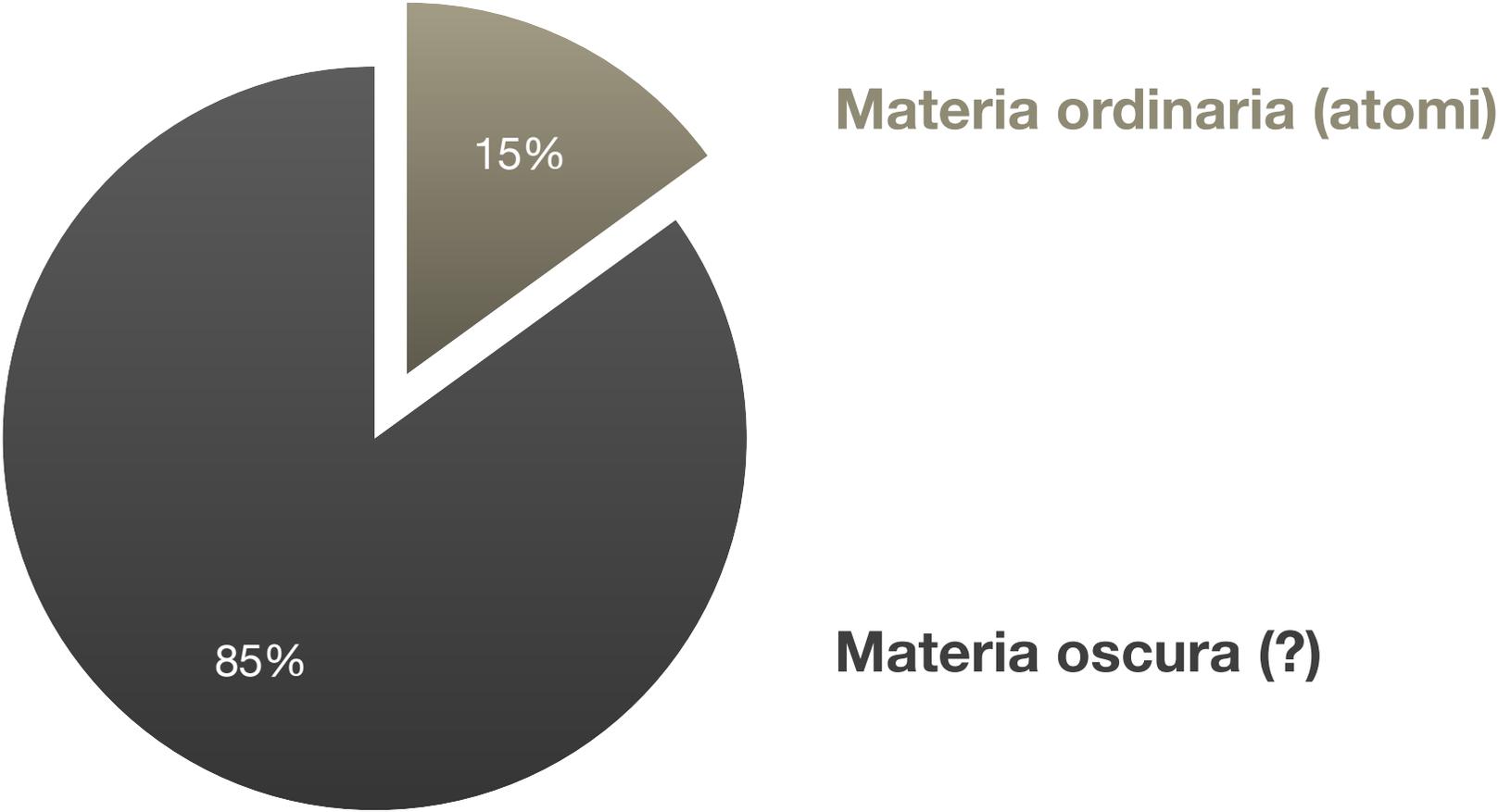


La Materia Oscura



Francesco Pandolfi
(INFN Roma)
Liceo Scientifico Cavour
22.02.23

La maggior parte dell'Universo è fatto di materia oscura



Quattro prove dell'esistenza della materia oscura

1. Le curve di rotazione delle galassie
2. Il *lensing* gravitazionale
3. Il 'Bullet cluster'
4. La radiazione cosmica di fondo

Quattro prove dell'esistenza della materia oscura

1. Le curve di rotazione delle galassie

2. Il *lensing* gravitazionale

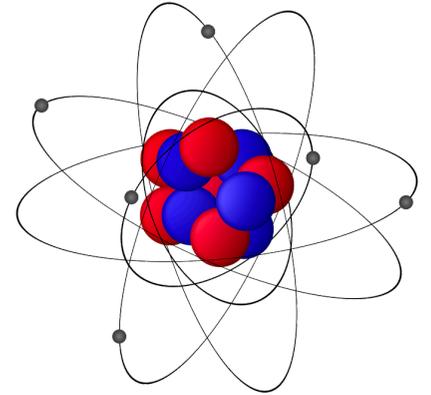
3. Il 'Bullet cluster'

4. La radiazione cosmica di fondo

Cominciamo dalla Terra



Fatta di atomi



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

Queste particelle hanno **massa**

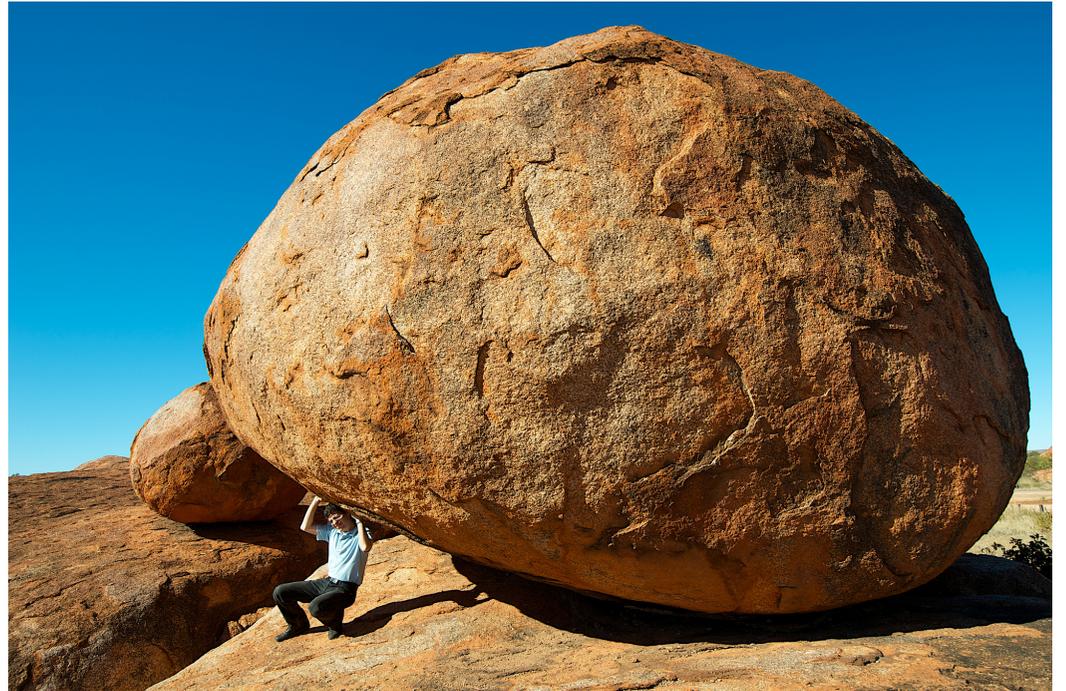
Due definizioni di massa

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**

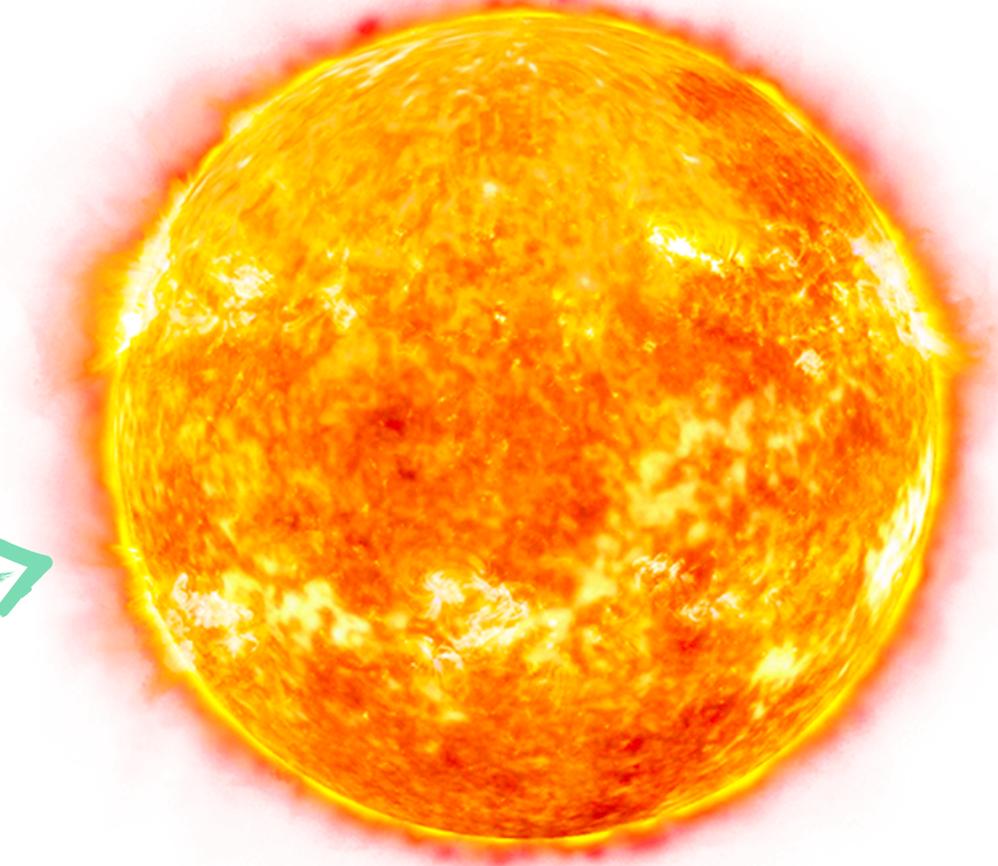
La gravità ci tiene ancorati al terreno



Oggetti pesanti sono 'più ancorati'

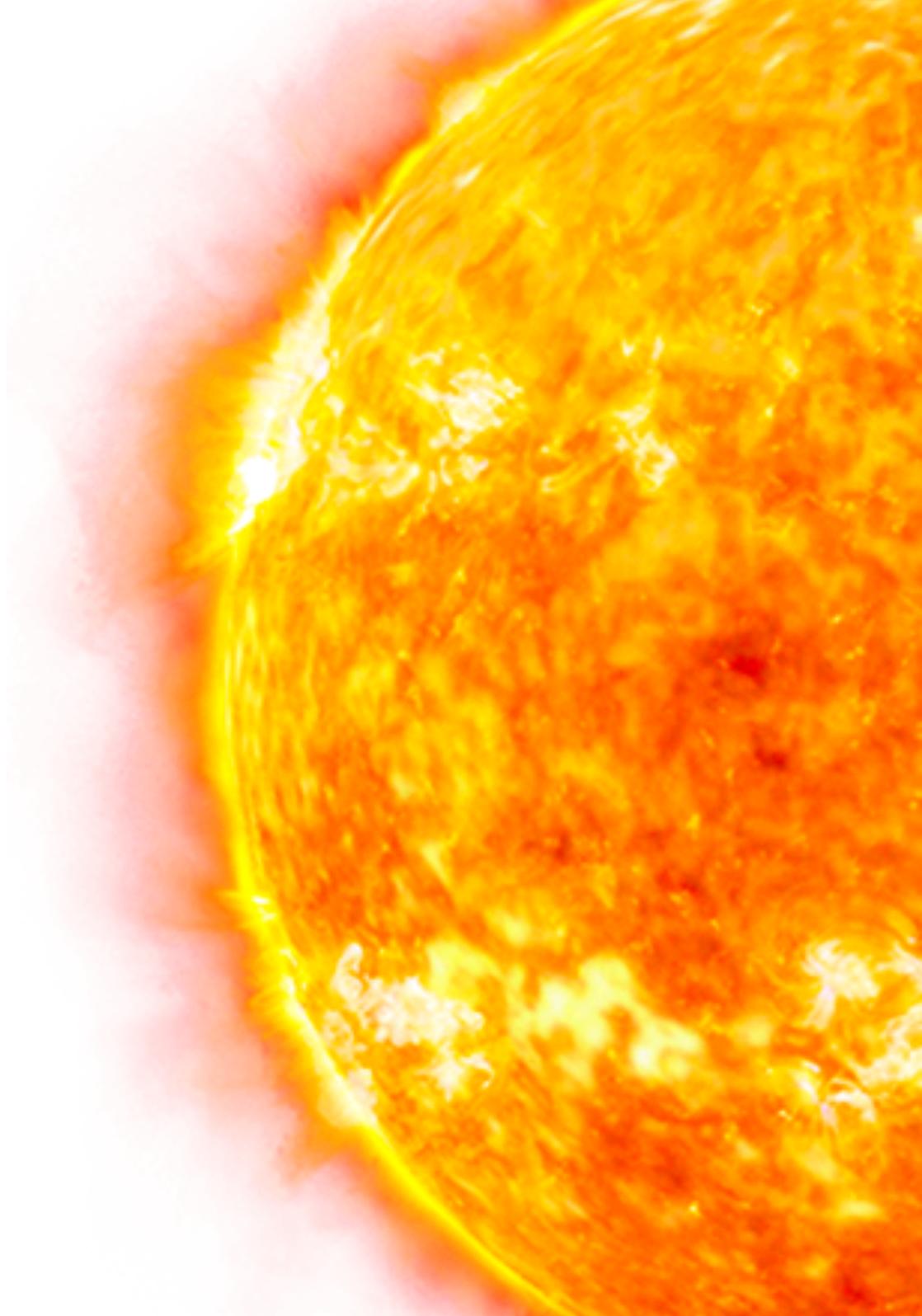


E tiene la Terra ancorata al Sole



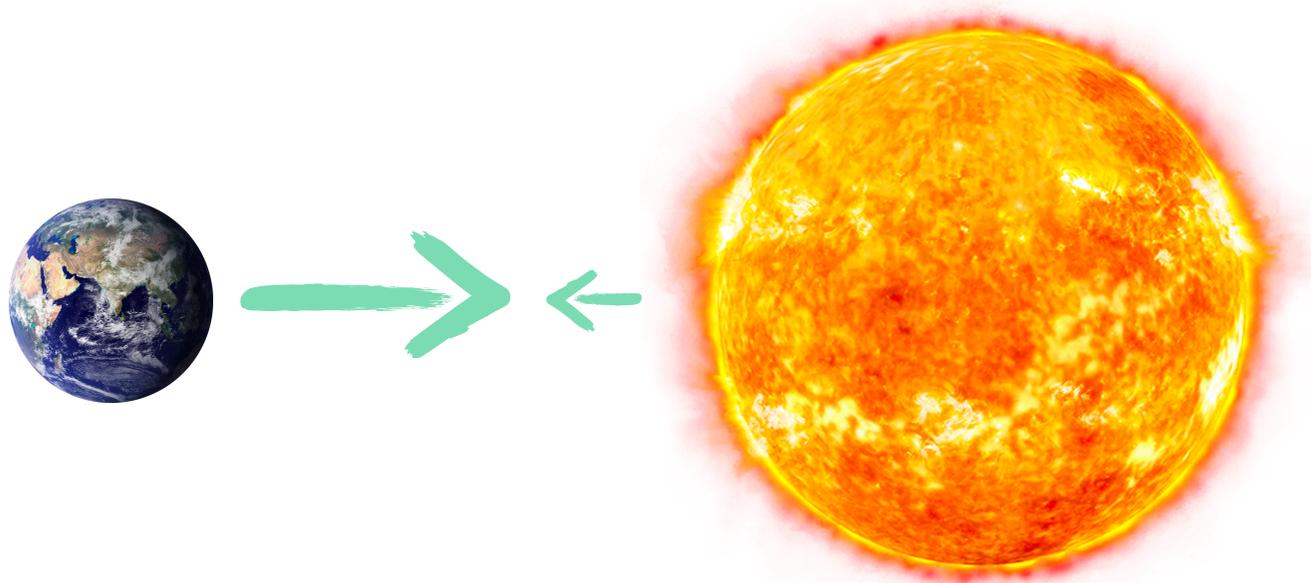
(non in scala)

In scala

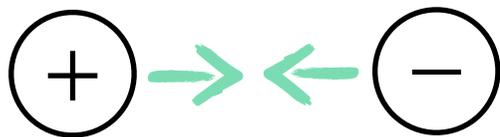


Come funziona la gravità?

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)

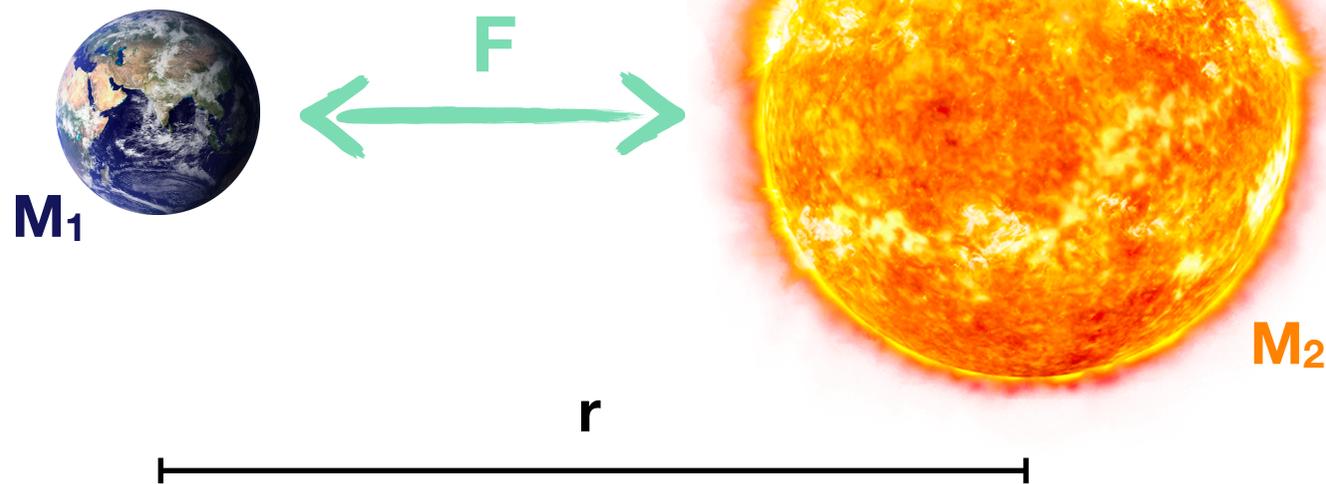
Questa è l'unica formula di oggi (quindi cerchiamo di capirla)

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

M₁ e **M₂** sono le due masse

r è la distanza

G è una costante (non importa)



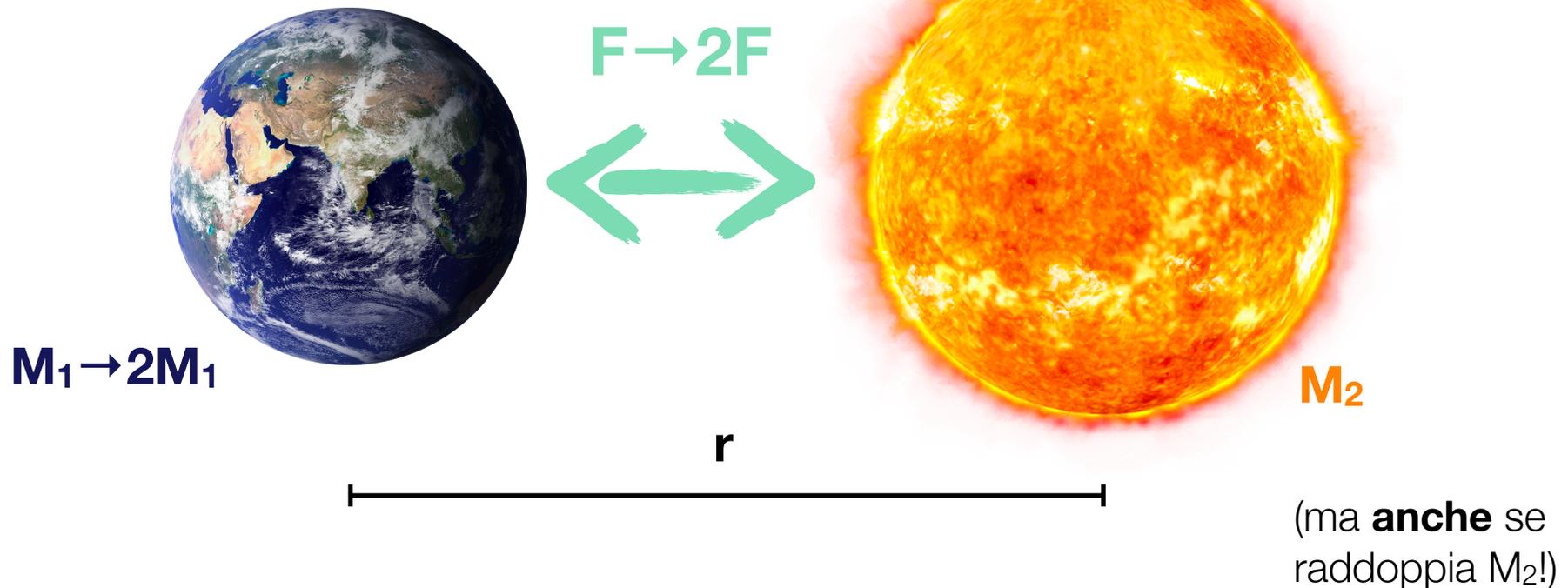
Questa è l'unica formula di oggi (quindi cerchiamo di capirla)

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

M_1 e M_2 sono le due masse

r è la distanza

G è una costante (non importa)



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

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

M₁ e **M₂** sono le due masse

r è la distanza

G è una costante (non importa)



M₁

F → F/4



r → 2r

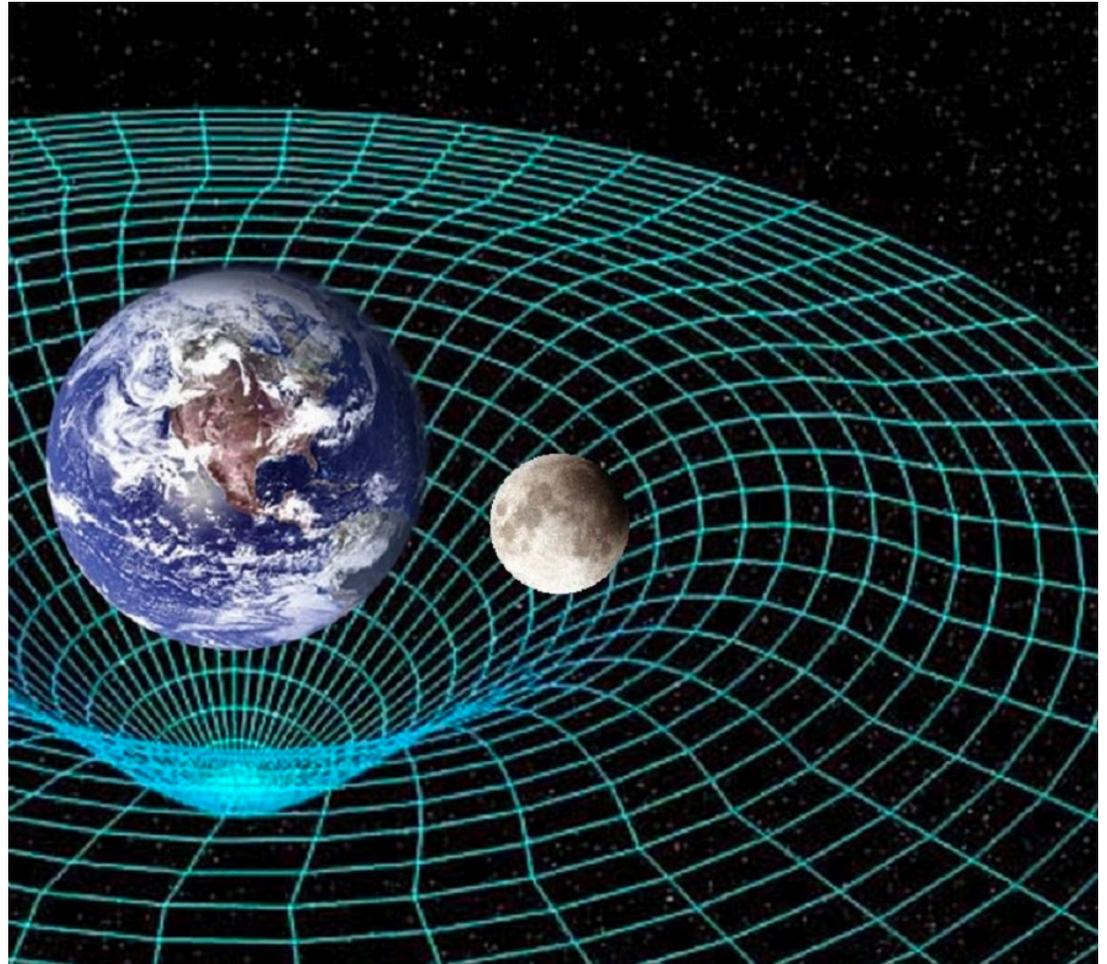
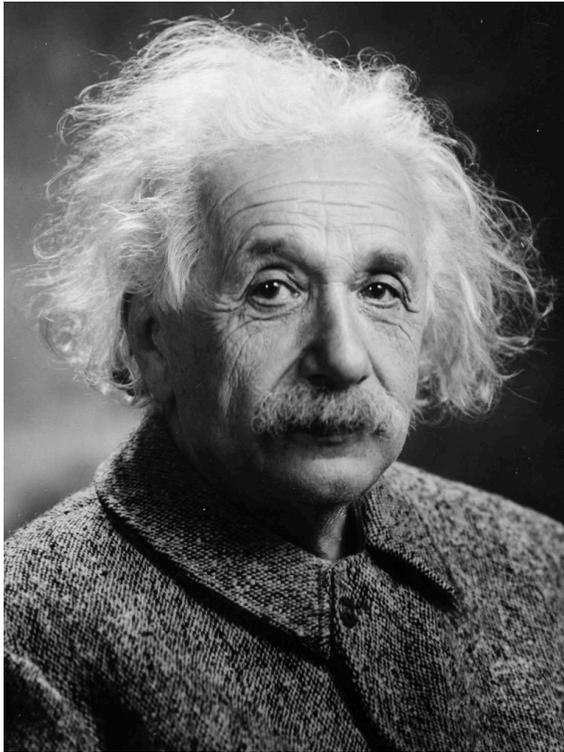


M₂



Poi arriva Einstein

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

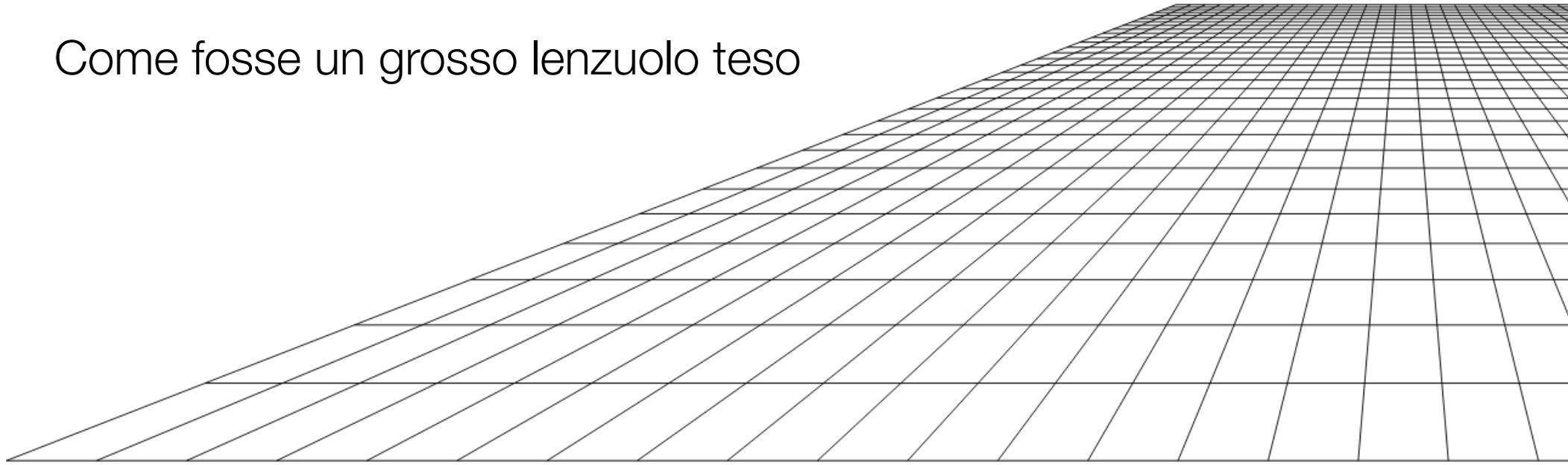


Come funziona davvero la gravità

Facciamo un esempio in due dimensioni:

facciamo finta che l'Universo sia un **piano** infinito

Come fosse un grosso lenzuolo teso



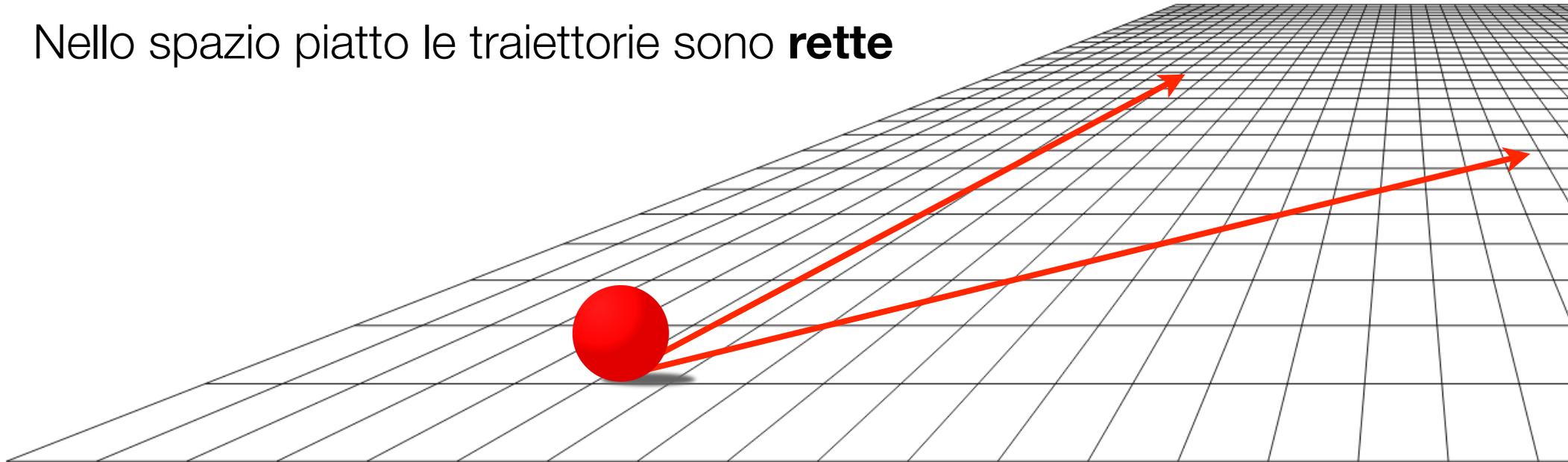
Come funziona davvero la gravità

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

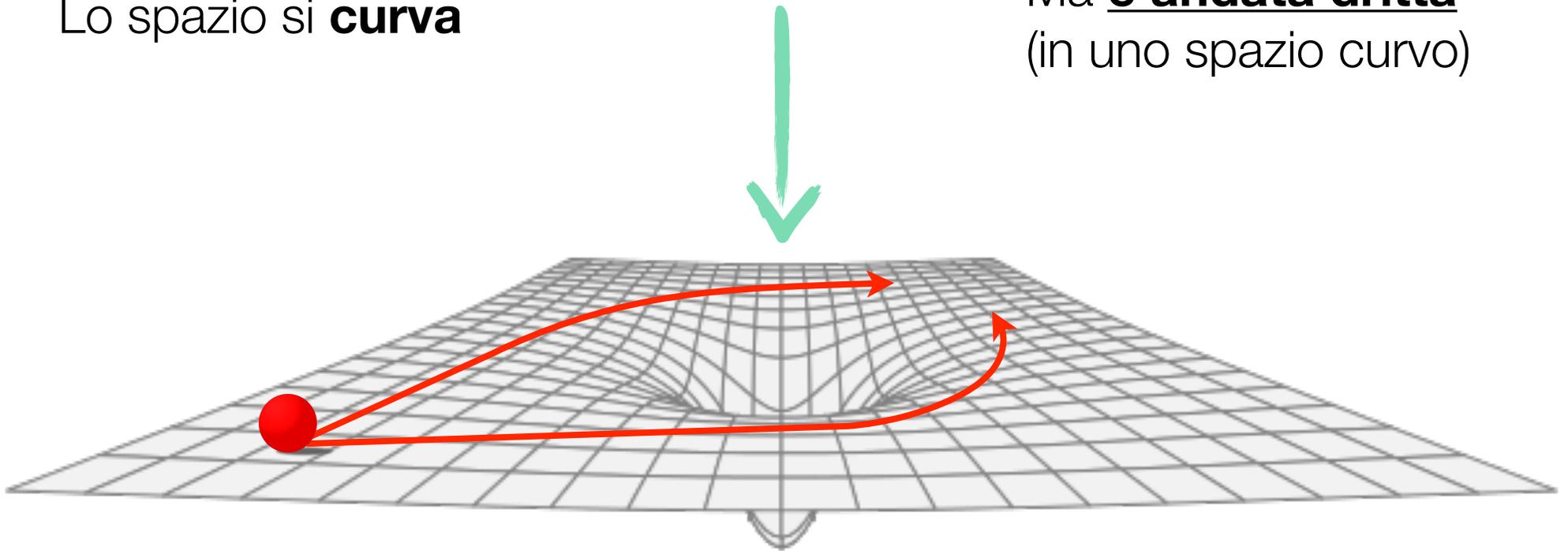
Adesso mettiamoci
una palla da bowling



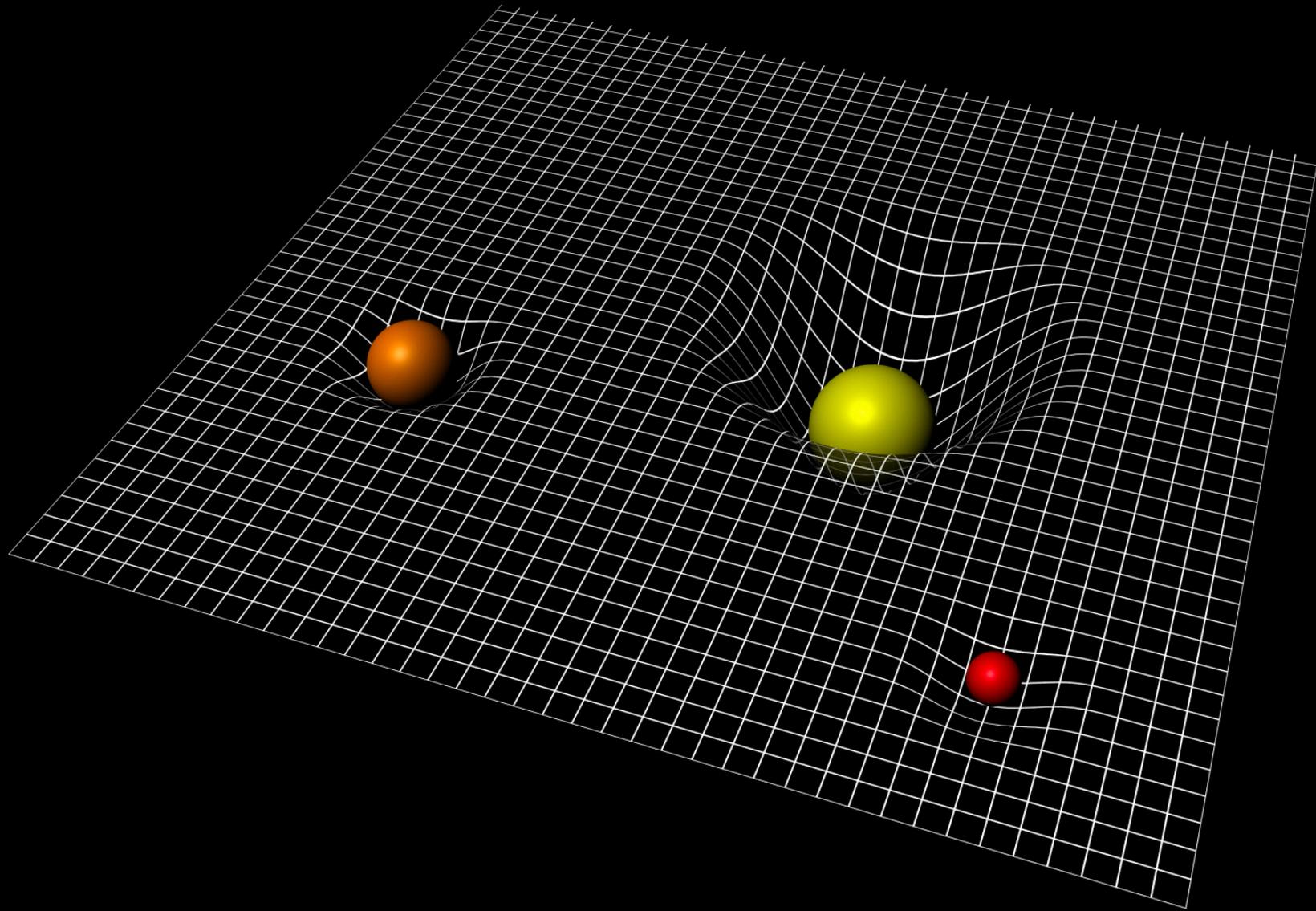
Se lancio una biglia
fa una traiettoria curva

Lo spazio si **curva**

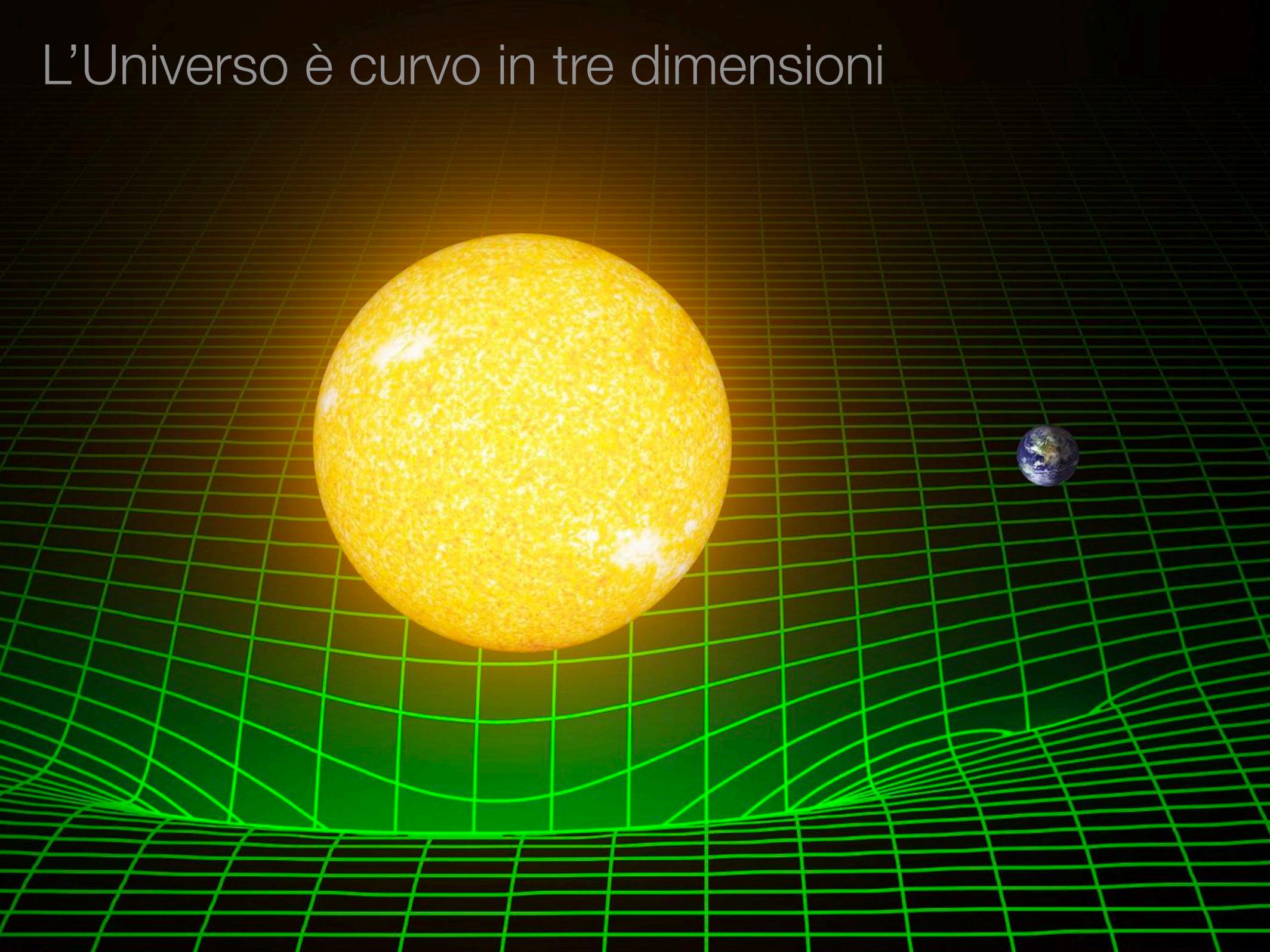
Ma **è andata dritta**
(in uno spazio curvo)



Più grande la massa, più grande la curvatura

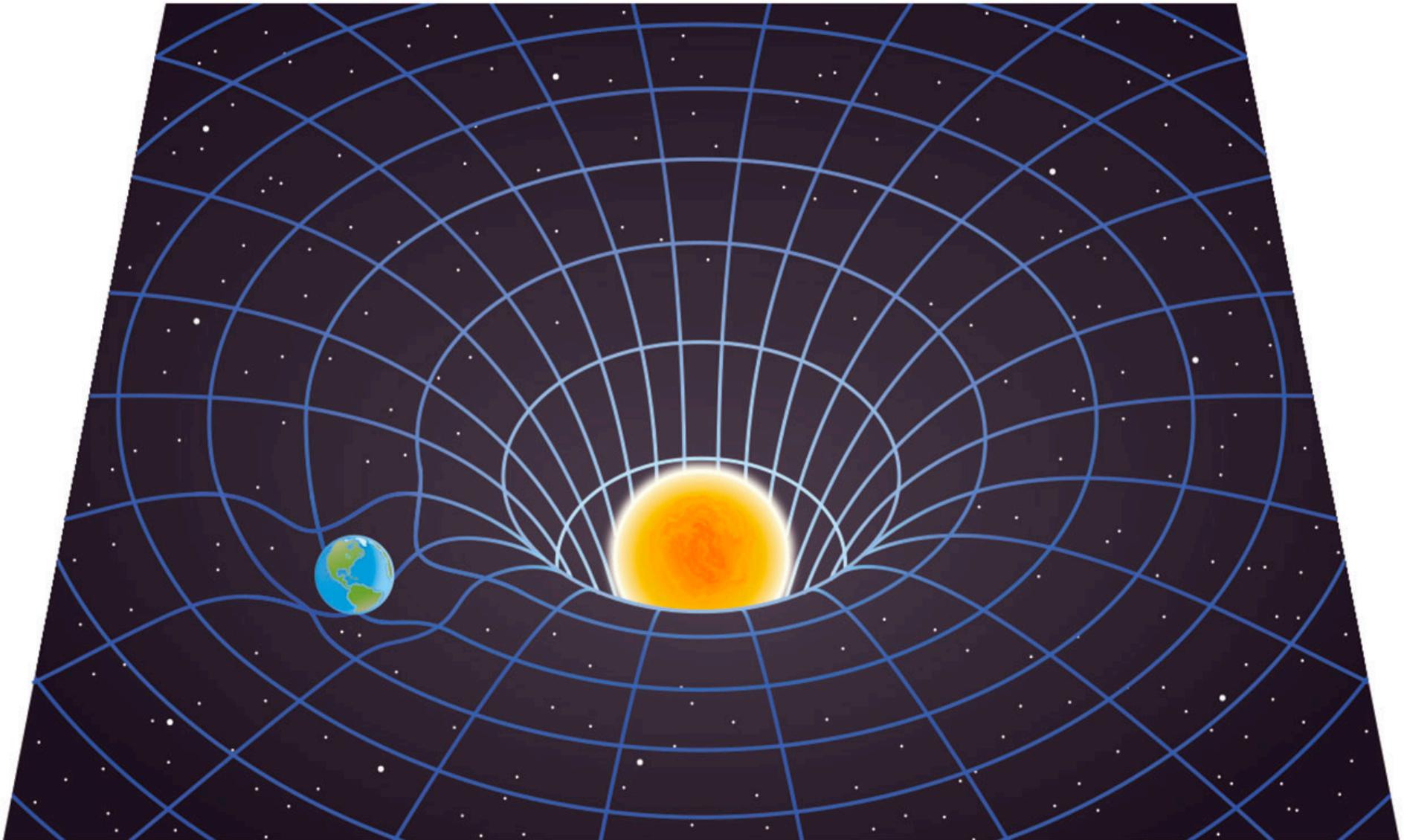


L'Universo è curvo in tre dimensioni



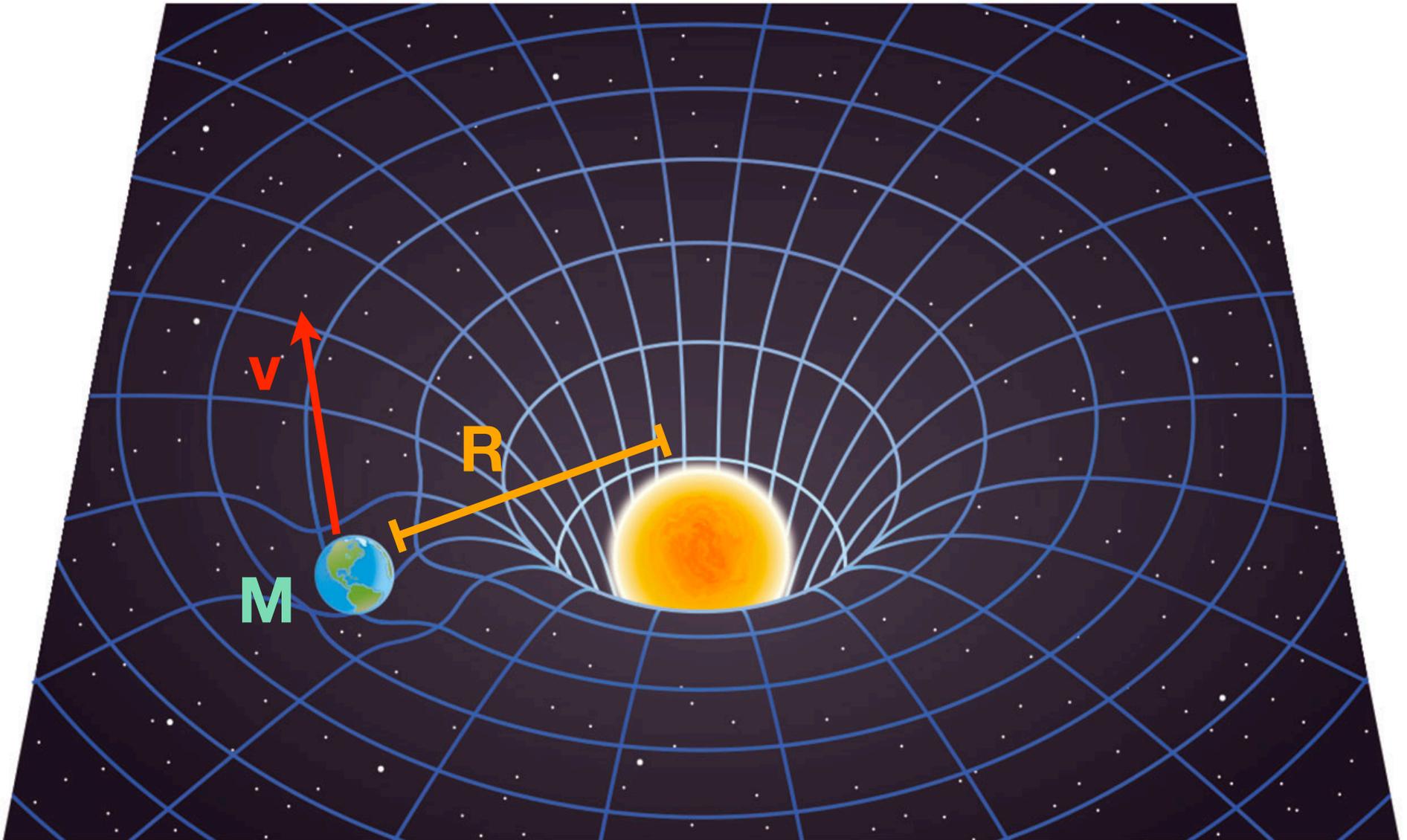
Come fa la Terra a rimanere in orbita?

Grazie a una precisa combinazione di M , v , R



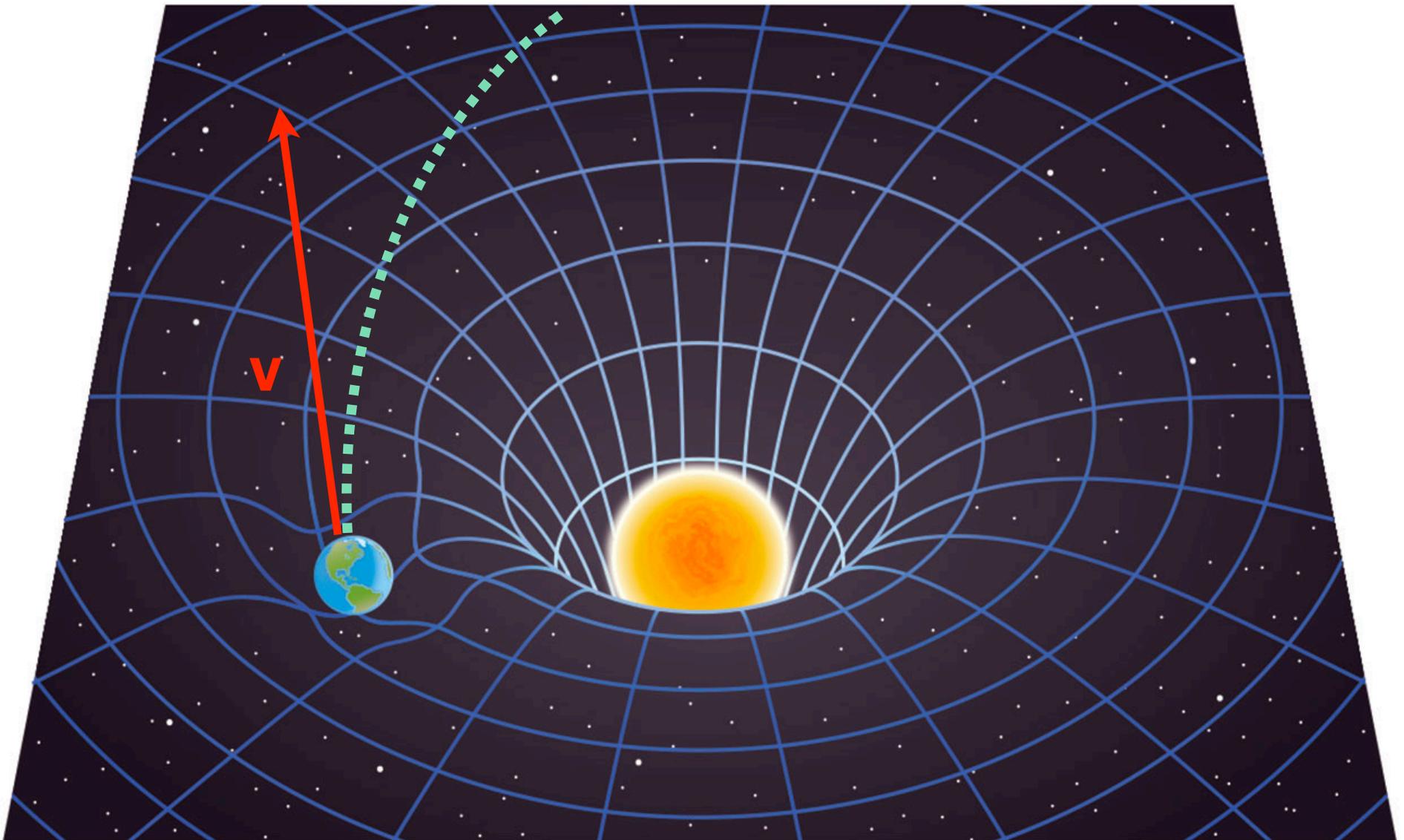
Come fa la Terra a rimanere in orbita?

Grazie a una precisa combinazione di M , v , R



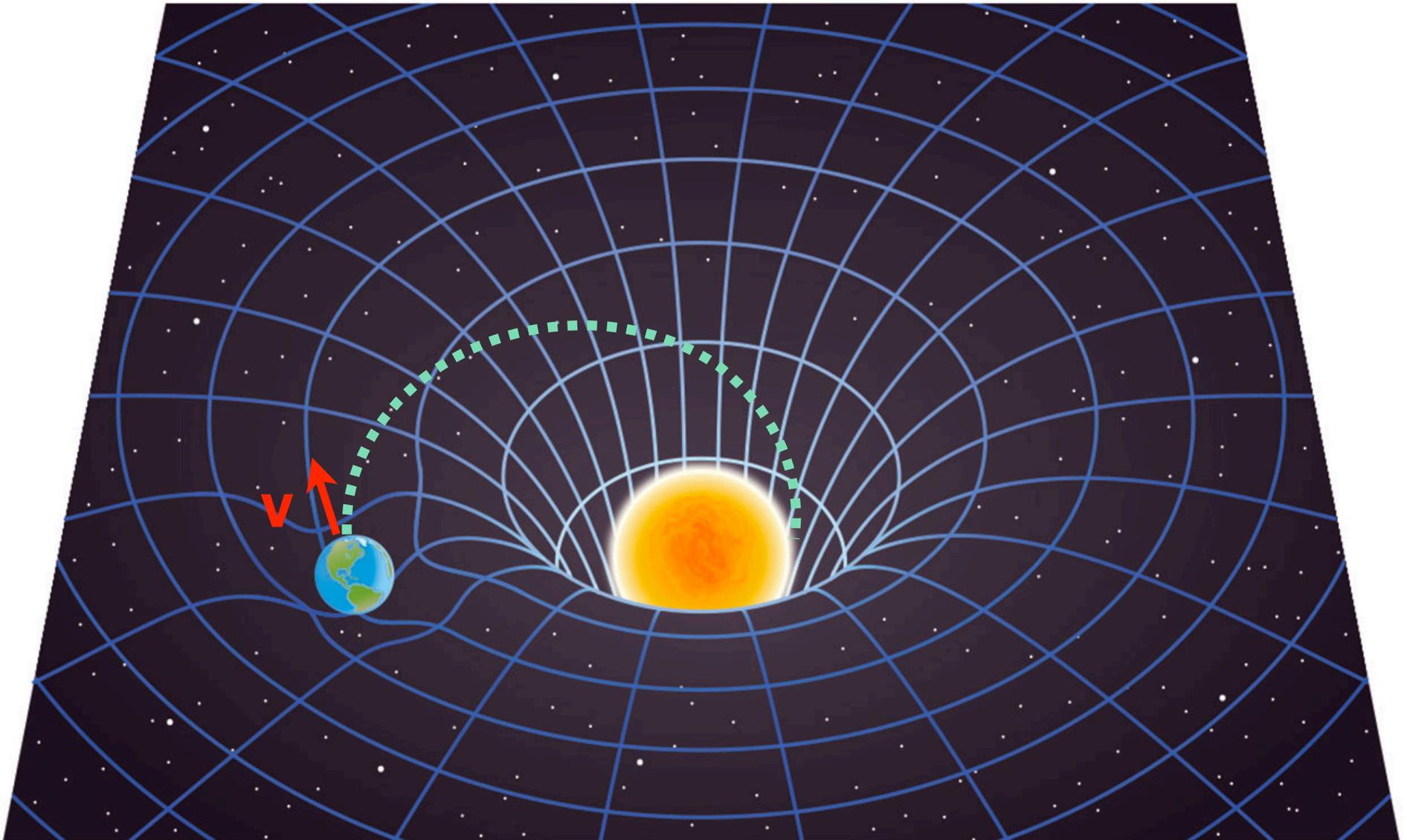
Come fa la Terra a rimanere in orbita?

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



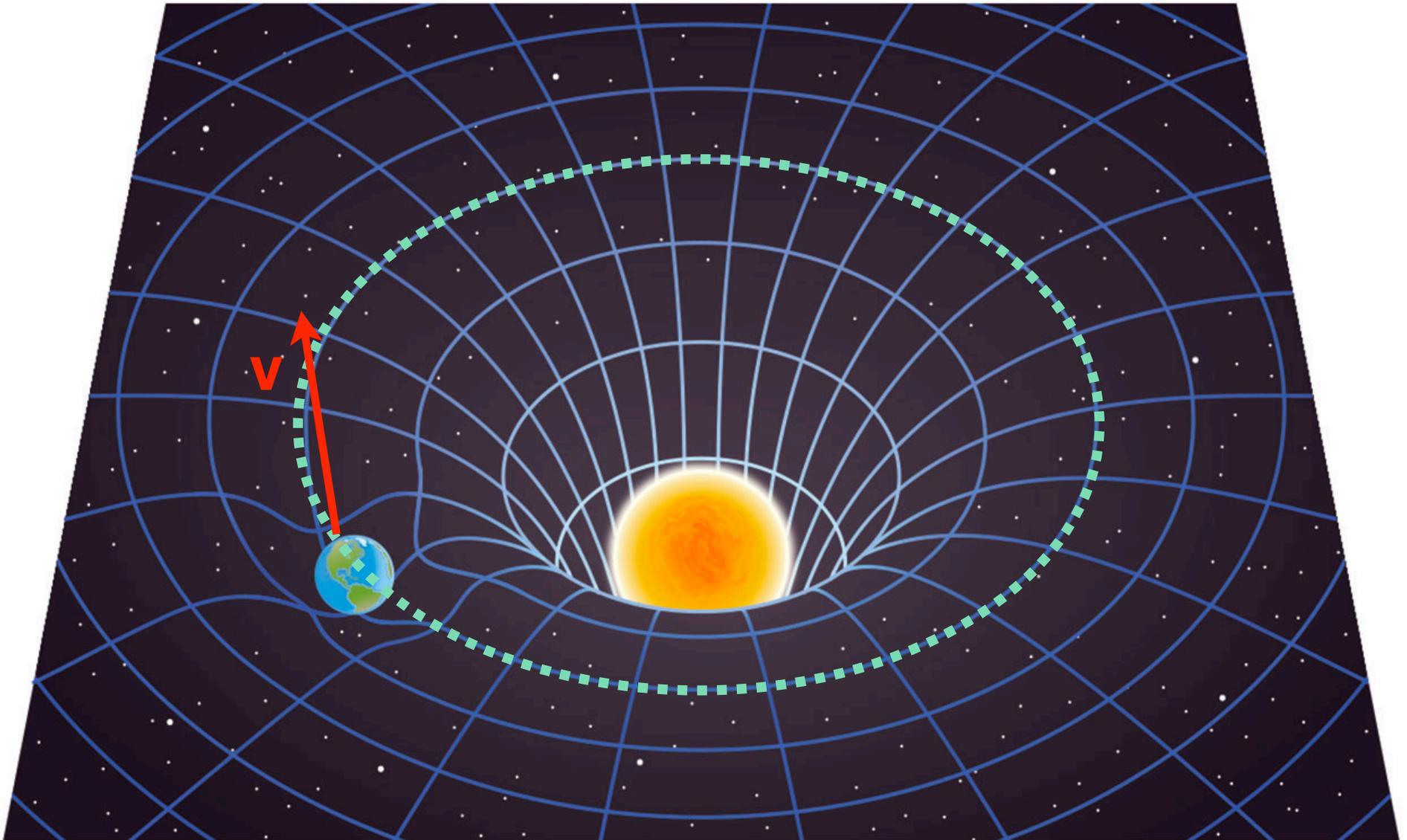
Come fa la Terra a rimanere in orbita?

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

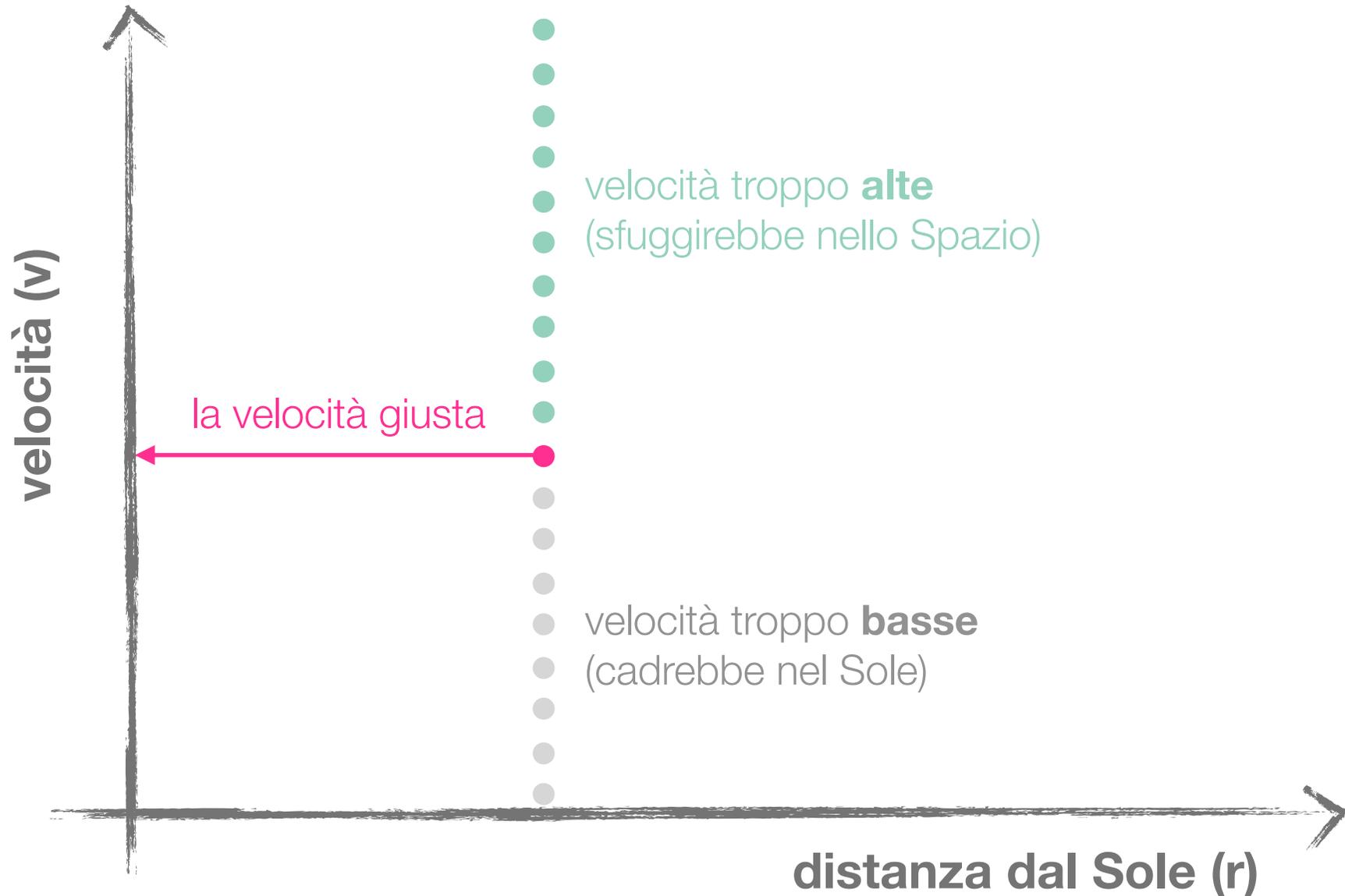


Come fa la Terra a rimanere in orbita?

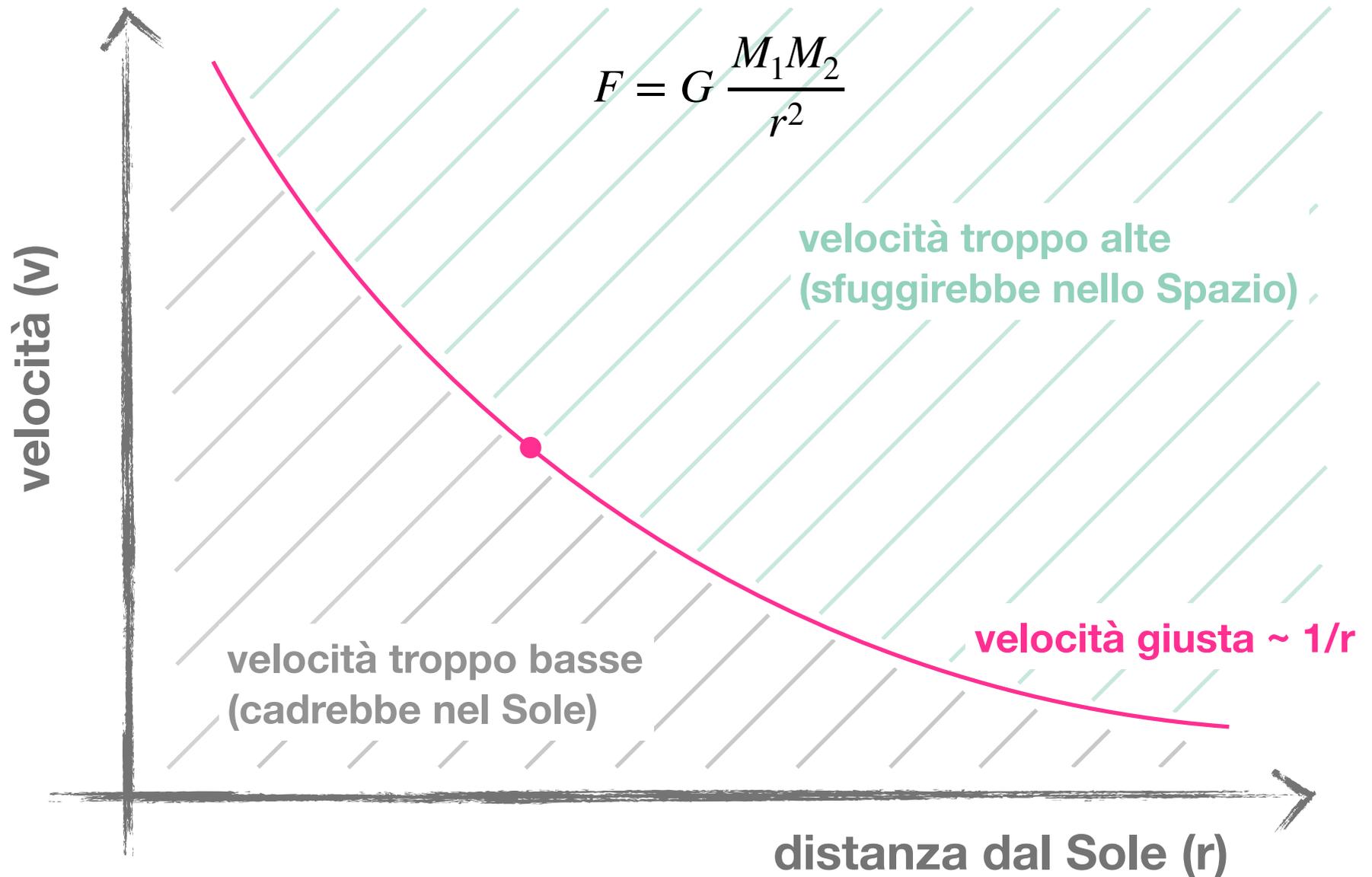
Con velocità **giusta**, la forza centrifuga bilancia l'attrazione di gravità



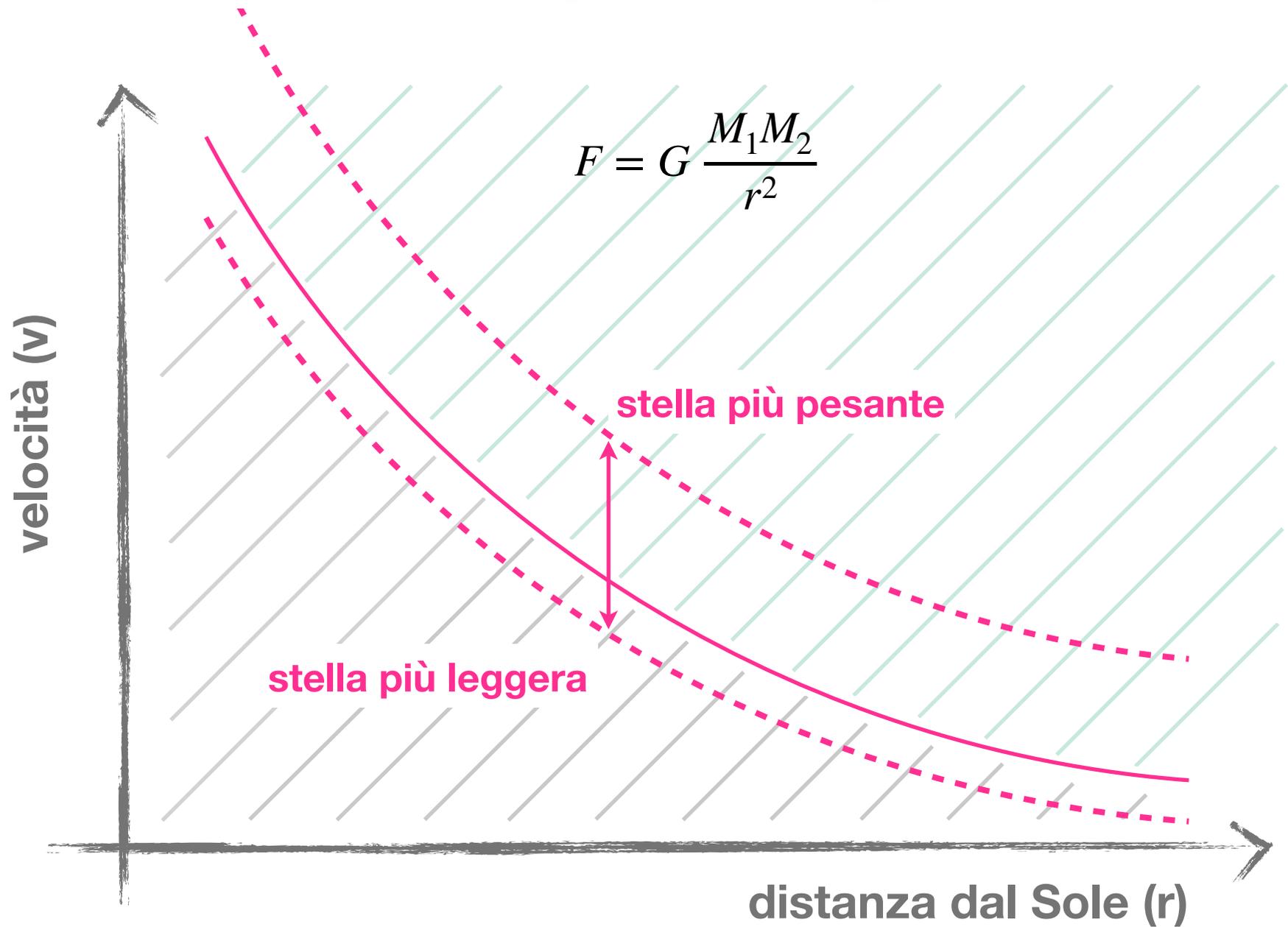
C'è solo **una** velocità giusta, a ogni distanza



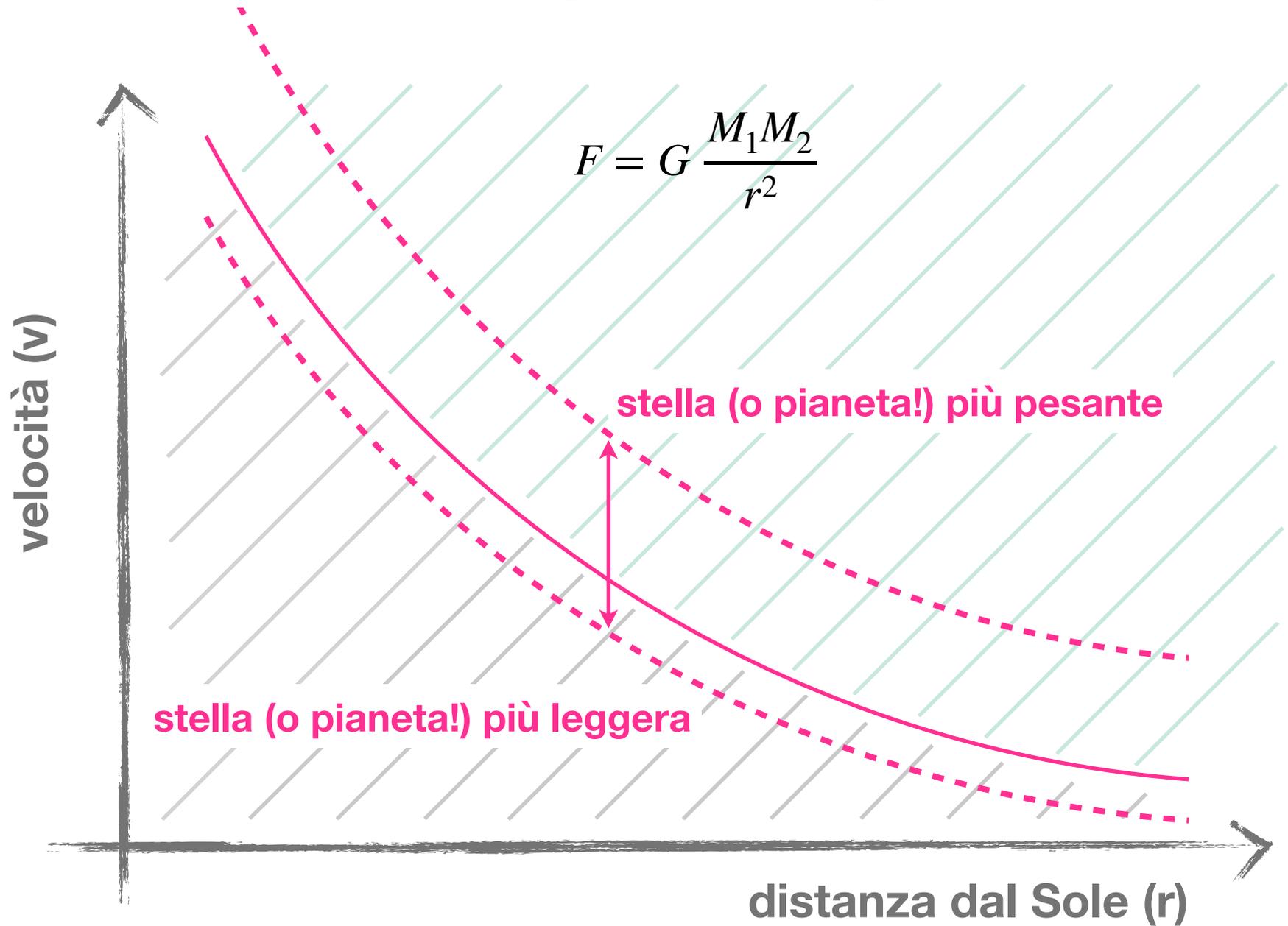
C'è solo **una** velocità giusta, a ogni distanza



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)



Orbita più velocemente Giove o Saturno?

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

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

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



Orbita più velocemente Giove o Saturno?

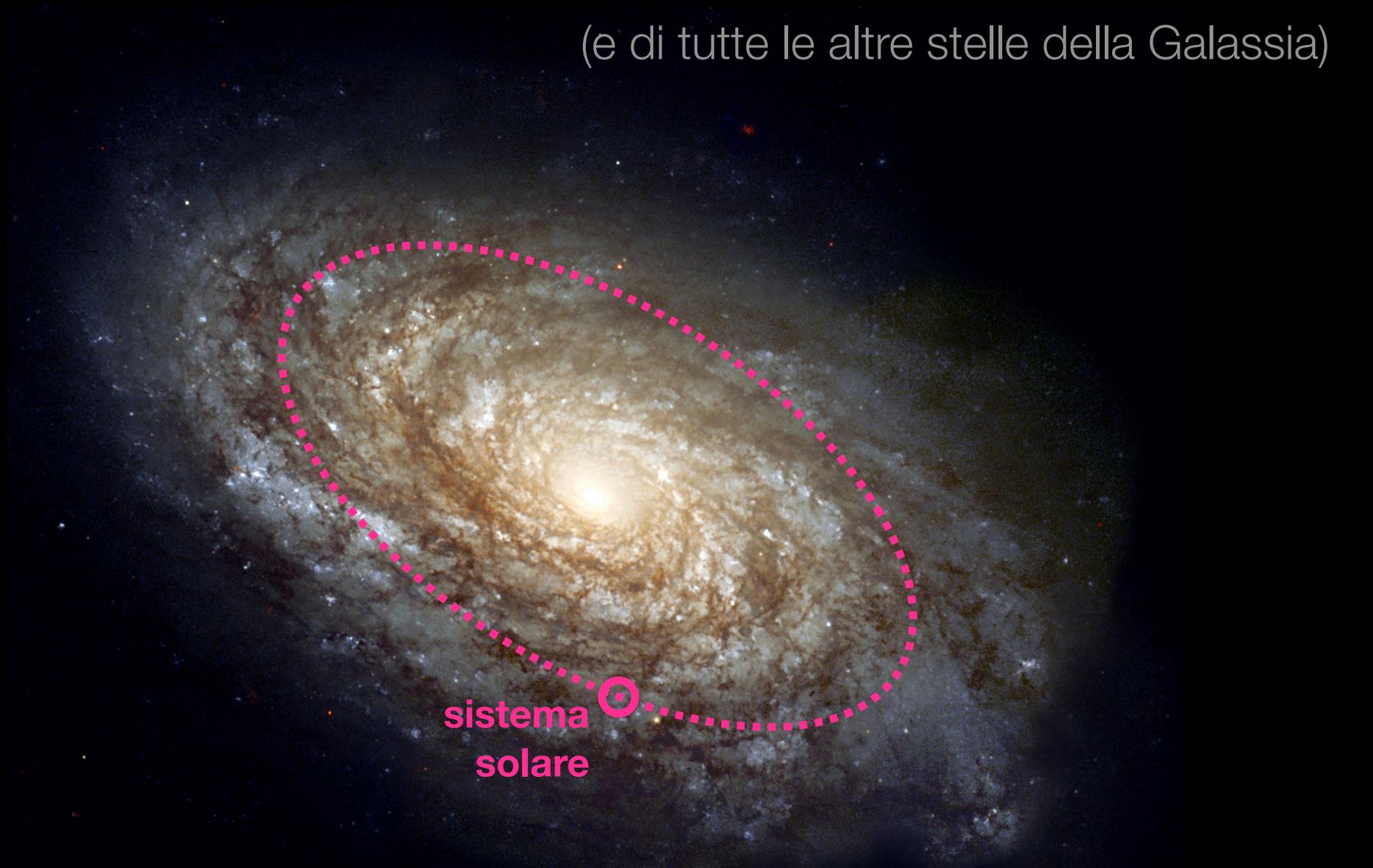
$M(\text{Giove}) > M(\text{Saturno})$

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

Risposta: Giove

Lo stesso vale per l'orbita del sistema solare

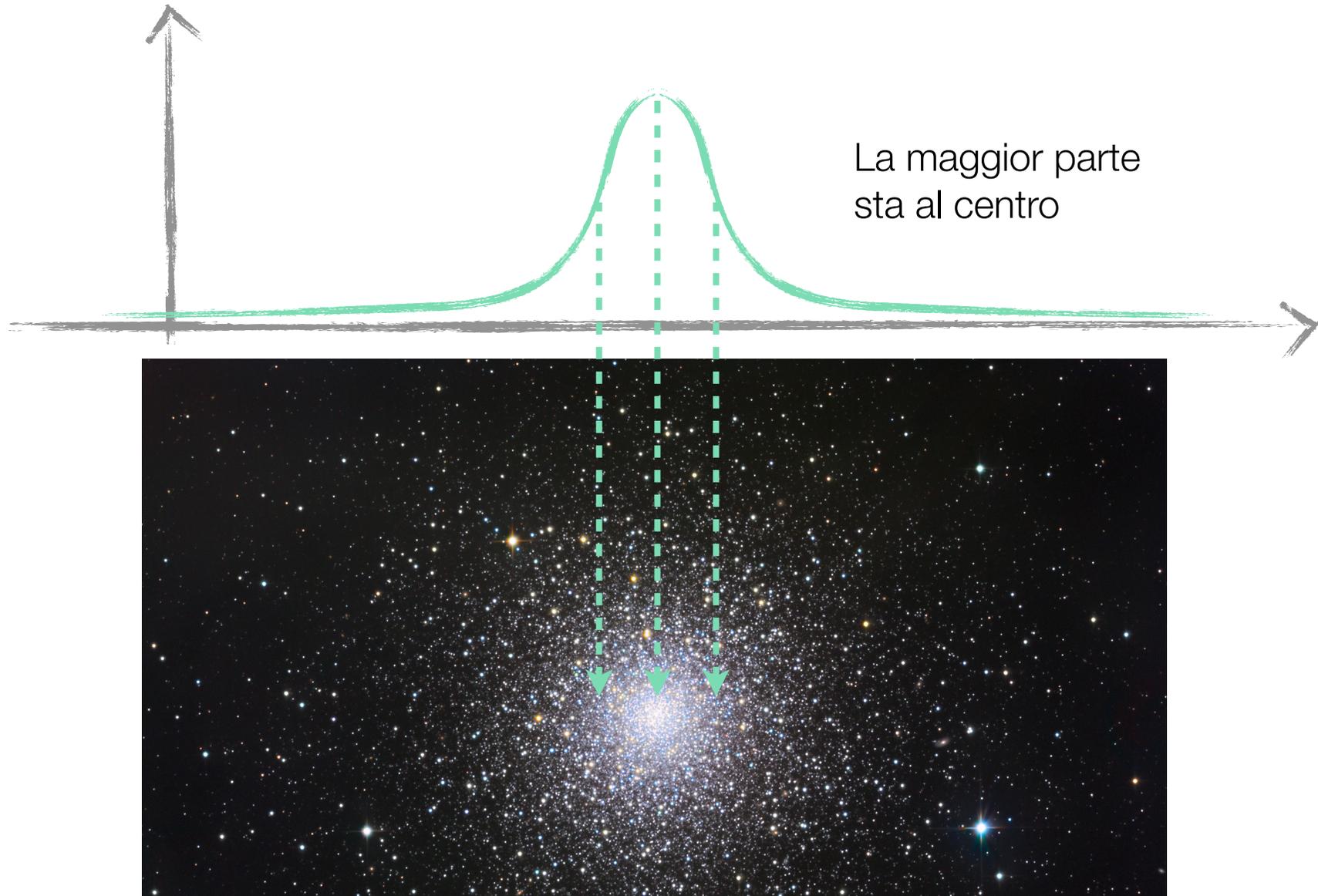
(e di tutte le altre stelle della Galassia)



c'è però una differenza importante...

Come è distribuita la materia visibile nelle galassie

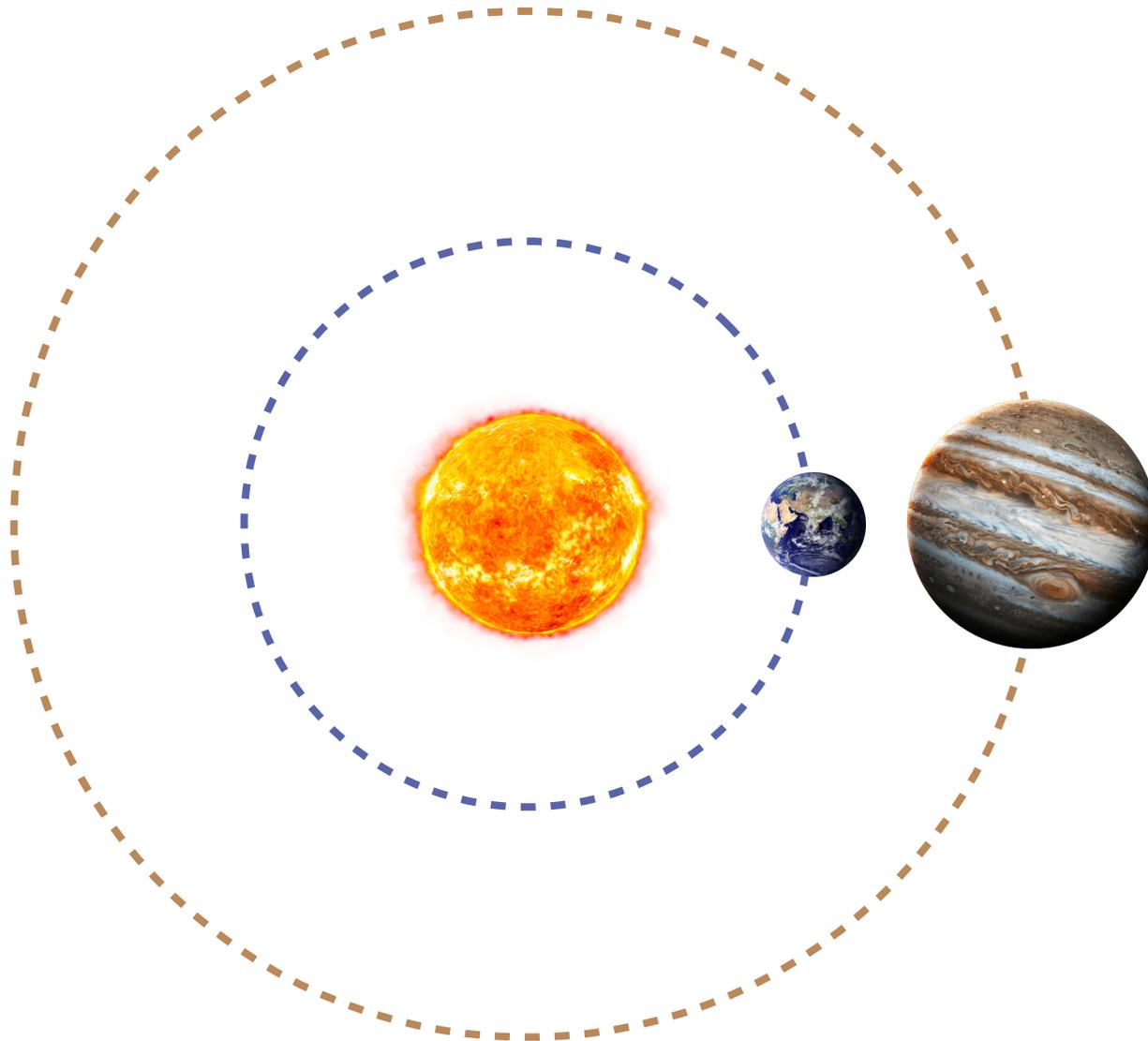
Una distribuzione fortemente **non** uniforme



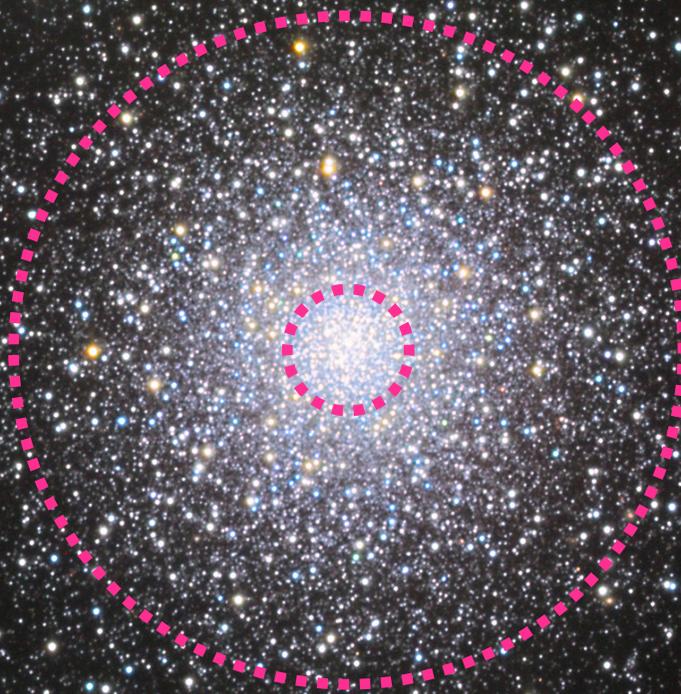
Quindi non è come il sistema solare

Dove pianeti con orbite diverse orbitano attorno alla stessa massa

(il Sole)

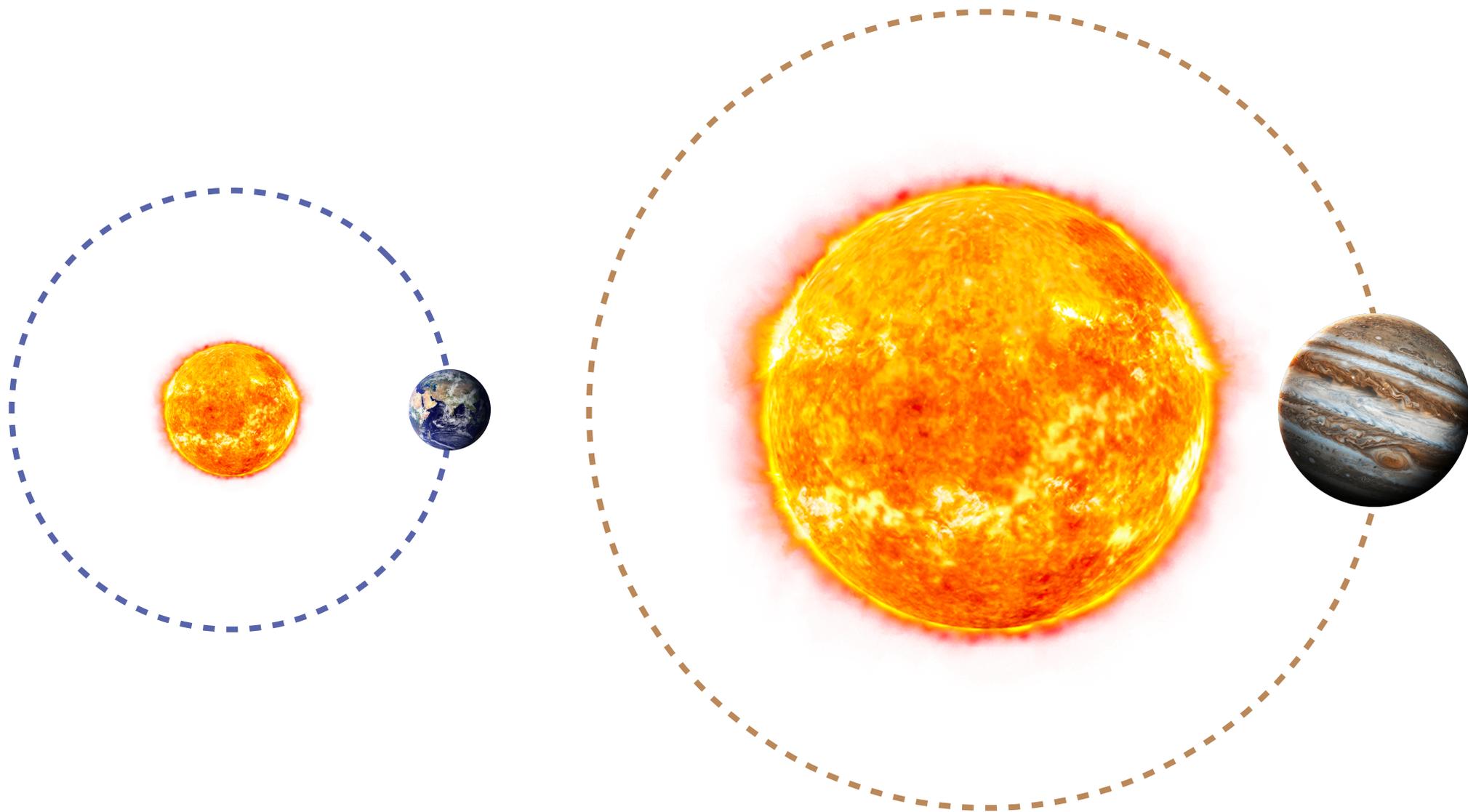


Nelle galassie la distanza conta!

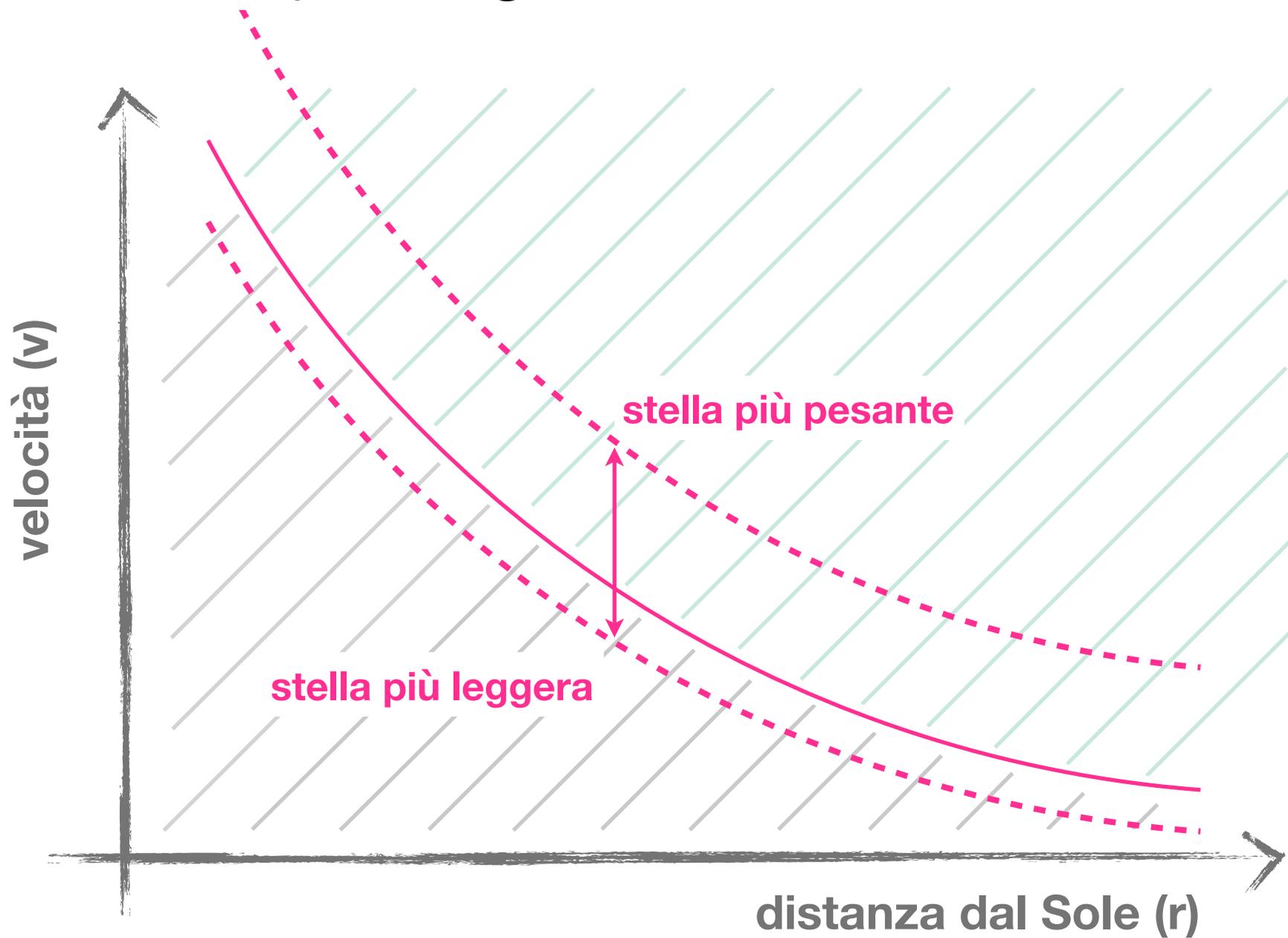


**Una stella lontana
orbita attorno a più massa
di una stella vicina**

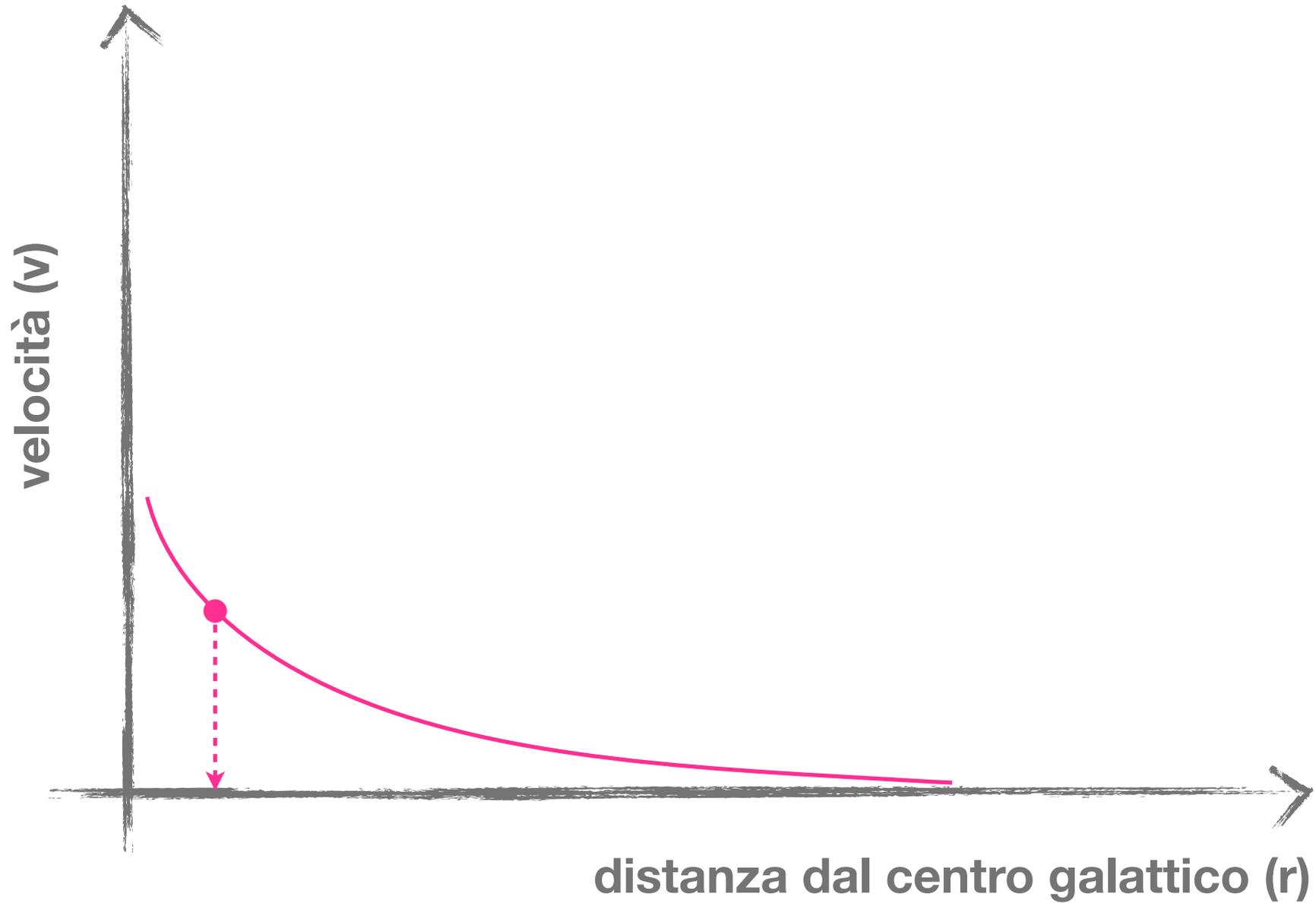
Un po' come orbitare attorno a un Sole
con massa che aumenta con la distanza



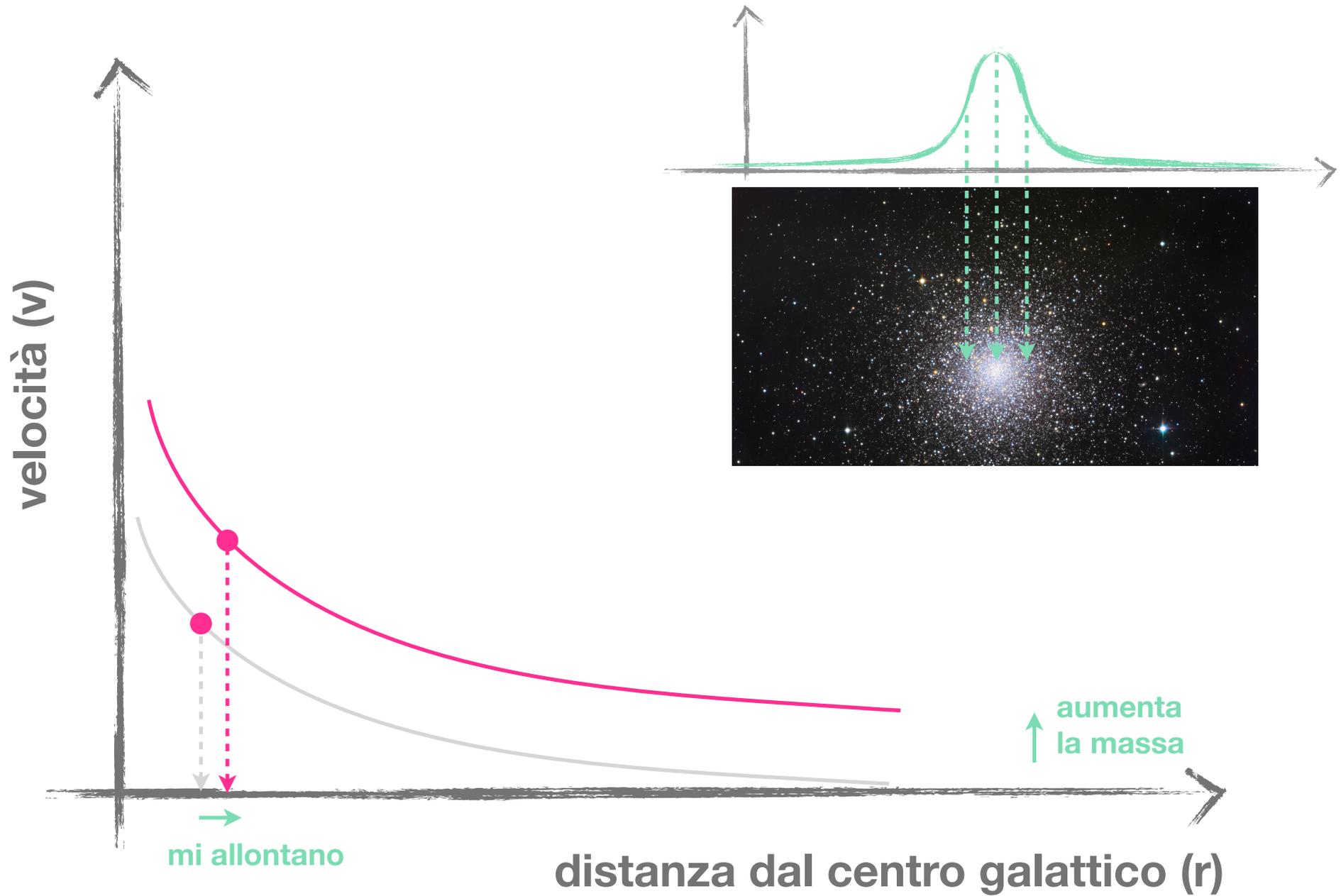
Vi ricordate questo grafico?



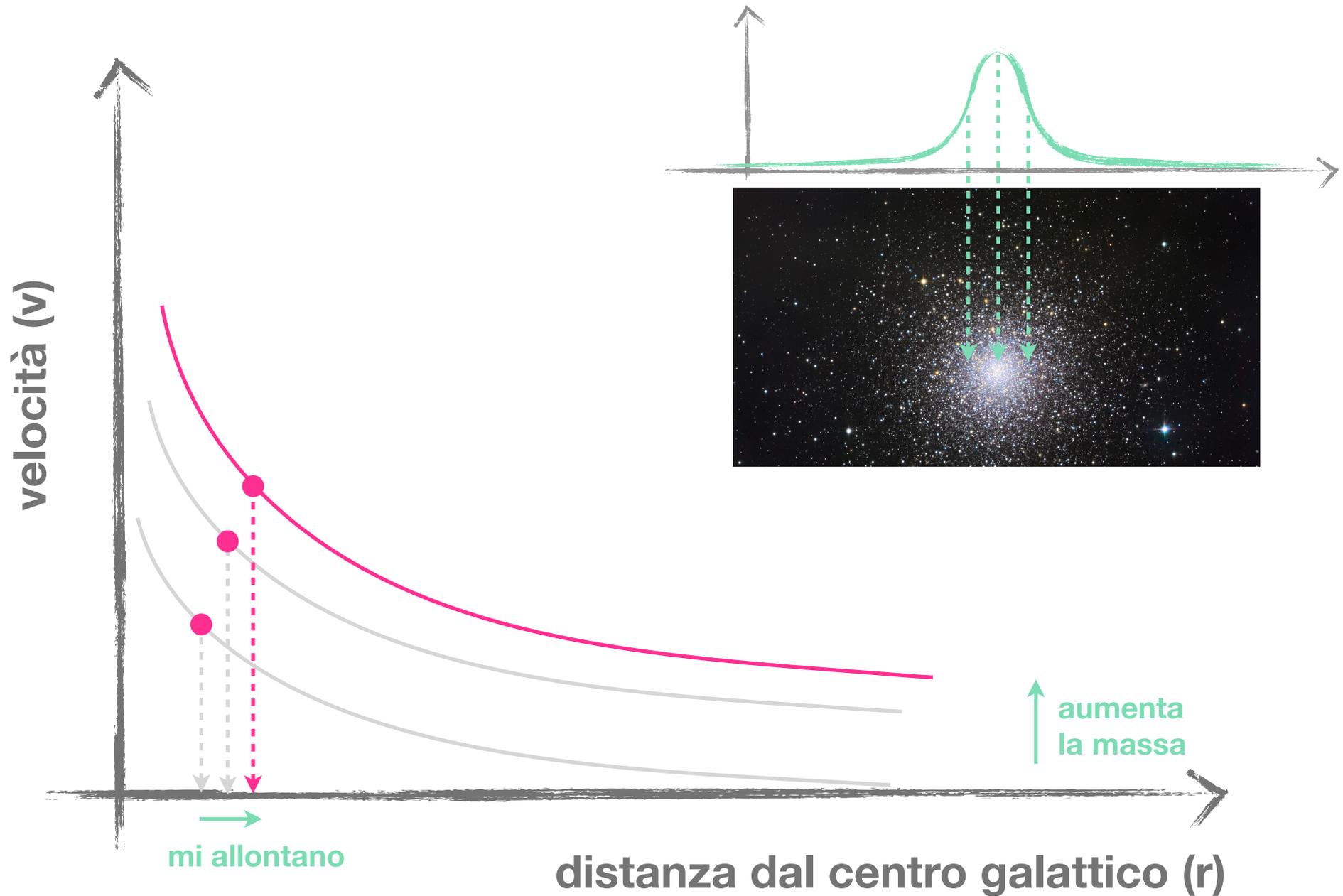
Capiamo la velocità di rotazione nelle galassie



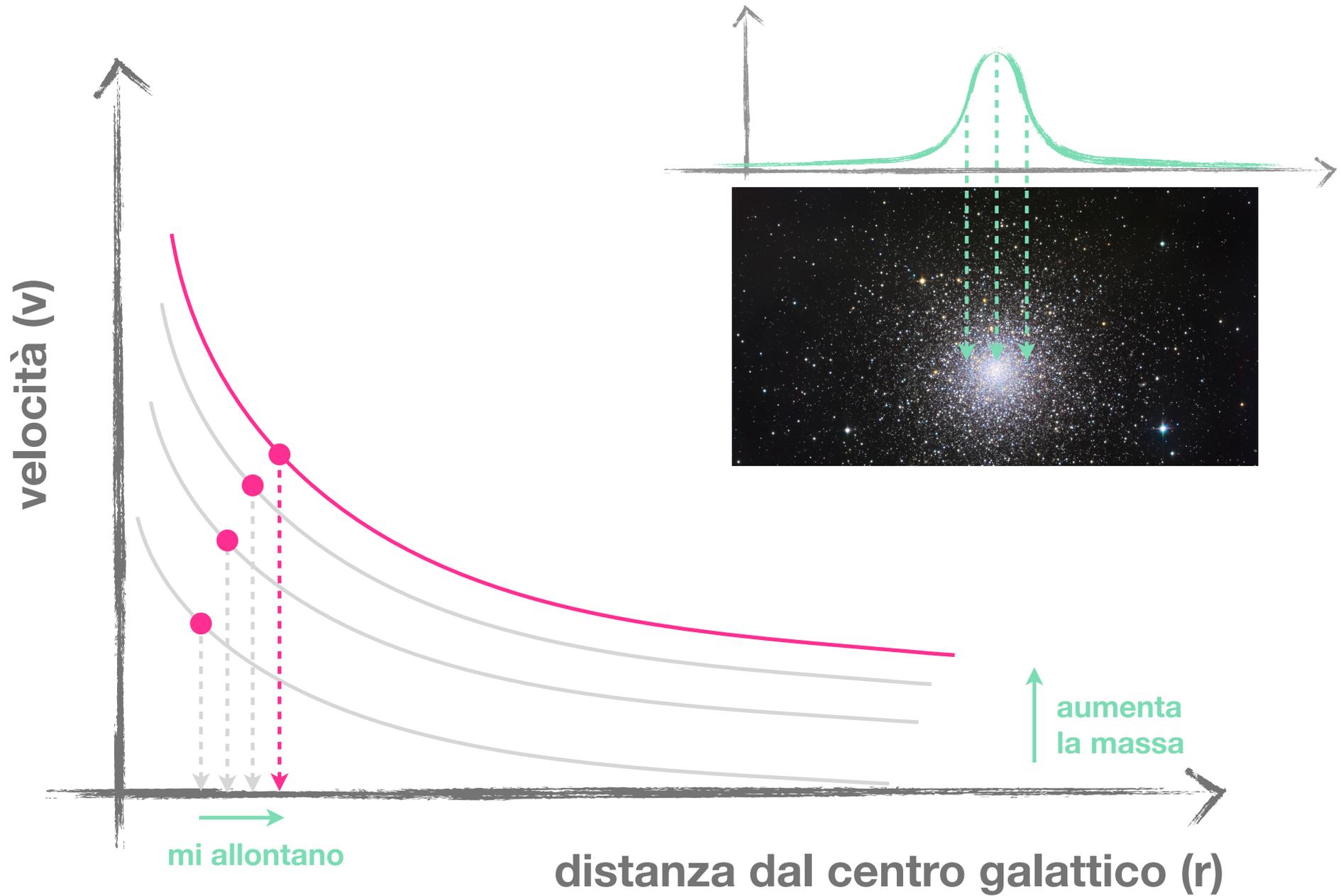
Capiamo la velocità di rotazione nelle galassie



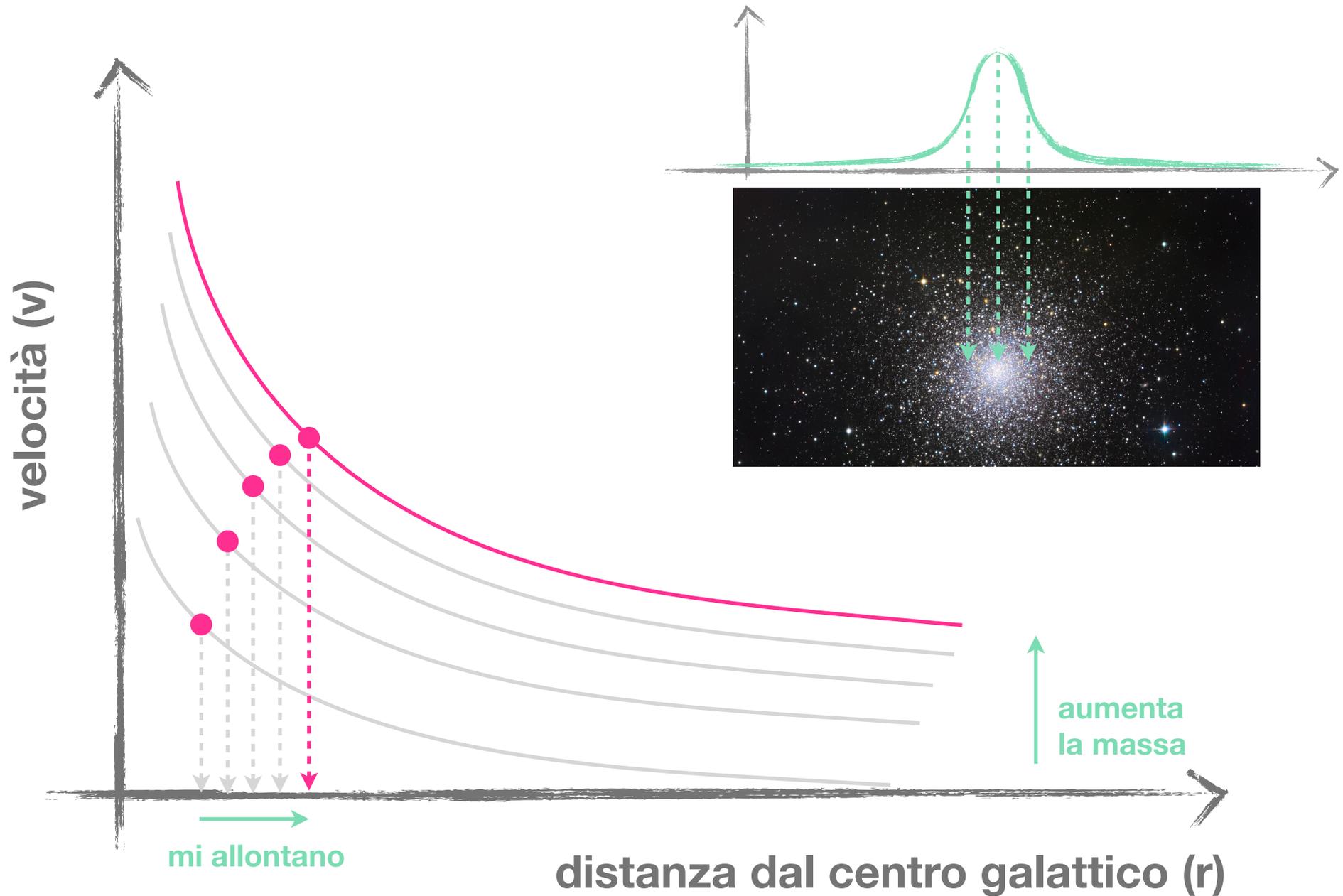
Capiamo la velocità di rotazione nelle galassie



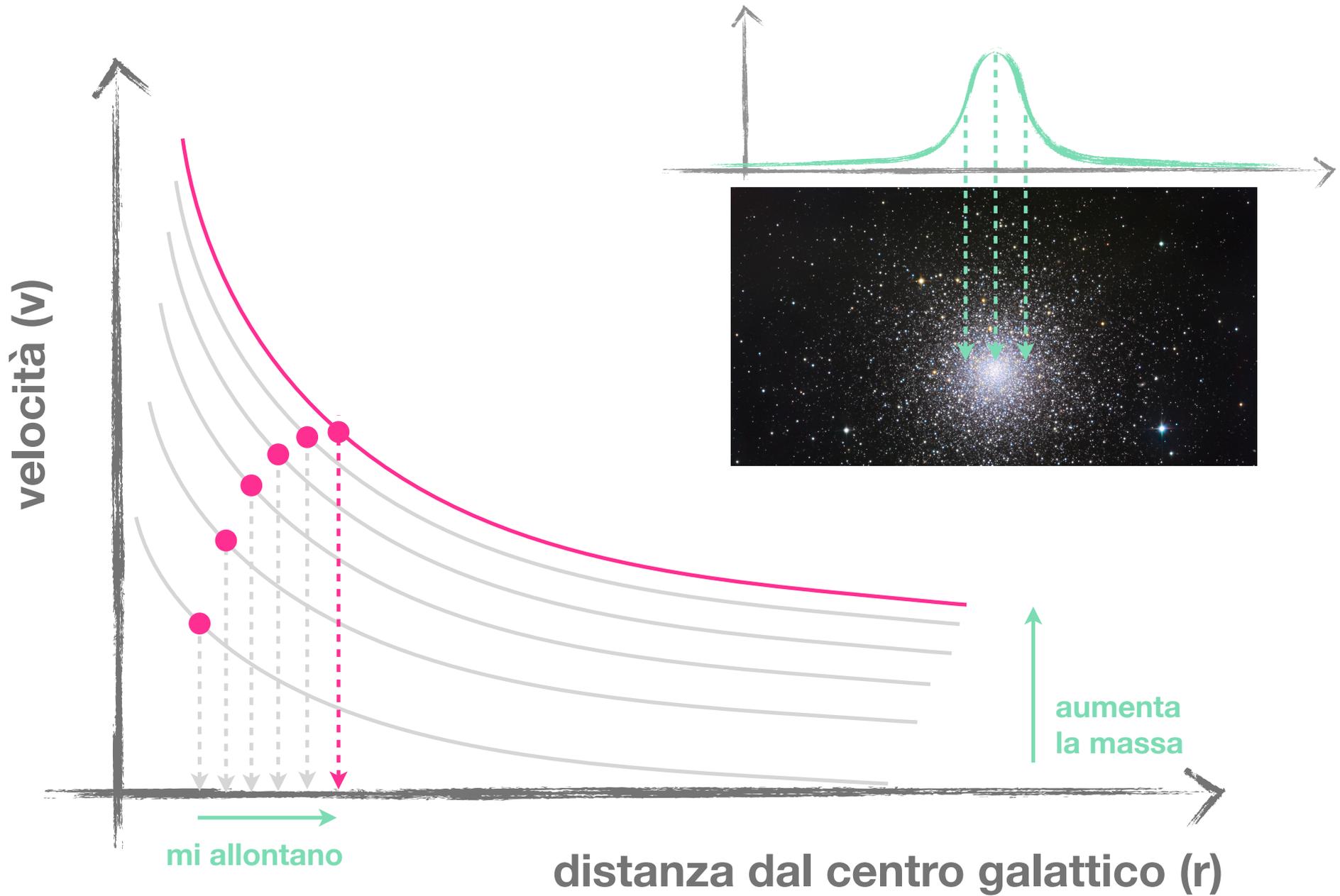
Capiamo la velocità di rotazione nelle galassie



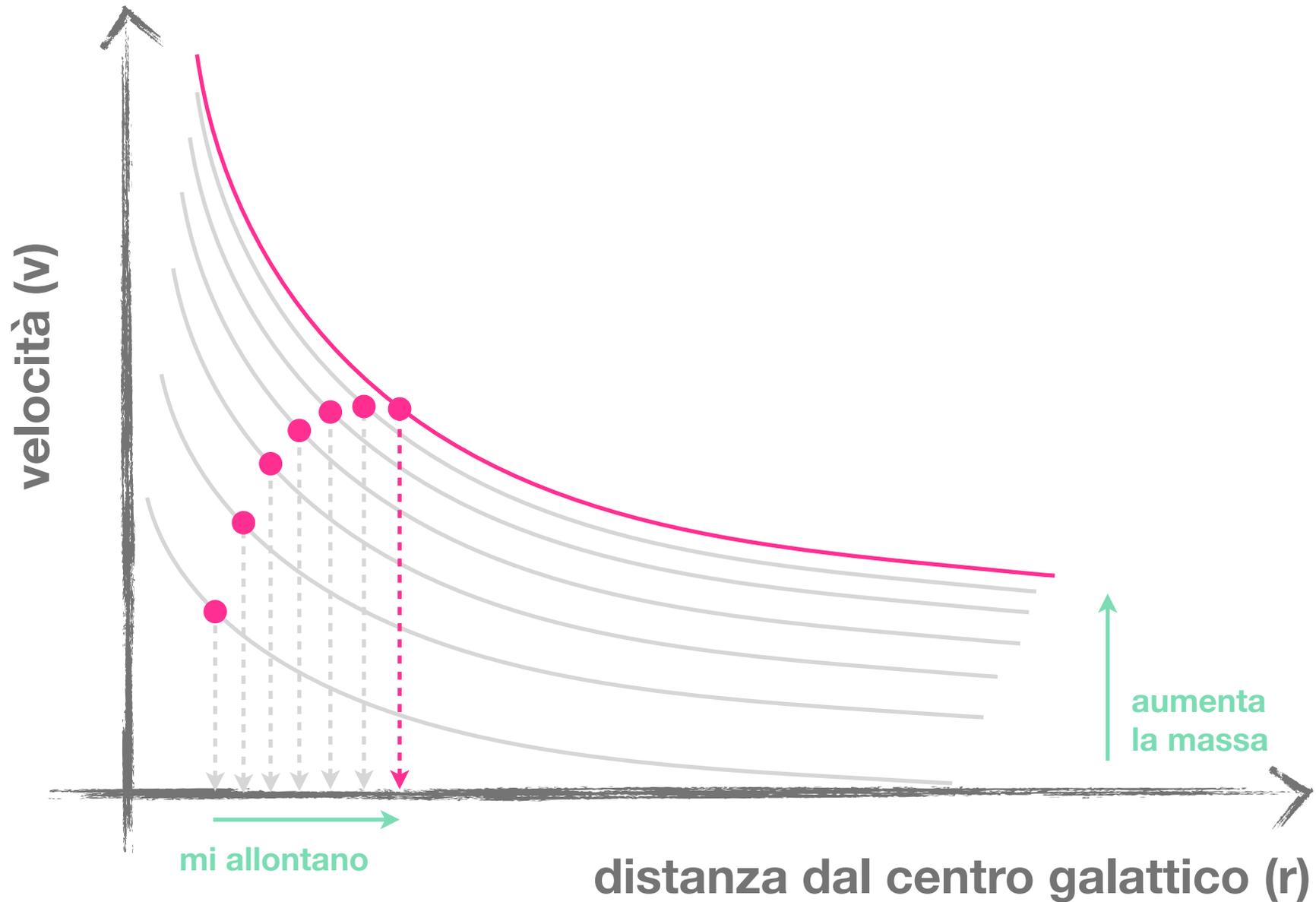
Capiamo la velocità di rotazione nelle galassie



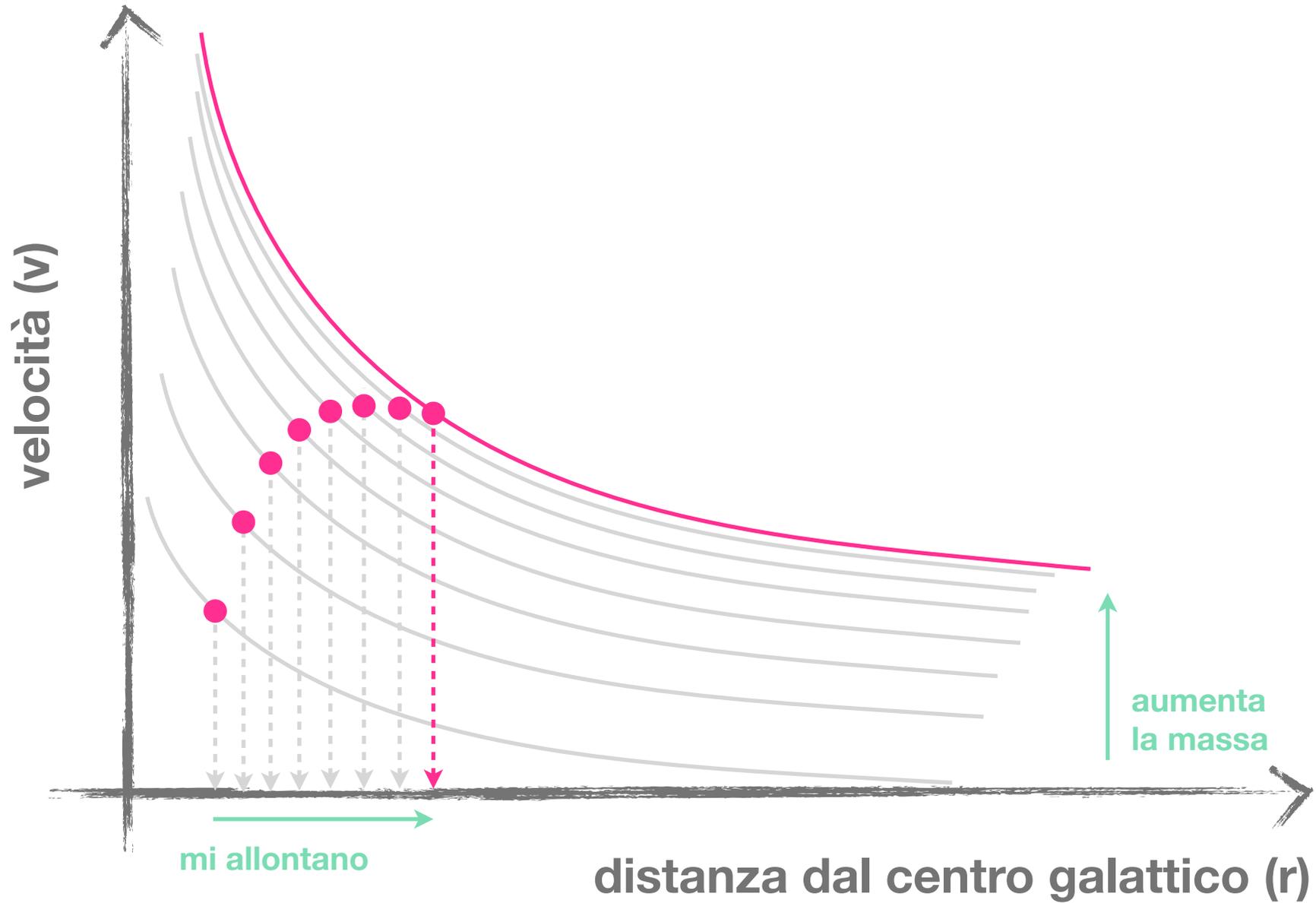
A un certo punto la massa aumenta meno



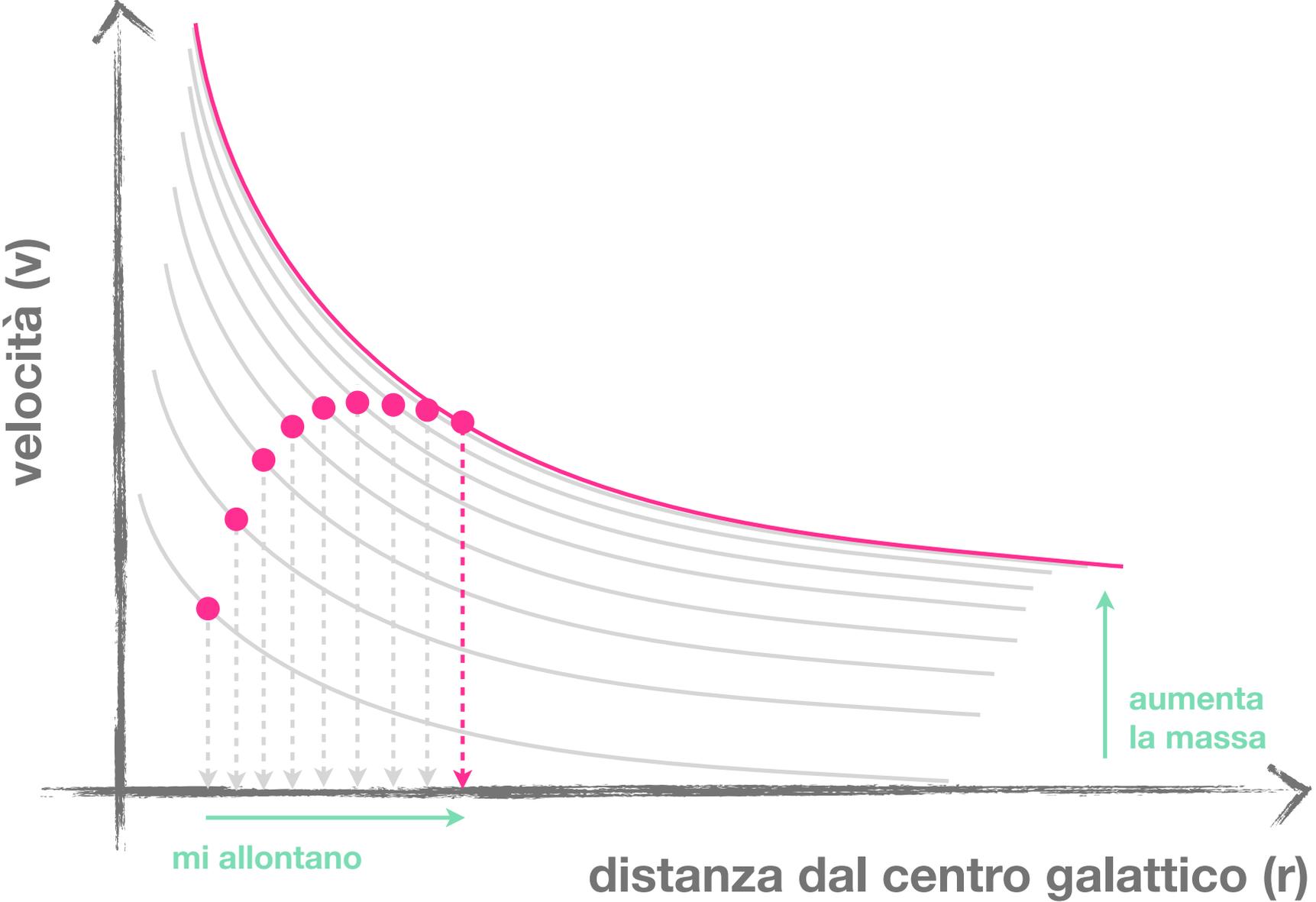
A un certo punto la massa aumenta meno



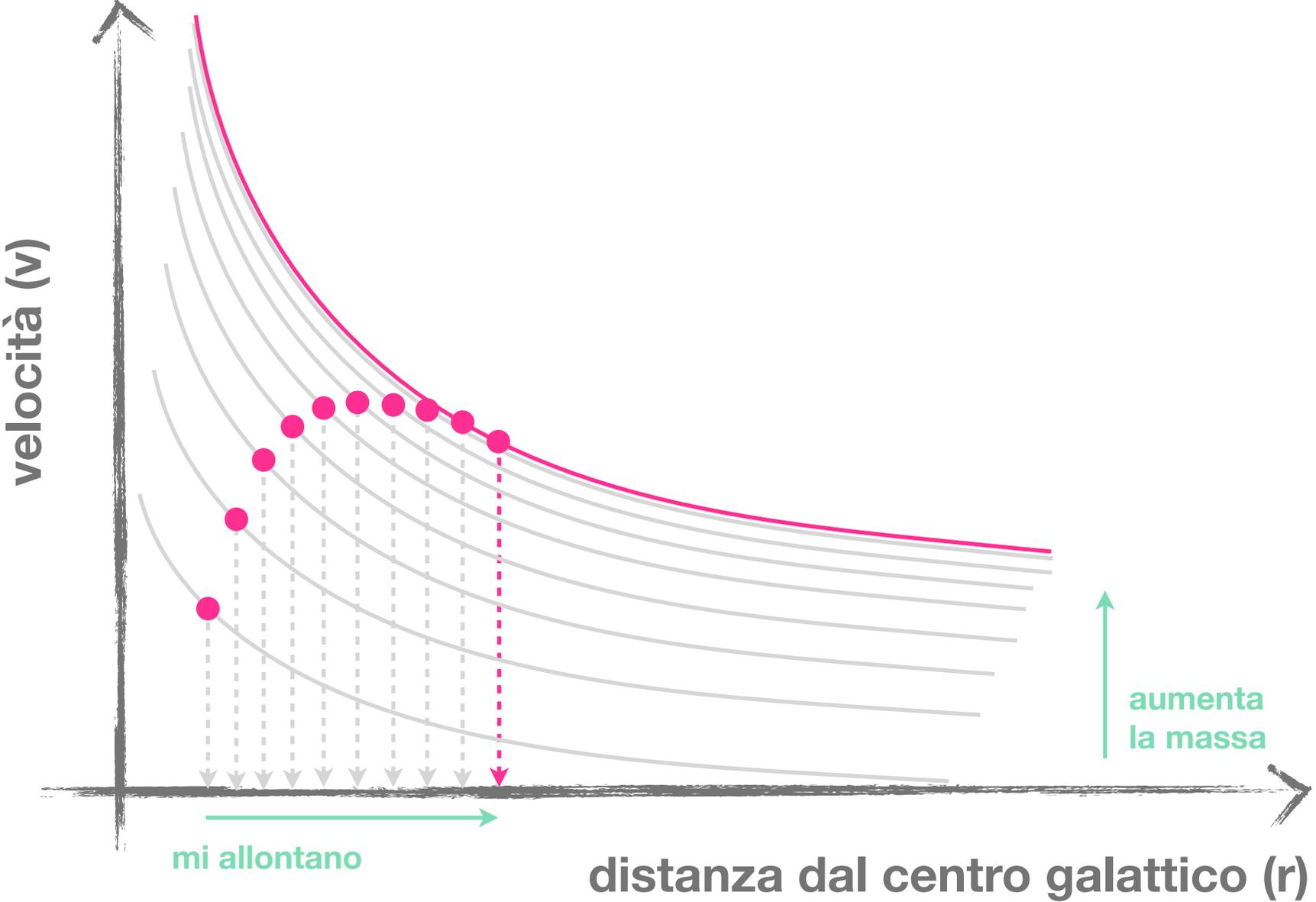
A un certo punto la massa aumenta meno



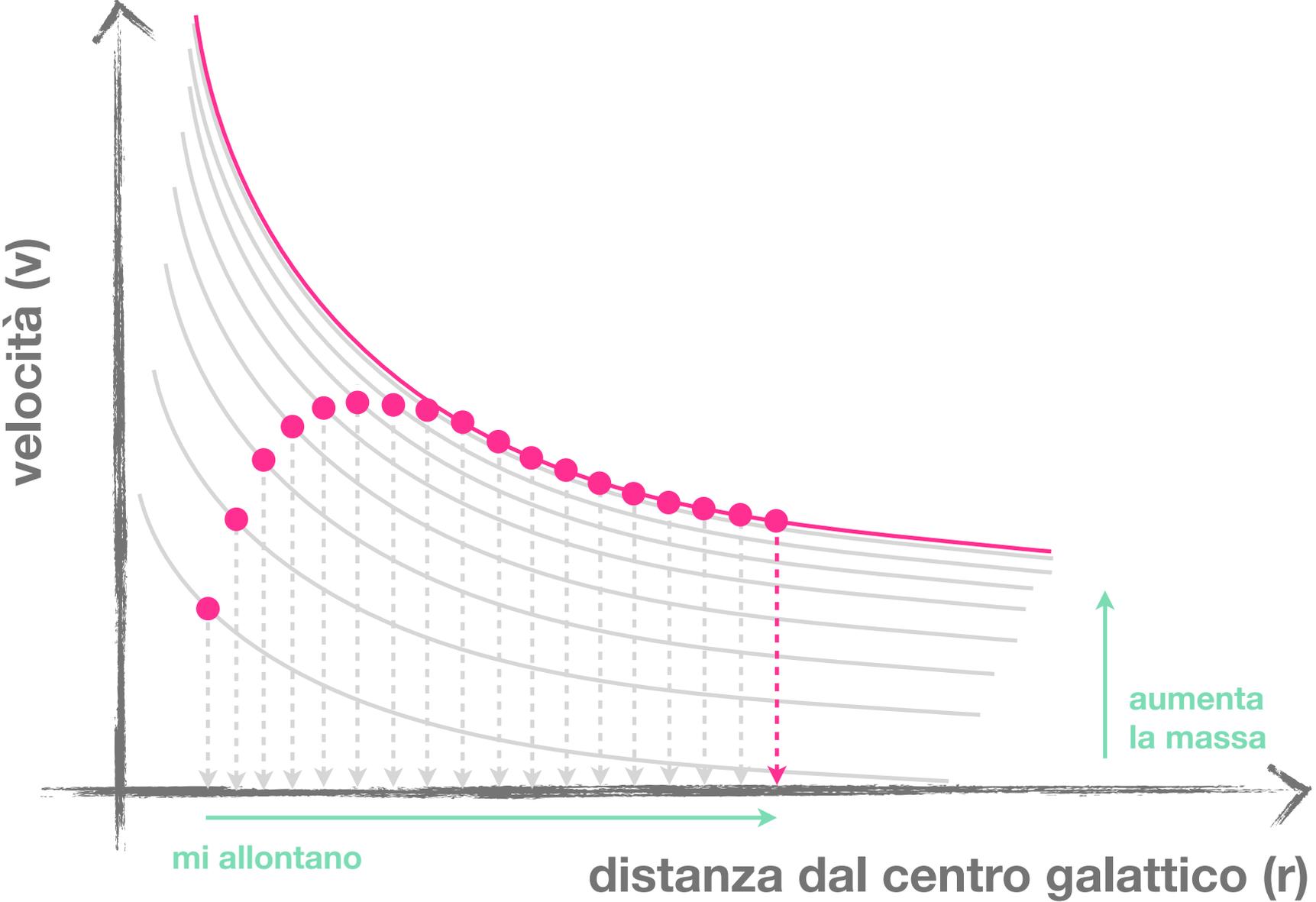
Fino al punto in cui non aumenta quasi più



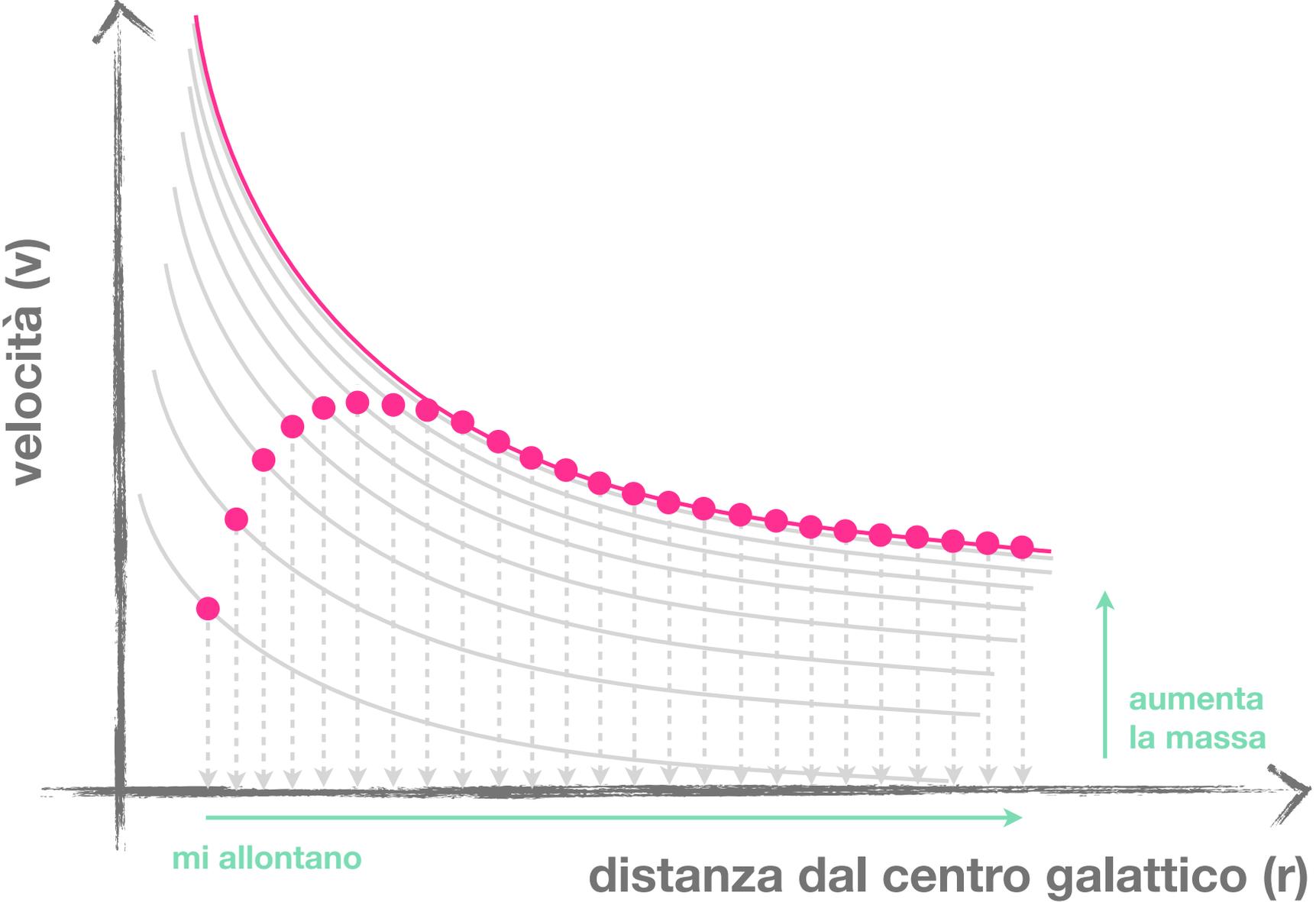
Fino al punto in cui non aumenta quasi più



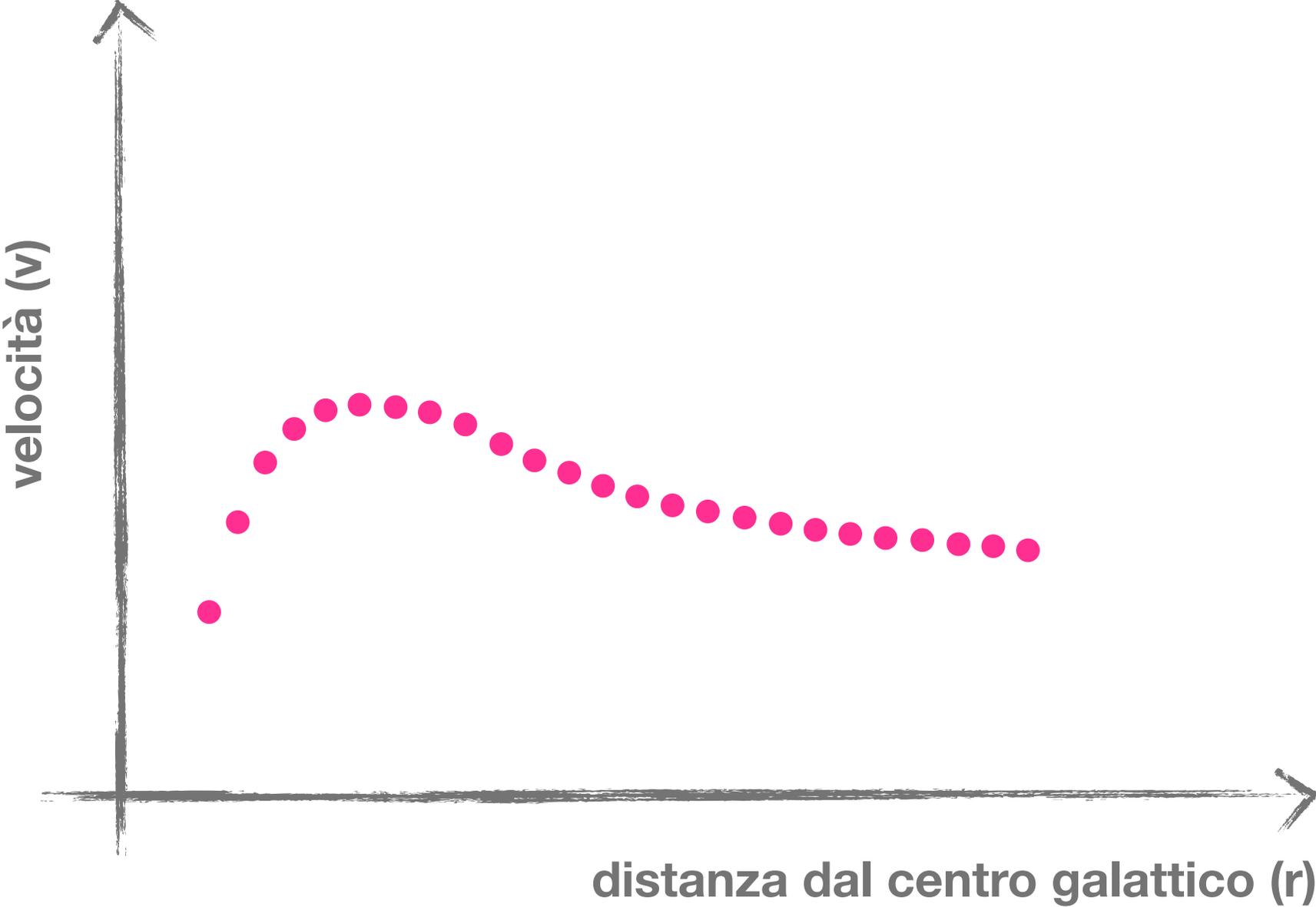
Fino al punto in cui non aumenta quasi più



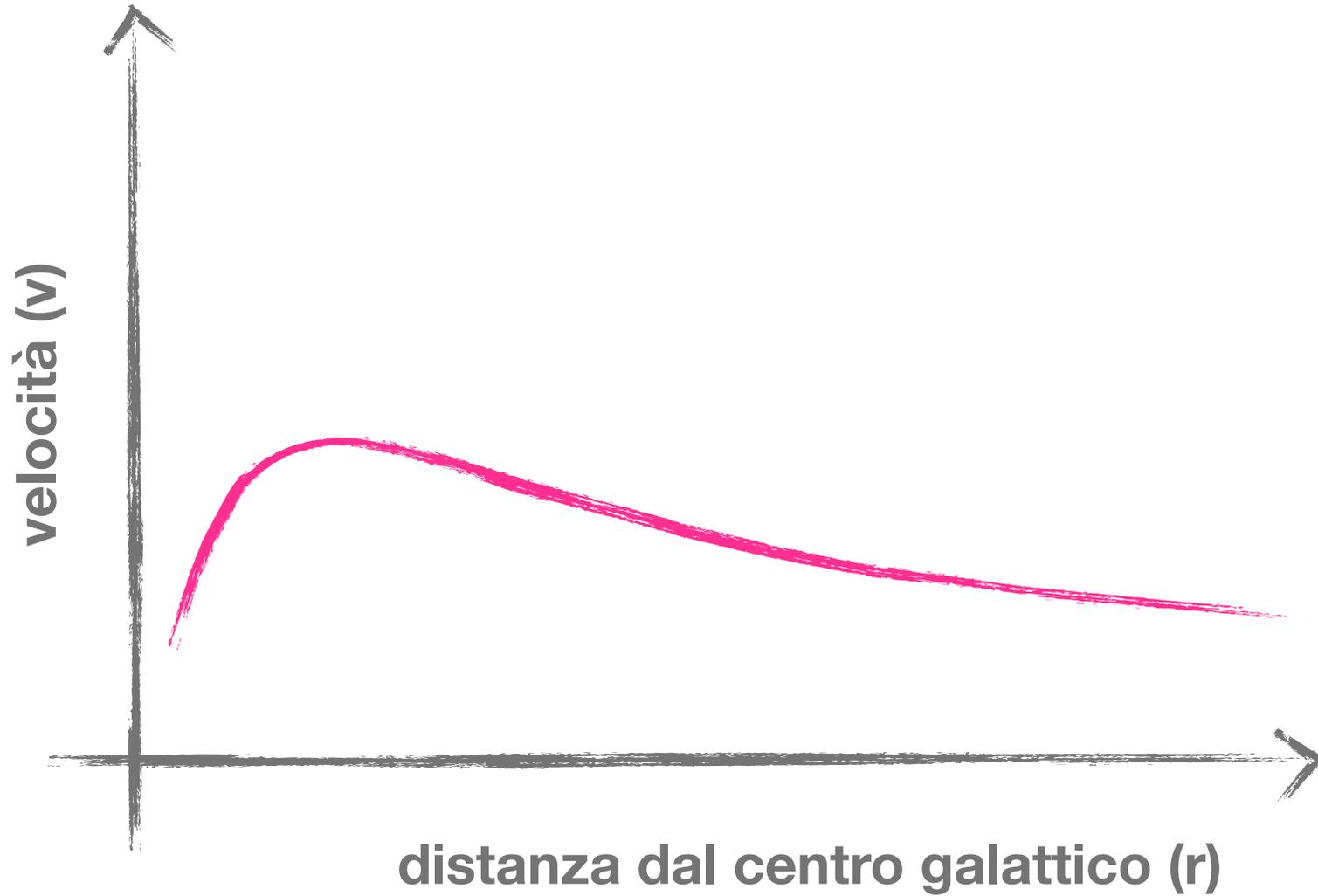
Fino al punto in cui non aumenta quasi più



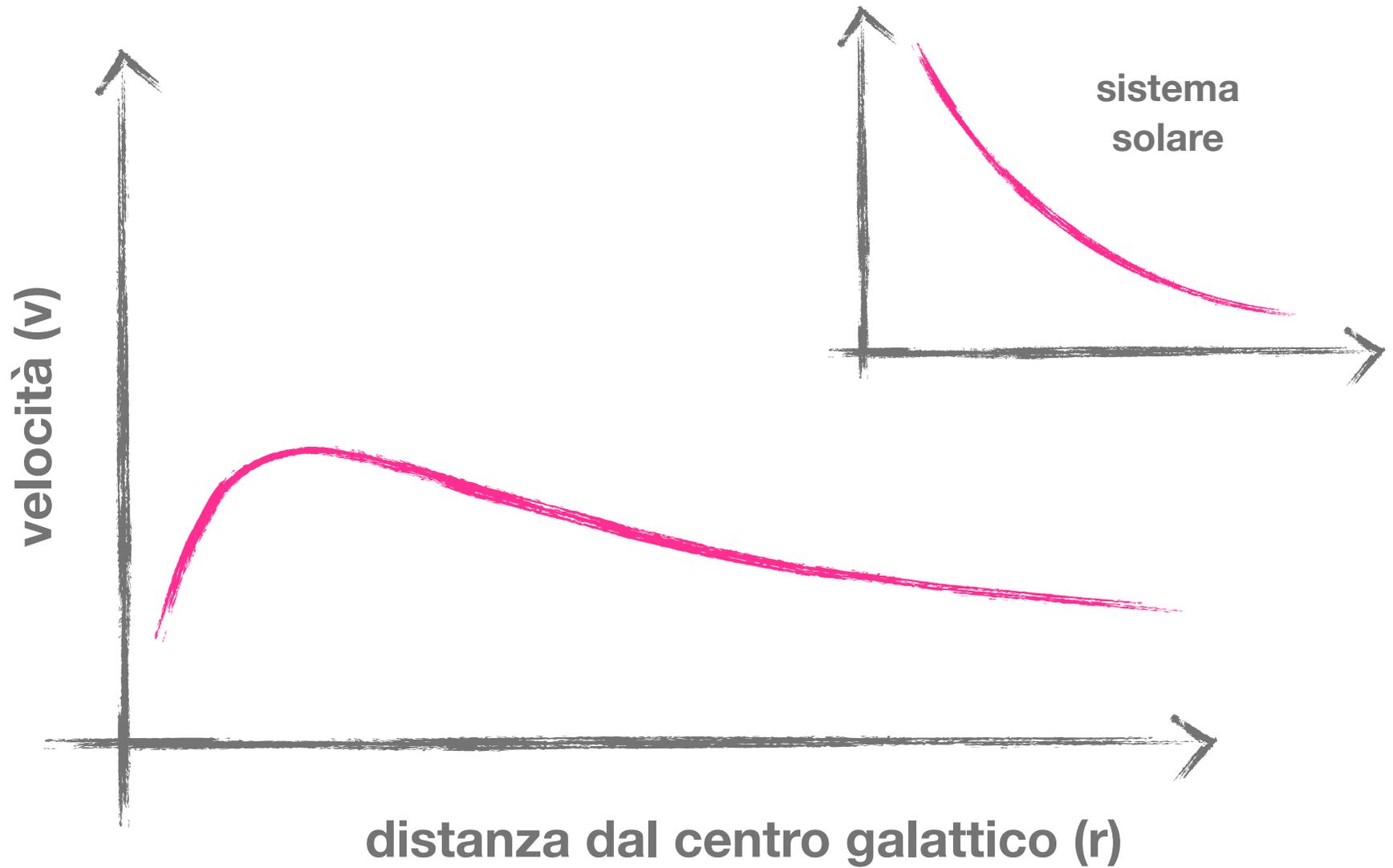
La curva delle velocità delle galassie ha una gobba



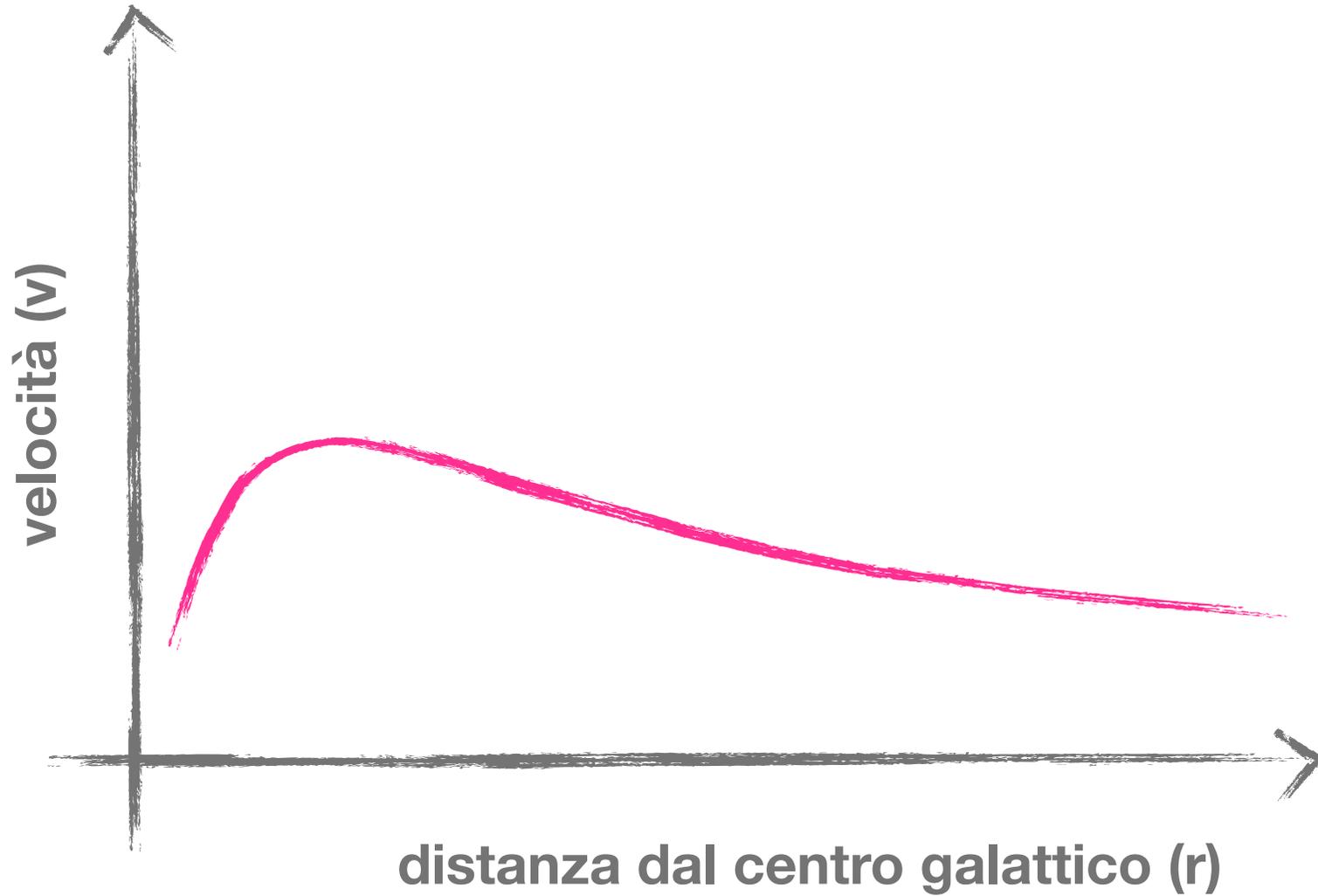
La curva di rotazione delle galassie



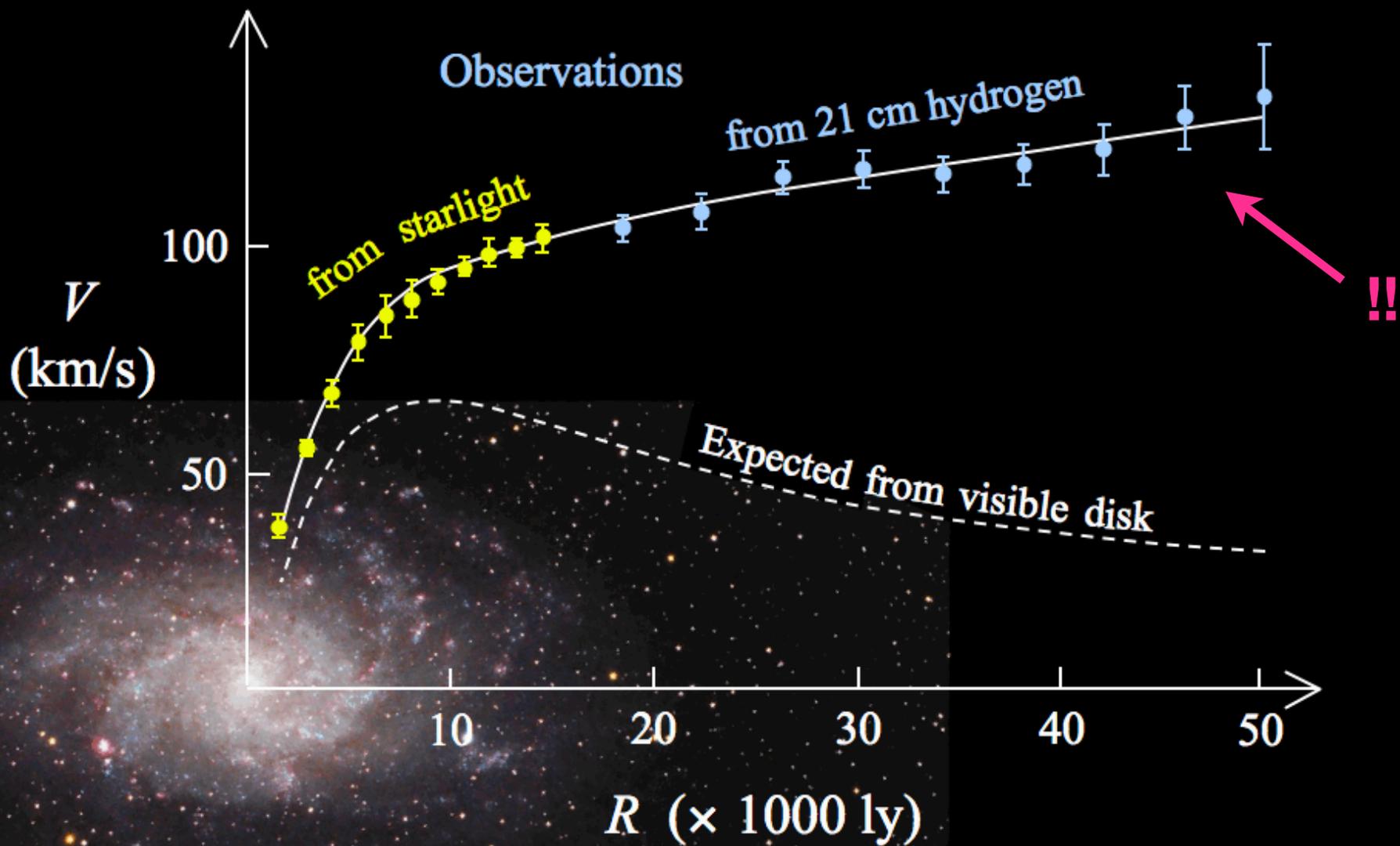
La curva di rotazione delle galassie



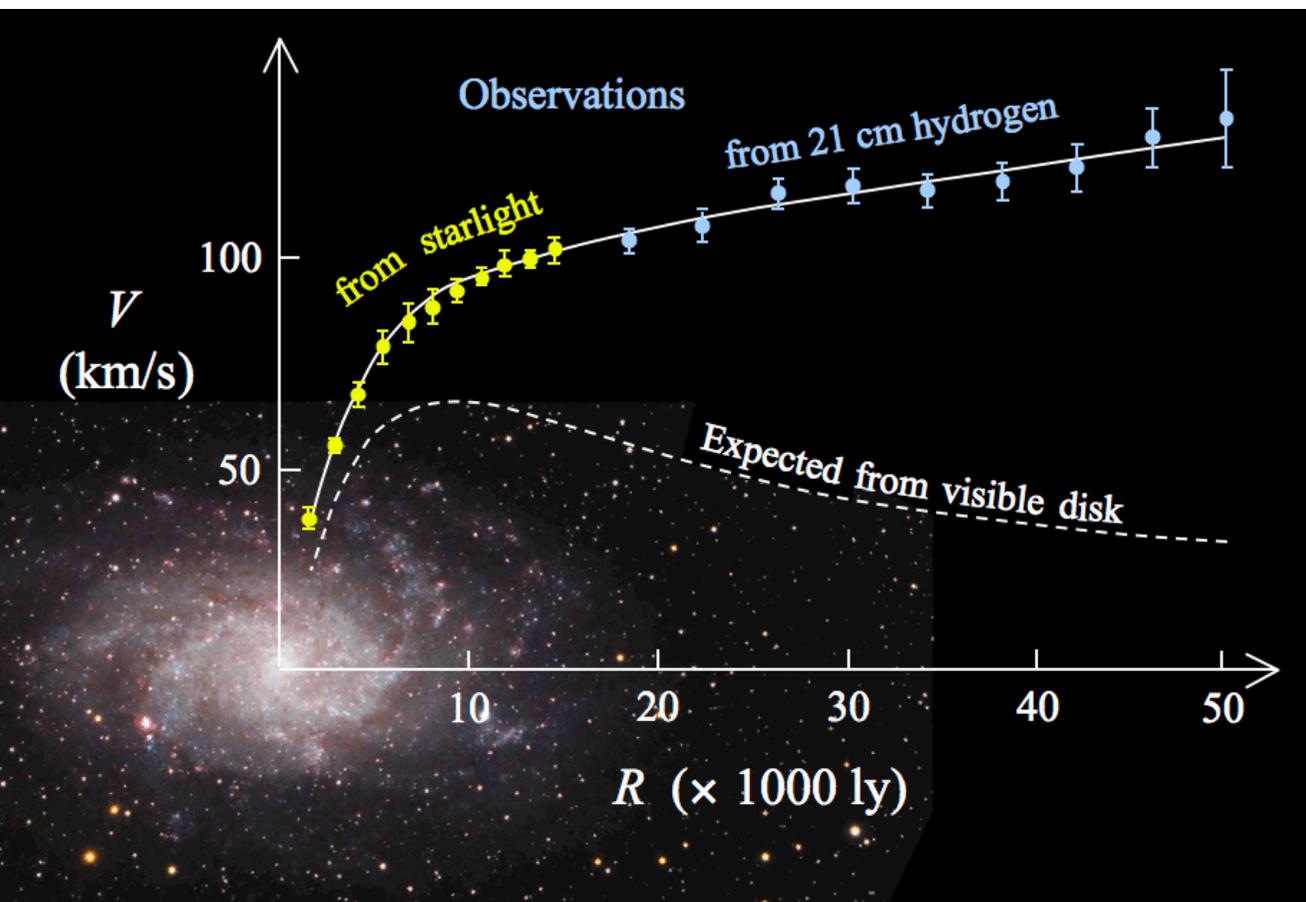
La curva di rotazione delle galassie



E invece le stelle più lontane vanno più veloci!



Com'è possibile che la velocità aumenti?



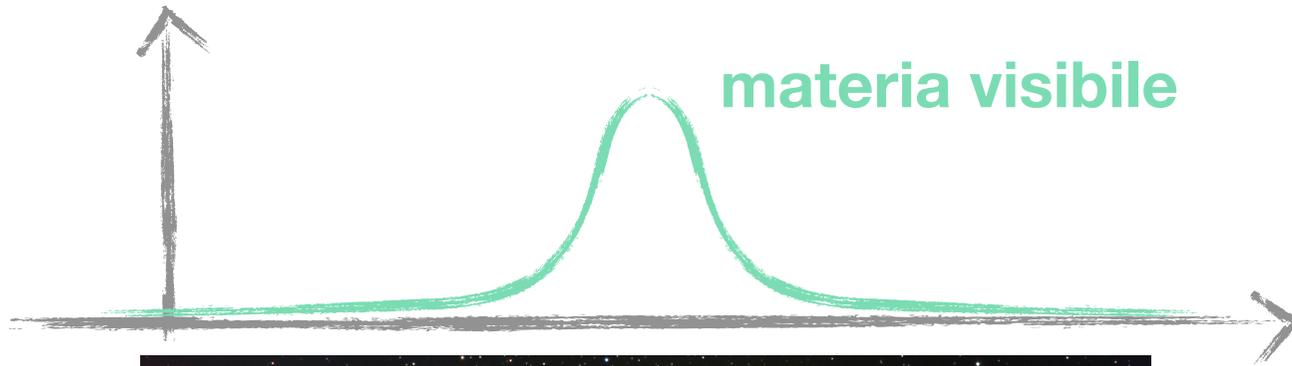
Significa che la massa attorno a cui orbitano sta **aumentando**... molto!

La massa visibile **non basta**: creerebbe una gobba

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

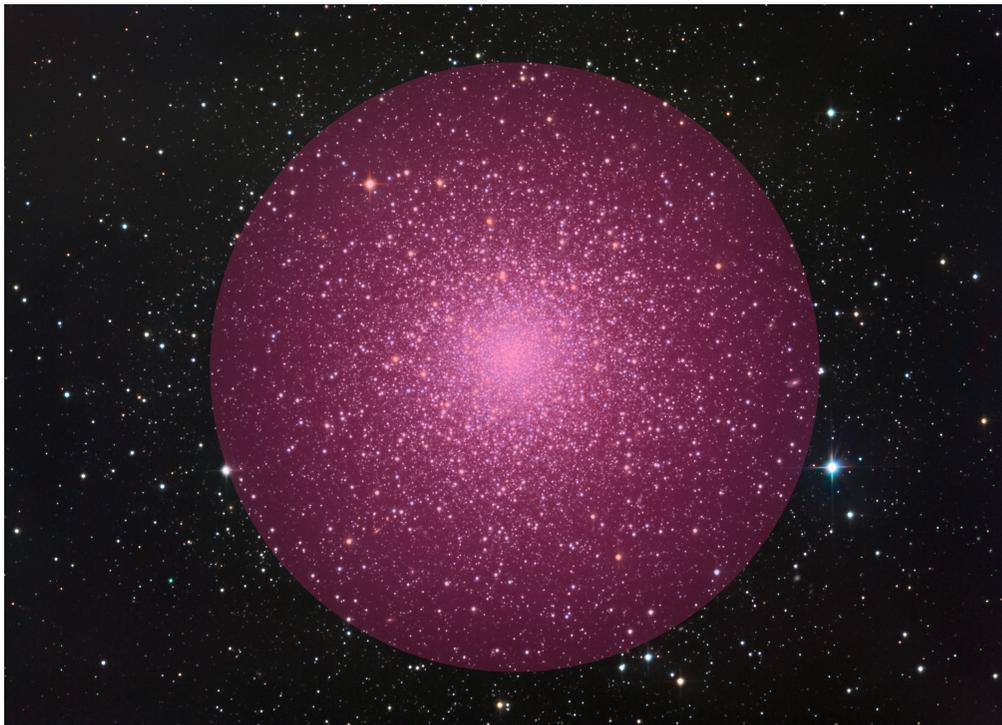
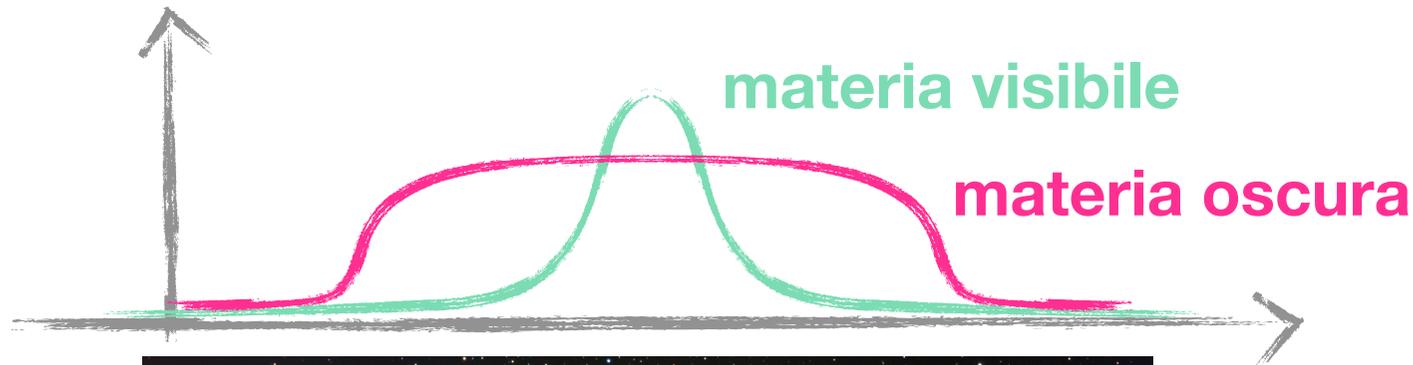
Materia oscura

Nelle galassie non c'è solo materia visibile



Nelle galassie non c'è solo materia visibile

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

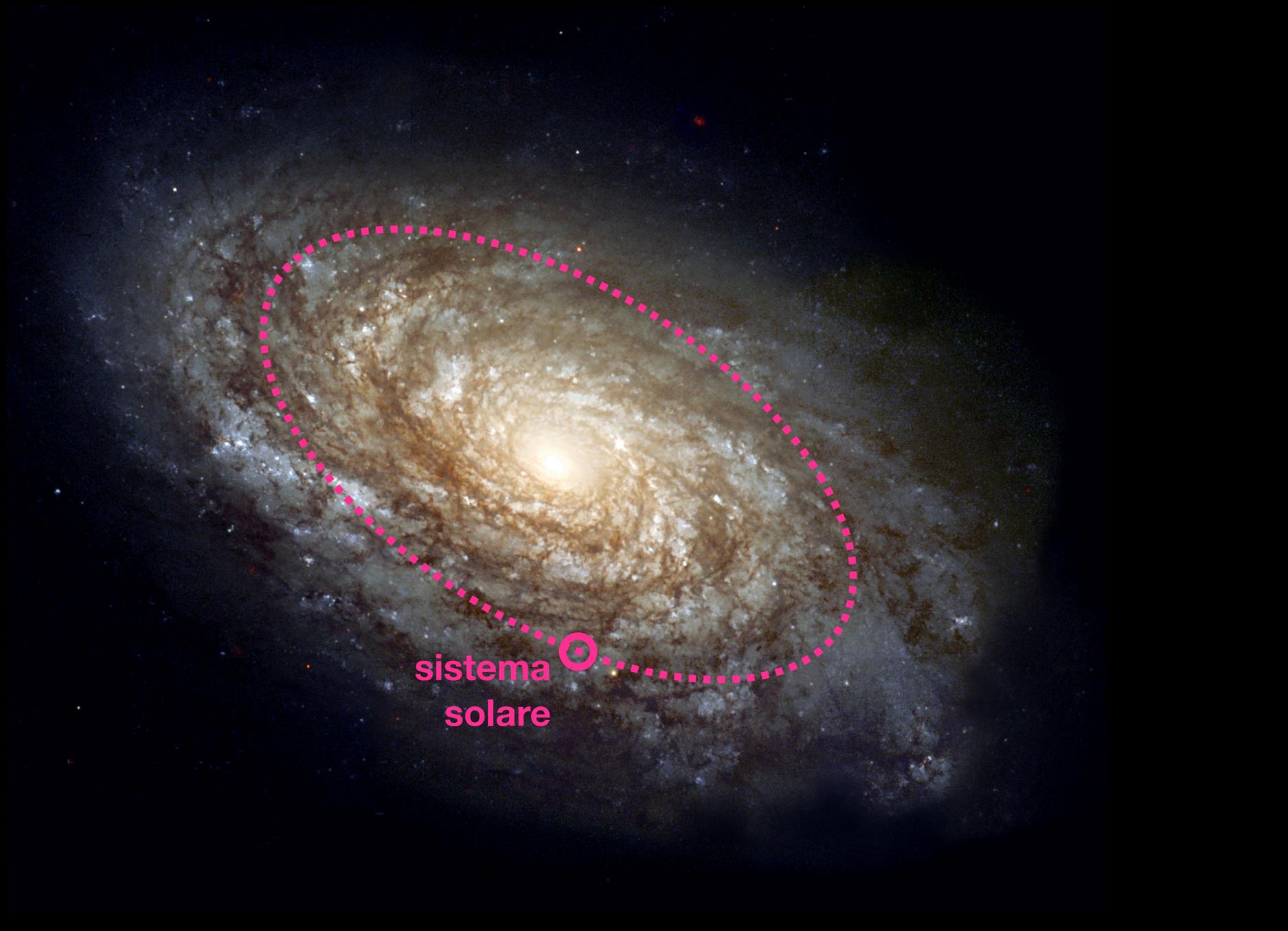
(come le stelle)

Ma anche che non riflette/assorbe la luce

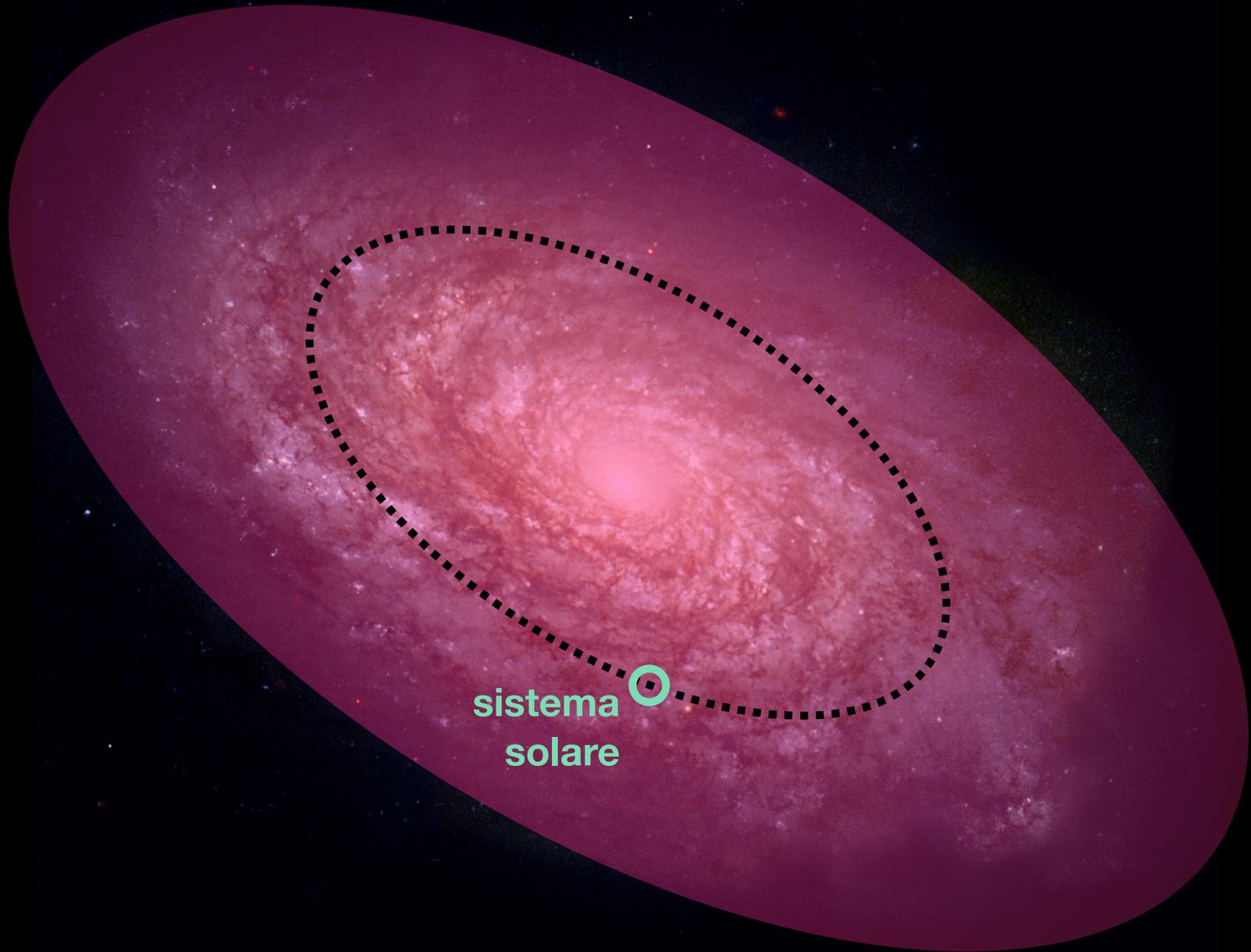
(sennò in qualche modo l'avremmo vista, come il gas)

Non interagisce in nessun modo con la luce

A pensarci bene non sembra interagire con niente

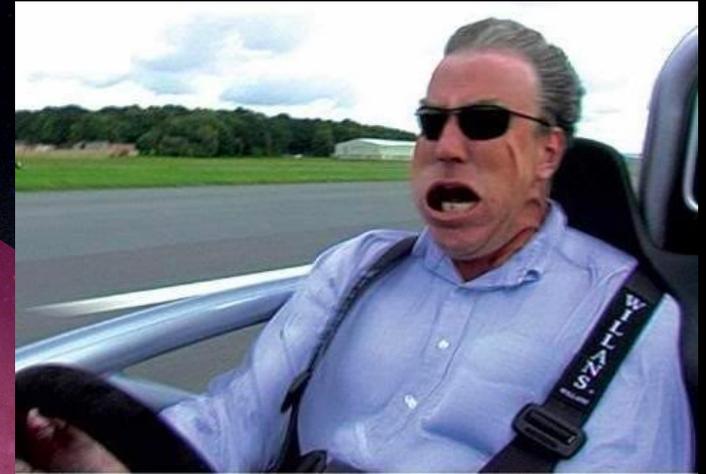
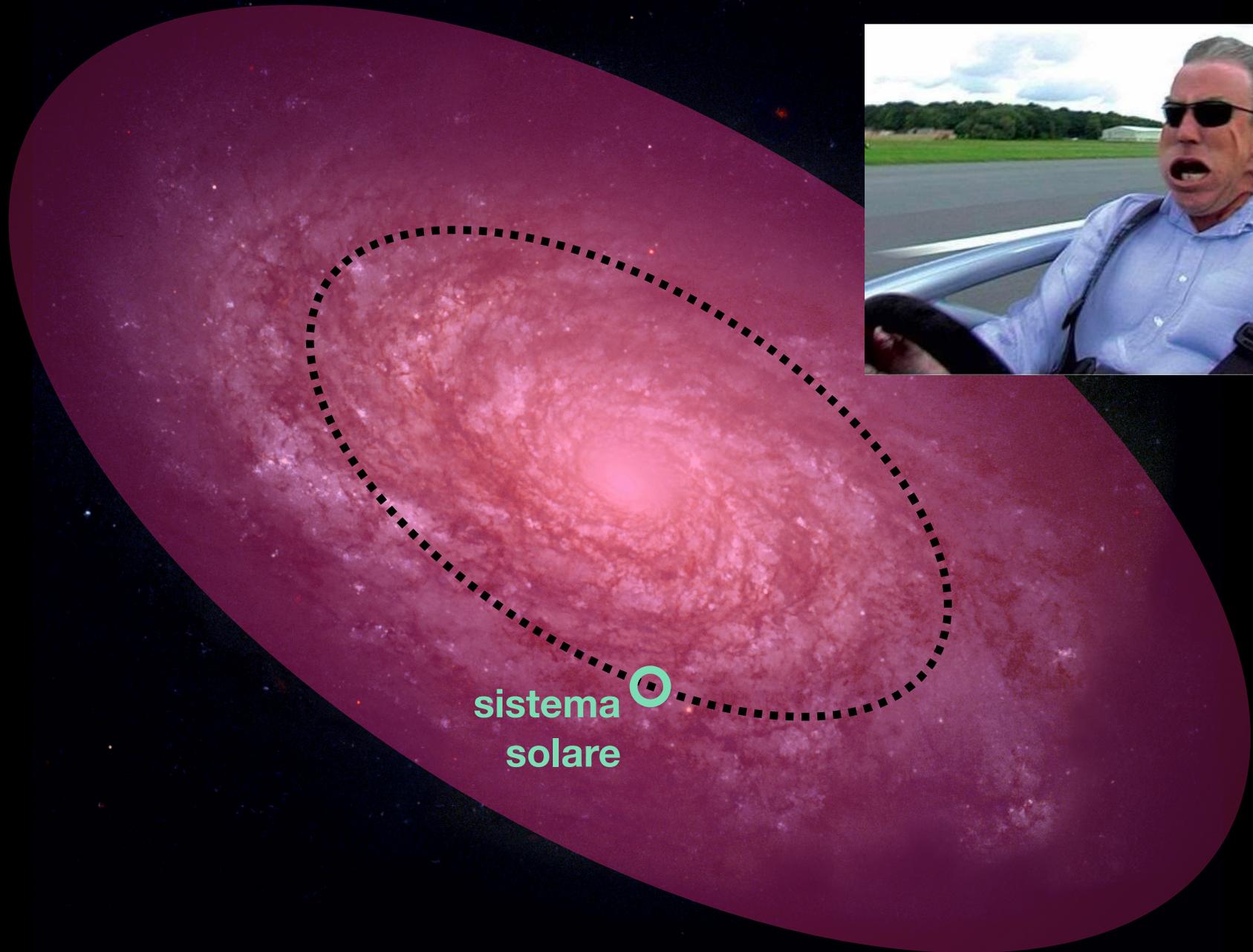


A pensarci bene non sembra interagire con niente



sistema
solare

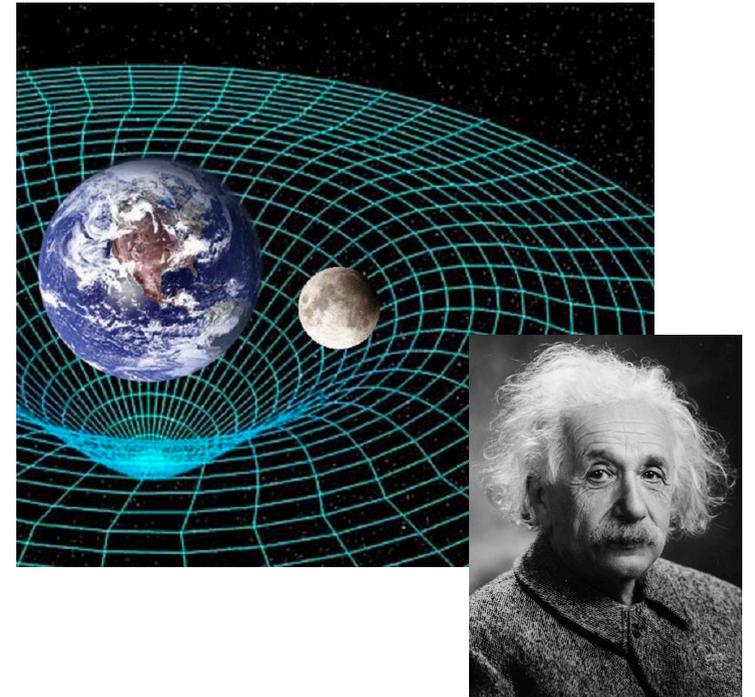
A pensarci bene non sembra interagire con niente



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...

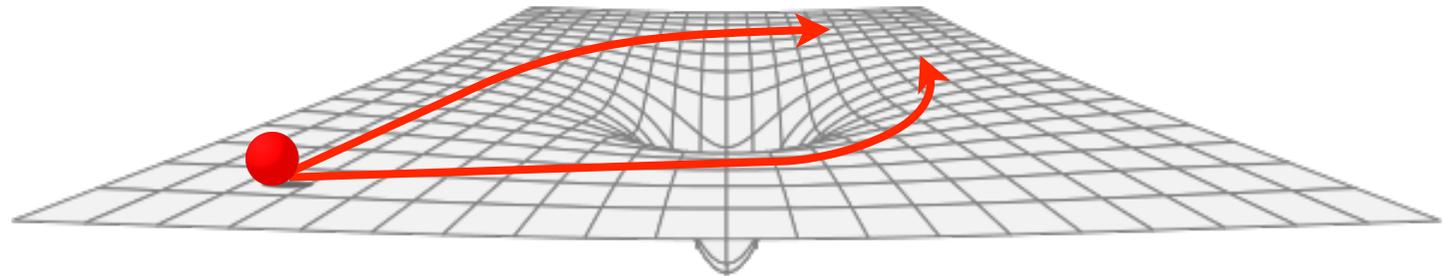
La gravità può curvare la luce

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**

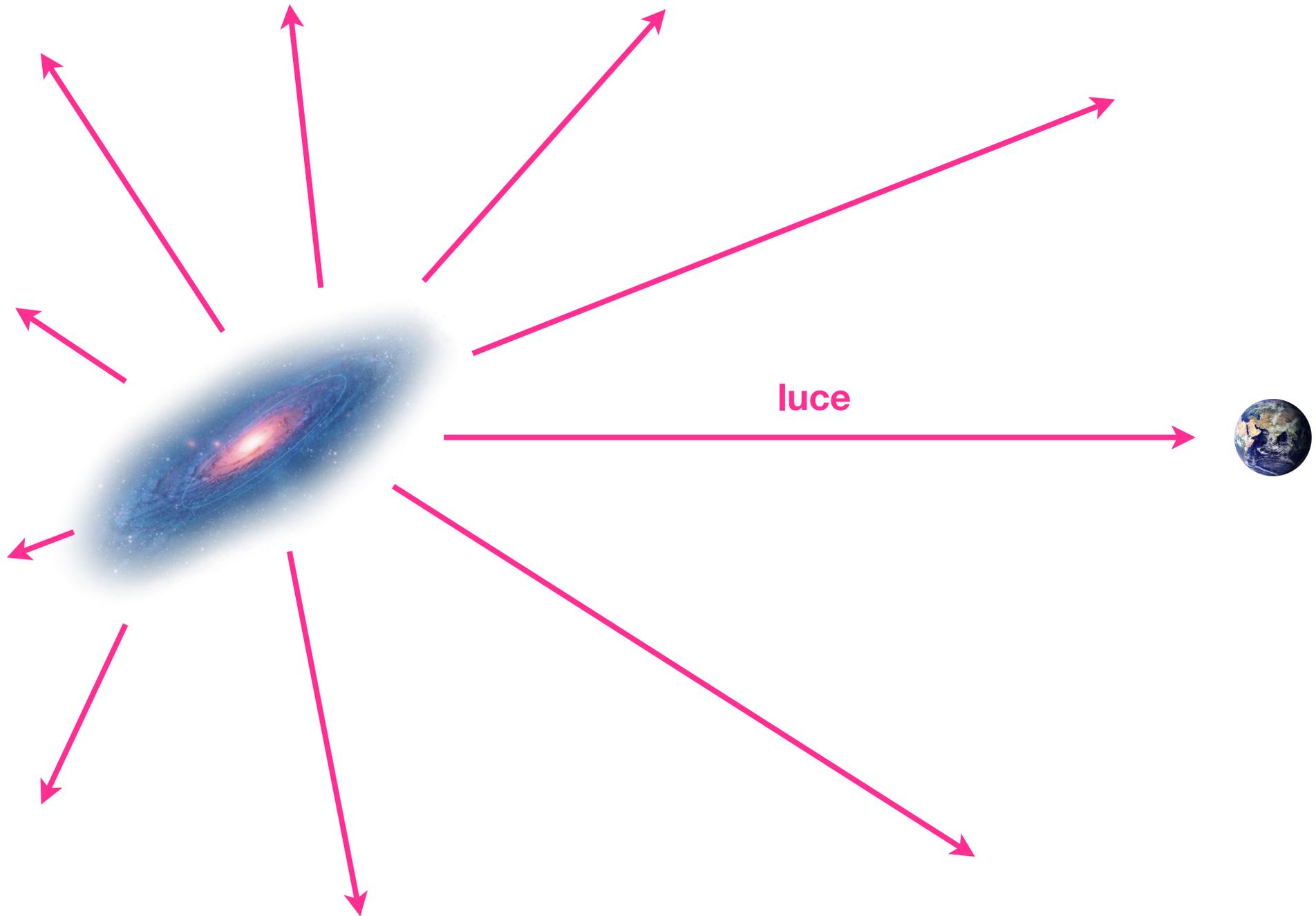


Cosa significa 'vedere' una galassia?

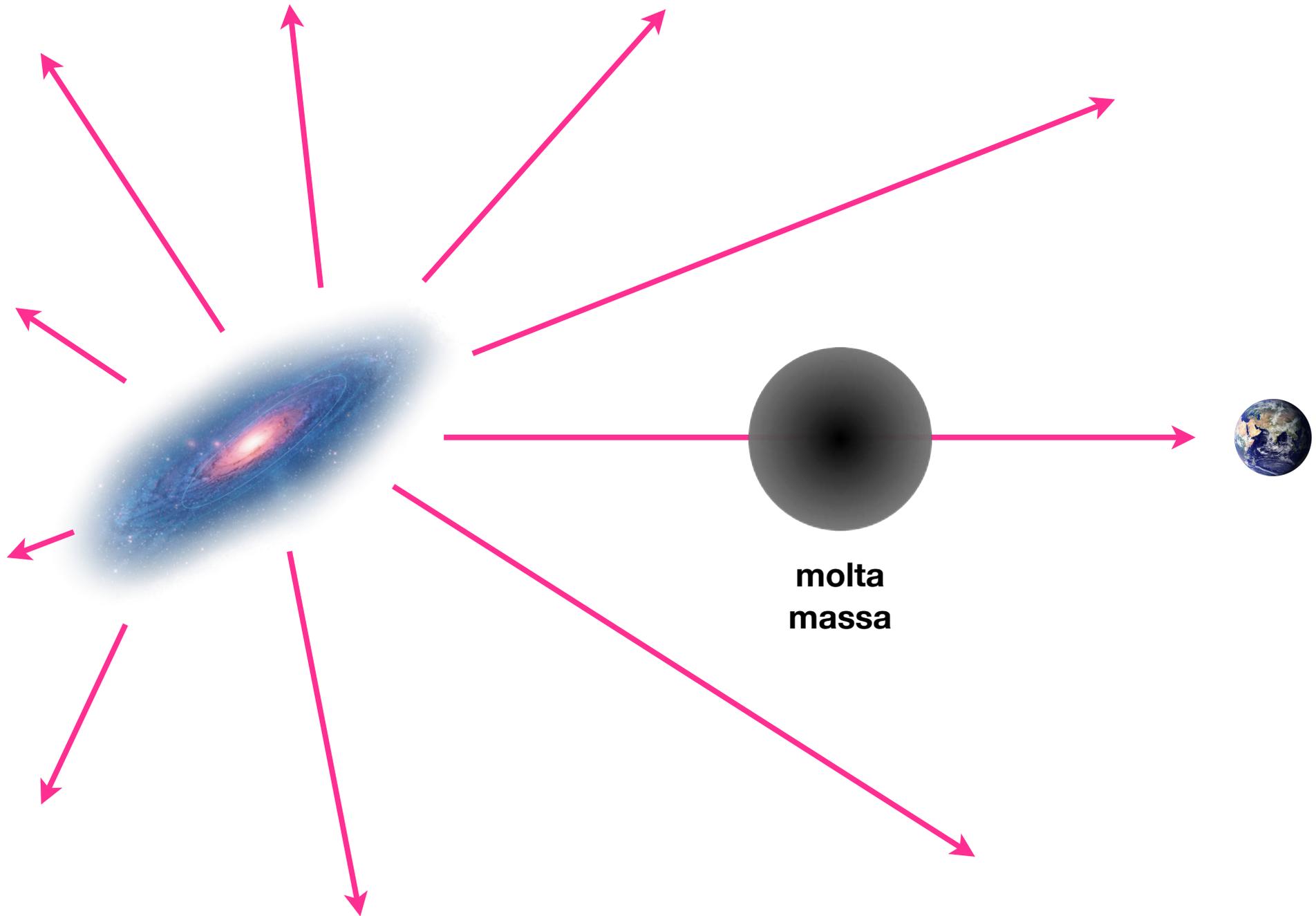


Dei raggi di luce (fotoni) partono dalla galassia e raggiungono noi

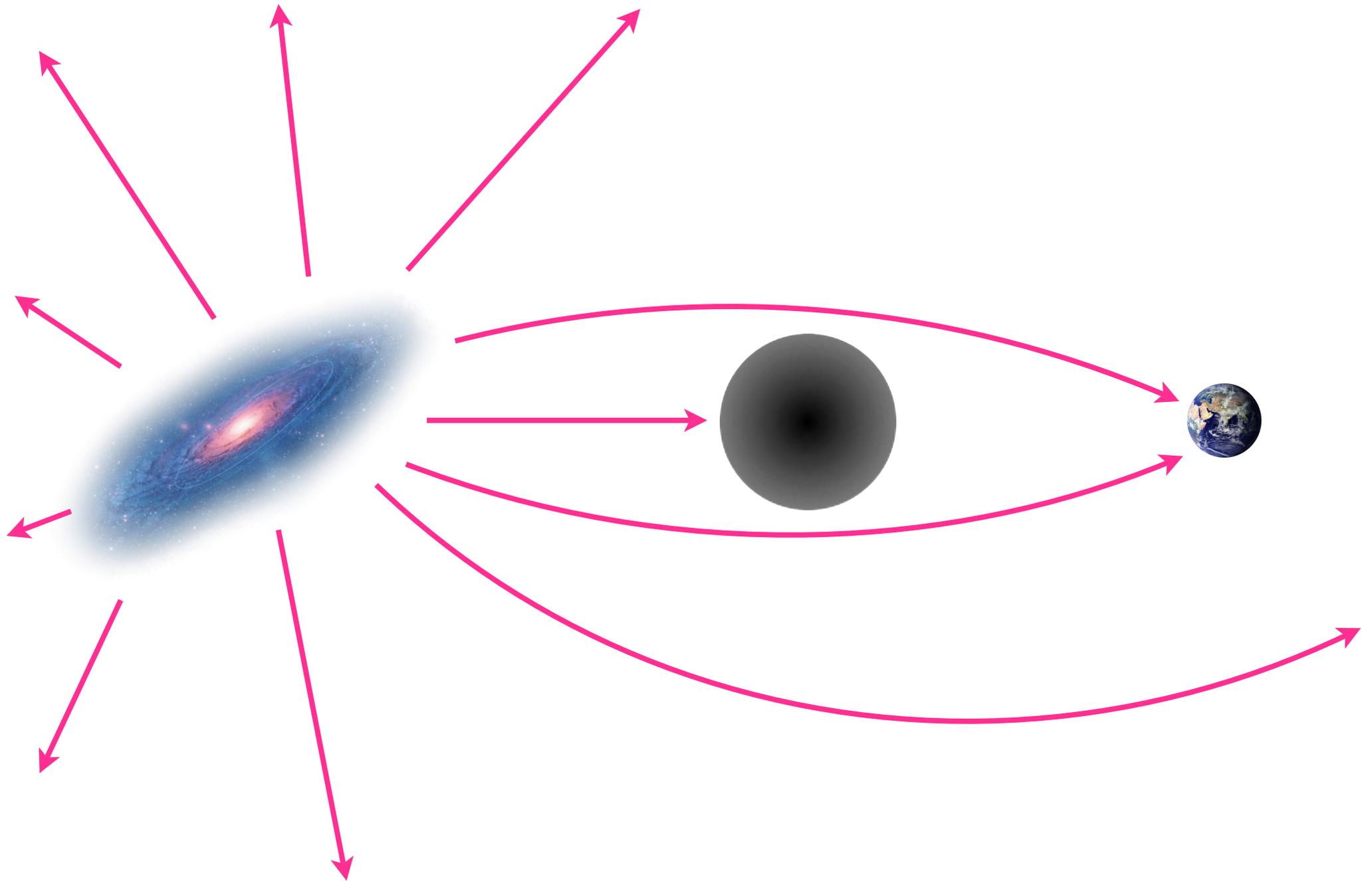
Cosa significa 'vedere' una galassia?



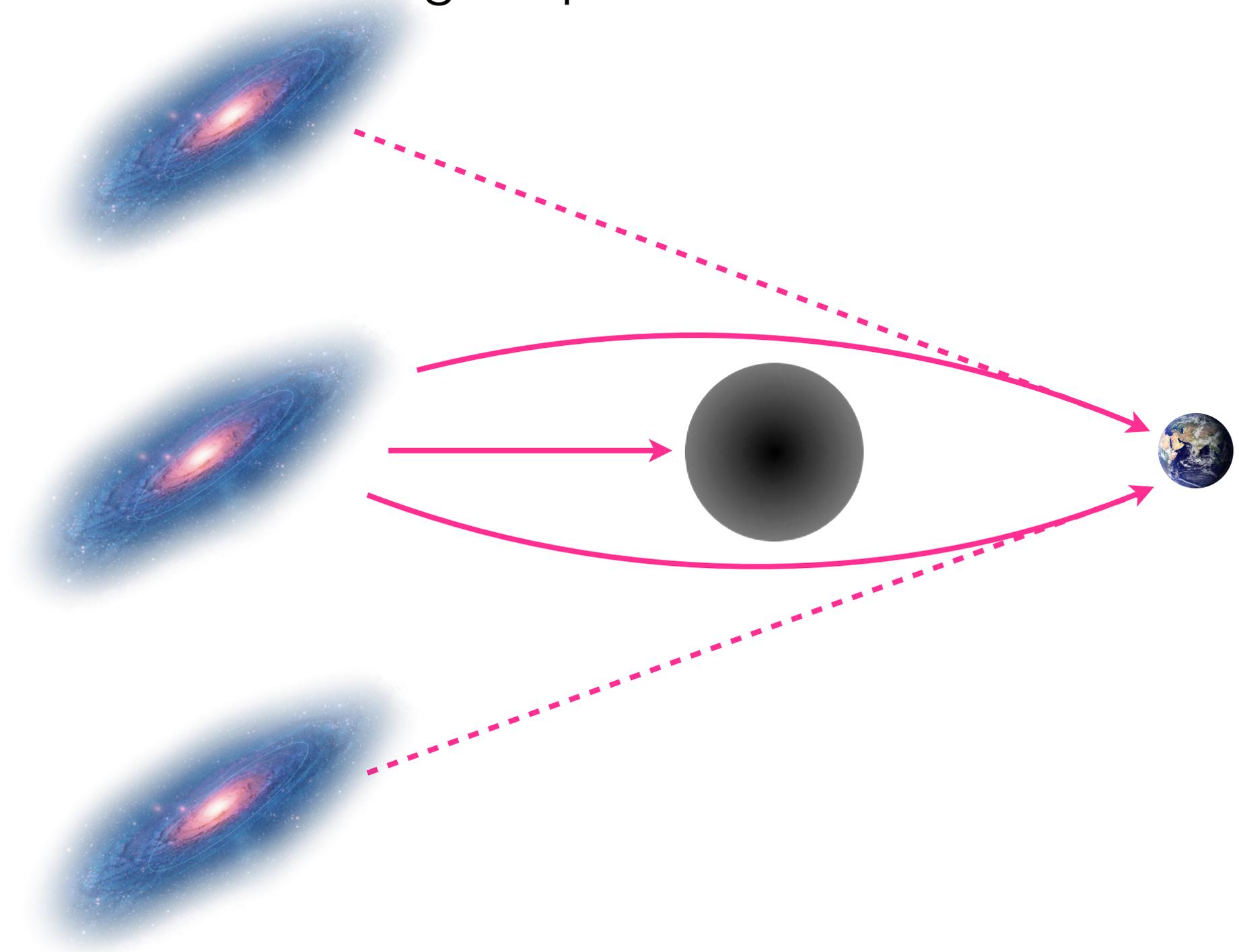
Cosa significa 'vedere' una galassia?



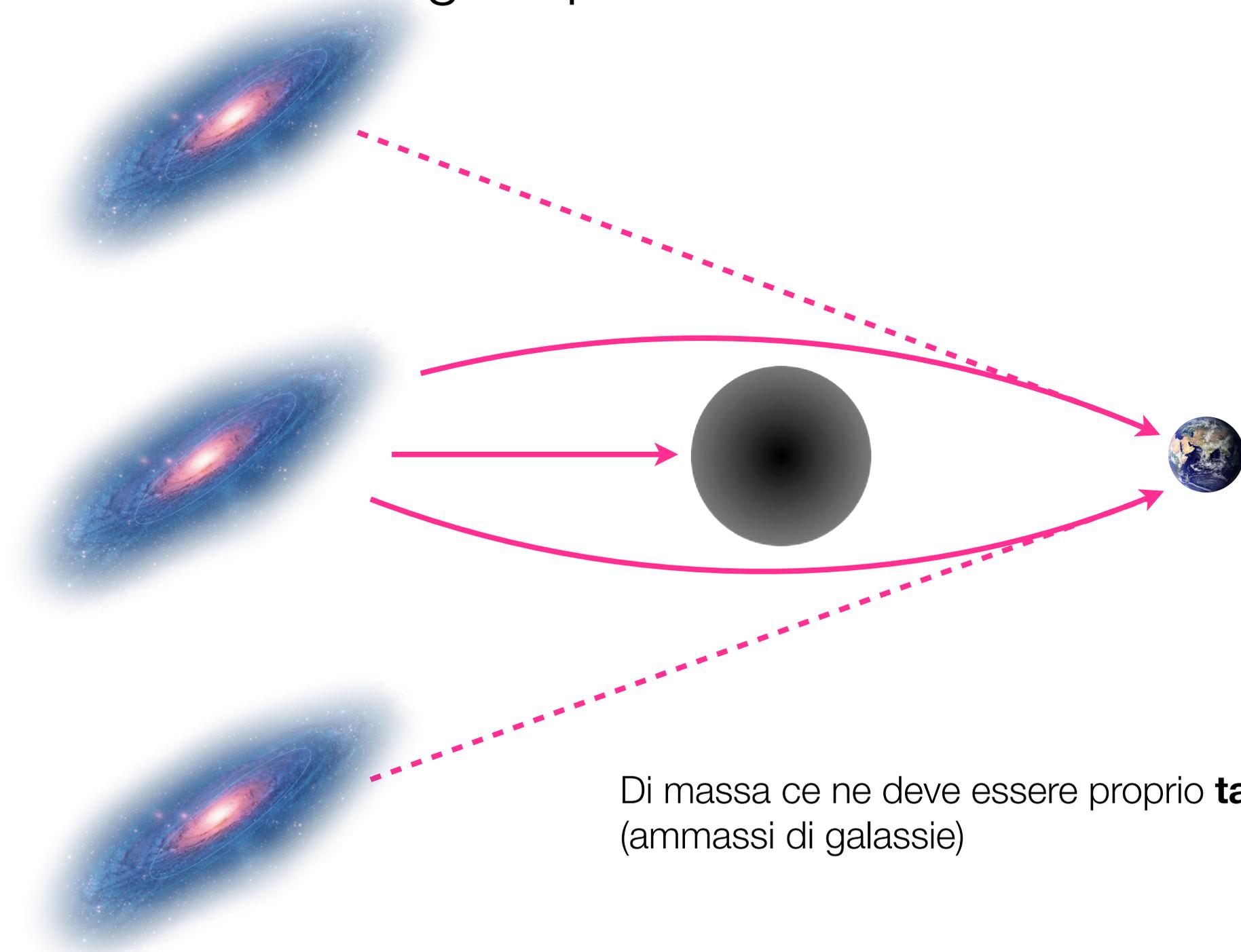
Una massa può deviare i raggi di luce



Si creano immagini speculari



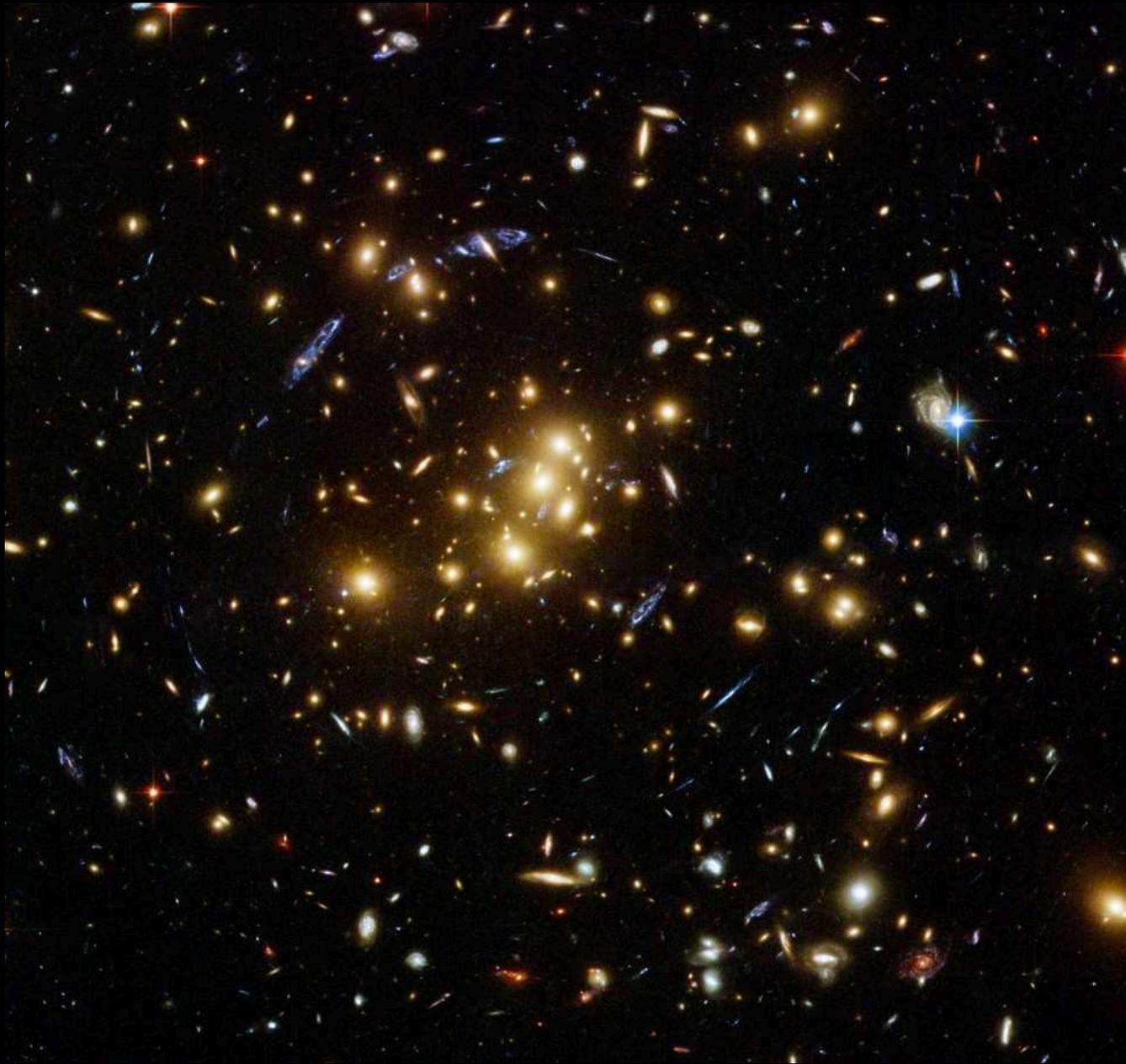
Si creano immagini speculari



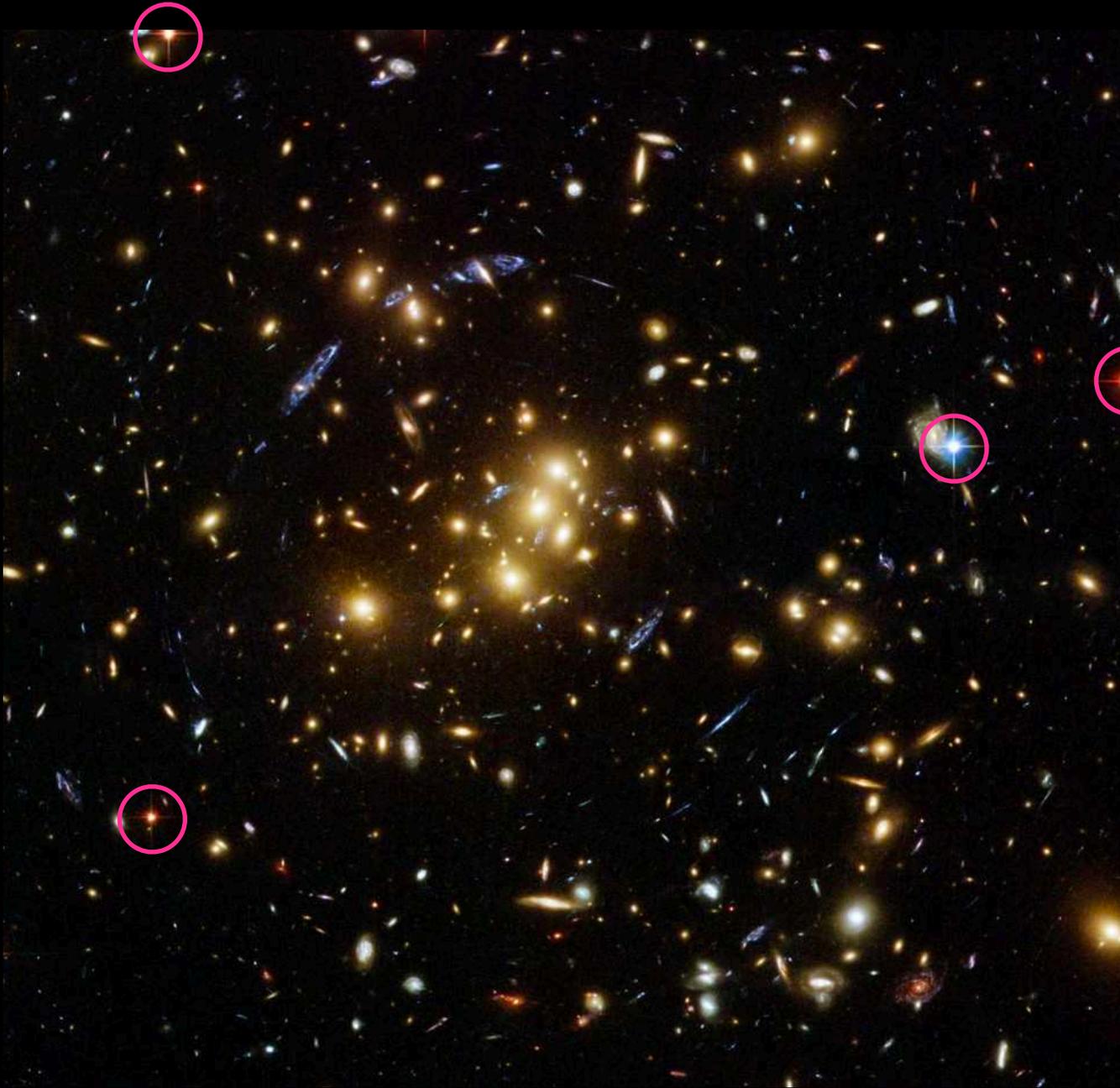
Di massa ce ne deve essere proprio **tanta**
(ammassi di galassie)

Studiamo questa foto del 1979

Telescopio Jodrell Bank MkIA

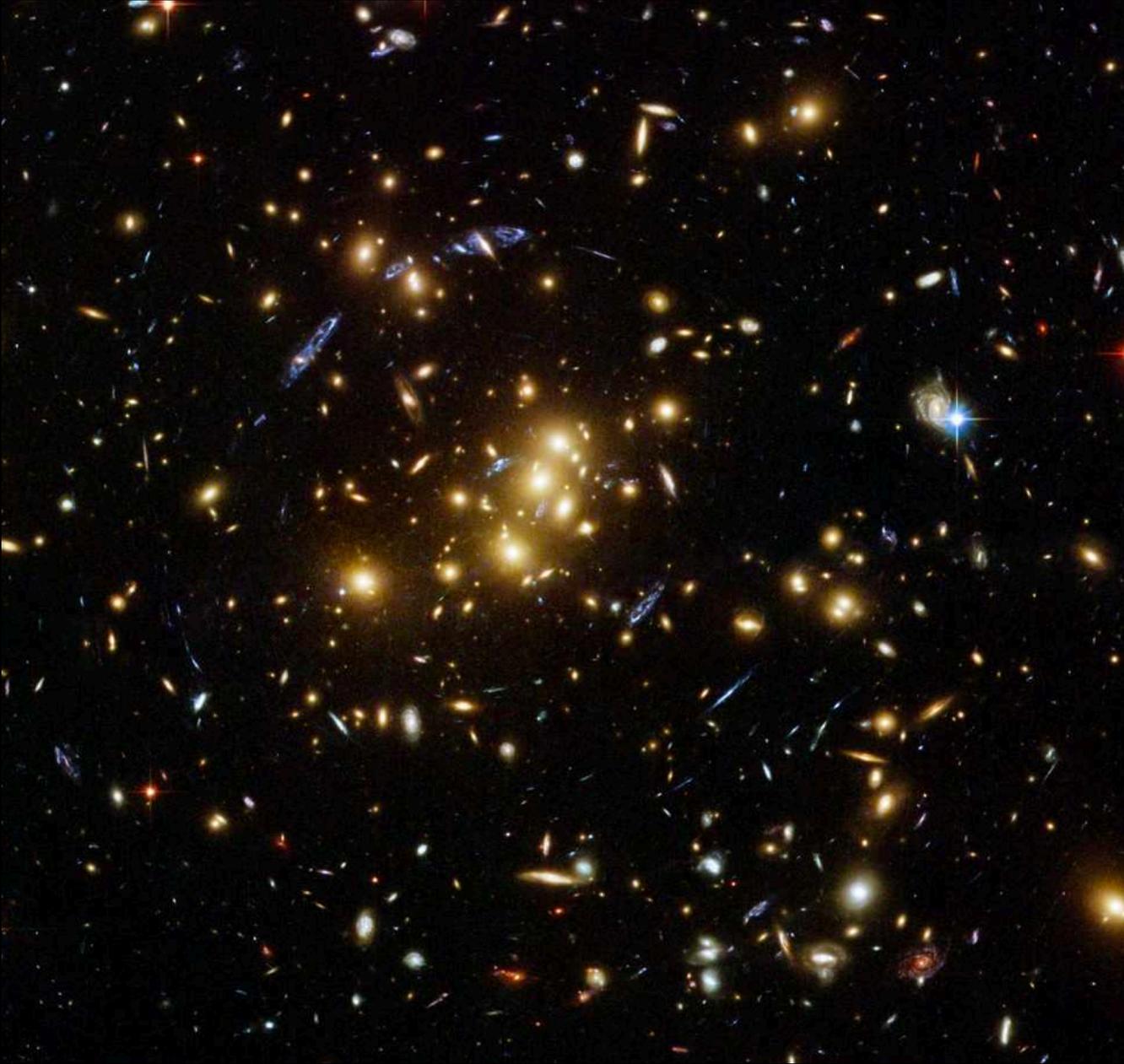


Studiamo questa foto del 1979



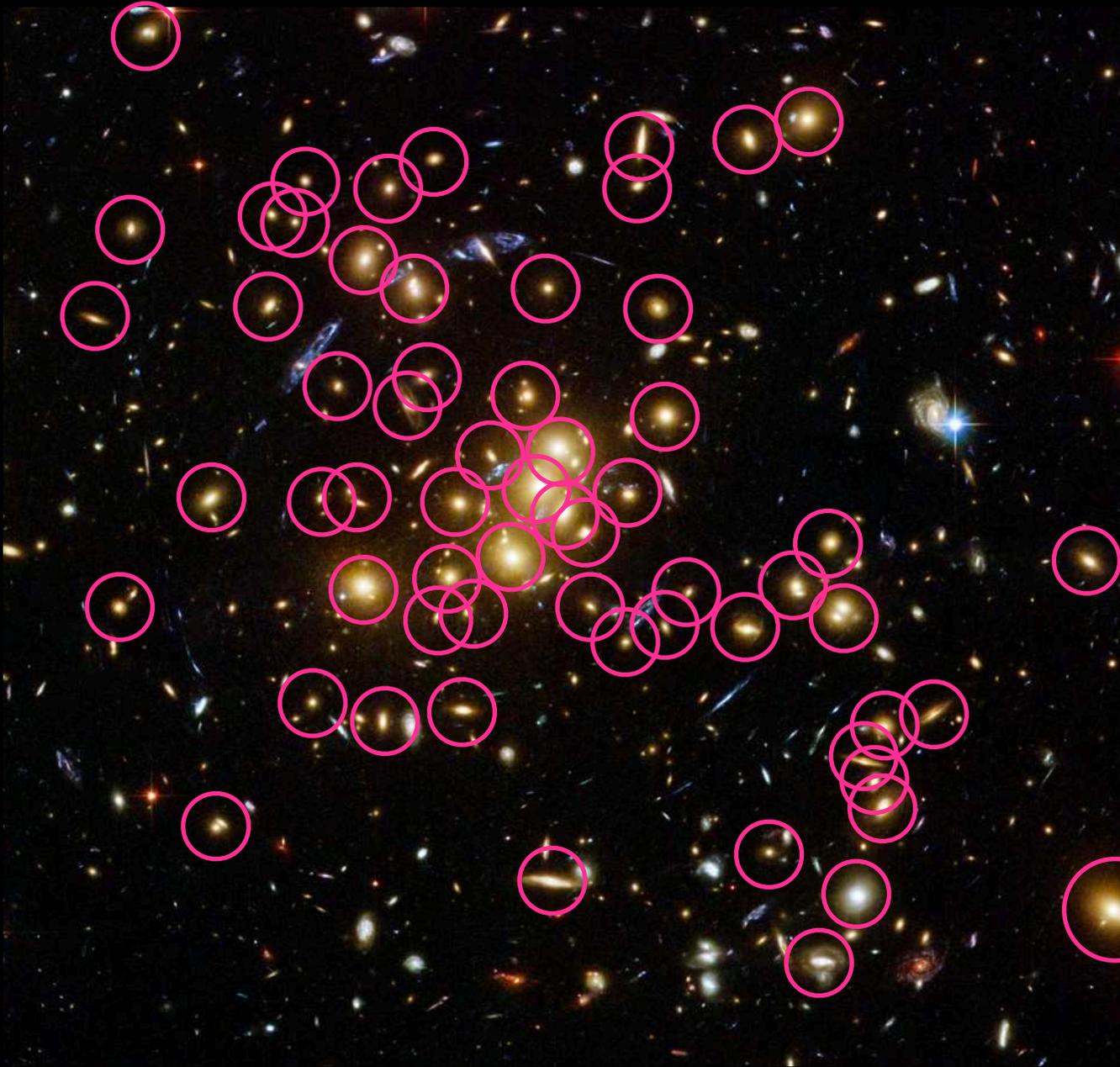
**gli oggetti a forma di +
sono stelle, vicine a noi**

Studiamo questa foto del 1979



**tutti gli altri oggetti
sono galassie**

Studiamo questa foto del 1979



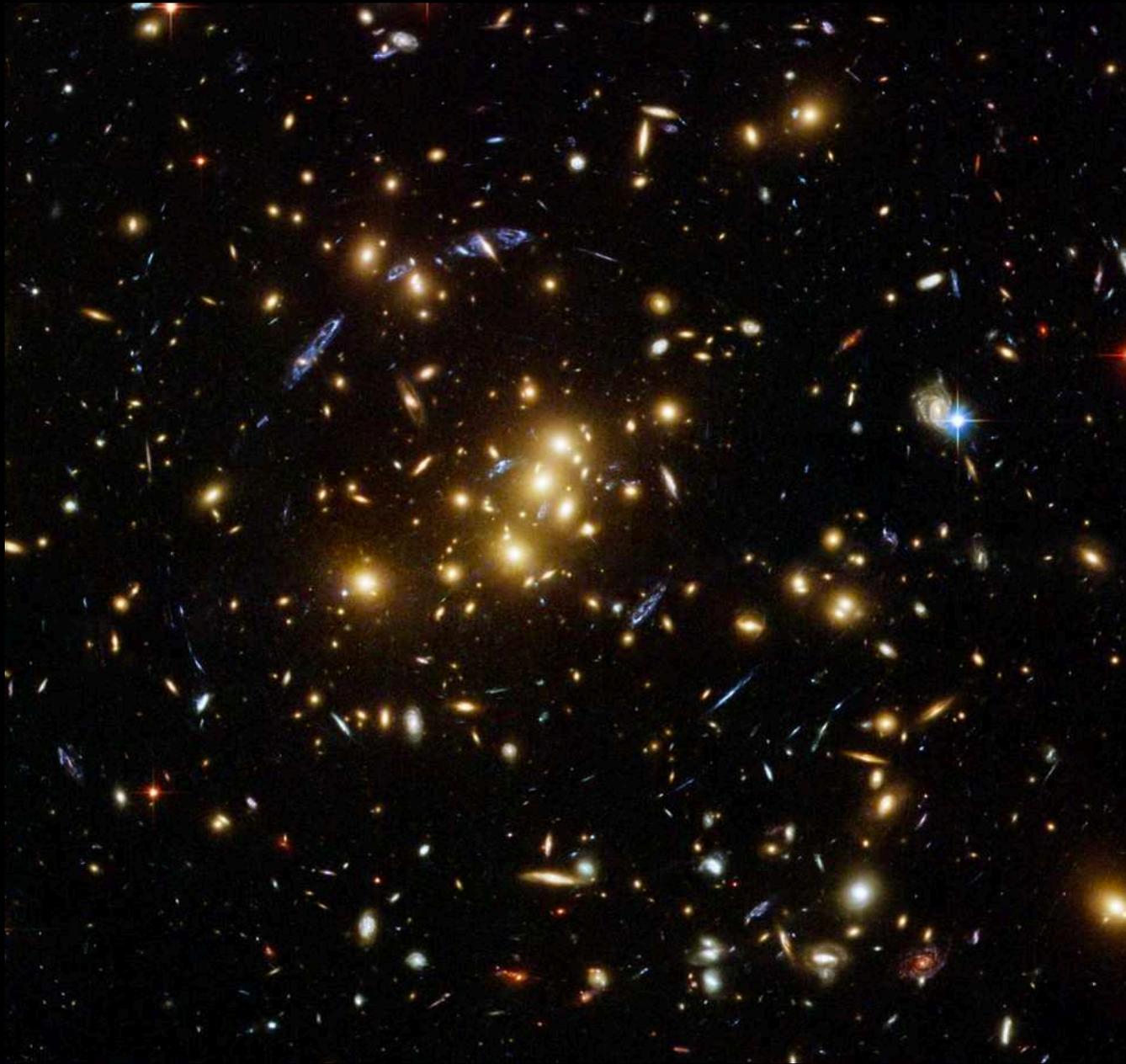
**tutti gli altri oggetti
sono galassie**

**quelle gialle sono
parte di un ammasso**

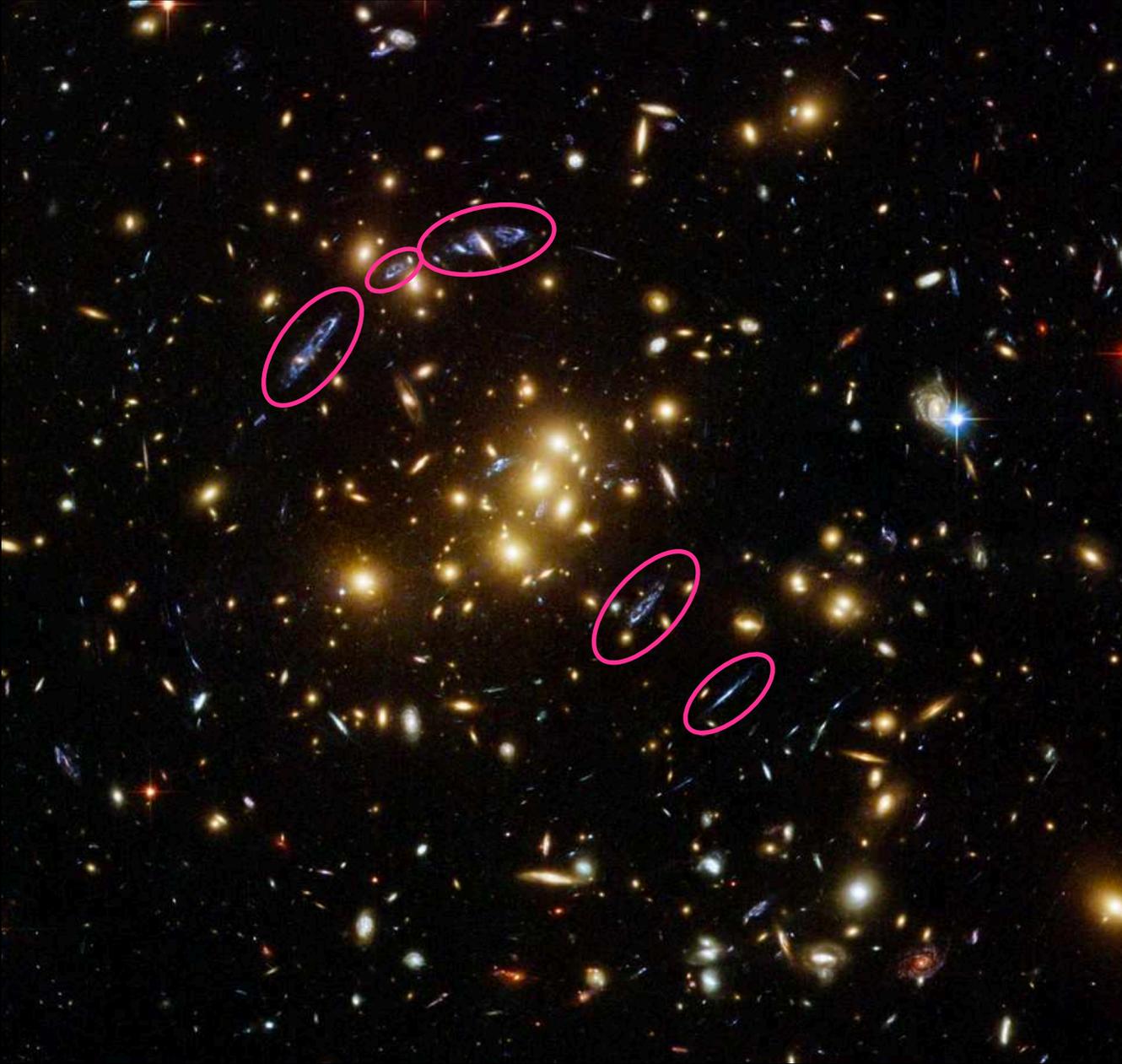
**sono tutte vicine
e connesse
gravitazionalmente**

Studiamo questa foto del 1979

Telescopio Jodrell Bank MkIA



Studiamo questa foto del 1979



**questa è una galassia
molto più lontana**

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

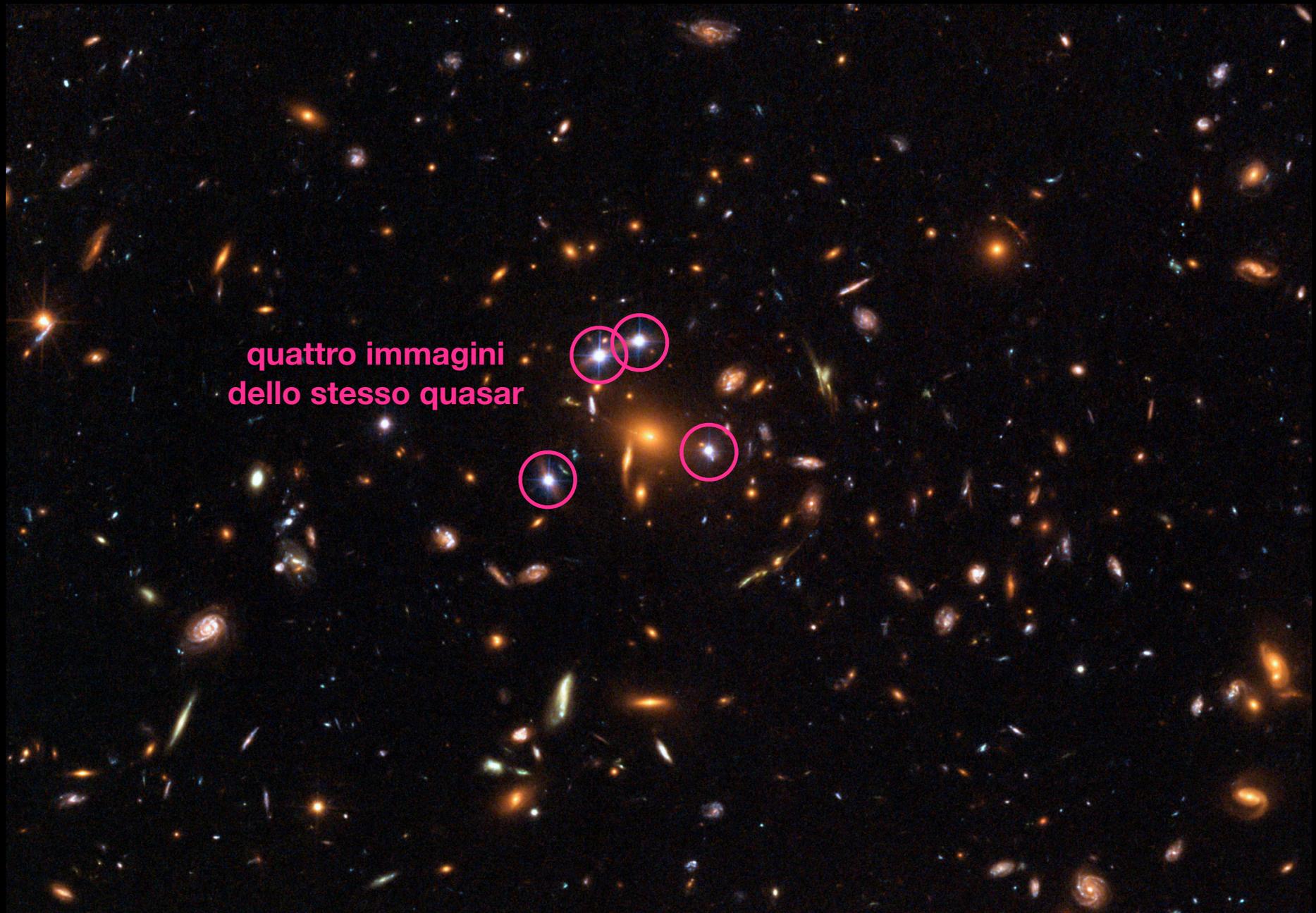
**la massa visibile
dell'ammasso non
è sufficiente per
spiegare questo**

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

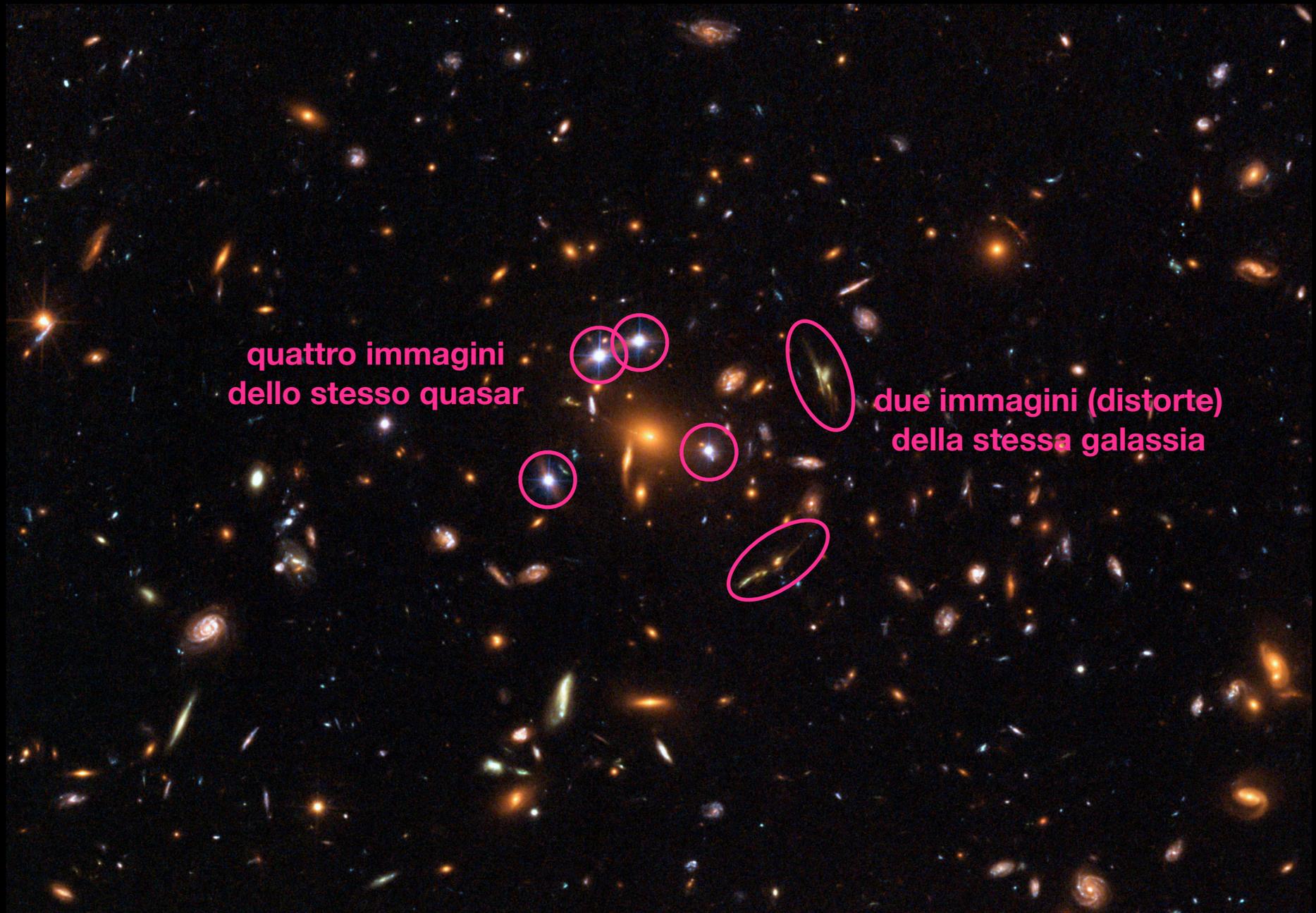
O quest'altra foto del 2006



O quest'altra foto del 2006



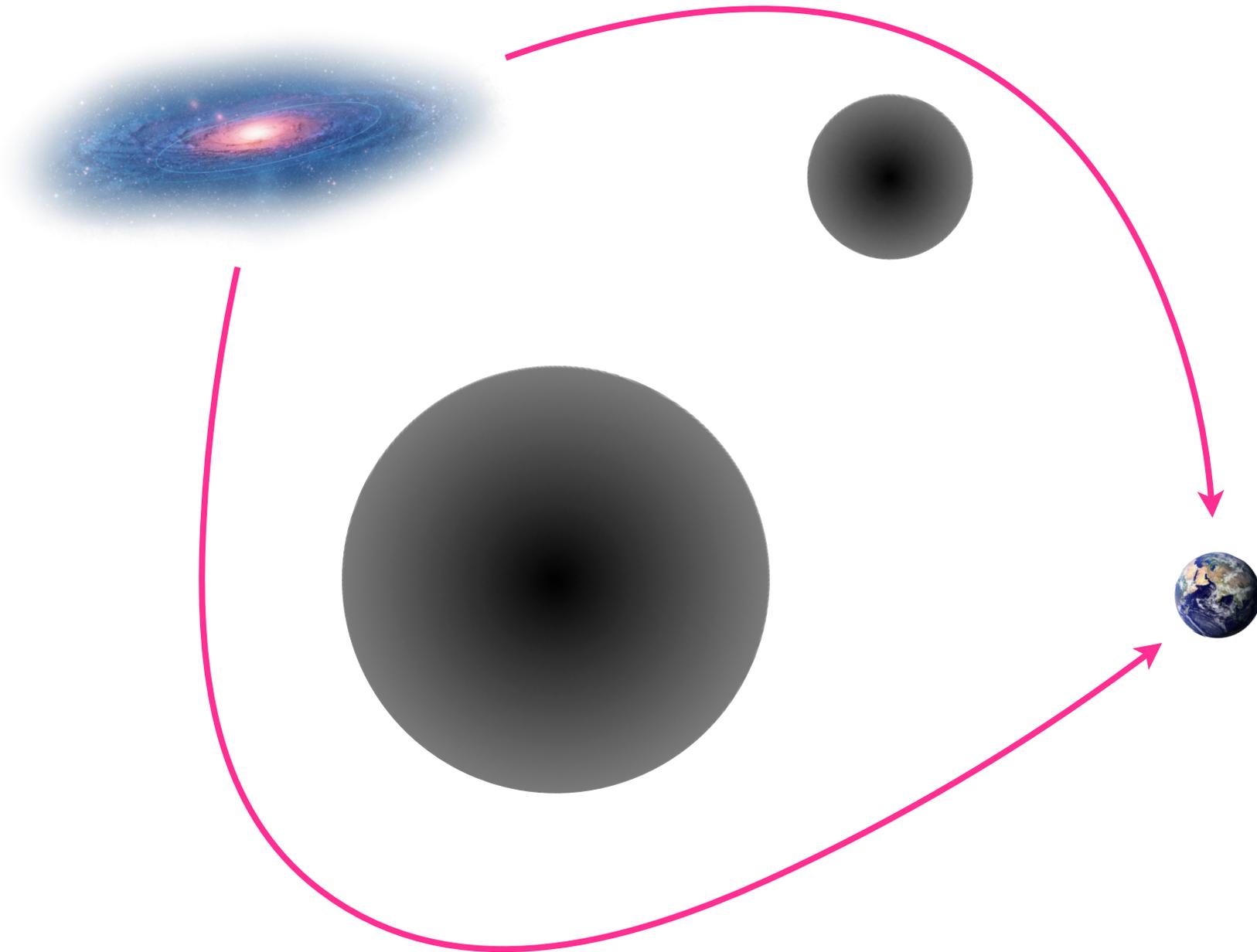
O quest'altra foto del 2006



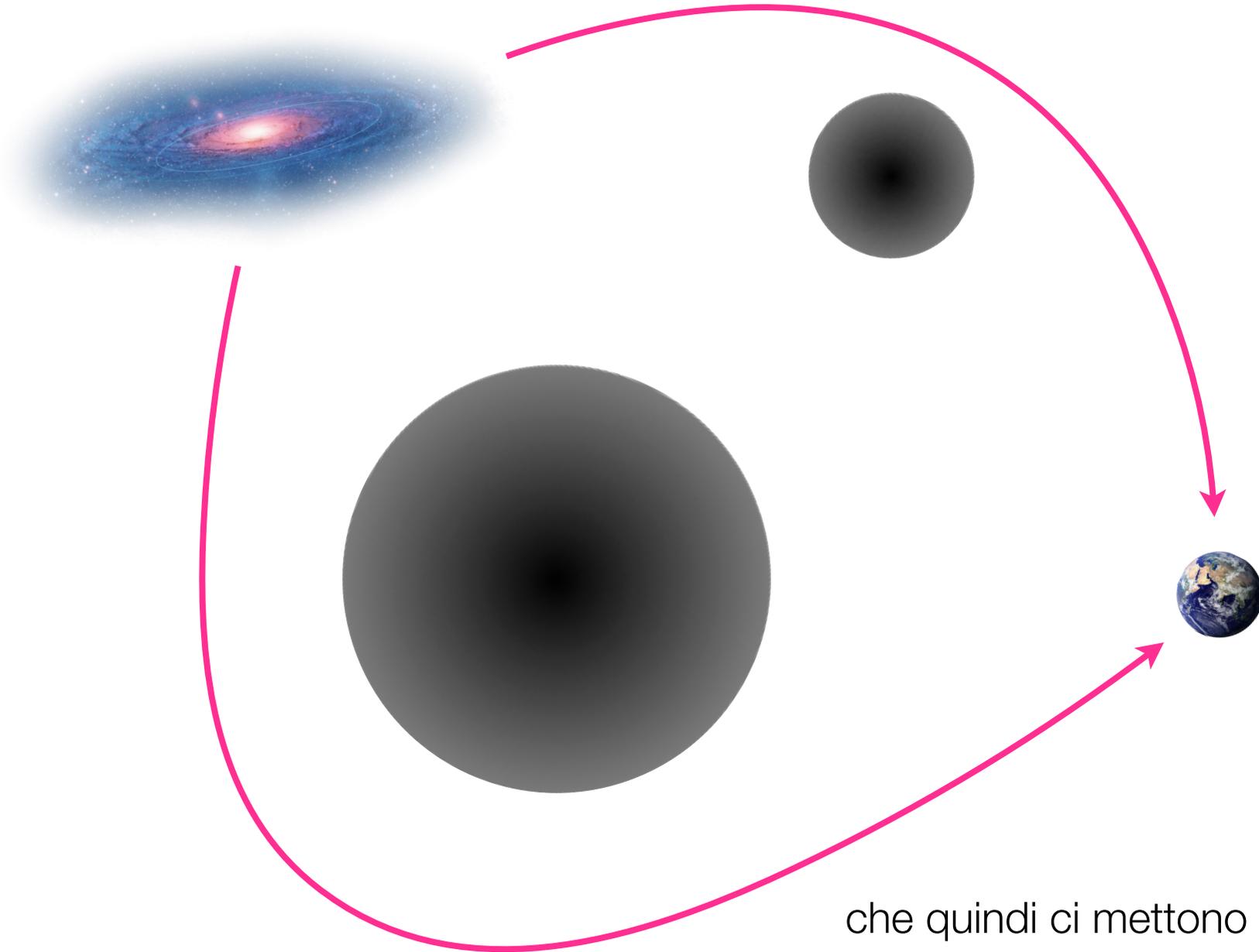
quattro immagini
dello stesso quasar

due immagini (distorte)
della stessa galassia

Potrebbero esistere percorsi più lunghi di altri

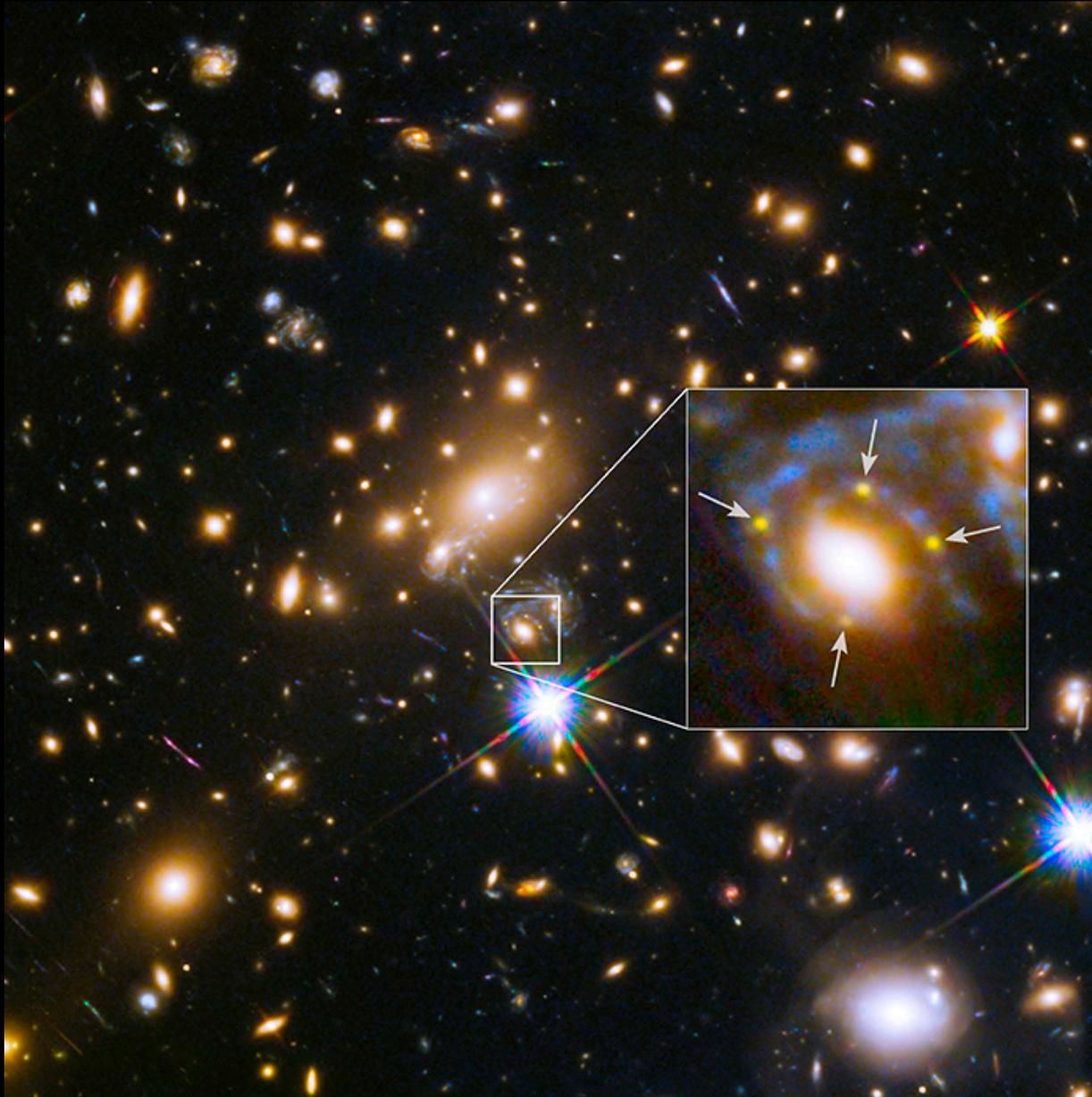


Potrebbero esistere percorsi più lunghi di altri



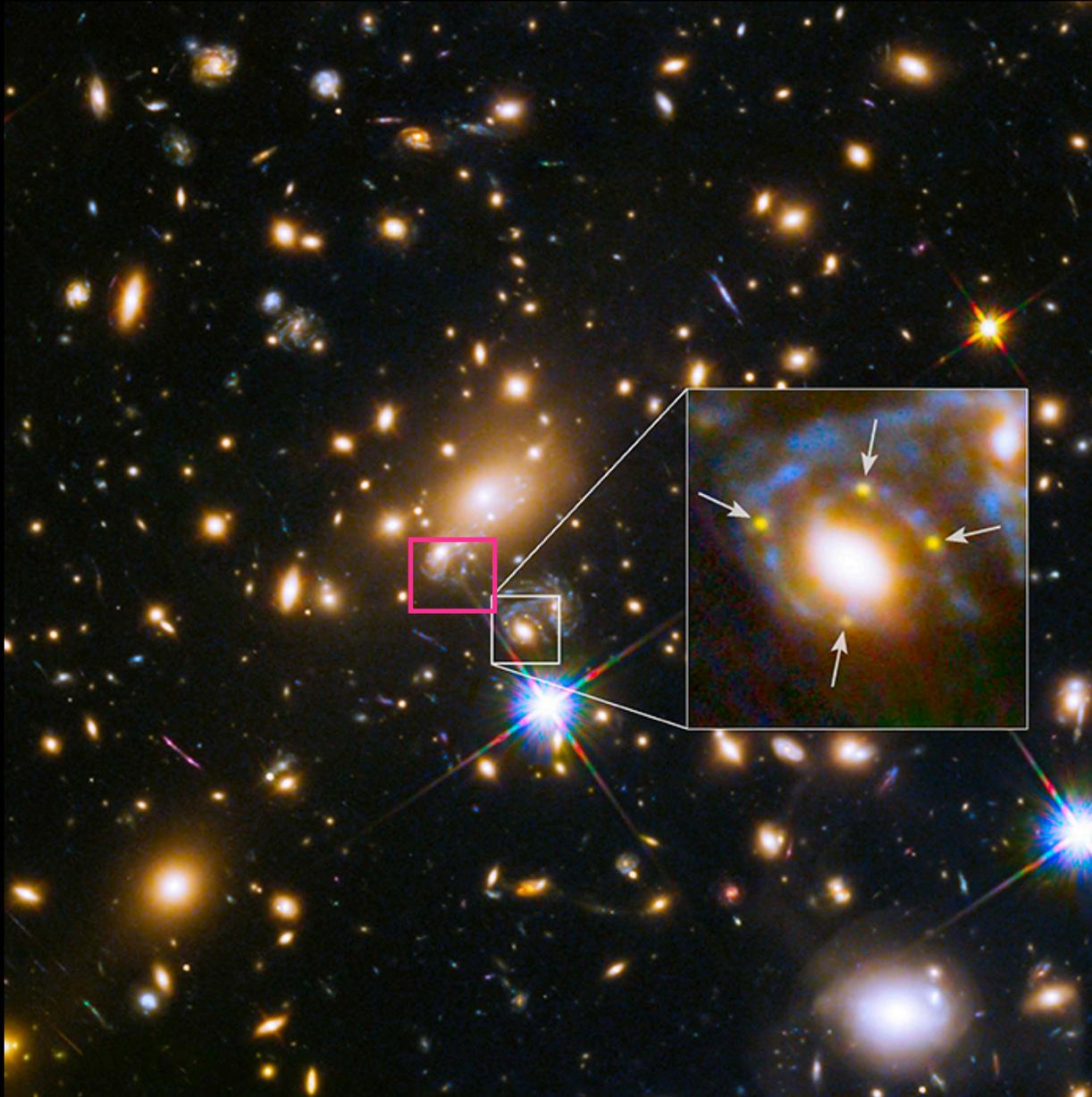
che quindi ci mettono più tempo

Questo effetto lo abbiamo capito bene



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

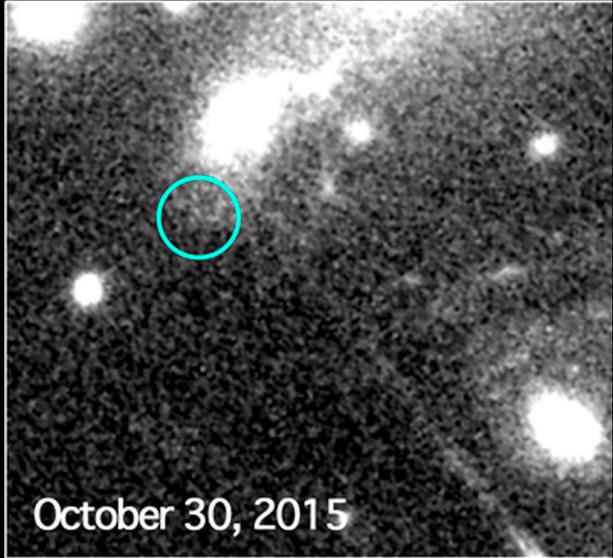
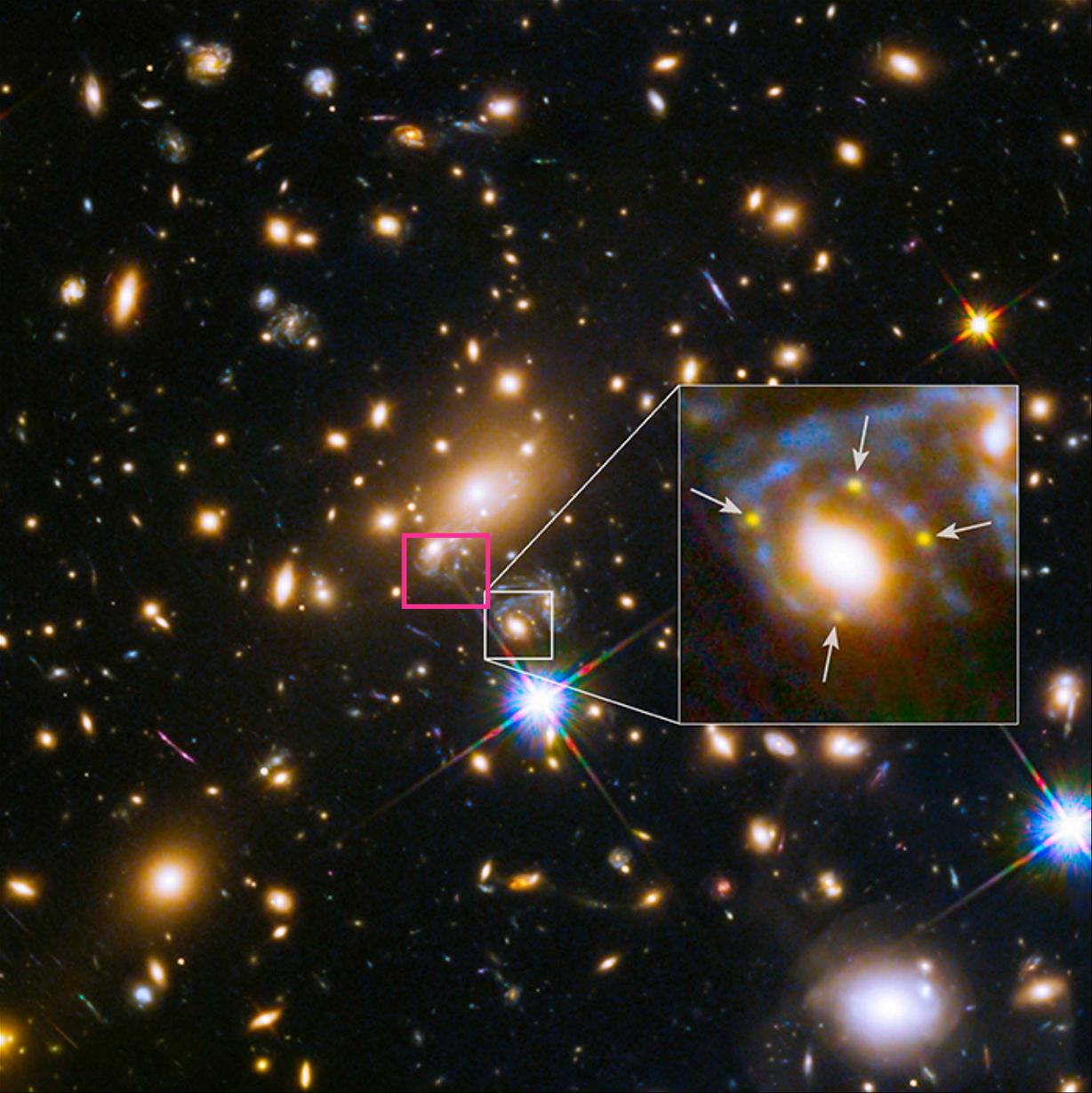
Questo effetto lo abbiamo capito bene



**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



La prova ultima: il Bullet Cluster



La prova ultima: il Bullet Cluster



**due ammassi di galassie si sono
scontrati 150 milioni di anni fa**

rosa: massa visibile

**il cluster piccolo è passato
attraverso il cluster grande
come una pallottola**

**blu: massa oscura
(dal lensing)**

**la materia oscura non
interagisce e va avanti
come se niente fosse**

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

