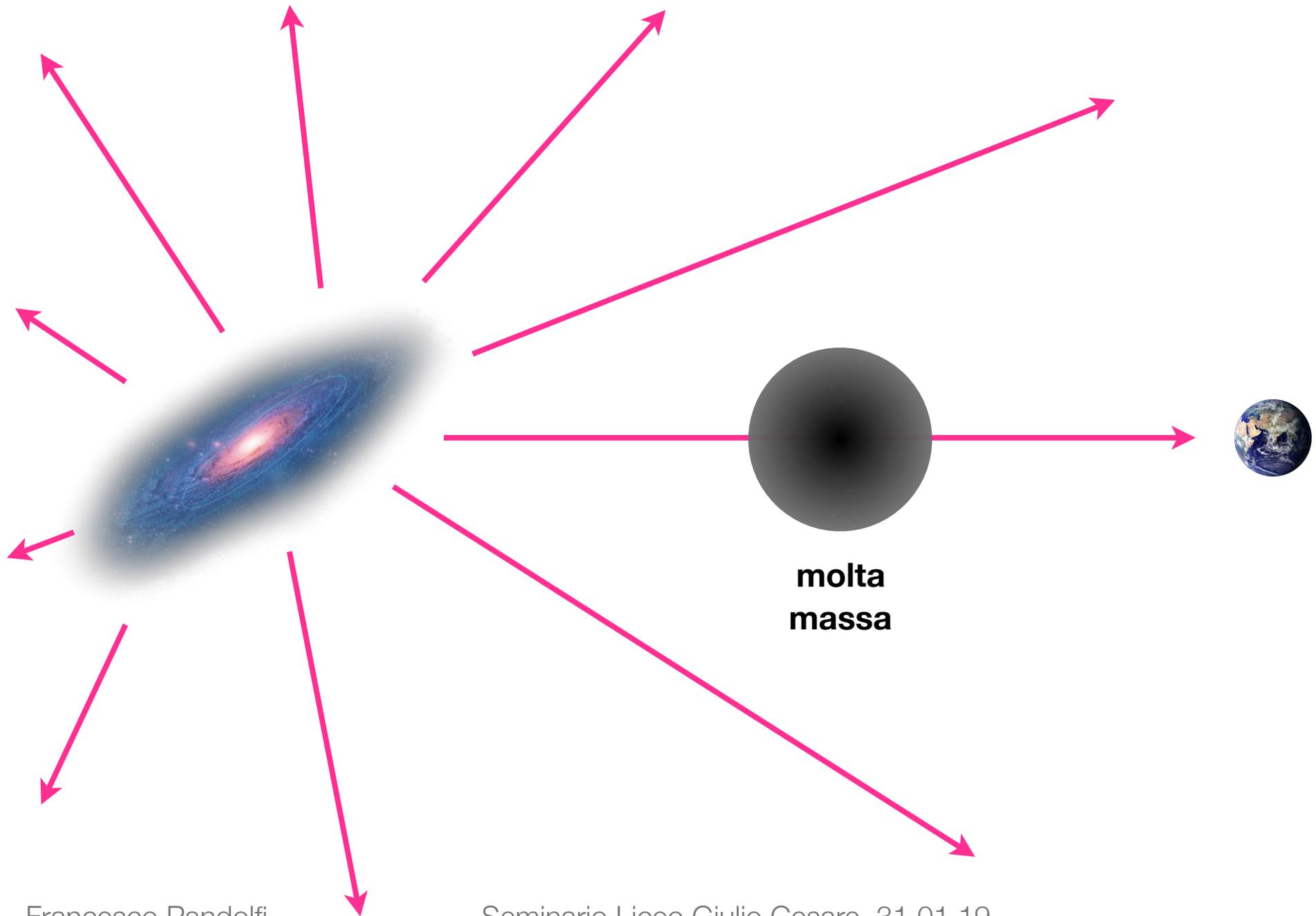


Dei raggi di luce (fotoni) partono dalla galassia e raggiungono noi

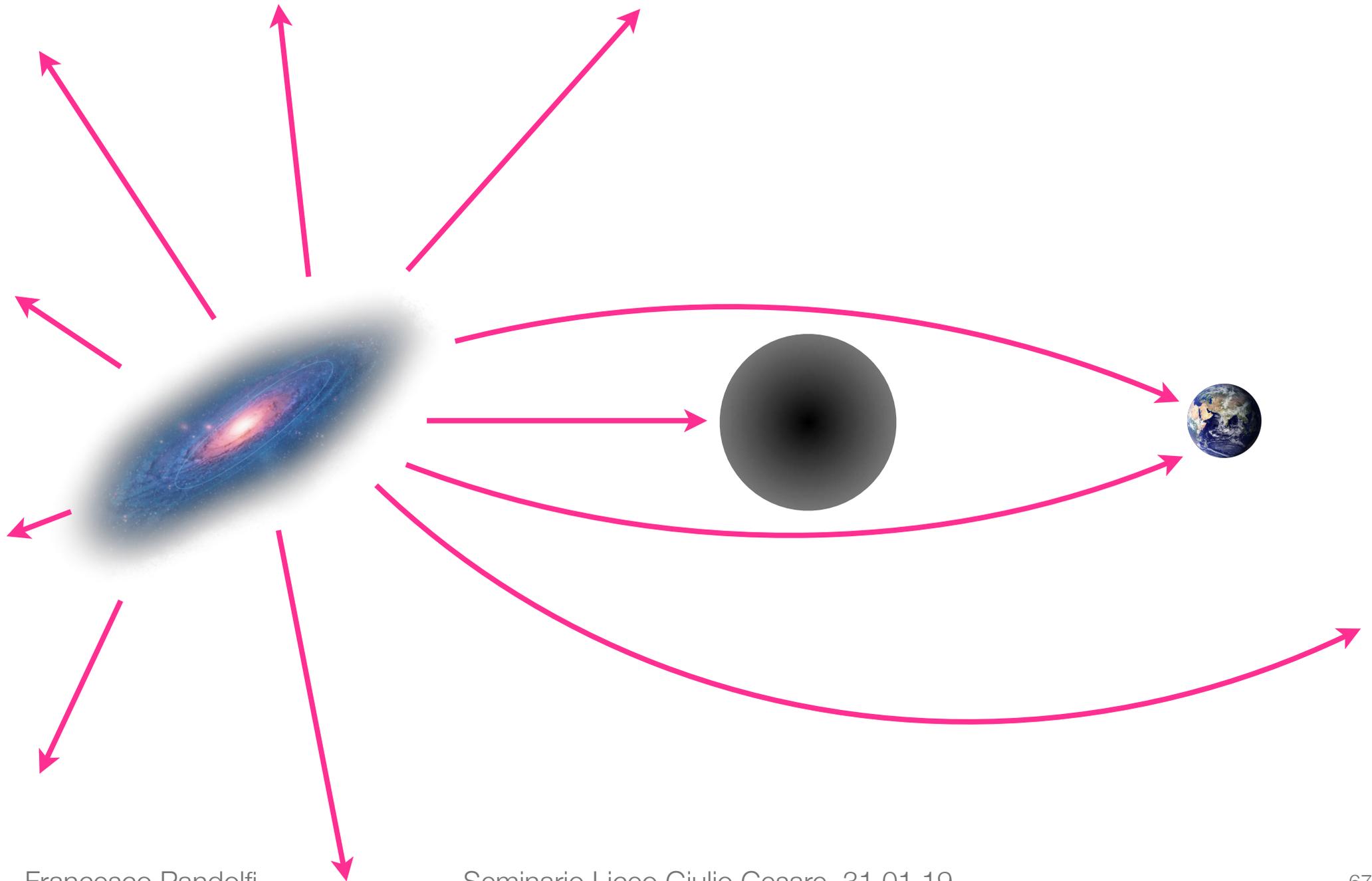
# Cosa significa 'vedere' una galassia?



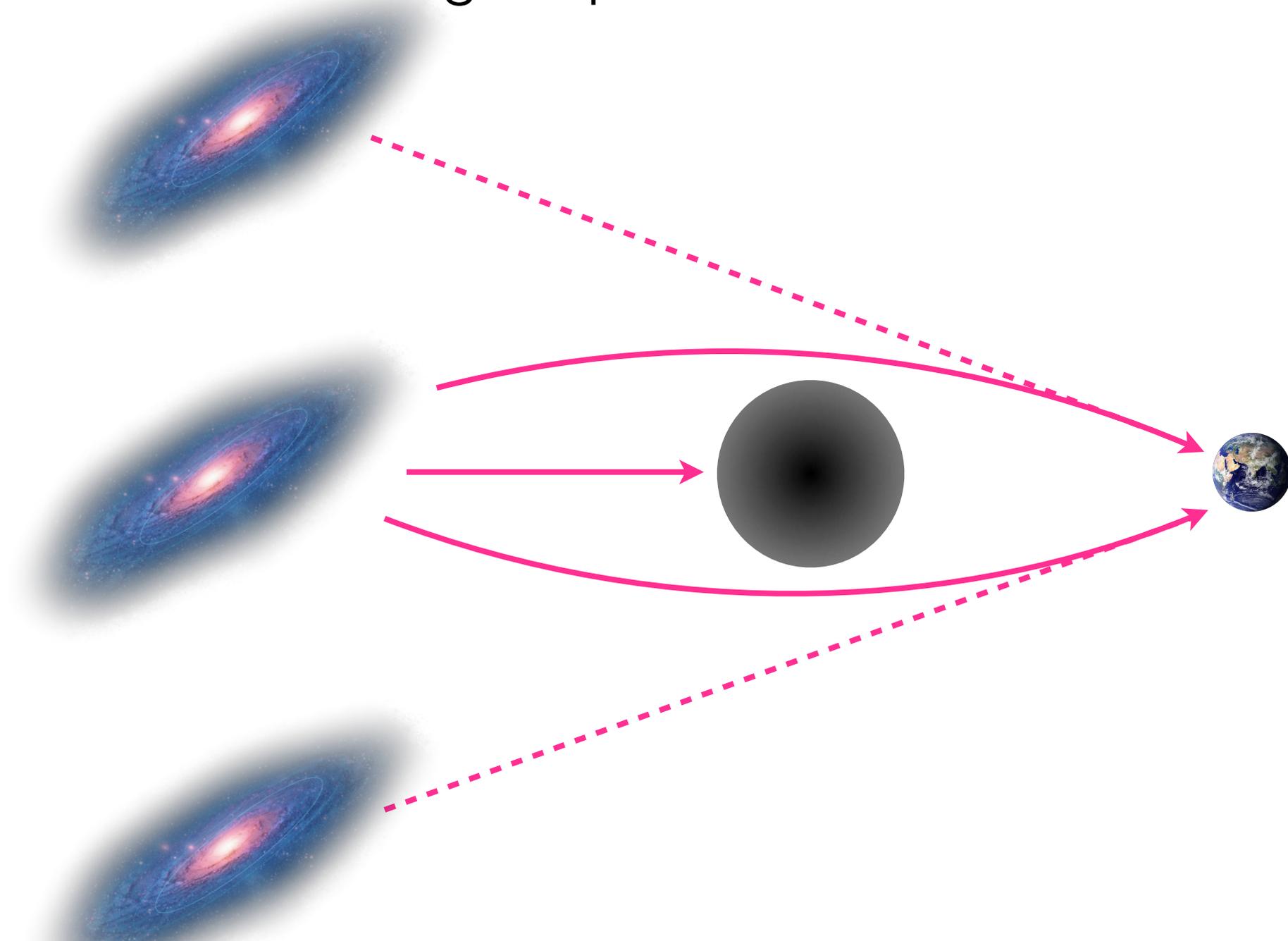
# Cosa significa 'vedere' una galassia?



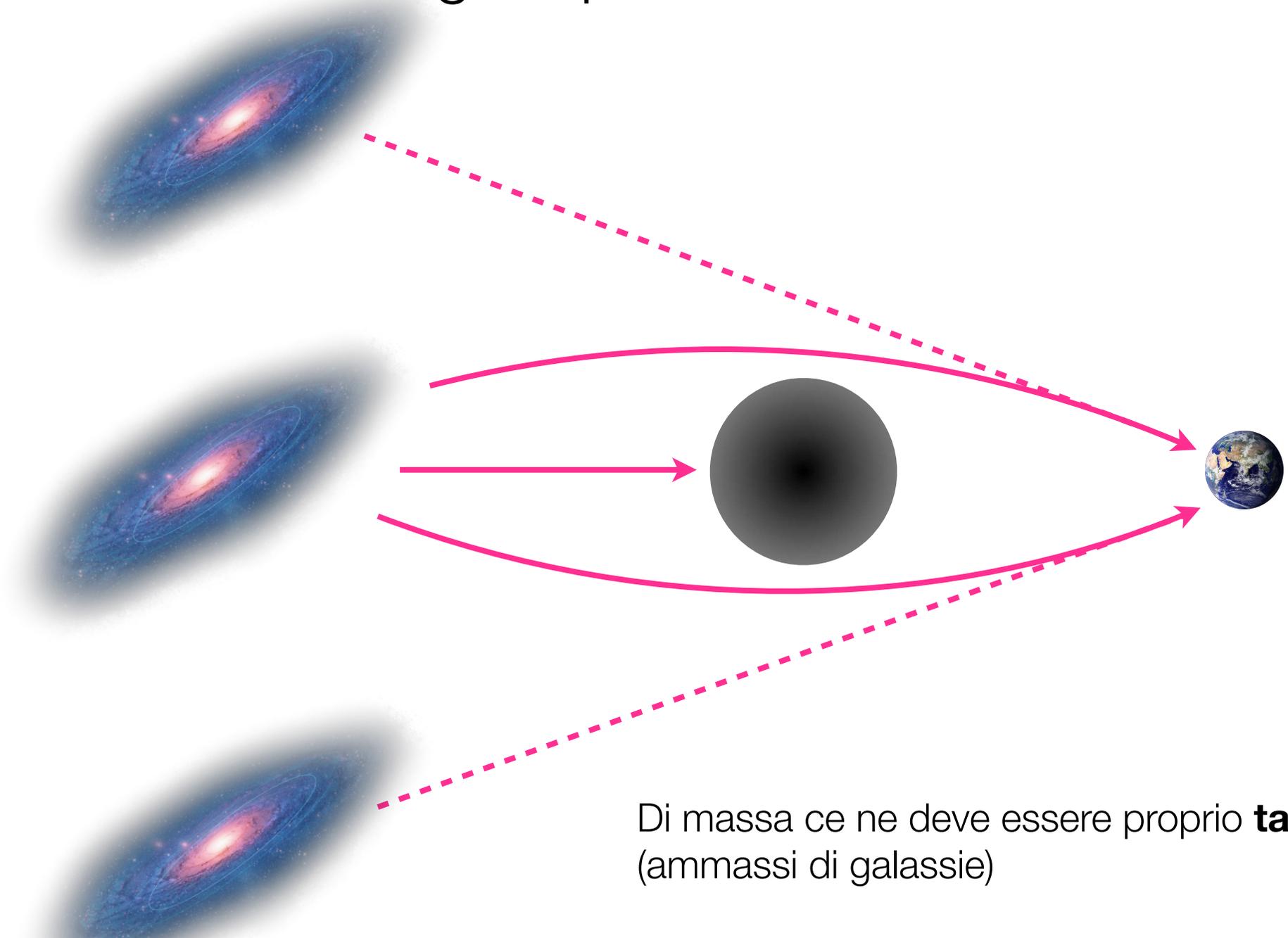
# Una massa può deviare i raggi di luce



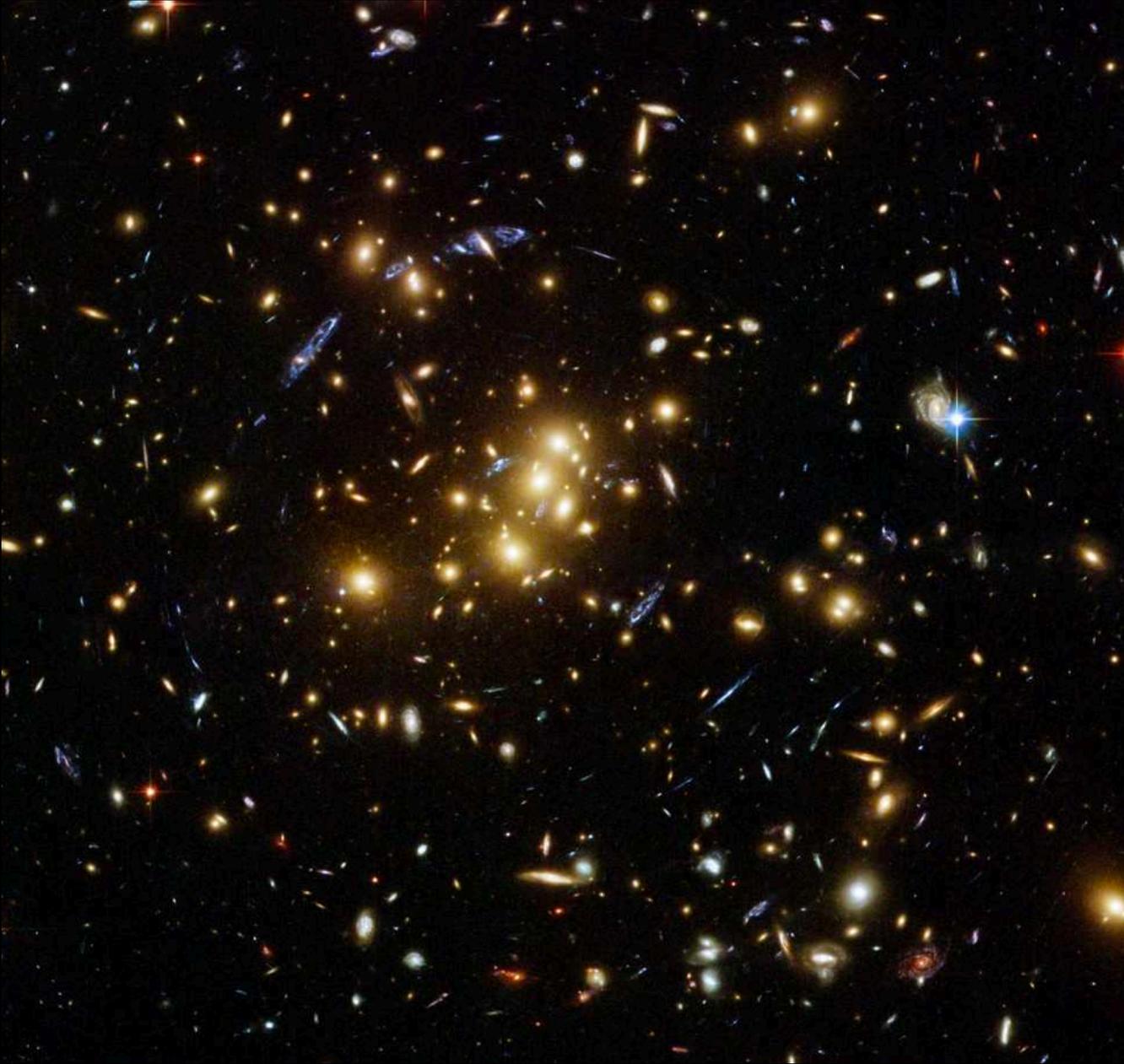
# Si creano immagini speculari



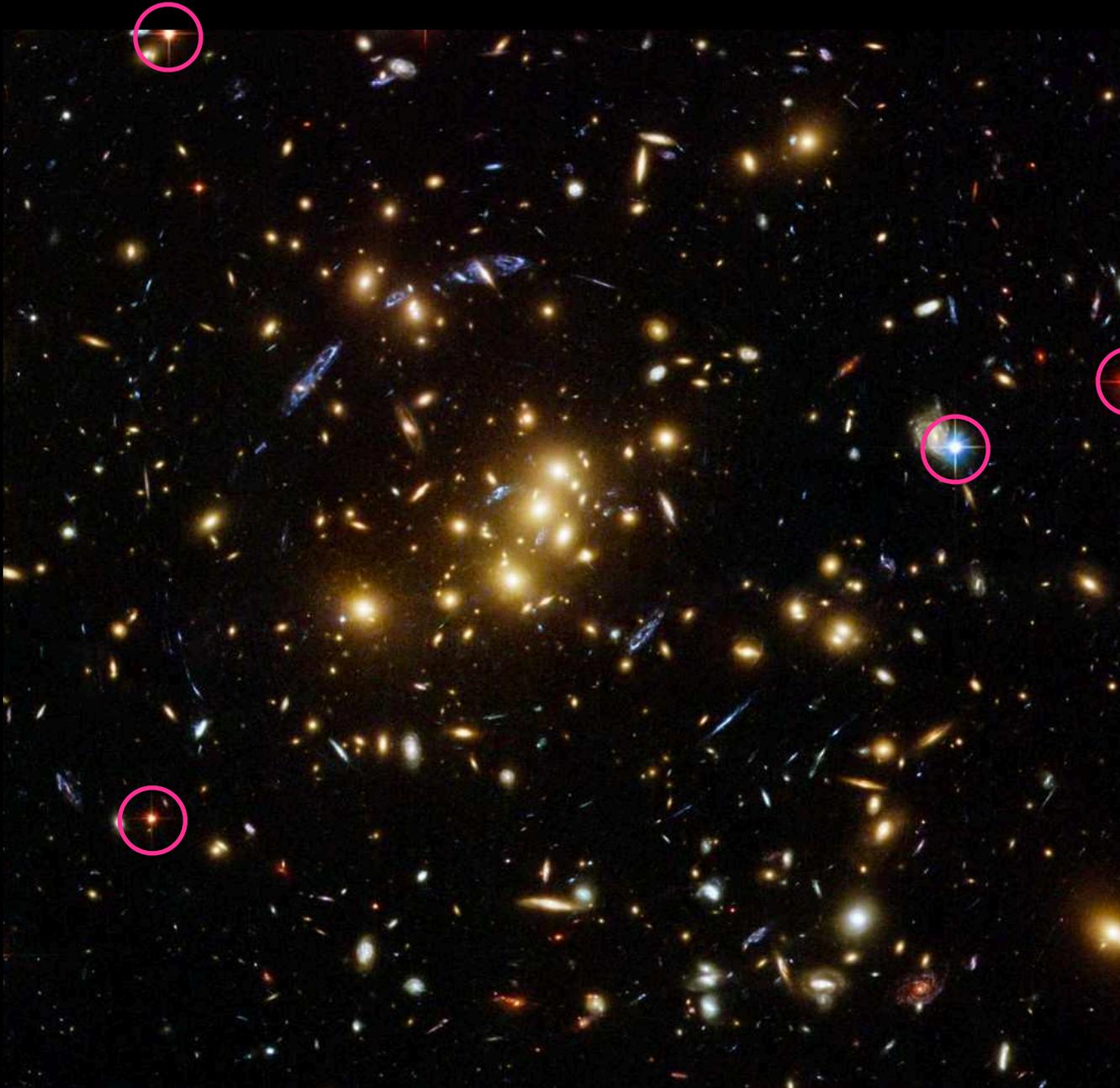
# Si creano immagini speculari



# Studiamo questa foto del 1979

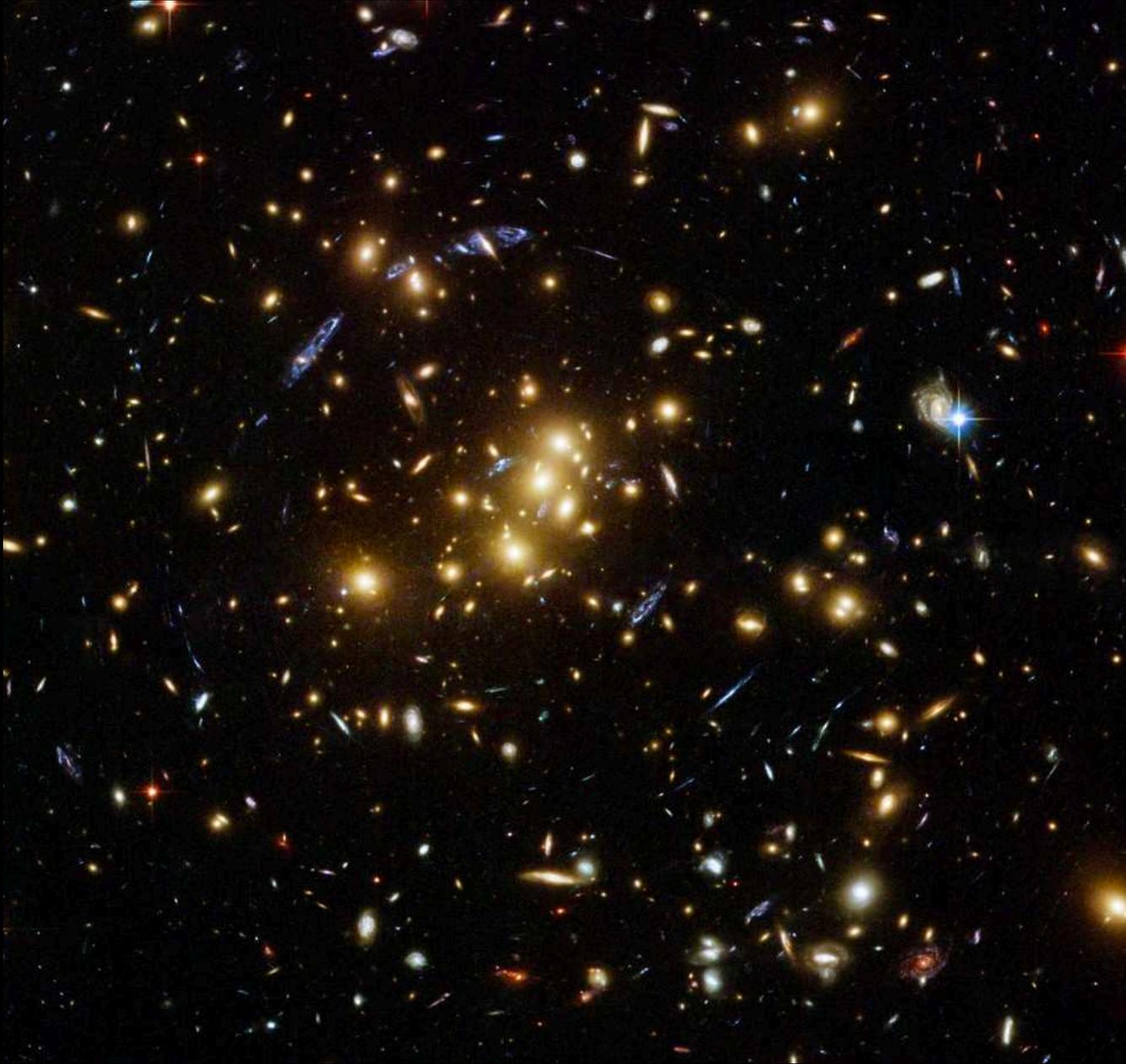


# Studiamo questa foto del 1979



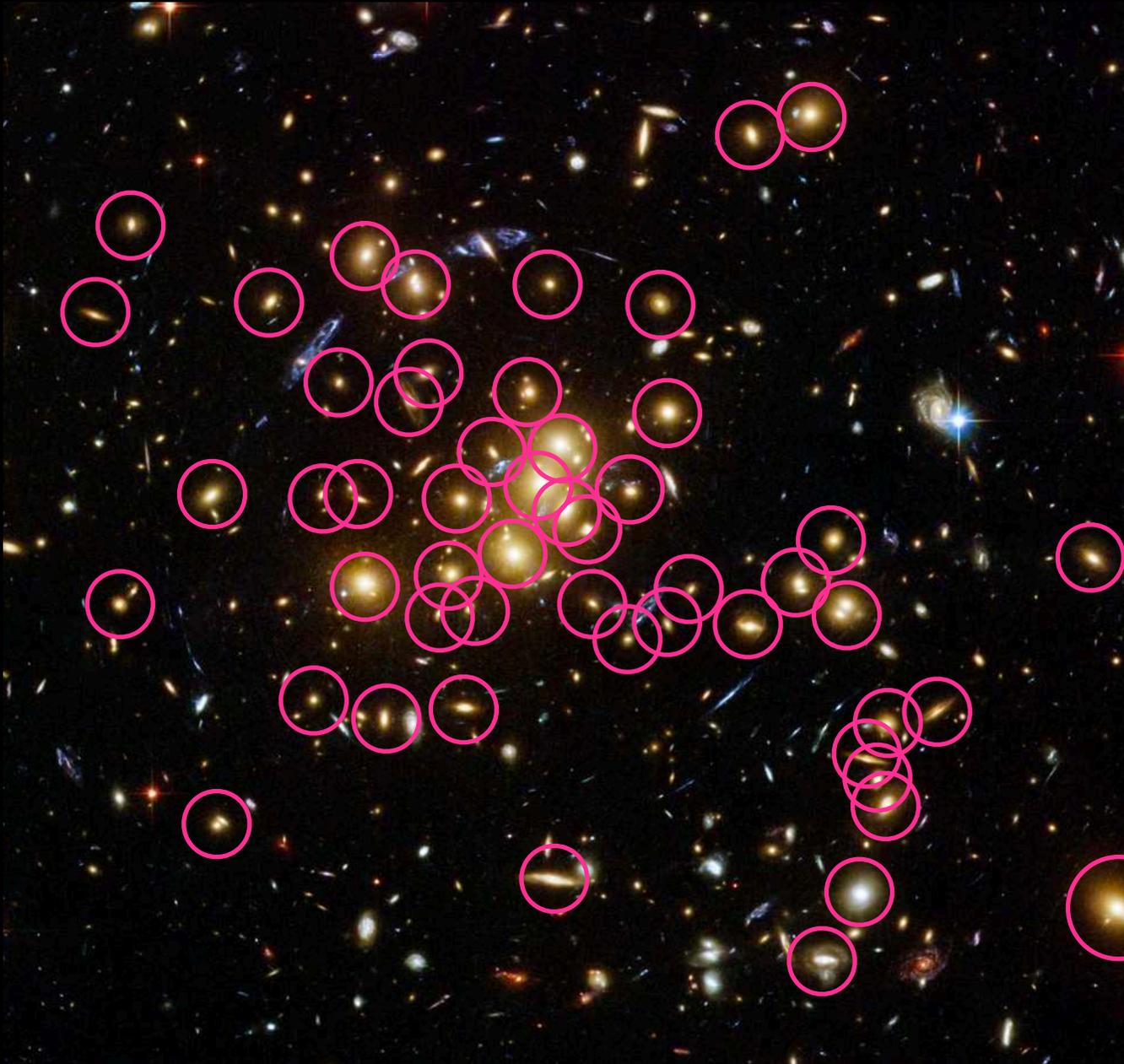
**gli oggetti a forma di +  
sono stelle, vicine a noi**

# Studiamo questa foto del 1979



**tutti gli altri oggetti  
sono galassie**

# Studiamo questa foto del 1979

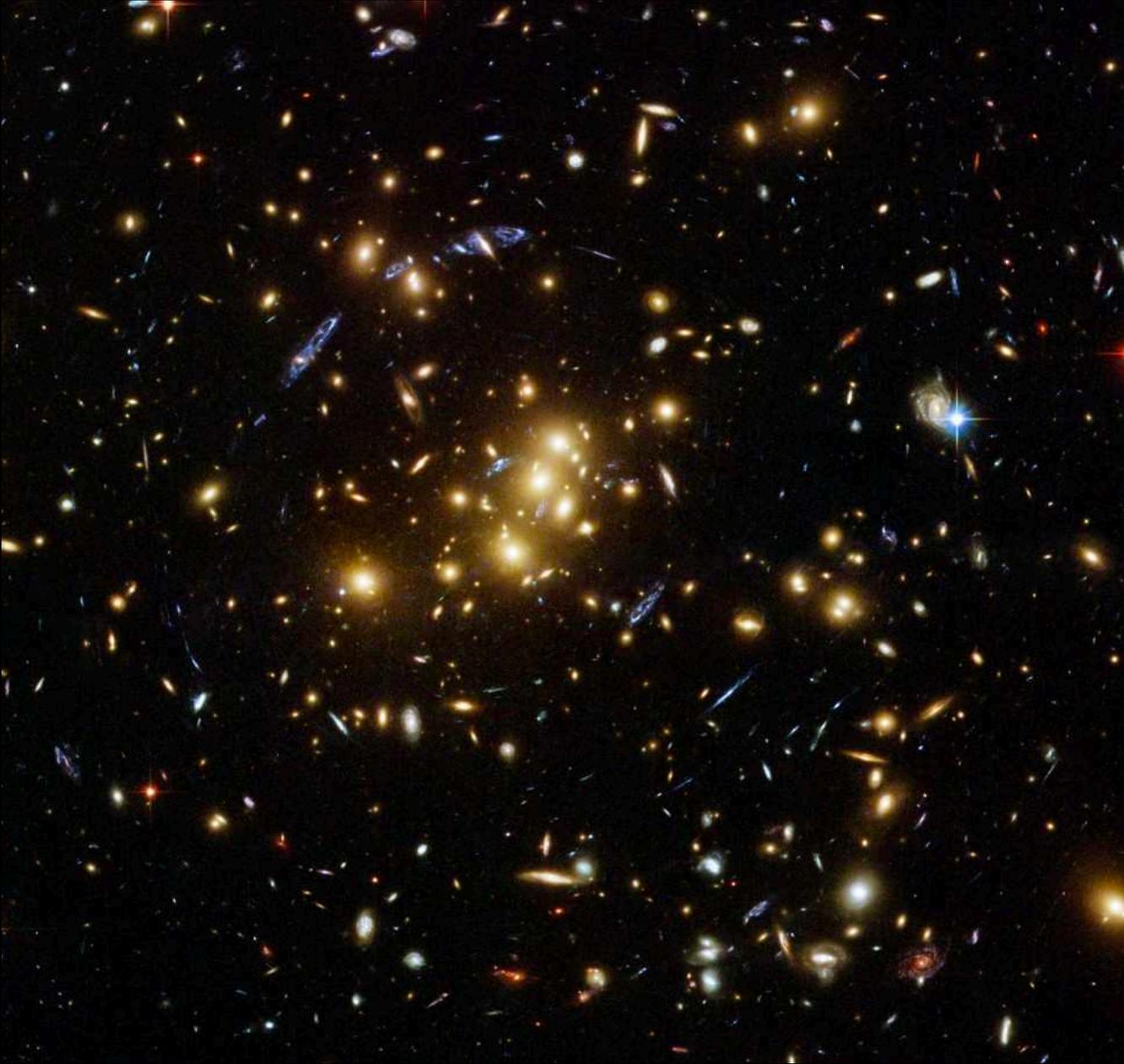


**tutti gli altri oggetti  
sono galassie**

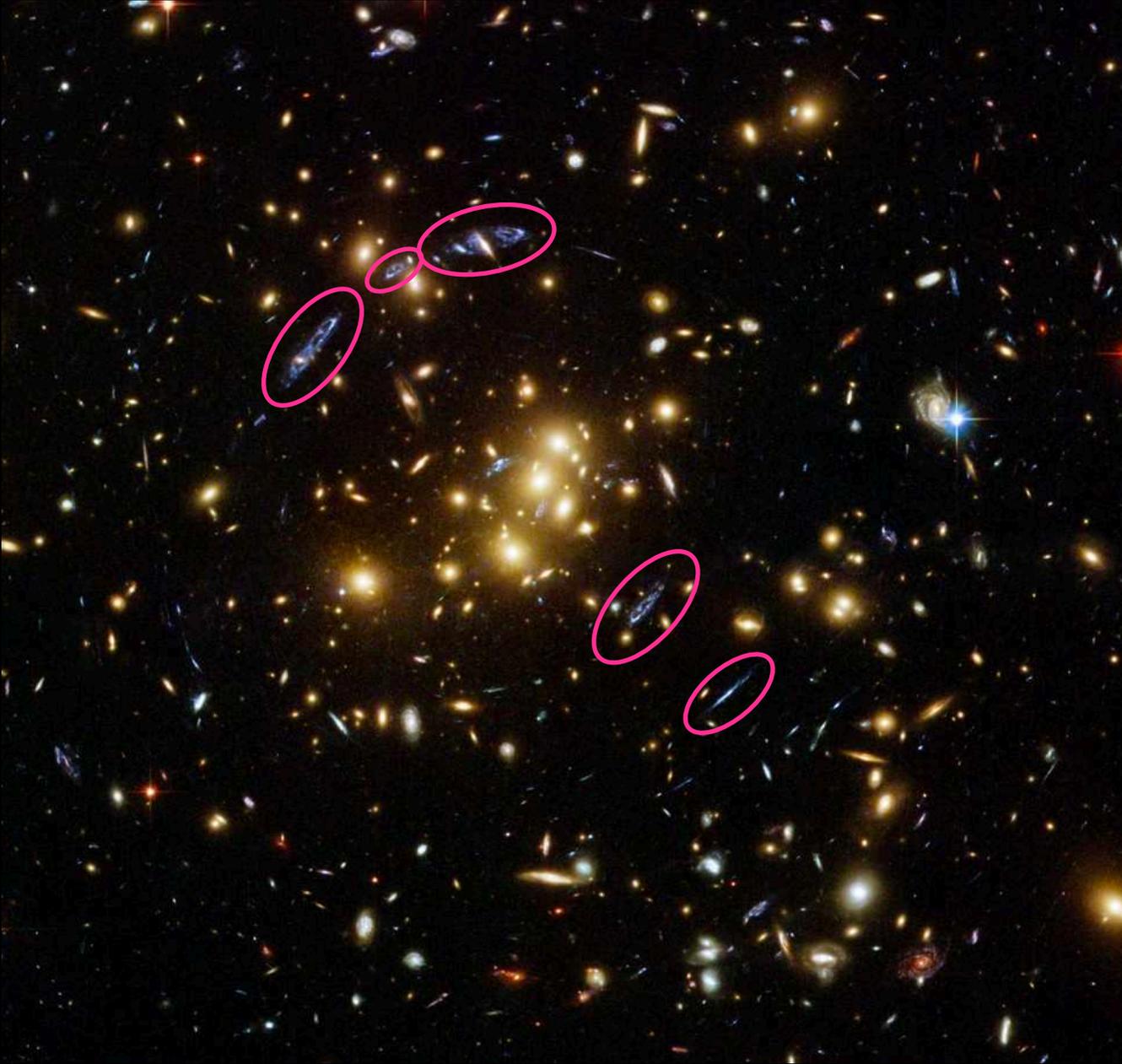
**quelle gialle sono  
parte di un ammasso**

**sono tutte vicine  
e connesse  
gravitazionalmente**

# Studiamo questa foto del 1979



# Studiamo questa foto del 1979



**questa è una galassia molto più lontana**

**sta dietro all'ammasso ma la sua immagine viene moltiplicata**

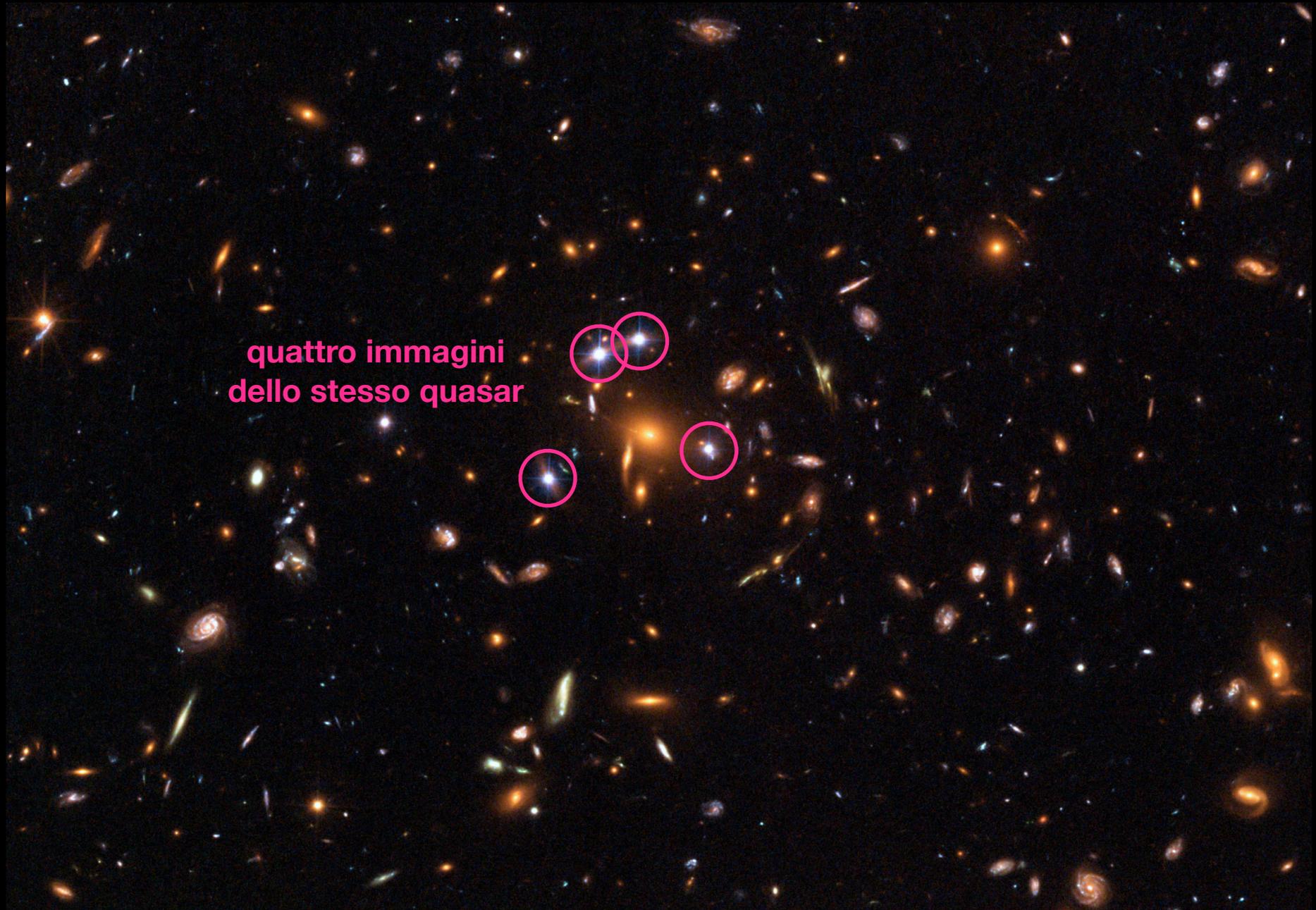
**la massa visibile dell'ammasso non è sufficiente per spiegare questo**

**al centro dell'ammasso c'è una grande concentrazione di materia oscura**

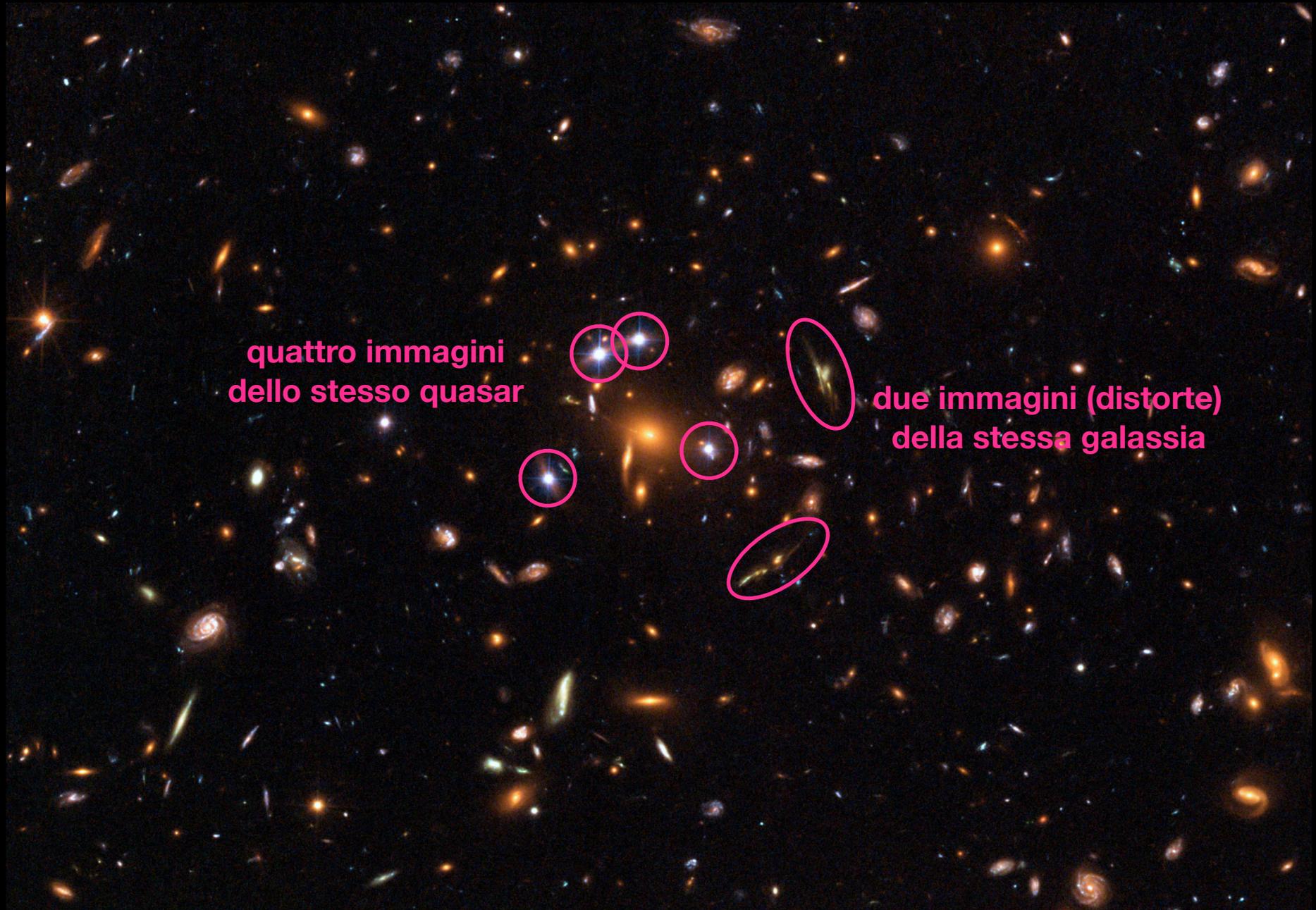
# O quest'altra foto del 2006



# O quest'altra foto del 2006



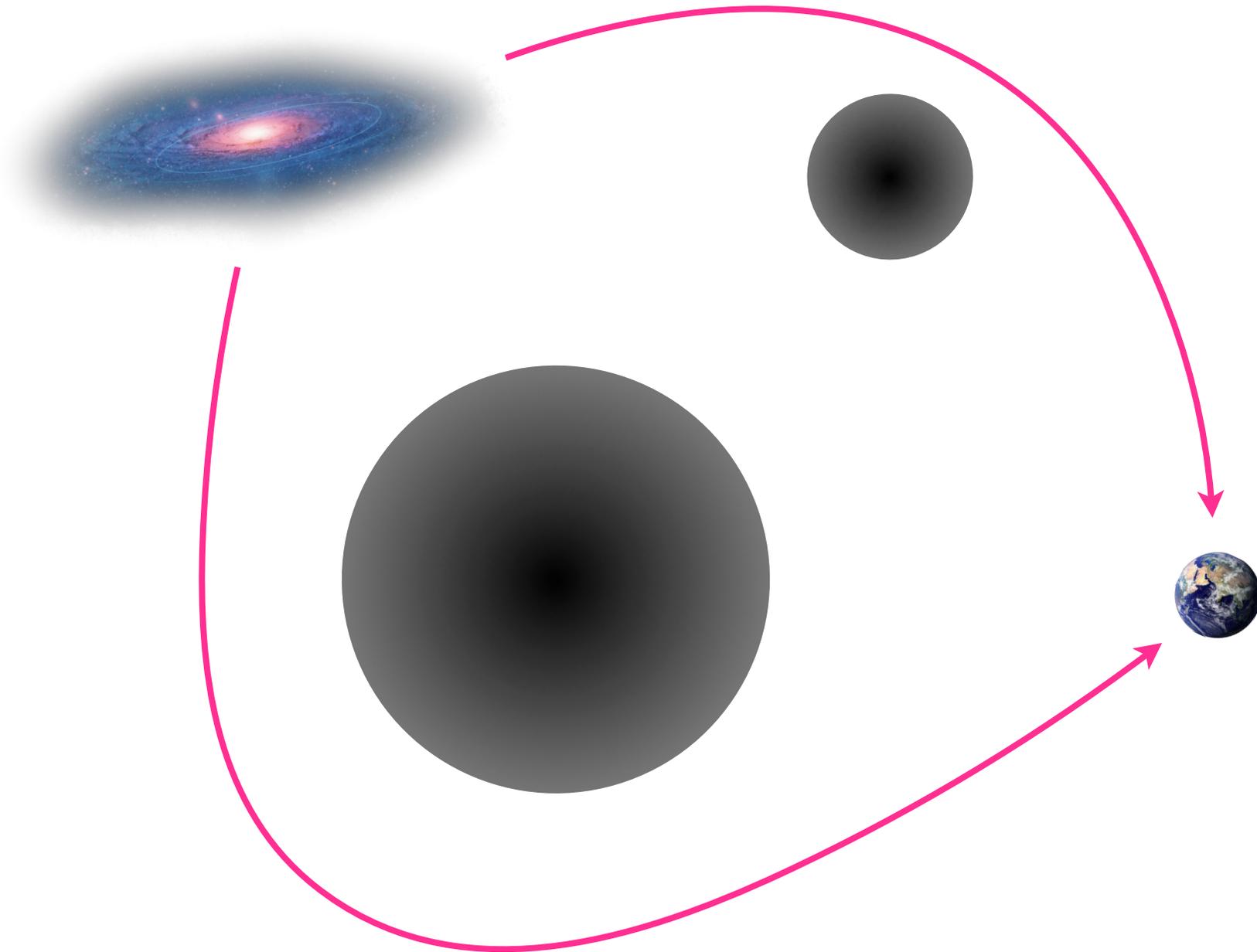
# O quest'altra foto del 2006



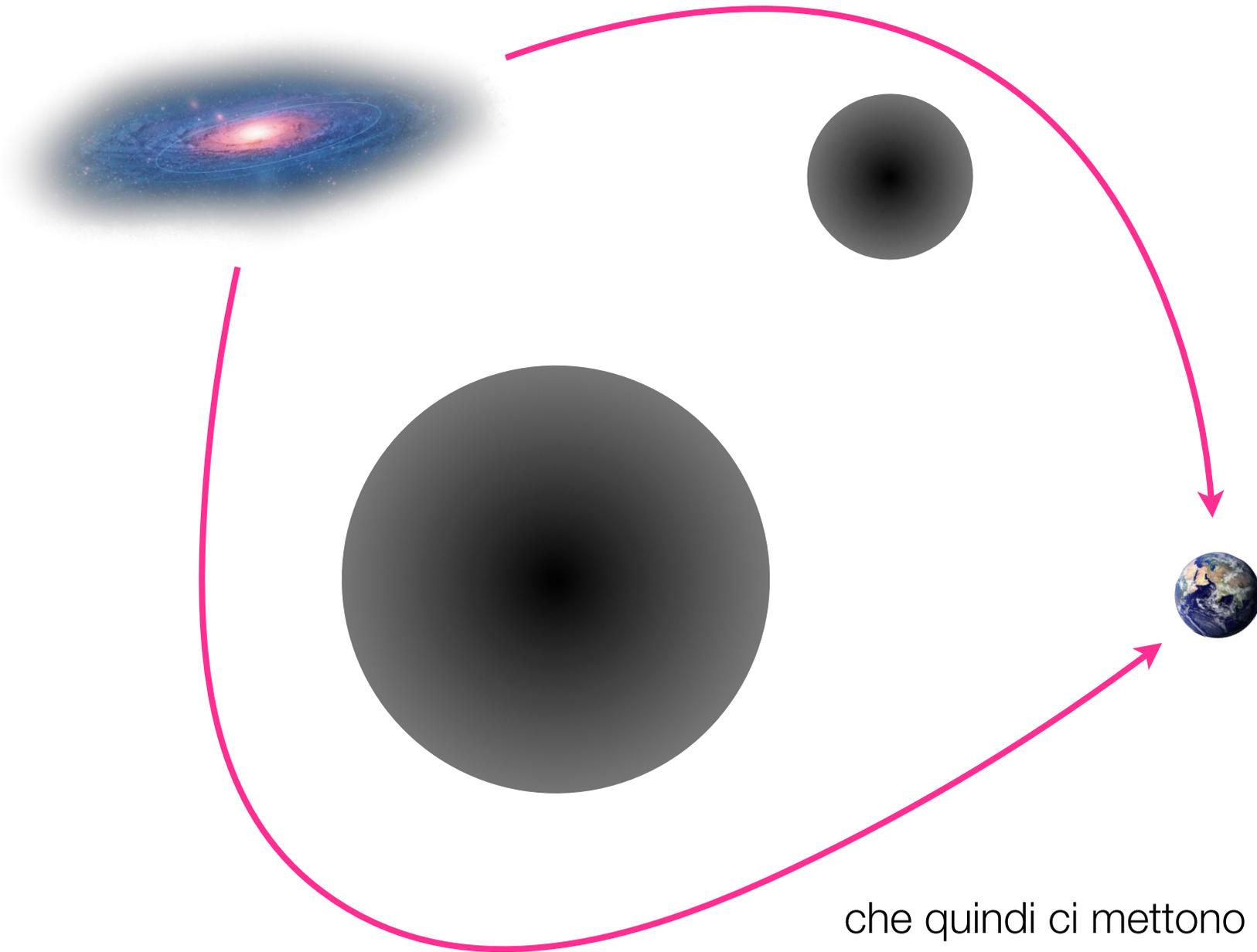
**quattro immagini  
dello stesso quasar**

**due immagini (distorte)  
della stessa galassia**

# Potrebbero esistere percorsi più lunghi di altri

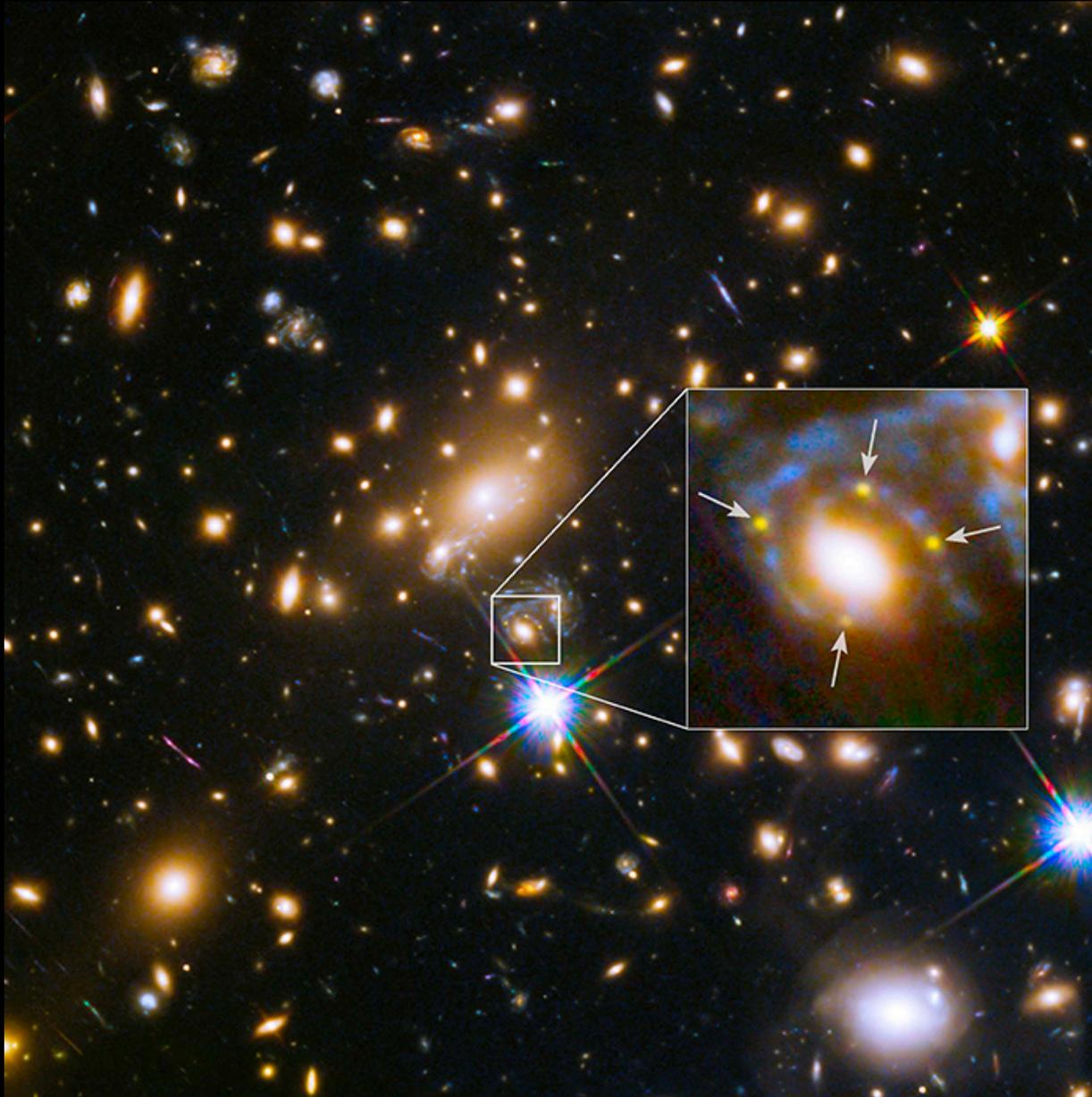


# Potrebbero esistere percorsi più lunghi di altri



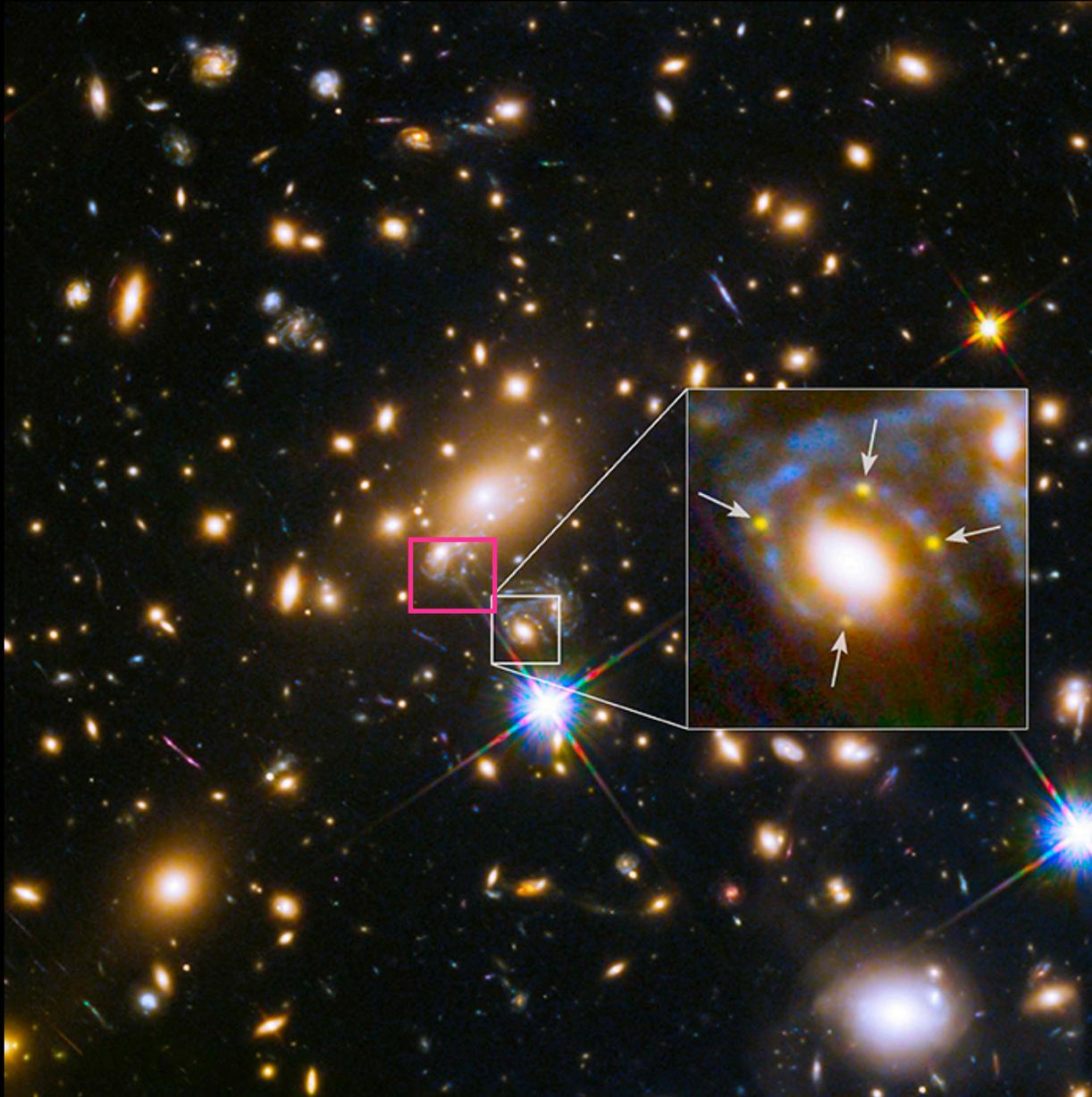
che quindi ci mettono più tempo

# Questo effetto lo abbiamo capito bene



**quattro immagini  
della stessa supernova  
attorno a una galassia  
apparse nel 2014  
(‘croce di Einstein’)**

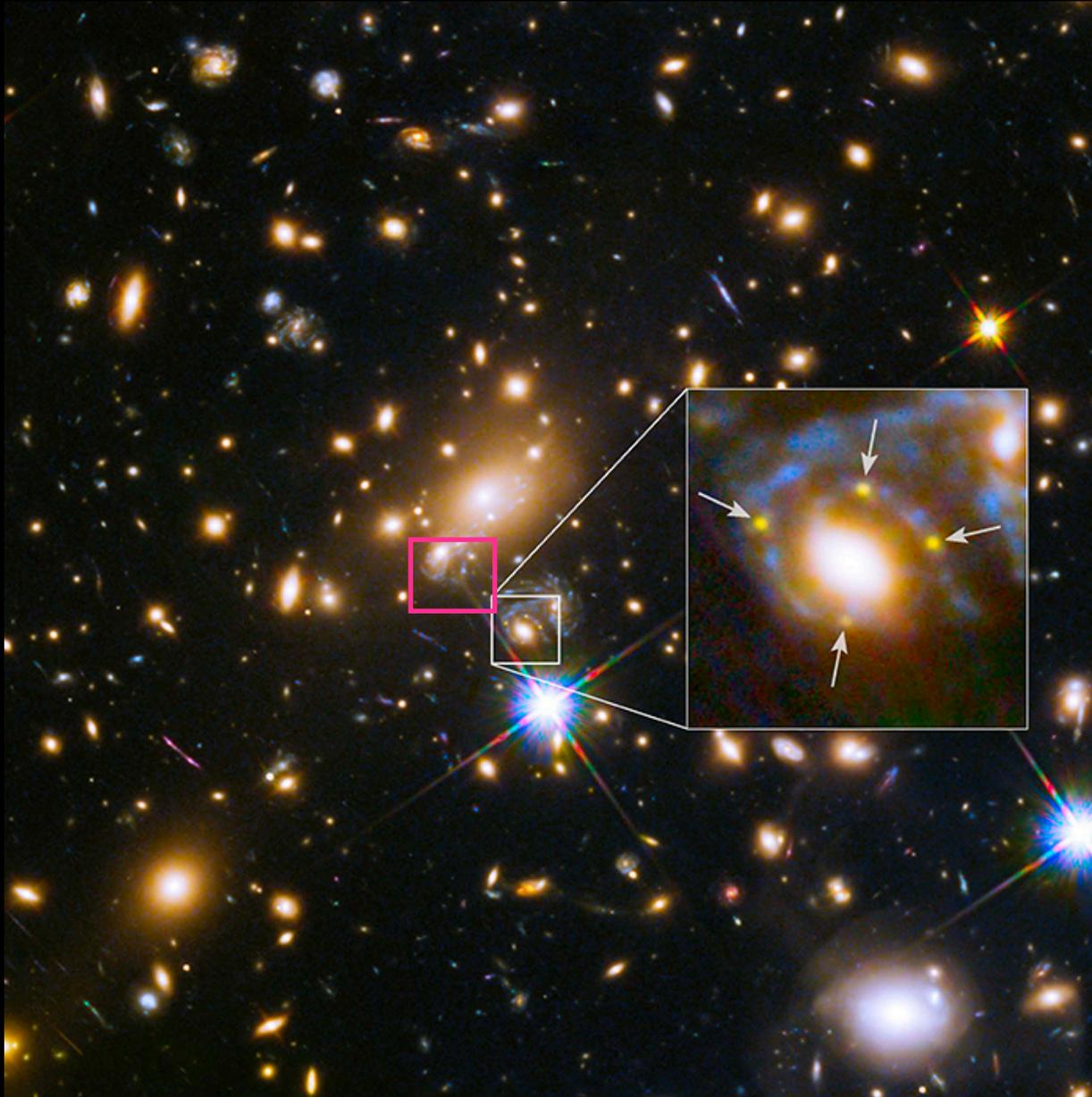
# Questo effetto lo abbiamo capito bene



**quattro immagini  
della stessa supernova  
attorno a una galassia  
apparse nel 2014  
(‘croce di Einstein’)**

**dai calcoli delle masse  
in quel settore di cielo  
gli scienziati hanno previsto  
che una quinta immagine  
sarebbe dovuta apparire  
alla fine del 2015**

# Questo effetto lo abbiamo capito bene



# Il più grosso mistero della scienza moderna

C'è molta più massa nelle galassie di quanto vediamo

(la massa visibile è solo il 15%)

# Il più grosso mistero della scienza moderna

C'è molta più massa nelle galassie di quanto vediamo

(la massa visibile è solo il 15%)

Questa materia addizionale non interagisce con la luce

(è oscura)

# Il più grosso mistero della scienza moderna

C'è molta più massa nelle galassie di quanto vediamo

(la massa visibile è solo il 15%)

Questa materia addizionale non interagisce con la luce

(è oscura)

Nessuna delle particelle che conosciamo spiega questo fenomeno

(le abbiamo testate tutte)

# Il più grosso mistero della scienza moderna

C'è molta più massa nelle galassie di quanto vediamo

(la massa visibile è solo il 15%)

Questa materia addizionale non interagisce con la luce

(è oscura)

Nessuna delle particelle che conosciamo spiega questo fenomeno

(le abbiamo testate tutte)

Quindi non capiamo l'85% della materia dell'Universo

(ma ci stiamo lavorando)

**Fine**

