

# Particelle e Cosmologia: le osservazioni



Paolo de Bernardis

Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma

Accademia Nazionale dei Lincei

11 Novembre 2021

# Particelle e Cosmologia

- **Cosmologia:** studia l'universo nella sua globalità. Dimensioni tipiche dell'universo osservabile:  $> 10^{26}\text{m}$  (inifinitamente grande !)
- **Particelle subatomiche:** hanno dimensioni  $< 10^{-14}\text{m}$  (infinitamente piccolo !)
- Eppure il titolo suggerisce che ci sia una relazione tra l'universo e le particelle che lo compongono (e le loro strane interazioni a livello microscopico). Quindi una relazione per cui ciò che accade nell'inifinitamente grande dipende dall'inifinitamente piccolo.
- Lo confermeremo, descrivendo una serie di fenomeni che si osservano avvenire nell'universo a diverse scale, sempre maggiori, e per i quali si possono eseguire misure quantitative, confrontabili con le teorie della fisica fondamentale.

# Esempio 1: la meccanica quantistica spiega il funzionamento delle stelle

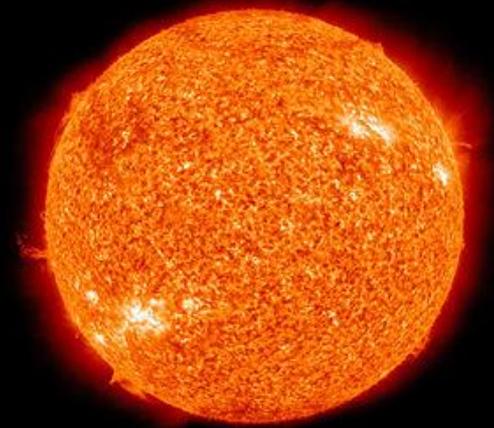
- Il Sole: sistema macroscopico, diametro  $10^9\text{m}$  (grande, seppure non cosmologico).
- Eppure non potrebbe funzionare se non avvenissero al suo interno, contro ogni previsione classica, **fusioni nucleari**, governate dalle strane leggi della meccanica quantistica.
- Dal sole vengono emessi circa  $10^{26}\text{J}$  di energia ogni secondo (basta sommare gli  $1.4\text{ kW/m}^2$  che riceviamo alla distanza della Terra su tutta la superficie sferica a  $1.5 \times 10^{11}\text{m}$  di distanza dal Sole).
- Una energia spaventosa, che non può avere origine chimica o gravitazionale. Una energia che mantiene la Terra ad una temperatura favorevole allo sviluppo della vita. Fondamentale per la nostra esistenza..

Centrale nucleare (fissione)



$1.6 \times 10^{10} \text{W}$

Sole (fusione)



$3.8 \times 10^{26} \text{W}$

Una centrale nucleare è 200 milioni di miliardi di volte meno potente del sole.

# Esempio 1: la meccanica quantistica spiega il funzionamento delle stelle

- Il Sole: sistema macroscopico, diametro  $10^9\text{m}$  (grande, seppure non cosmologico).
- Eppure non potrebbe funzionare se non avvenissero al suo interno, contro ogni previsione classica, **fusioni nucleari**, governate dalle strane leggi della meccanica quantistica.
- Dal sole vengono emessi circa  $10^{26}\text{J}$  di energia ogni secondo (basta sommare i  $1400\text{ W/m}^2$  che riceviamo alla distanza della Terra su tutta la superficie sferica a  $1.5 \times 10^{11}\text{m}$  di distanza dal Sole).
- Una energia spaventosa, che non può avere origine chimica o gravitazionale. Una energia che mantiene la Terra ad una temperatura favorevole allo sviluppo della vita. Fondamentale per la nostra esistenza.
- Solo nel 1930 Hans Bethe ipotizzò che potesse avere **origine nucleare**, risolvendo un secolare problema della fisica, grazie all'estrema efficienza energetica delle reazioni nucleari.

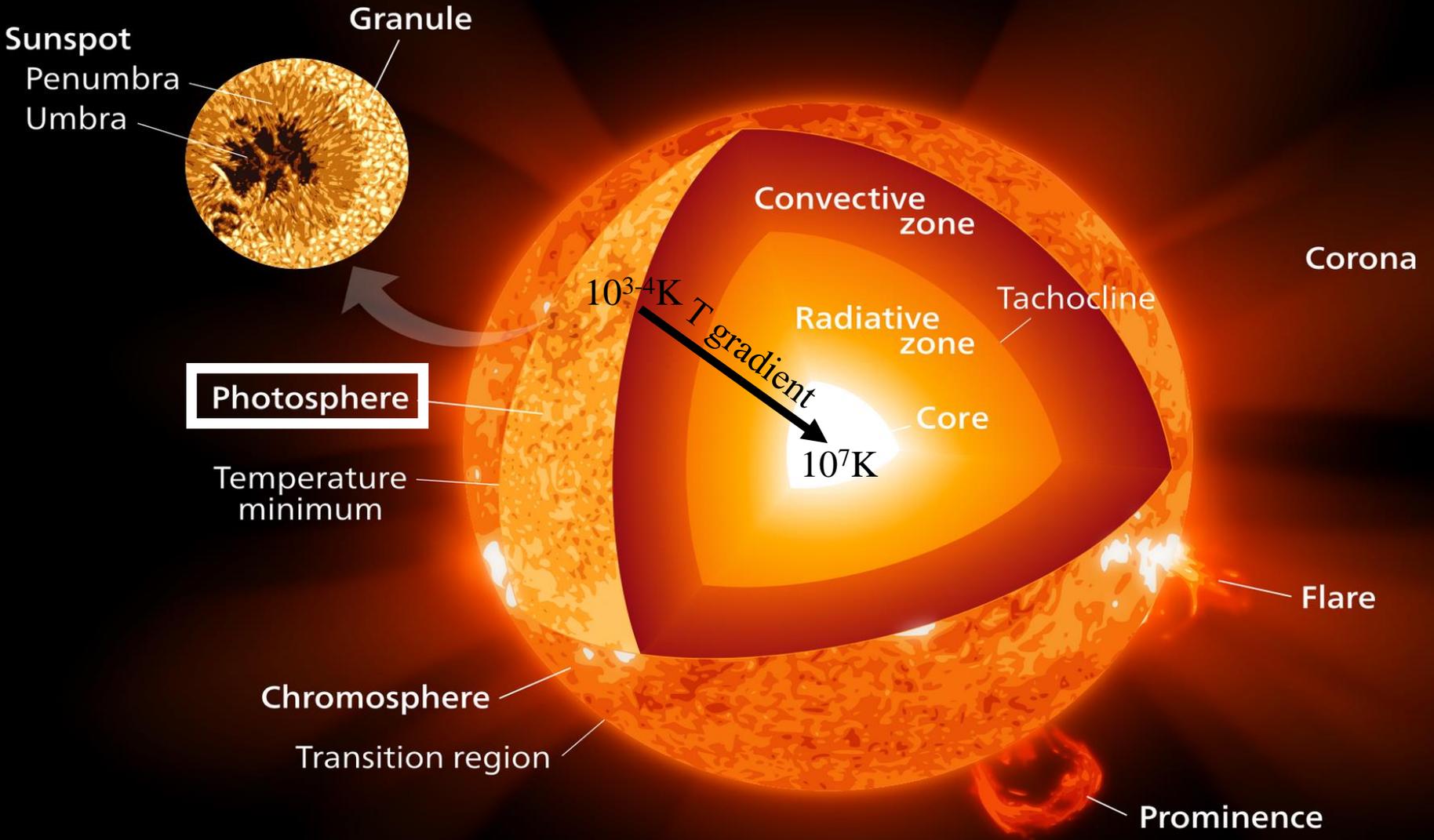
# Esempio 1: la meccanica quantistica spiega il funzionamento delle stelle

- In una reazione di fusione nucleare, particelle leggere si fondono formando particelle più pesanti.
- Parte della massa dei reagenti non va a finire nel prodotto, ma viene convertita direttamente in energia, secondo la formula:

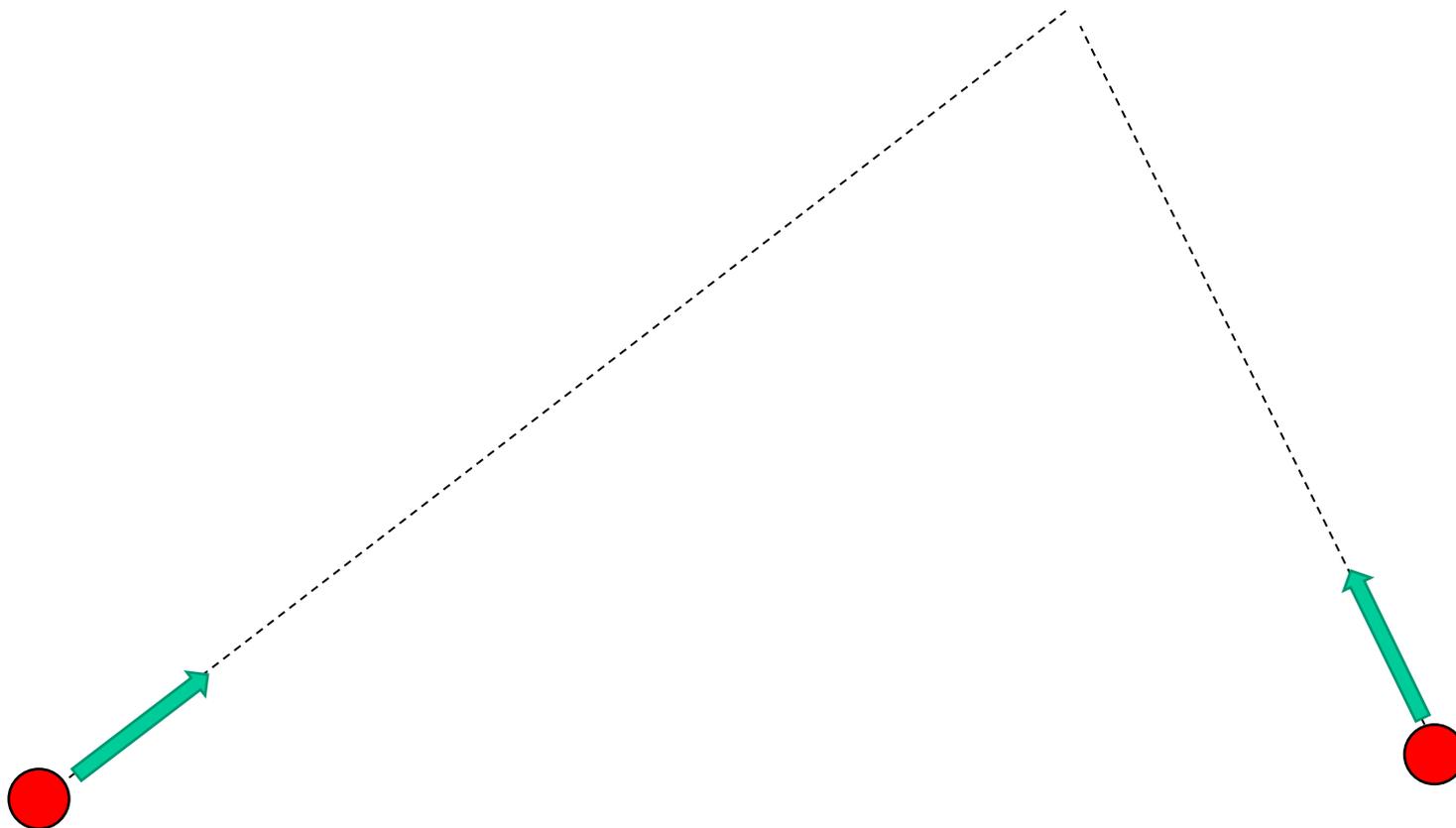
$$E = c^2 \Delta m$$

- E' il modo di conversione di massa in energia più efficiente che si conosca. Molto, molto maggiore della conversione chimica (ad es. della combustione nei motori termici).
- La conversione di 1kg di materia fornisce  $10^{17}$ J di energia, abbastanza per coprire l'intero fabbisogno energetico italiano per un mese.
- Se ragioniamo in modo classico, concludiamo che le reazioni nucleari, nel Sole, non possono avvenire. Consideriamo ad esempio la reazione più semplice possibile: la fusione di due protoni. Spariamoli uno contro l'altro cercando di farli incontrare.

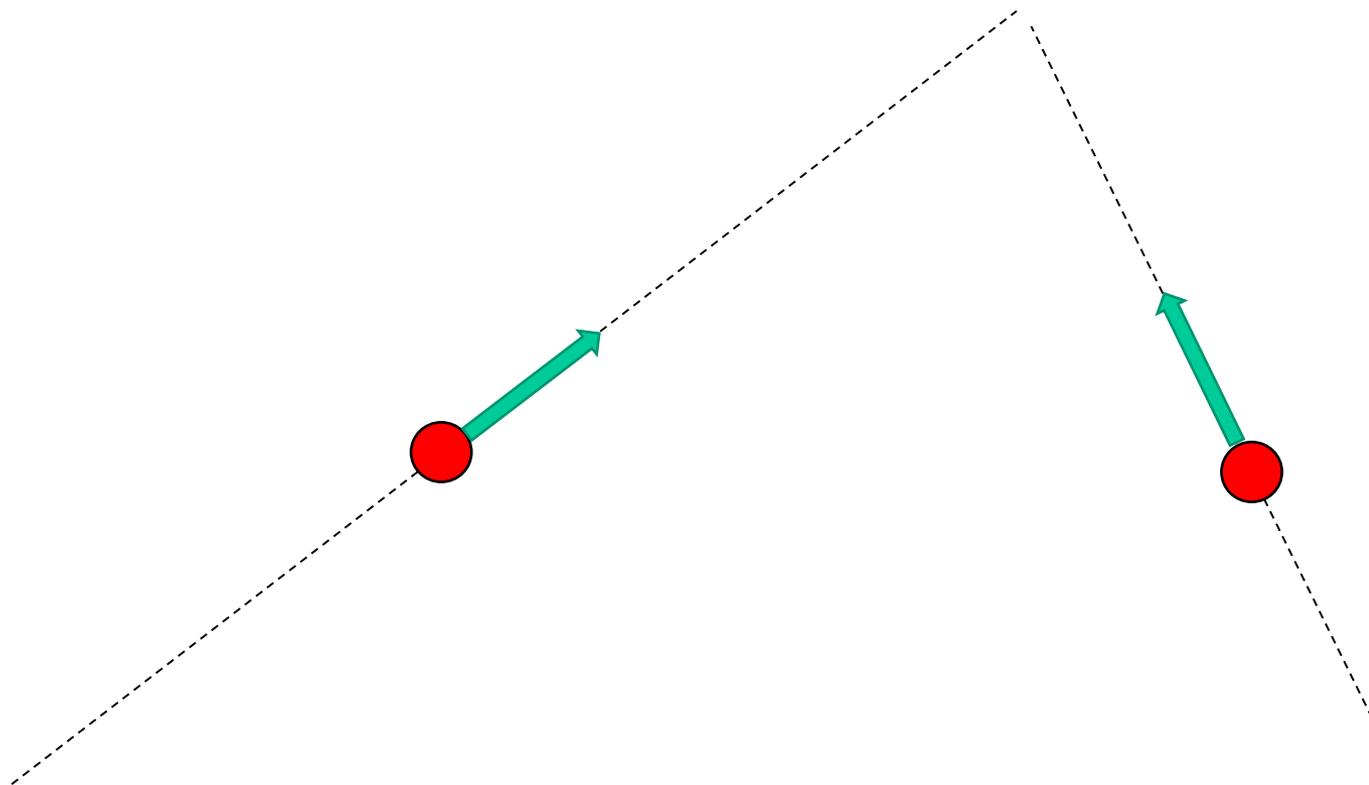
# Struttura di una stella



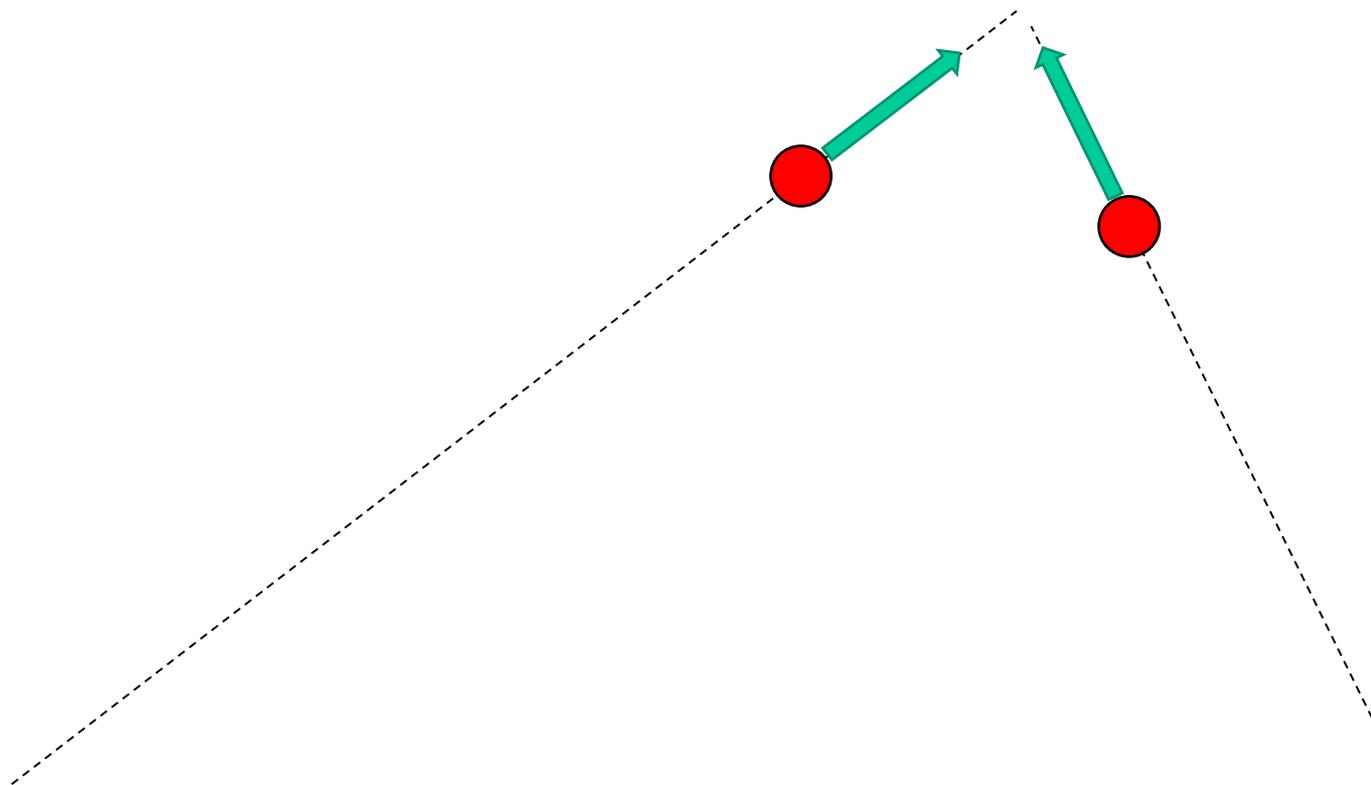
# Che cosa avviene nel nucleo ?



# Che cosa avviene nel nucleo ?

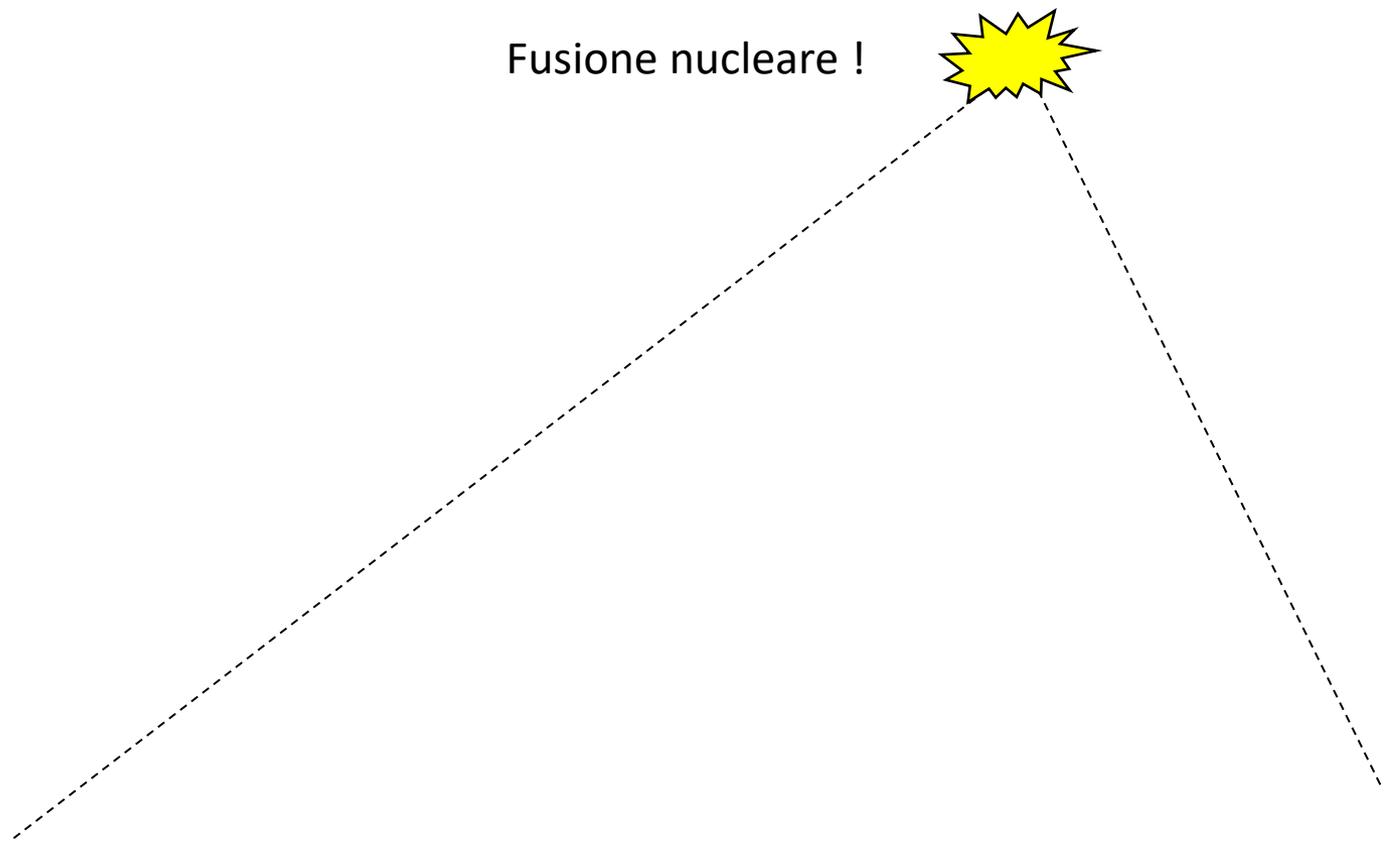


# Che cosa avviene nel nucleo ?

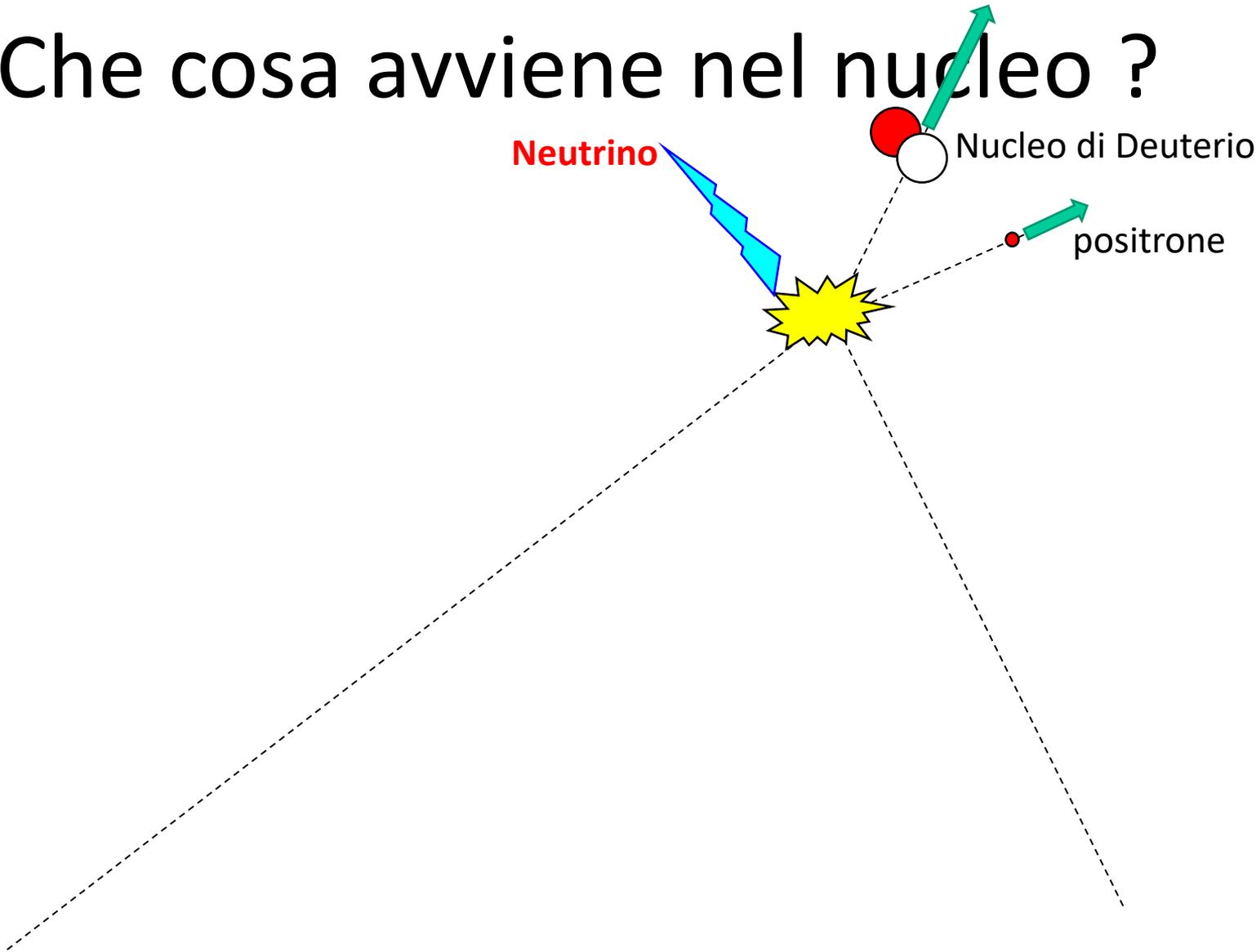


# Che cosa avviene nel nucleo ?

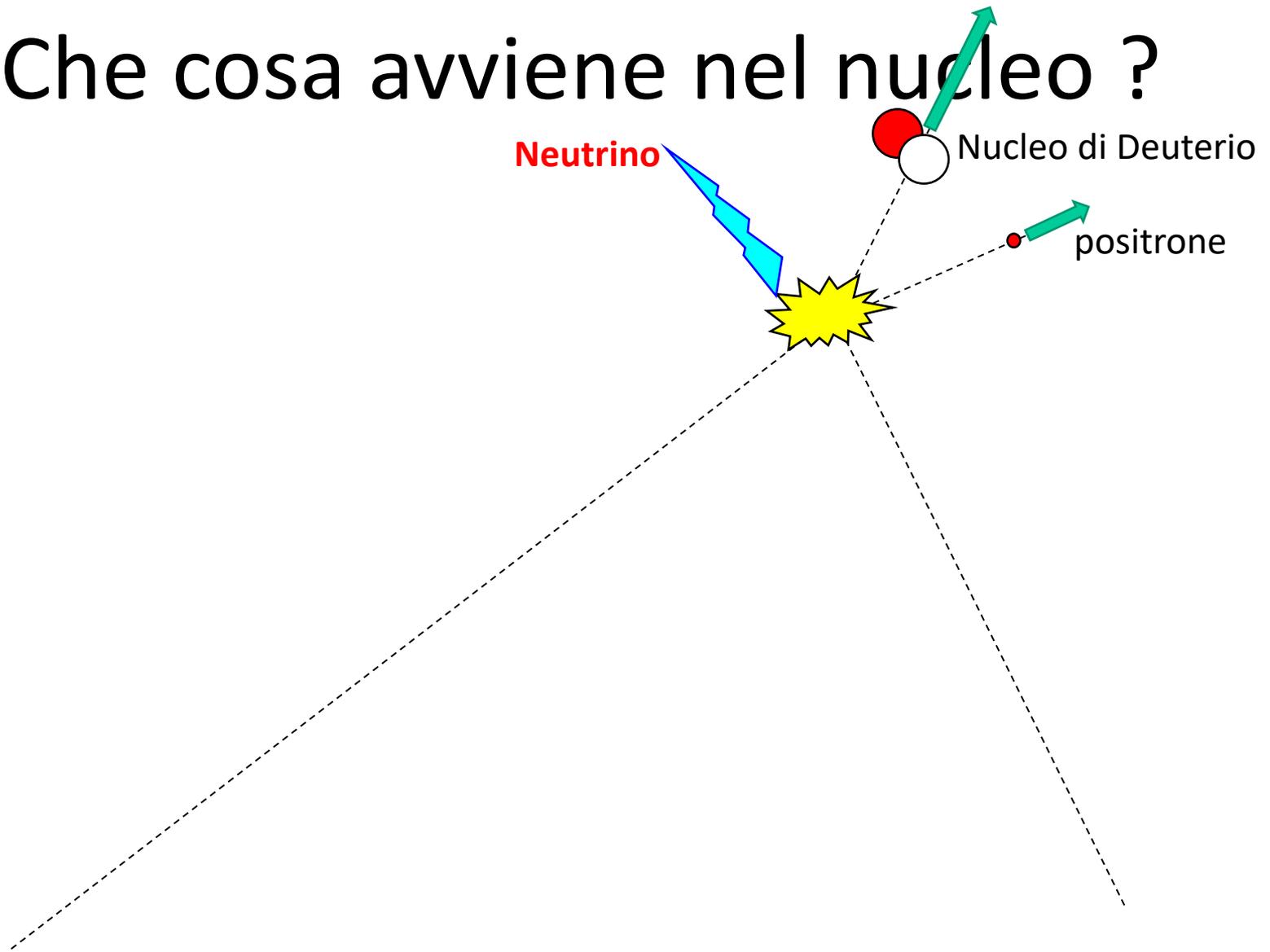
Fusione nucleare !



# Che cosa avviene nel nucleo ?



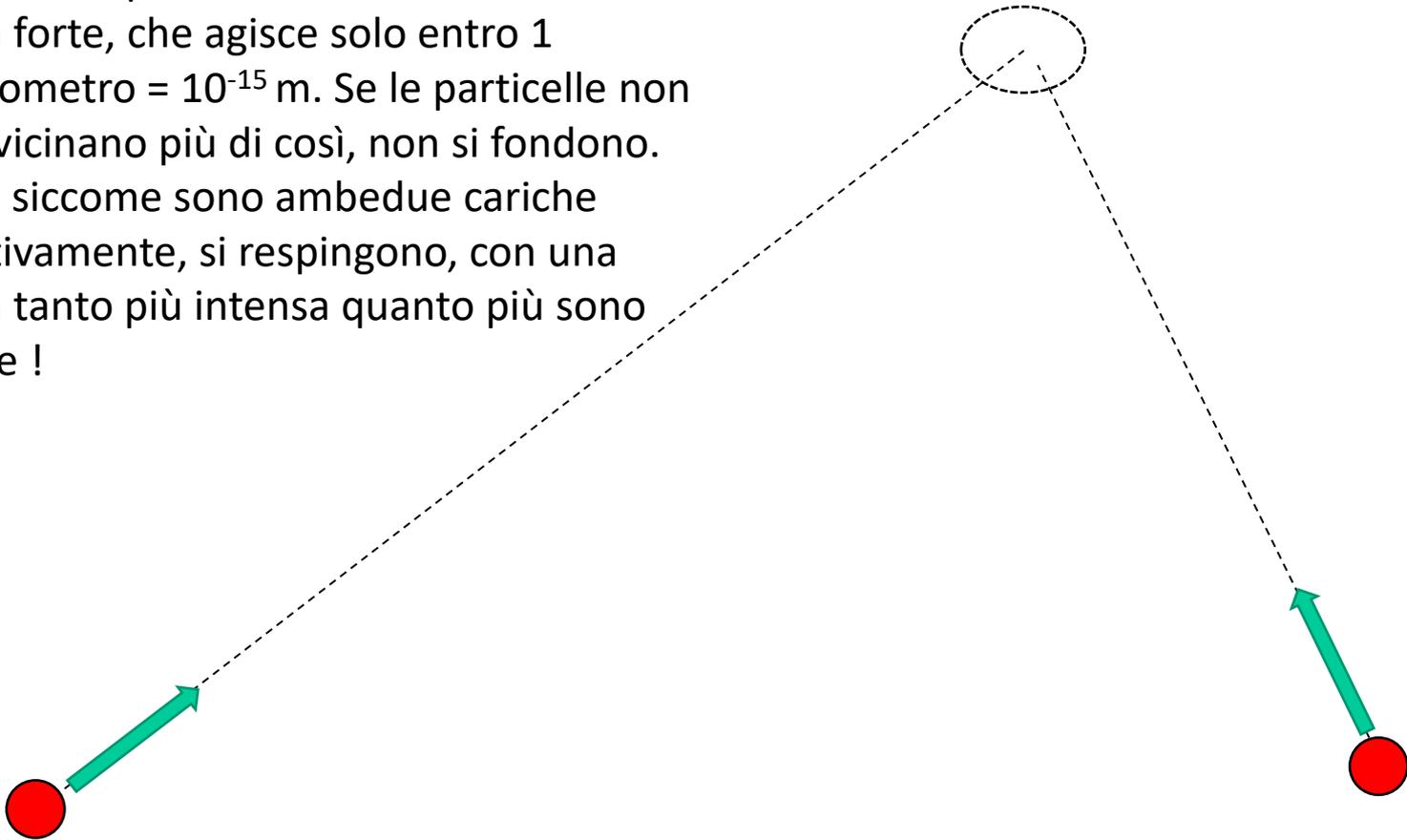
# Che cosa avviene nel nucleo ?



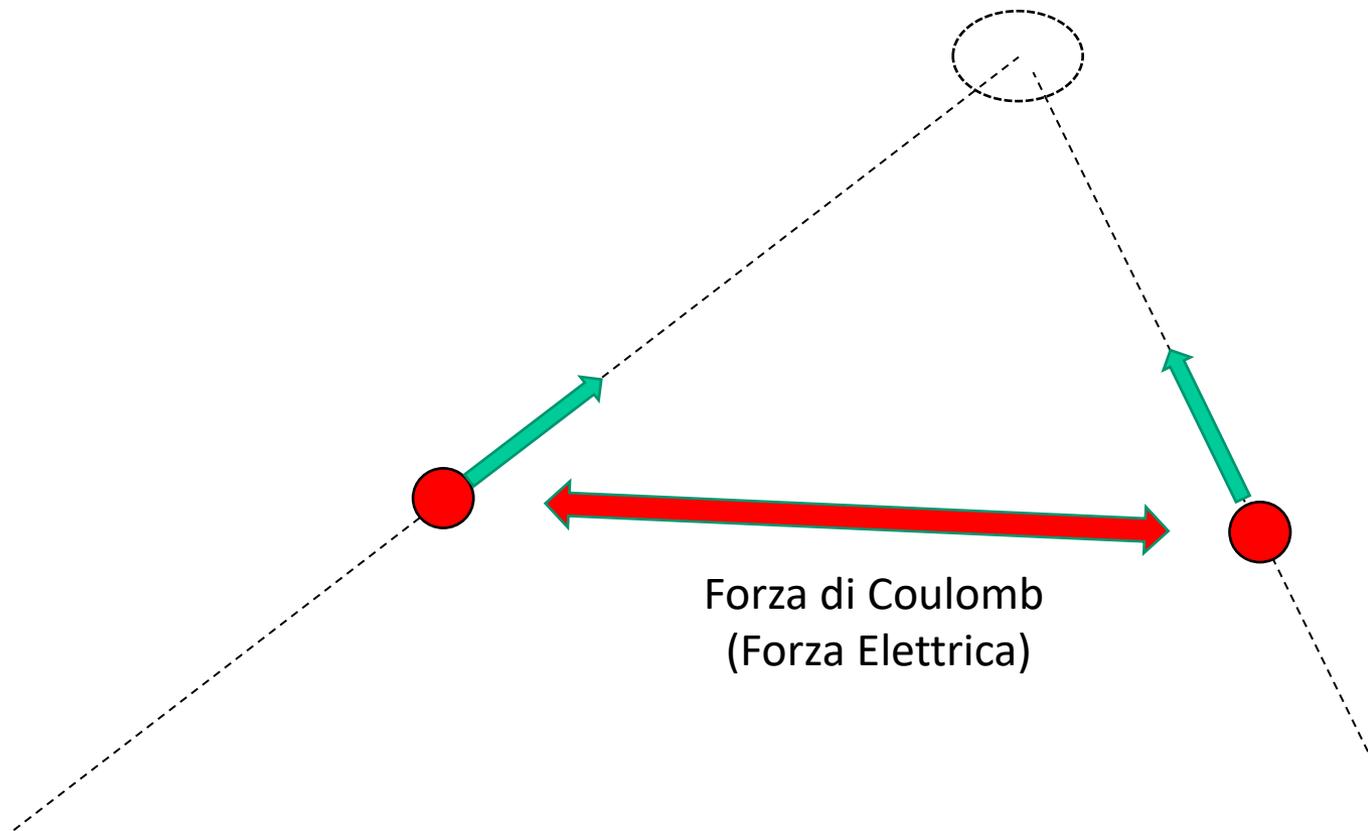
In realtà è molto difficile che avvenga.

# Che cosa avviene nel nucleo ?

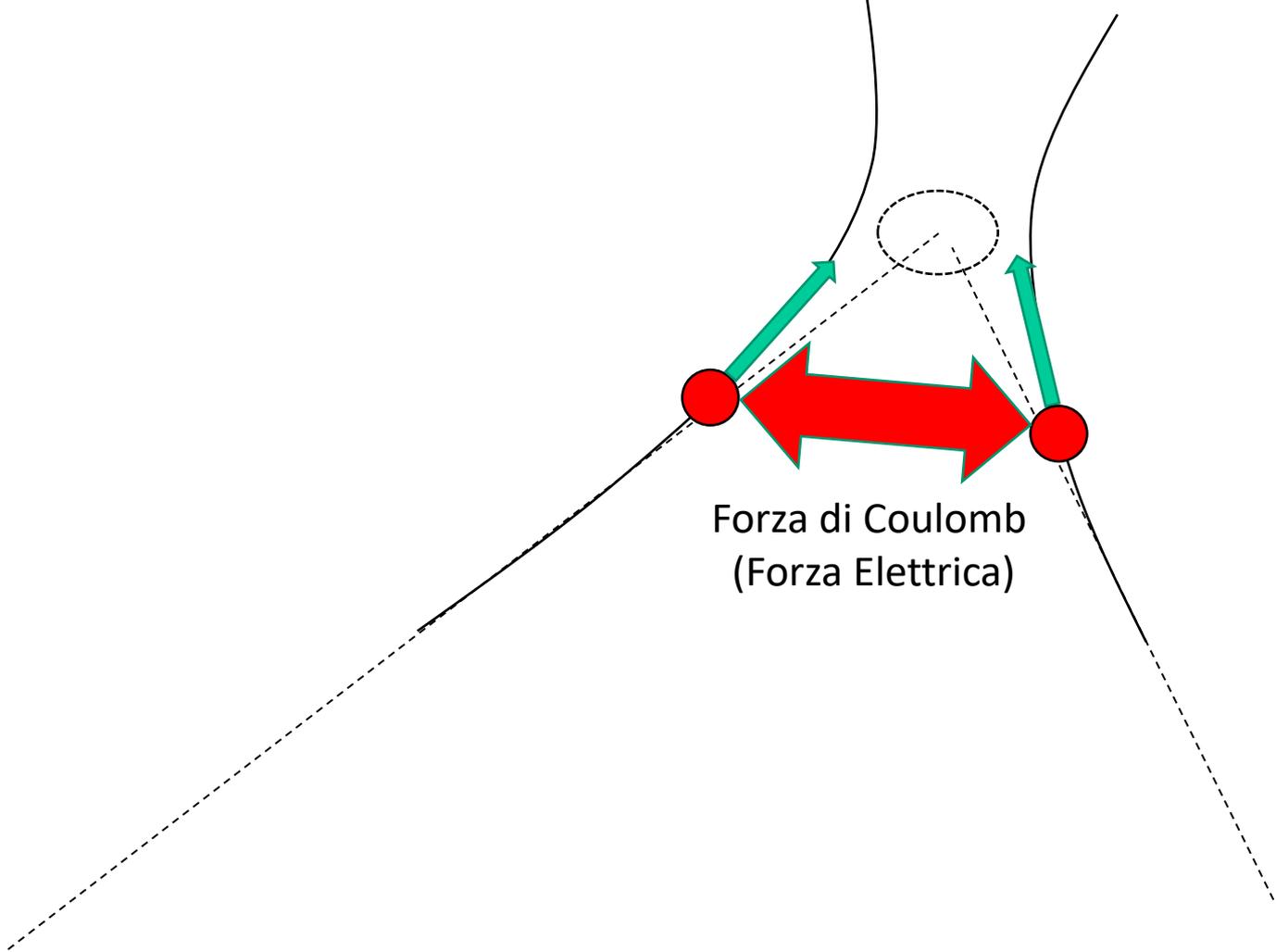
La Fusione Nucleare può avvenire solo se le due particelle si avvicinano abbastanza da rendere possibile l'intervento della forza forte, che agisce solo entro 1 femtometro =  $10^{-15}$  m. Se le particelle non si avvicinano più di così, non si fondono. Anzi, siccome sono ambedue cariche positivamente, si respingono, con una forza tanto più intensa quanto più sono vicine !



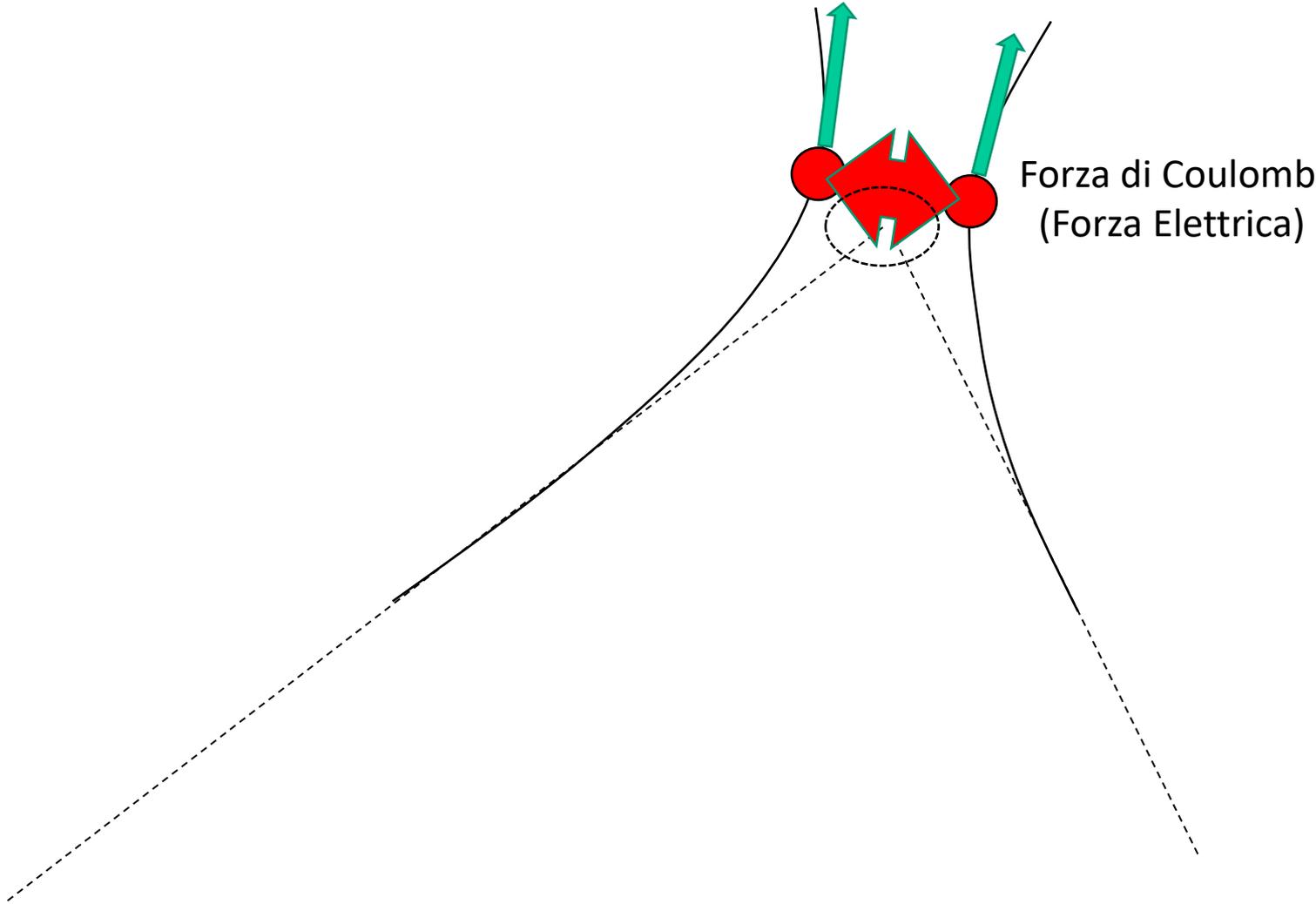
# Che cosa avviene nel nucleo ?



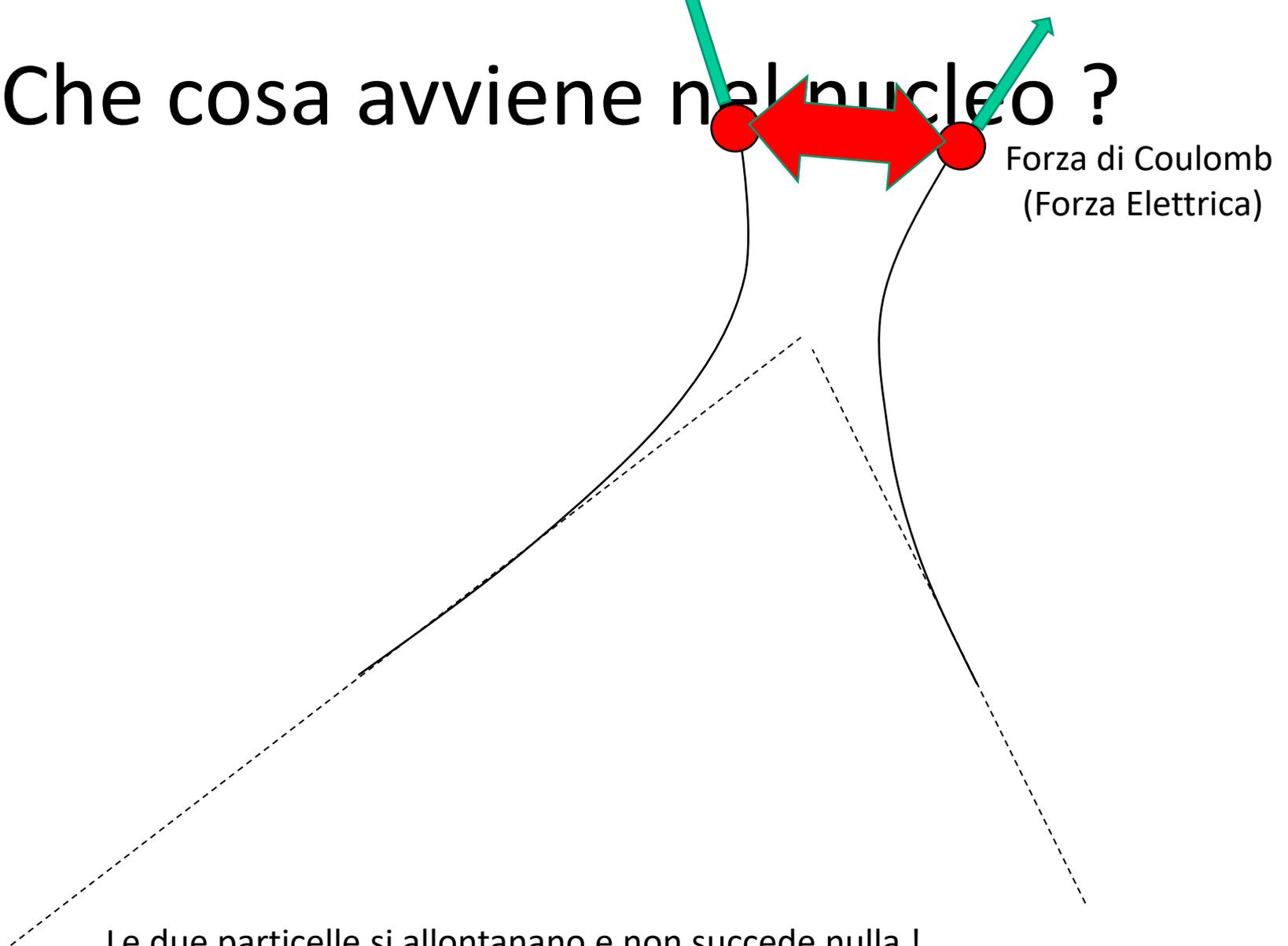
# Che cosa avviene nel nucleo ?



# Che cosa avviene nel nucleo ?

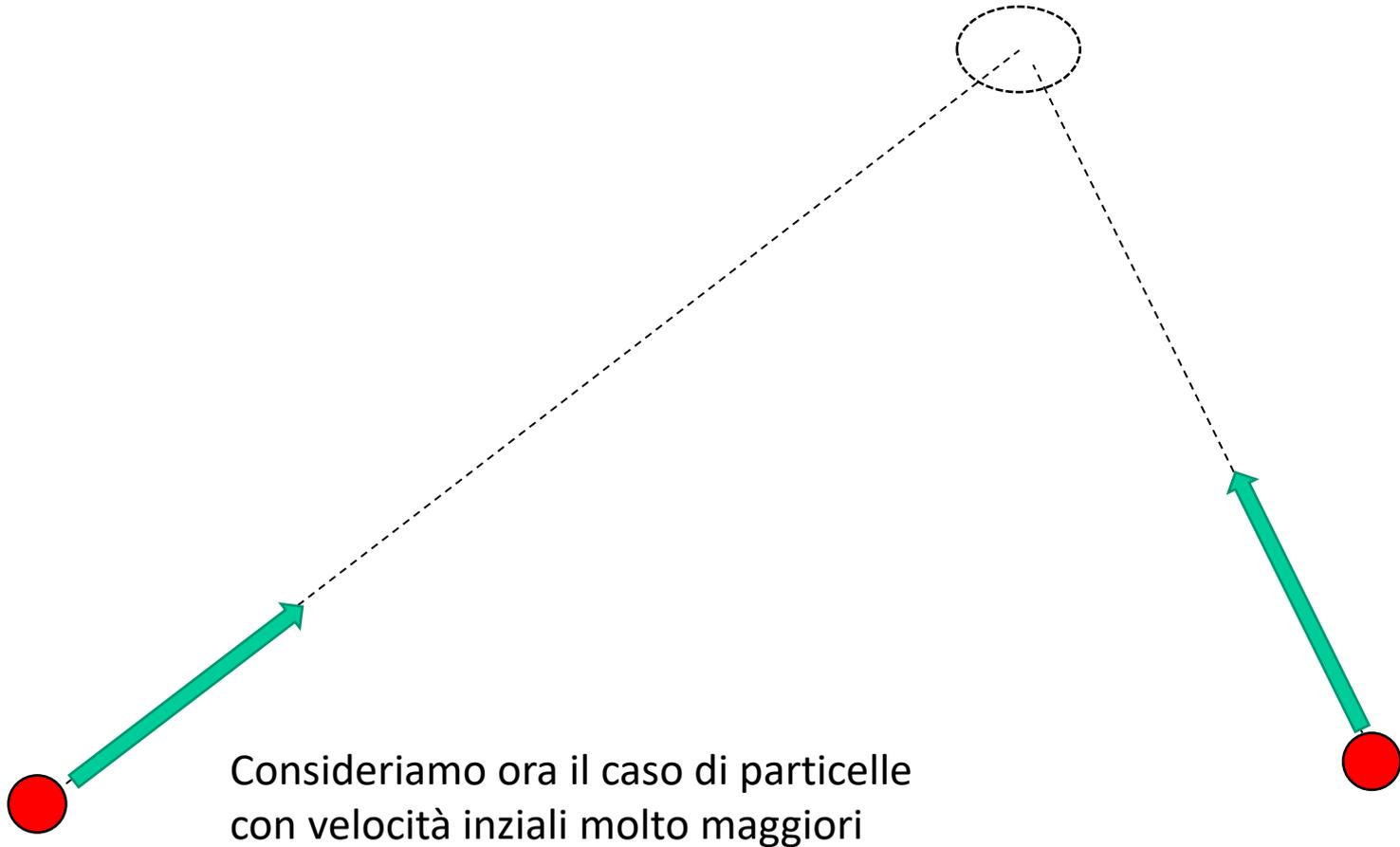


# Che cosa avviene nel nucleo ?

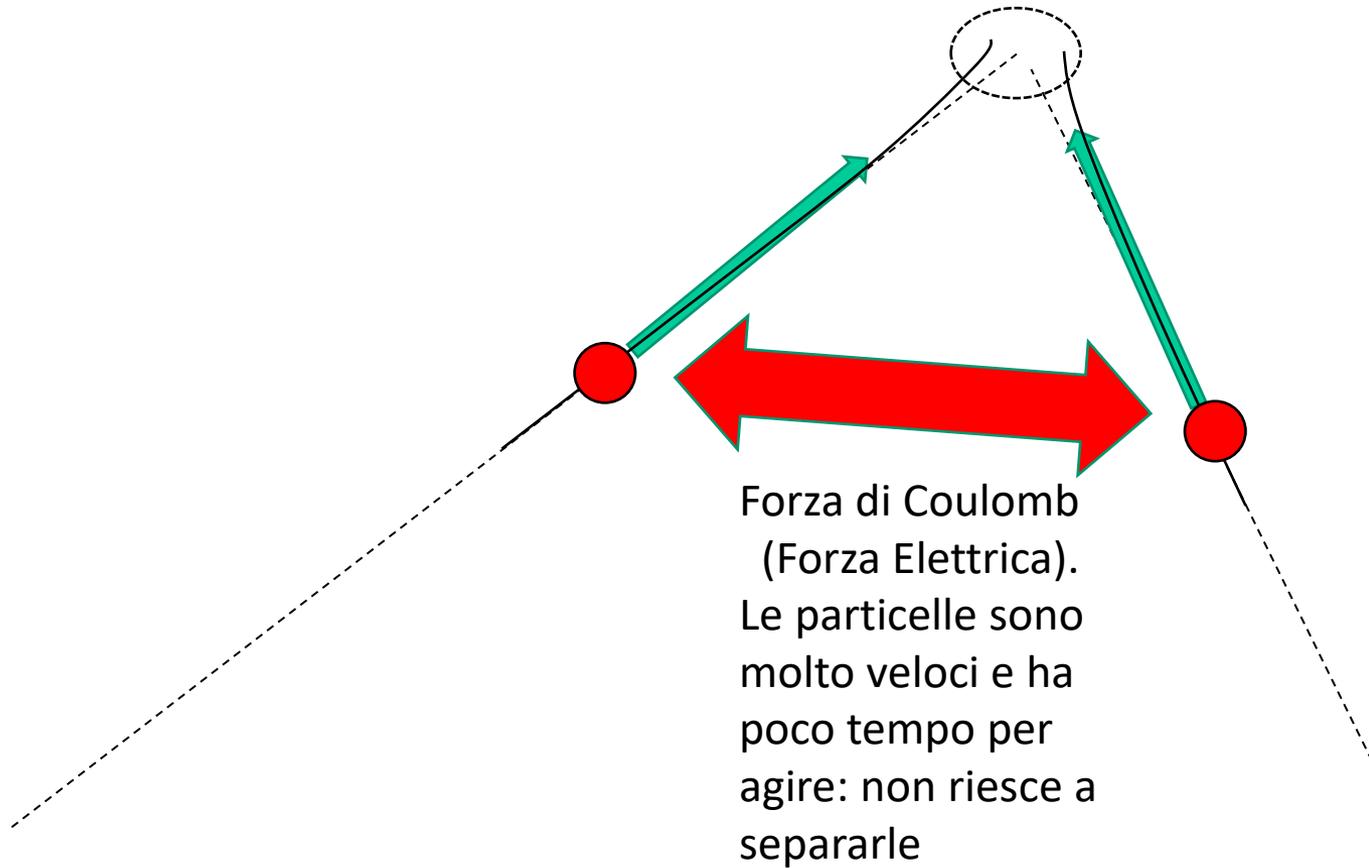


Le due particelle si allontanano e non succede nulla !  
Perché si possano avvicinare di più, nonostante la forza elettrica repulsiva, devono avere una spinta maggiore, maggiore velocità iniziale

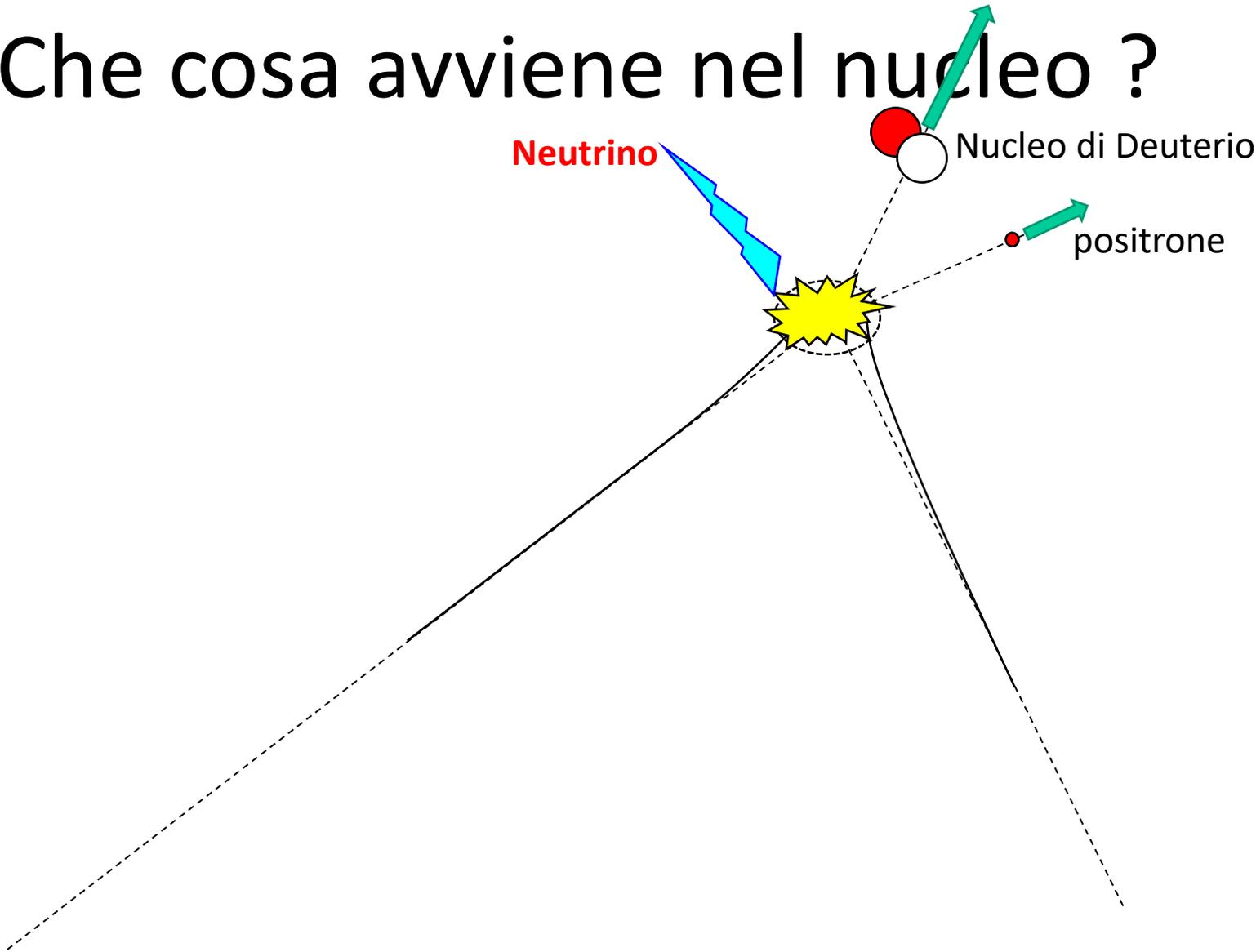
# Che cosa avviene nel nucleo ?



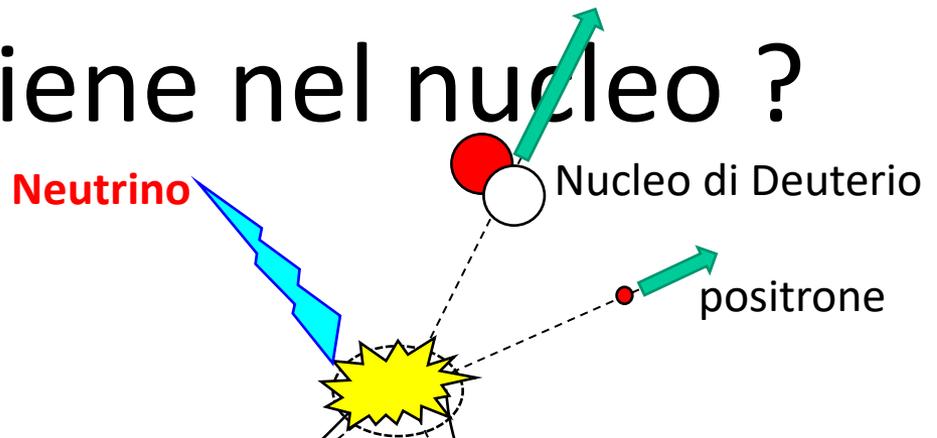
# Che cosa avviene nel nucleo ?



# Che cosa avviene nel nucleo ?

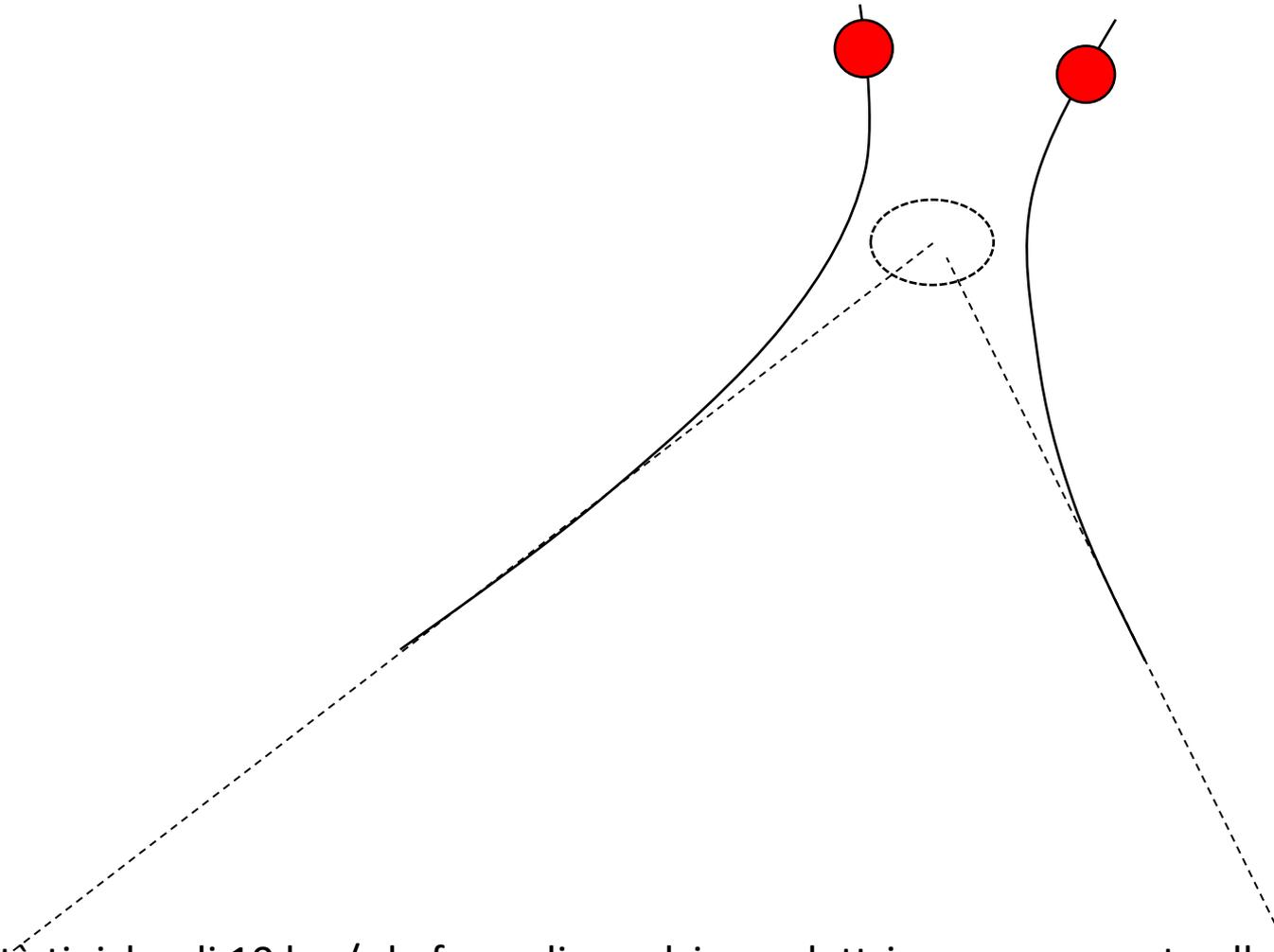


# Che cosa avviene nel nucleo ?



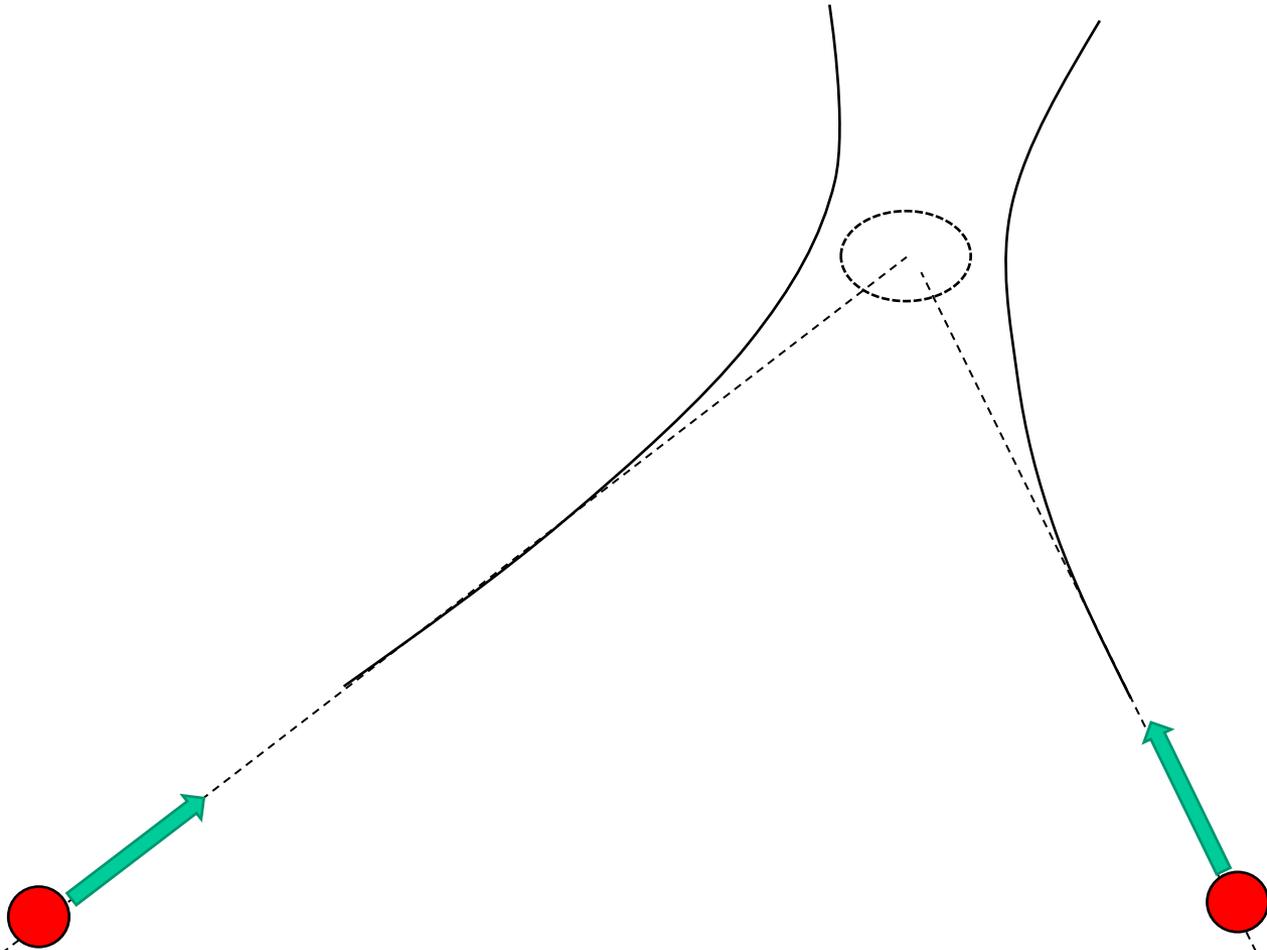
Ma quali sono le velocità delle particelle nel nucleo del sole ? Sono sufficienti ?  
Queste velocità sono dovute all'altissima temperatura, e quindi all'altissima agitazione termica delle particelle. Nel centro del Sole con una temperatura di più di 10 milioni di gradi, le velocità tipiche sono intorno a 10 km/s. Altissime, ma non abbastanza !

# Che cosa avviene nel nucleo ?



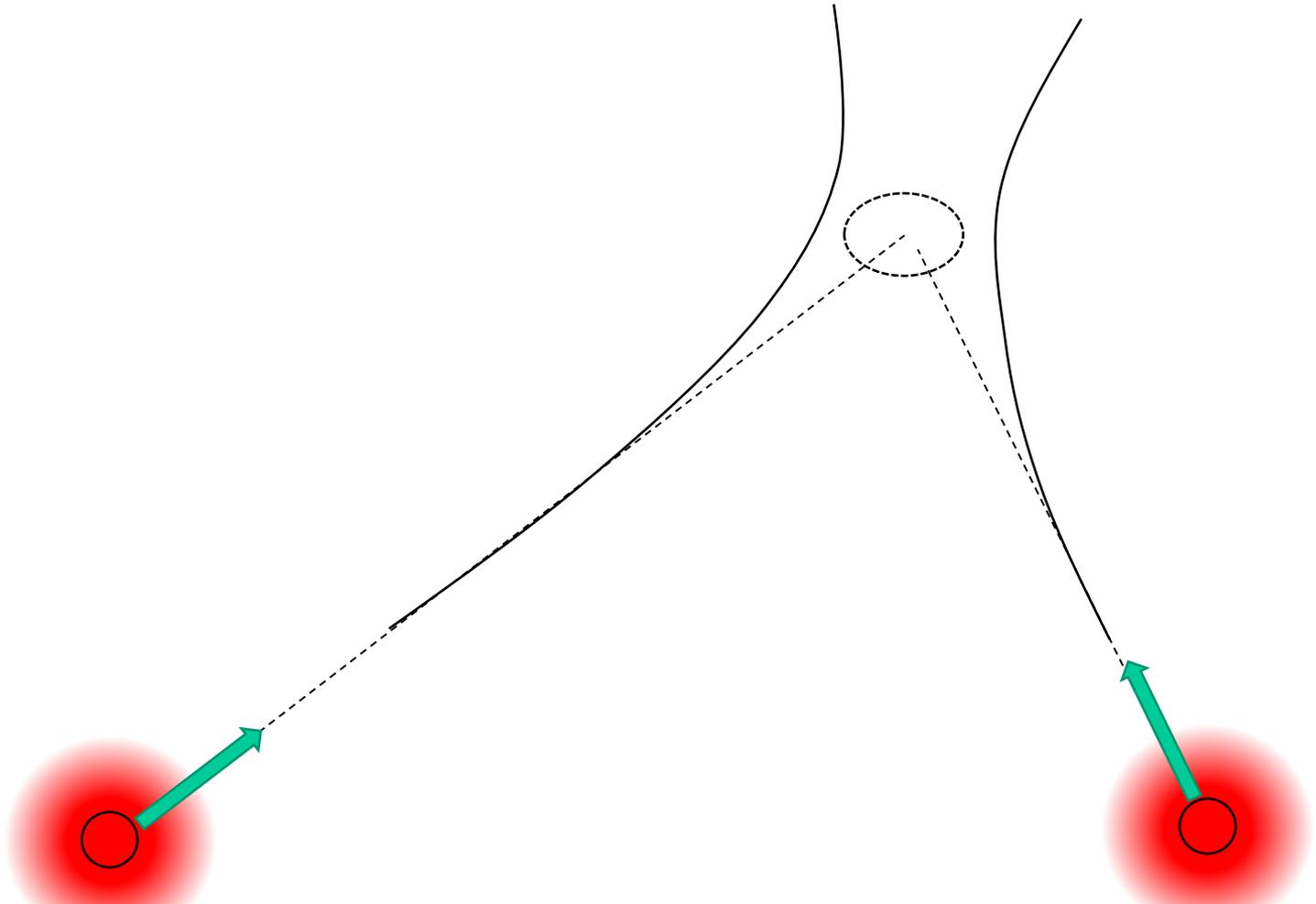
Con velocità tipiche di 10 km/s la forza di repulsione elettrica non consente alle particelle di avvicinarsi abbastanza. Almeno ragionando in modo classico.

# Che cosa avviene nel nucleo ?



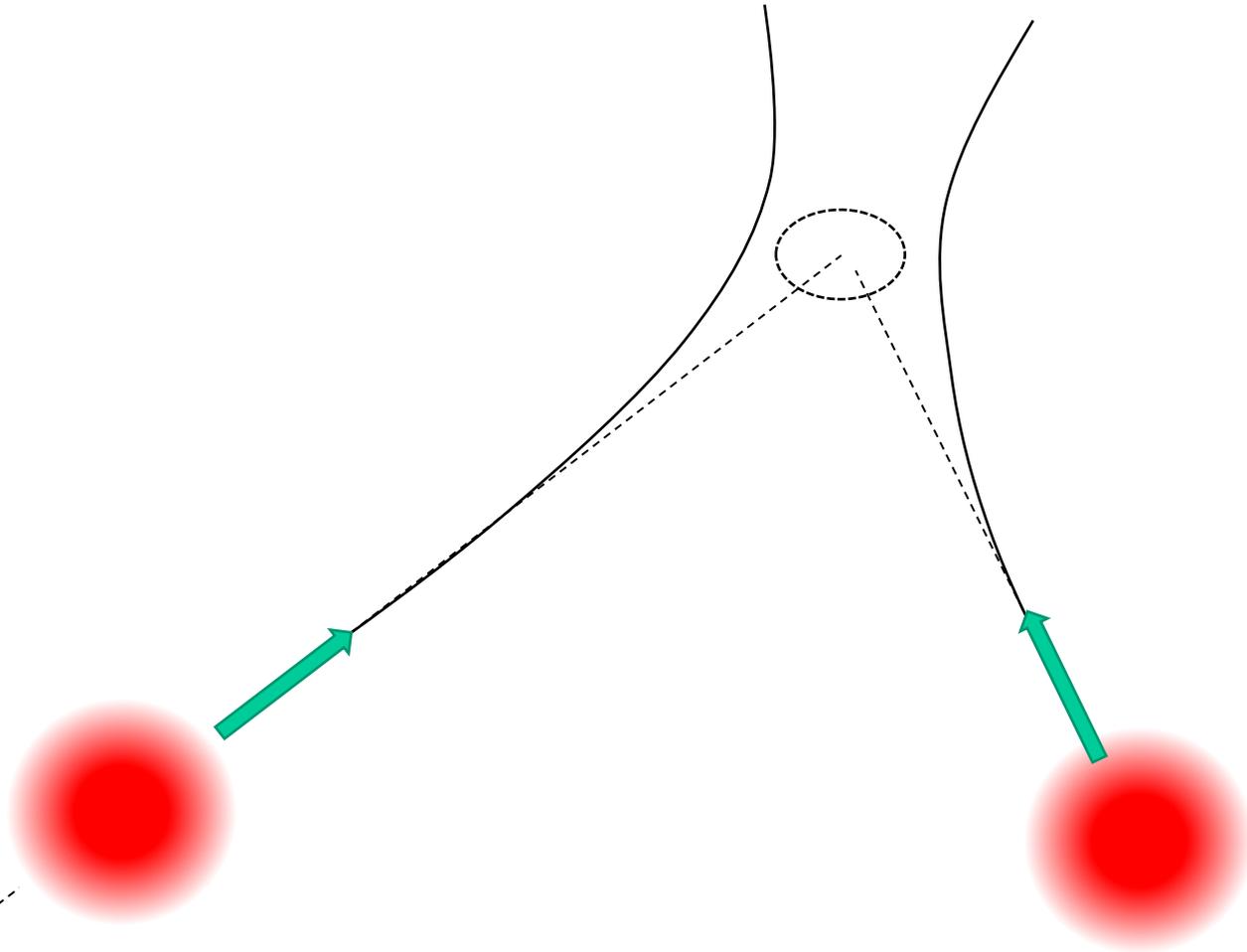
Ma nel mondo delle particelle elementari, si deve ragionare in modo quantistico ! Non sappiamo mai esattamente contemporaneamente la posizione e la velocità delle particelle (principio di indeterminazione di Heisenberg). Possiamo solo sapere che le particelle si trovano, con una certa probabilità, entro una certa distanza dalla posizione prevista dalla fisica classica.

# Che cosa avviene nel nucleo ?



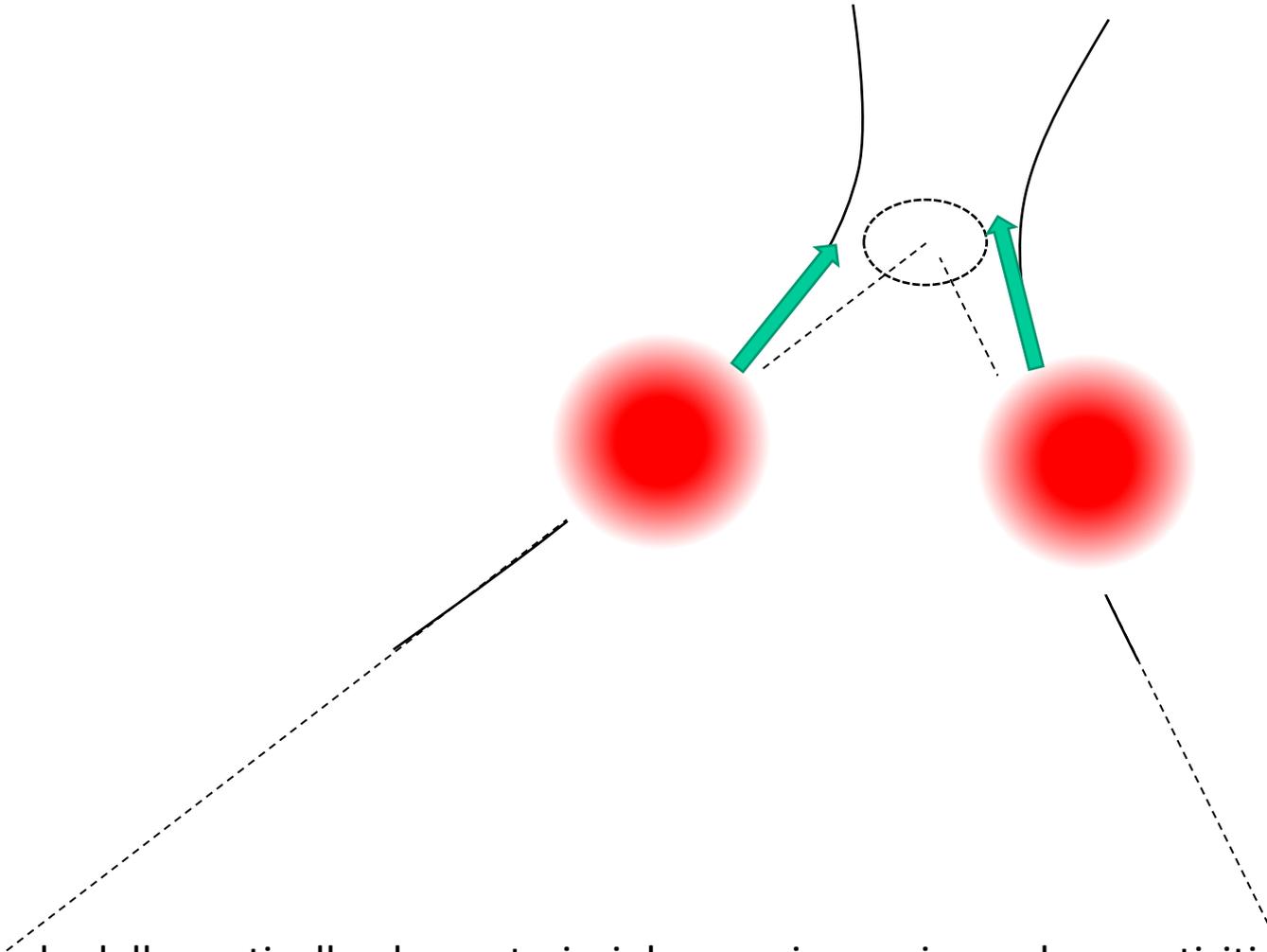
Ma nel mondo delle particelle elementari, si deve ragionare in modo quantistico !  
Non sappiamo mai esattamente contemporaneamente la posizione e la velocità delle  
particelle. Possiamo sapere che le particelle si trovano, con una certa probabilità, entro una  
certa distanza dalla posizione prevista.

# Che cosa avviene nel nucleo ?



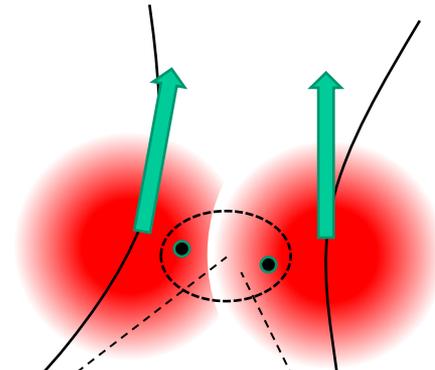
Ma nel mondo delle particelle elementari, si deve ragionare in modo quantistico !  
Non sappiamo mai esattamente contemporaneamente la posizione e la velocità delle  
particelle. Possiamo sapere che le particelle si trovano, con una certa probabilità, entro una  
certa distanza dalla posizione prevista.

# Che cosa avviene nel nucleo ?



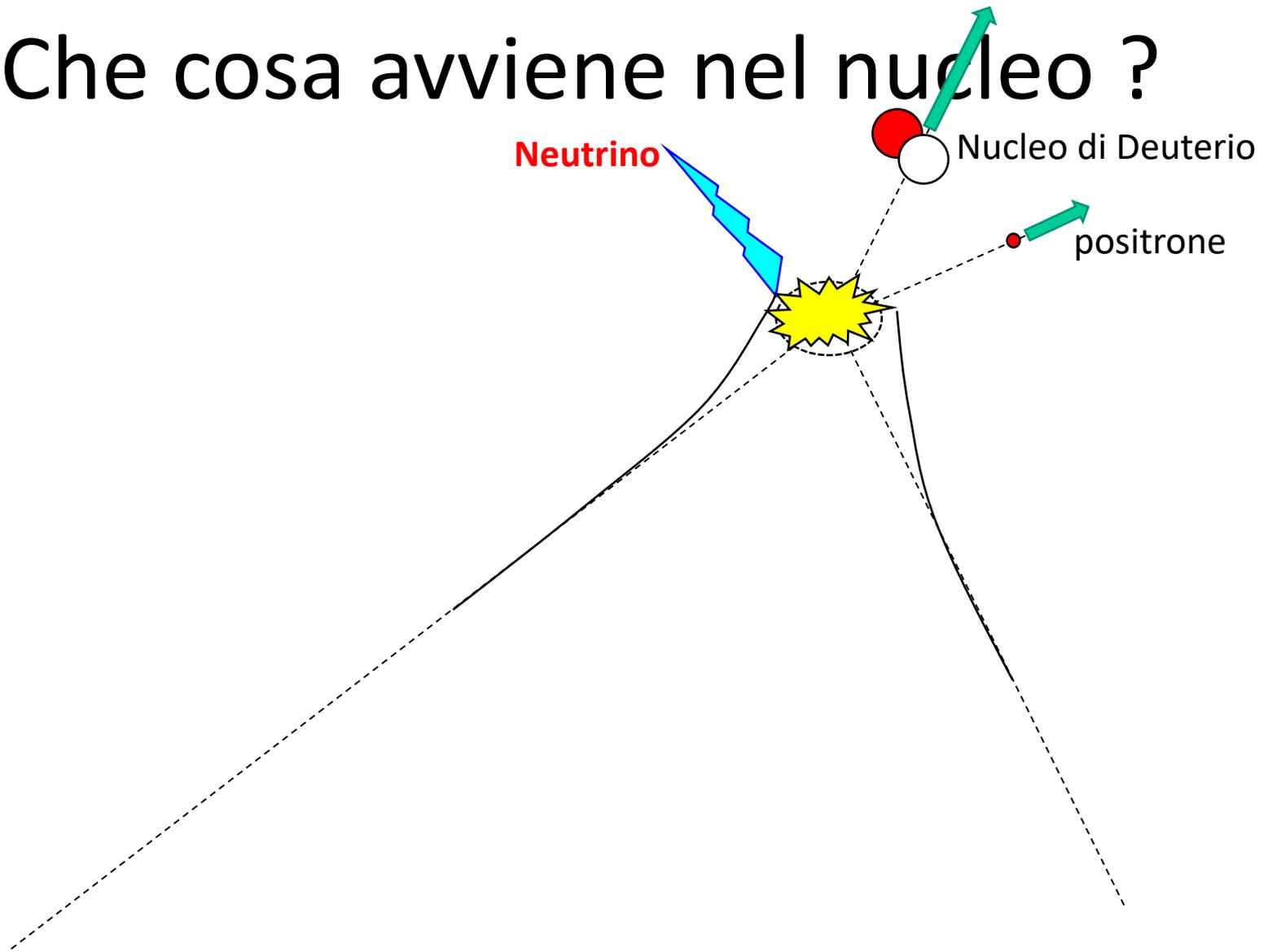
Ma nel mondo delle particelle elementari, si deve ragionare in modo quantistico !  
Non sappiamo mai esattamente contemporaneamente la posizione e la velocità delle  
particelle. Possiamo sapere che le particelle si trovano, con una certa probabilità, entro una  
certa distanza dalla posizione prevista.

# Che cosa avviene nel nucleo ?



Quindi può succedere che per caso le due particelle si trovino ambedue all'interno del raggio di azione della forza forte, anche se la loro posizione più probabile non lo è. Sarà poco probabile che succeda, ma, secondo la meccanica quantistica, può succedere !

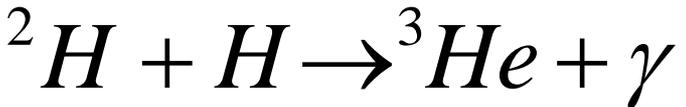
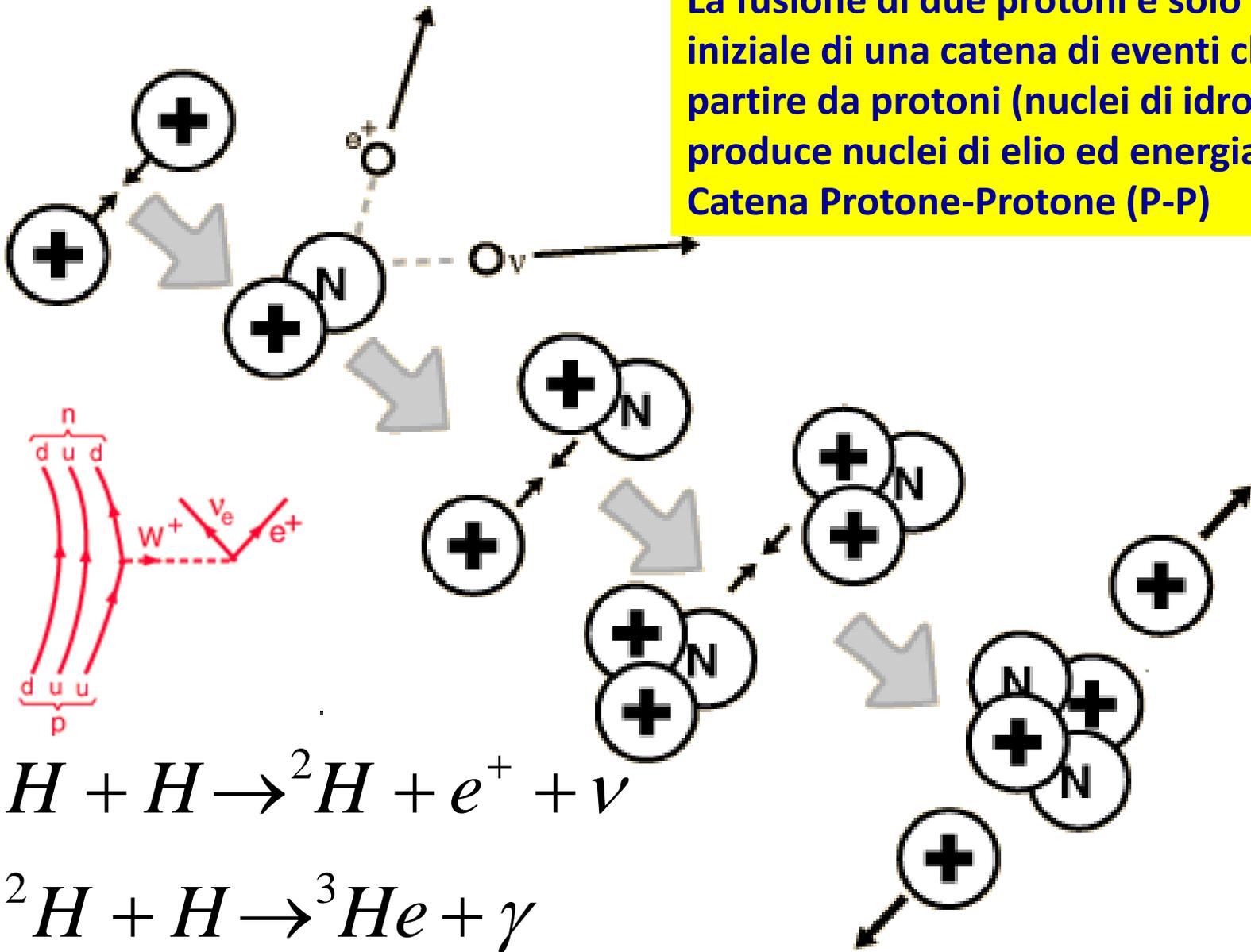
# Che cosa avviene nel nucleo ?



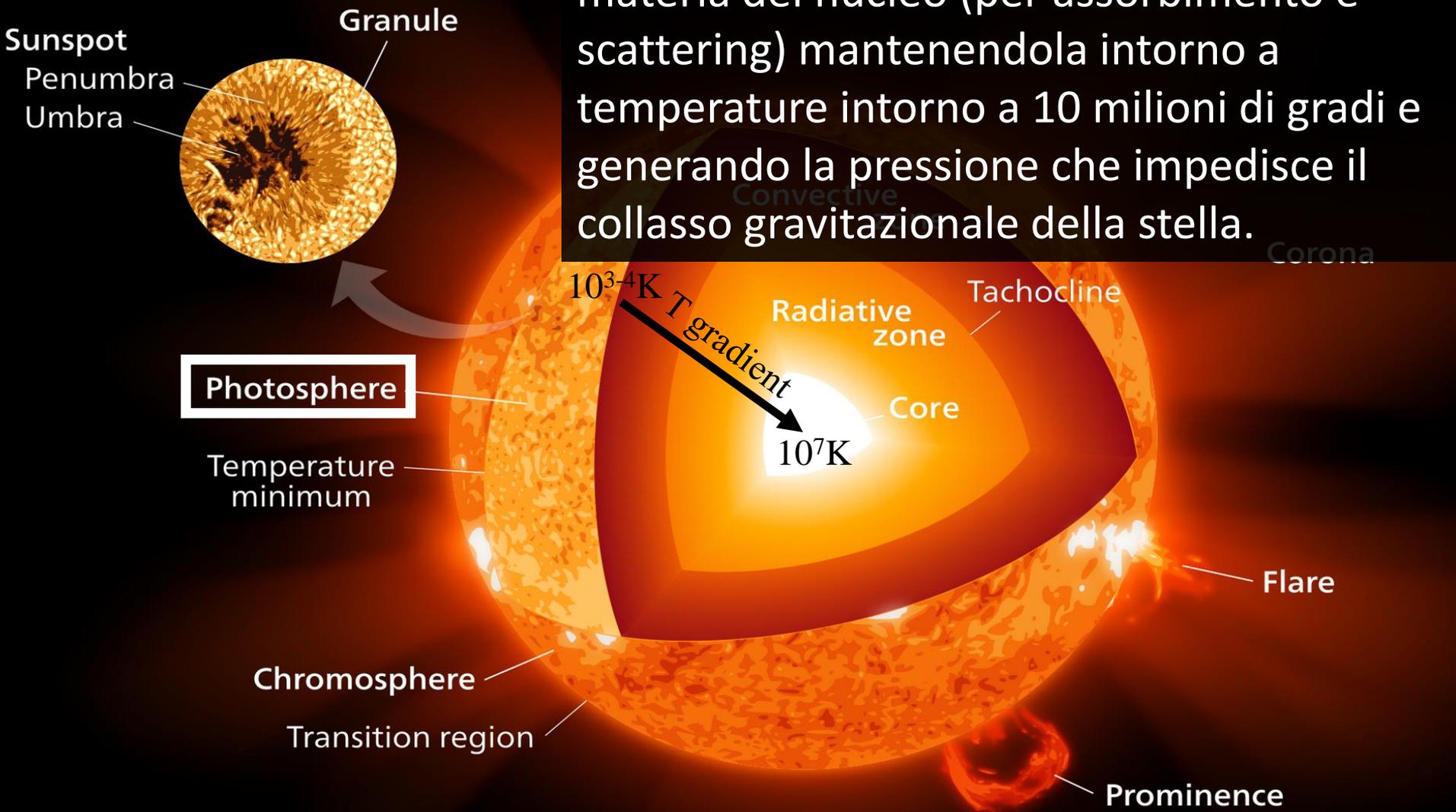
George Gamow negli anni '50 calcolò che con le velocità che hanno i protoni nel nucleo del sole, in media si verifica una fusione ogni miliardo di incontri. Con una probabilità bassissima, una parte per miliardo, si verifica un evento che classicamente sarebbe impossibile.



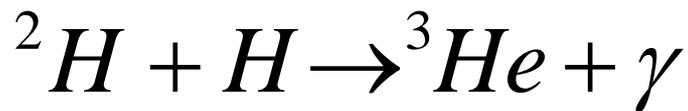
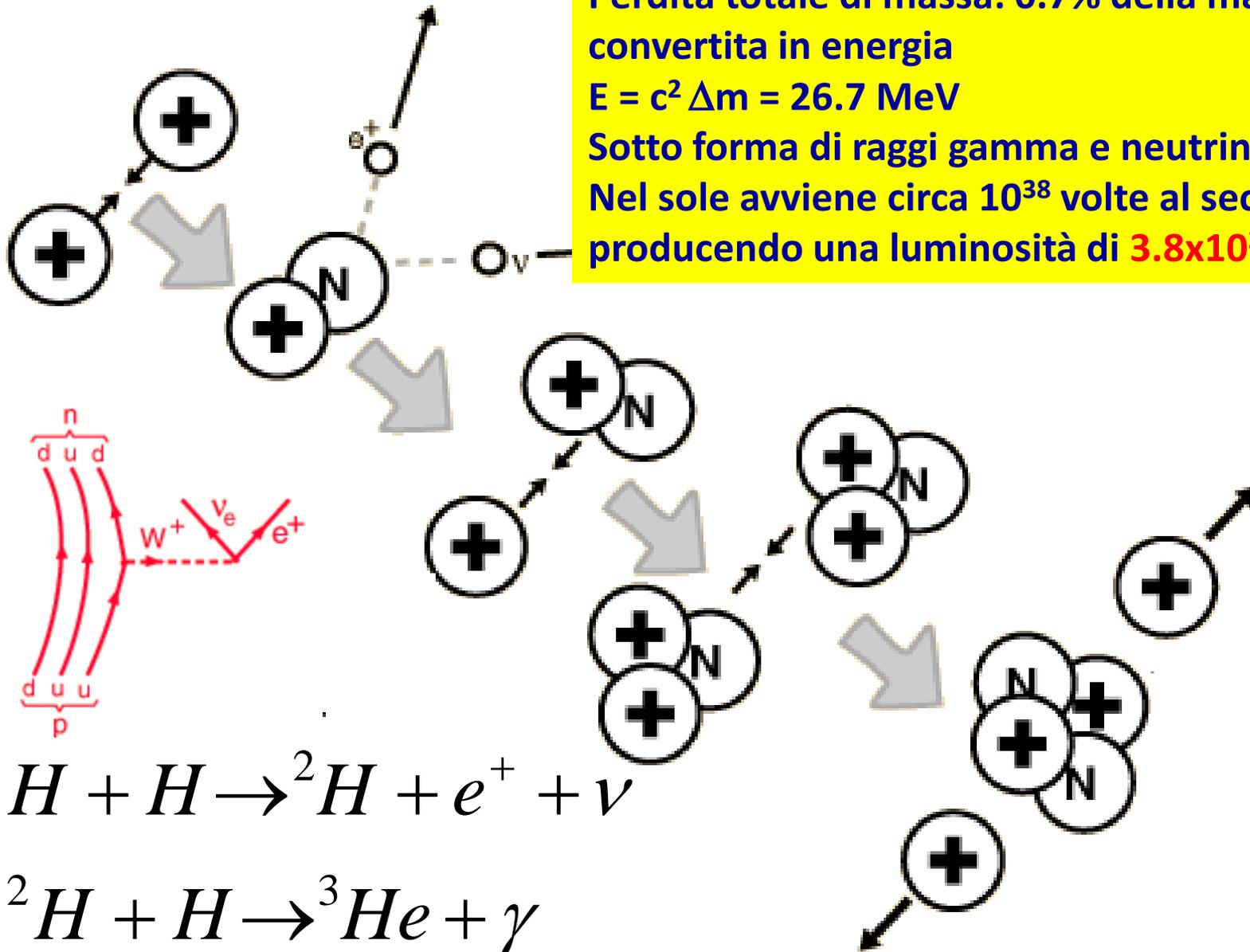
La fusione di due protoni è solo l'evento iniziale di una catena di eventi che a partire da protoni (nuclei di idrogeno) produce nuclei di elio ed energia. Catena Protone-Protone (P-P)



I raggi gamma prodotti interagiscono con la materia del nucleo (per assorbimento e scattering) mantenendola intorno a temperature intorno a 10 milioni di gradi e generando la pressione che impedisce il collasso gravitazionale della stella.

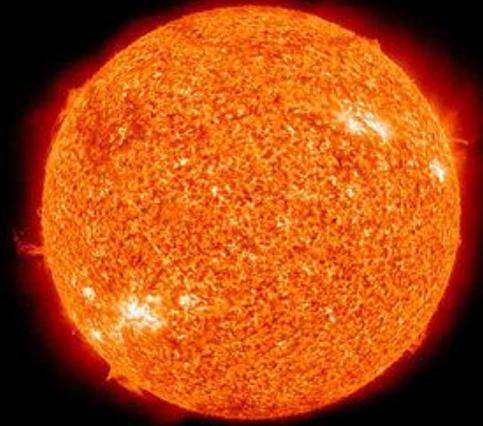


Perdita totale di massa: 0.7% della massa iniziale,  
 convertita in energia  
 $E = c^2 \Delta m = 26.7 \text{ MeV}$   
 Sotto forma di raggi gamma e neutrini  
 Nel sole avviene circa  $10^{38}$  volte al secondo,  
 producendo una luminosità di  $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ .





$1.6 \times 10^{10} \text{W}$



$3.8 \times 10^{26} \text{W}$

# Esempio 1: la meccanica quantistica spiega il funzionamento delle stelle

- Con questo primo esempio abbiamo concluso che ciò che avviene a livello microscopico, governato dalle strane leggi della meccanica quantistica, permette il funzionamento di un sistema macroscopico, una stella.
- L'energia sprigionata dalle reazioni nucleari fornisce la pressione che impedisce alla stella di collassare sotto la sua stessa gravità.
- E fornisce l'energia che permette la vita sulla Terra. Lo fa da 5 miliardi di anni, e continuerà a farlo per miliardi di anni nel futuro.



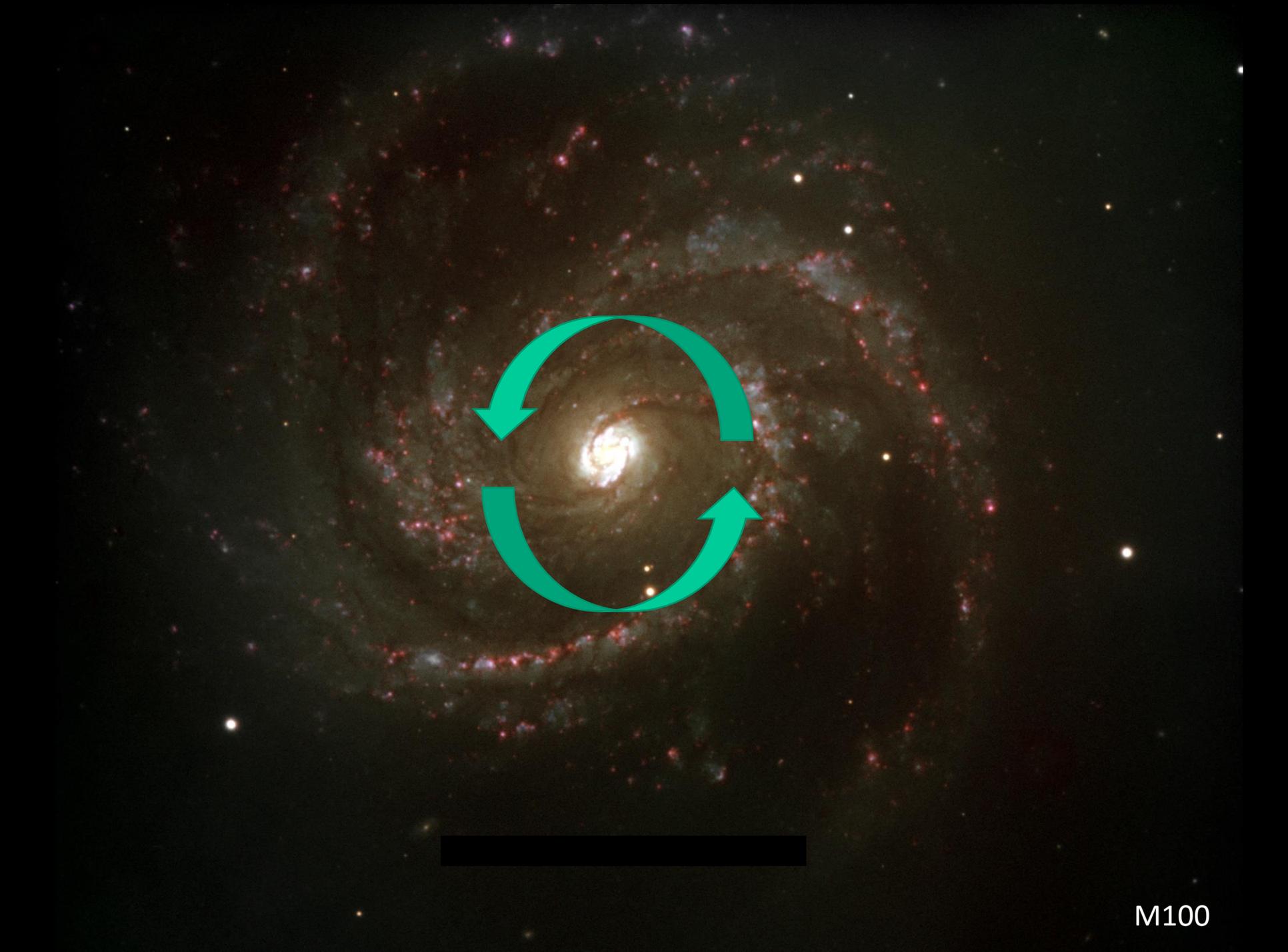
M100

## Esempio 2: la dinamica delle galassie dipende dalle particelle di materia oscura

- Le galassie sono formate da centinaia di miliardi di stelle
- Le loro dimensioni sono dell'ordine di  $10^{21}$  m
- Non ancora dimensioni cosmologiche, ma sicuramente molto maggiori delle dimensioni delle stelle.
- Le forme delle galassie, specialmente delle galassie a spirale, suggeriscono che stiano (lentamente) ruotando.
- E' possibile eseguire misure quantitative della rotazione delle galassie, grazie all'effetto Doppler, e quindi studiarne la dinamica: misurare come stanno ruotando.



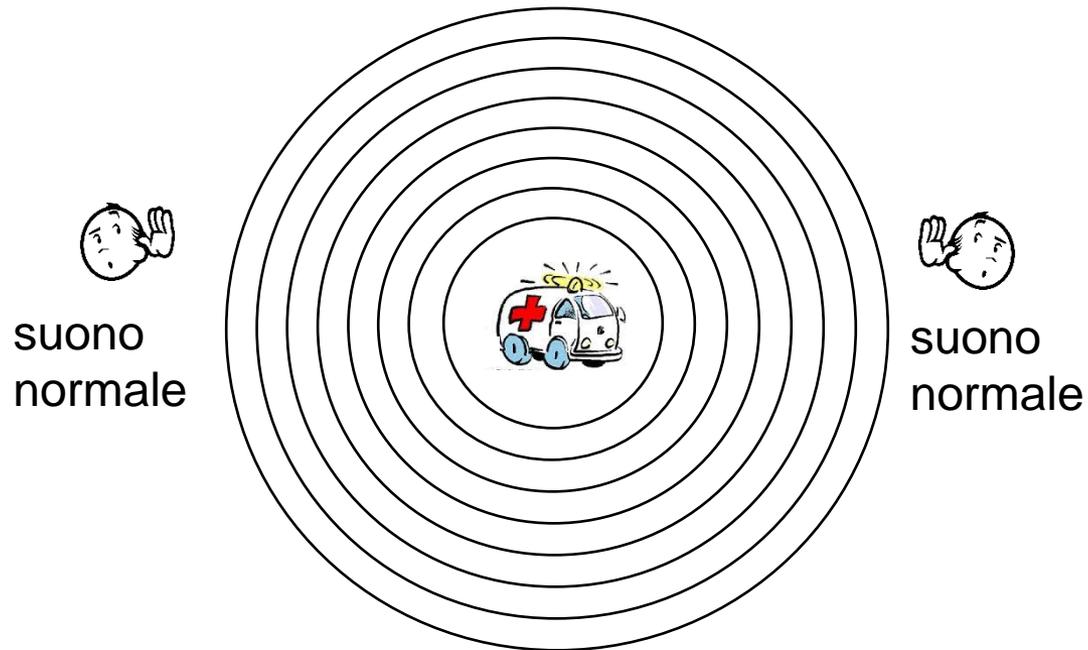
M100



M100

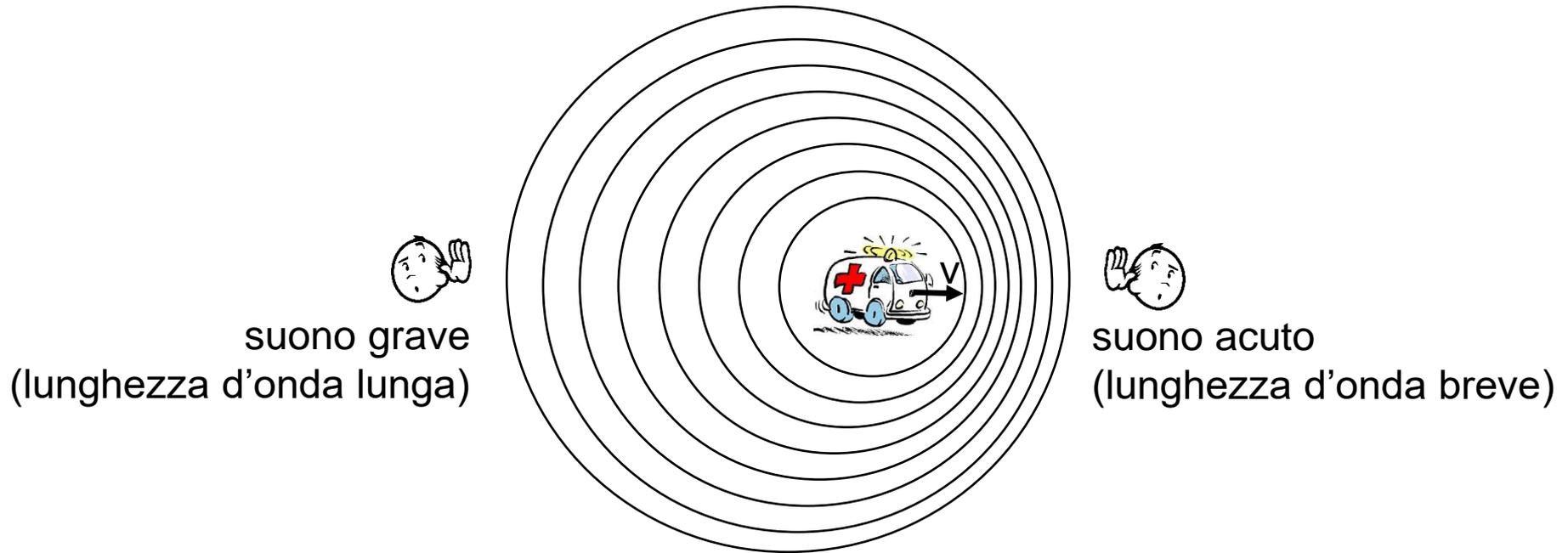
# Effetto Doppler

Ambulanza ferma



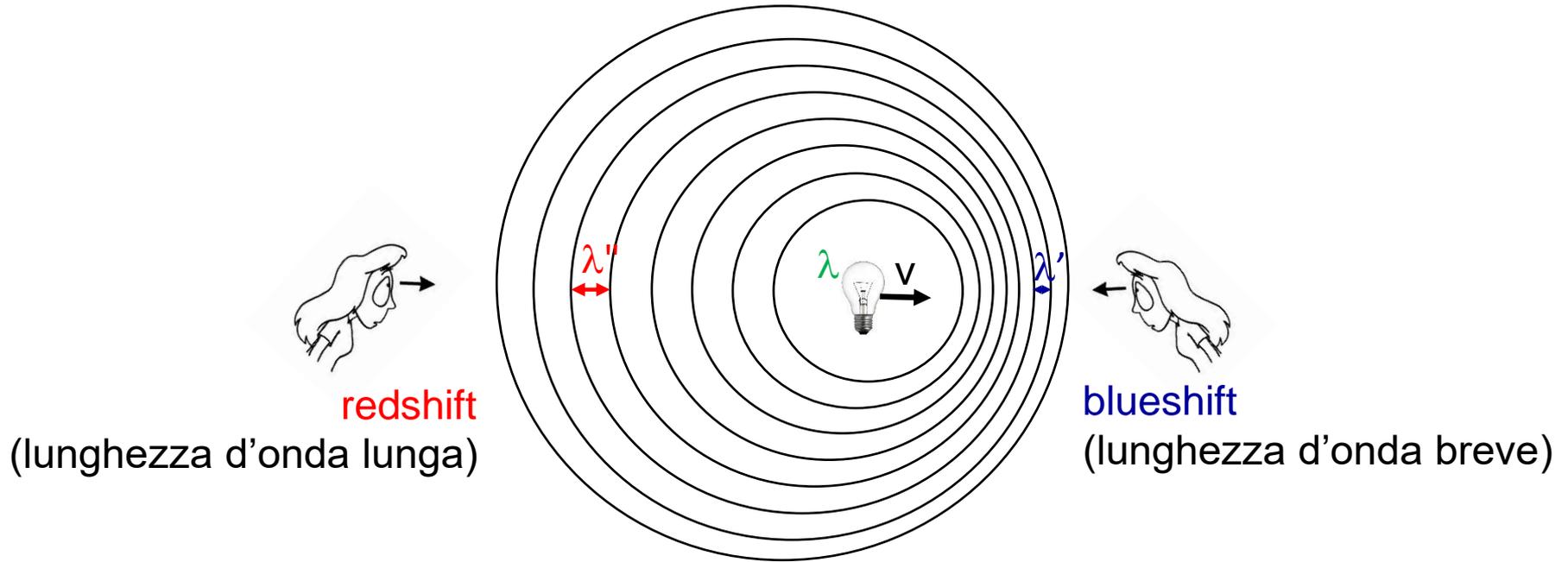
# Effetto Doppler

Ambulanza in corsa



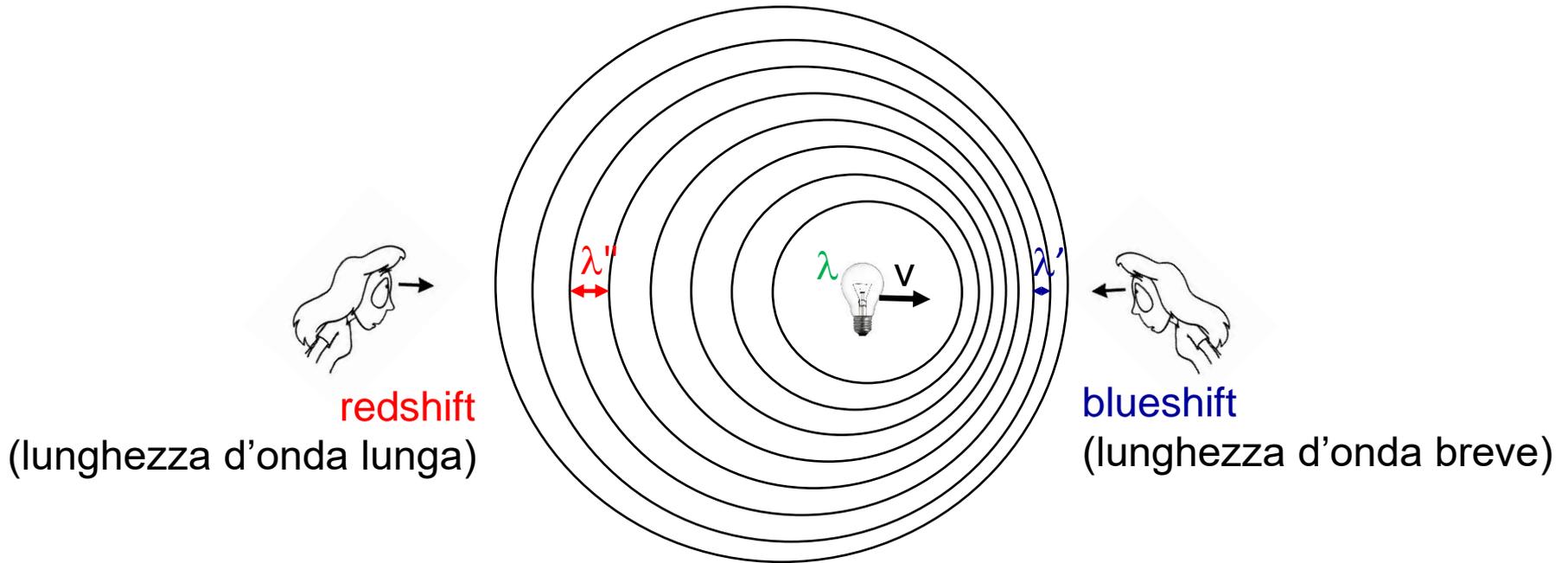
# Effetto Doppler

Stesso effetto per tutti i fenomeni ondulatori:  
anche per la luce da sorgenti in movimento



# Effetto Doppler

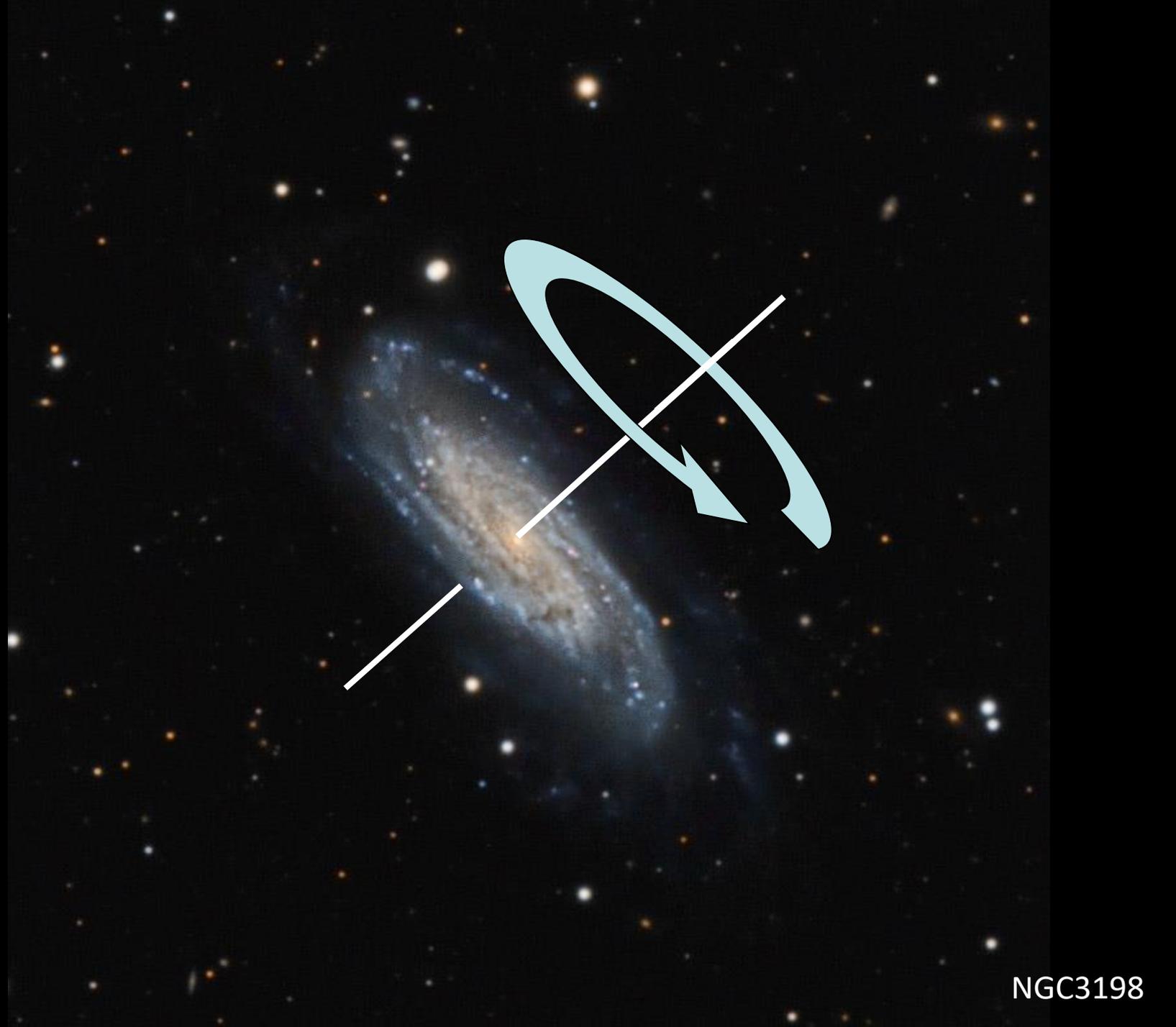
Stesso effetto per tutti i fenomeni ondulatori:  
anche per la luce da sorgenti in movimento



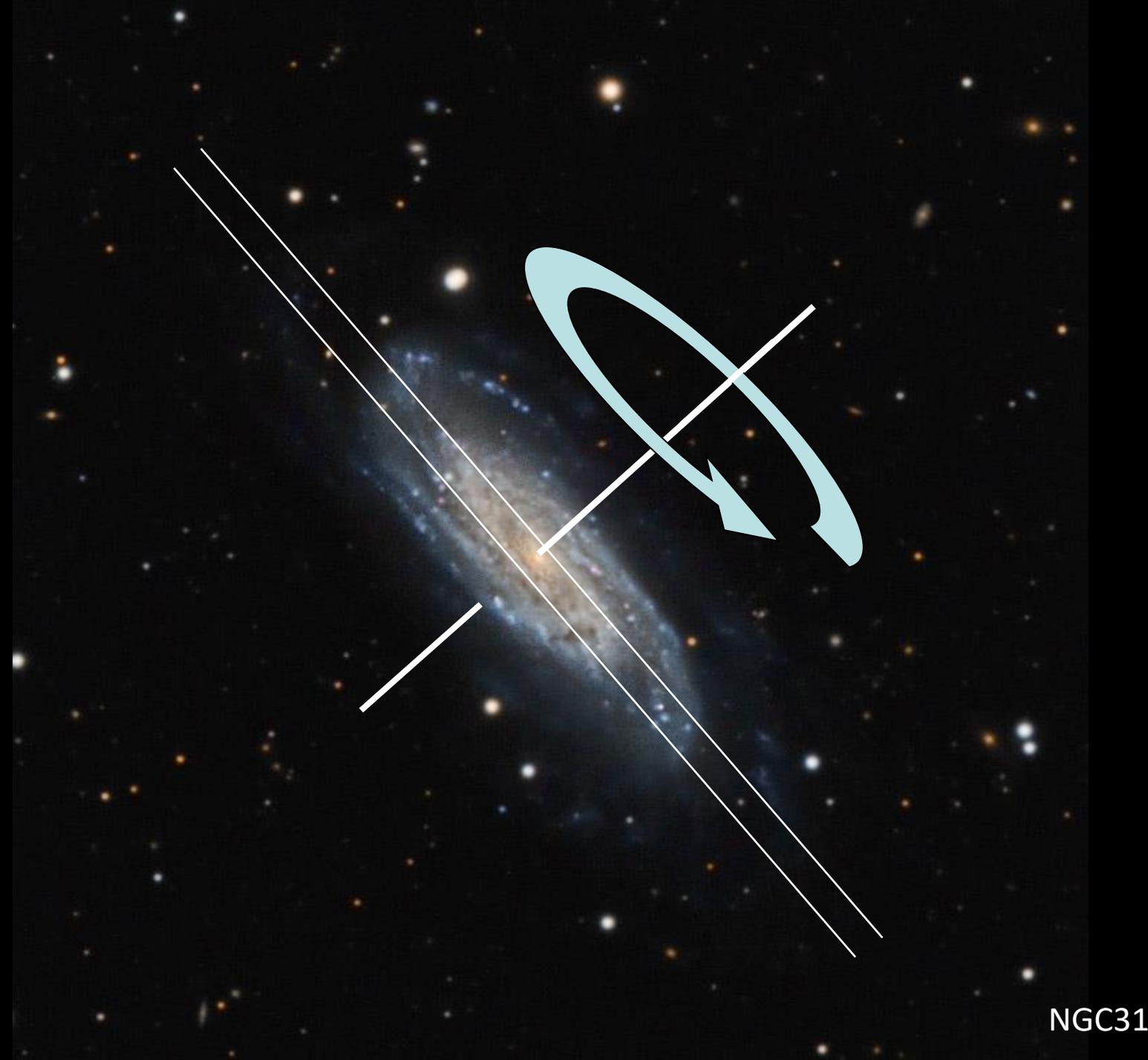
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$



NGC3198

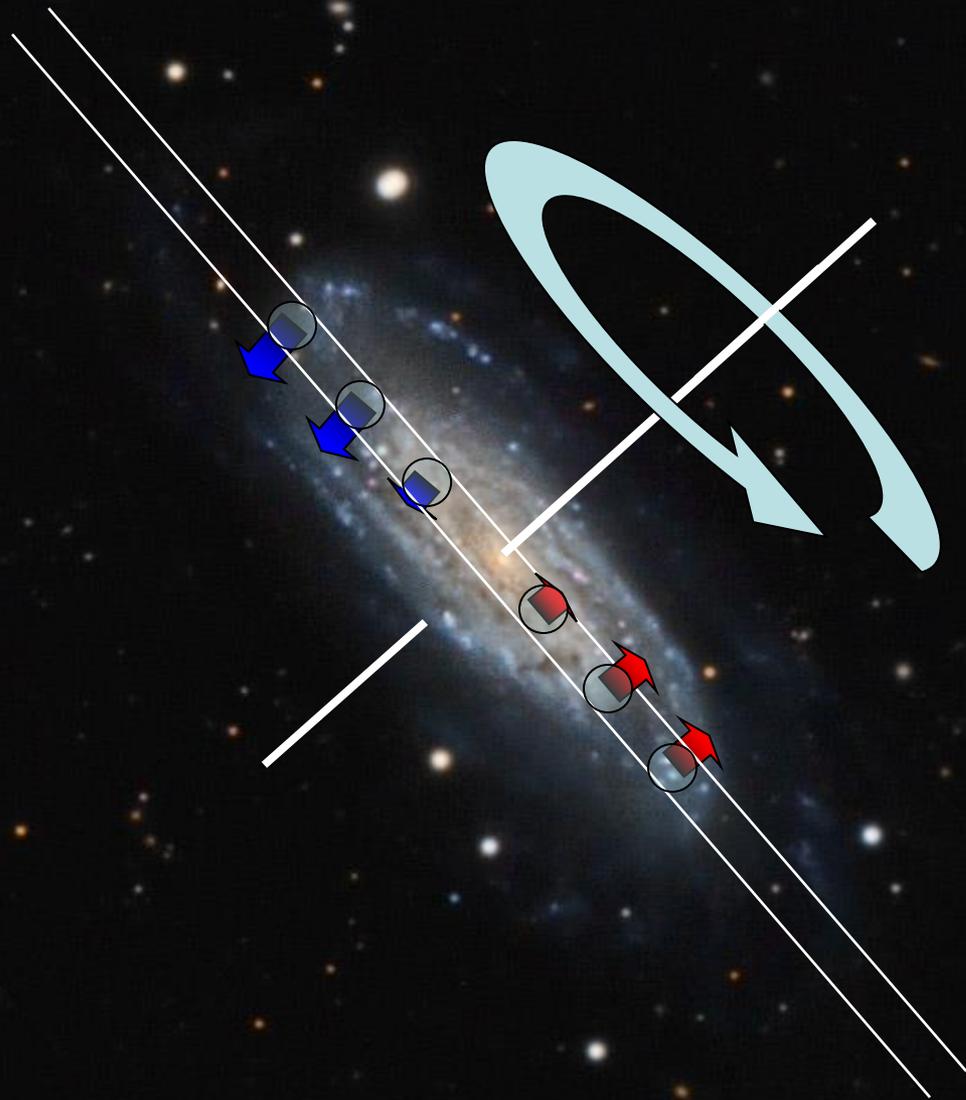


NGC3198

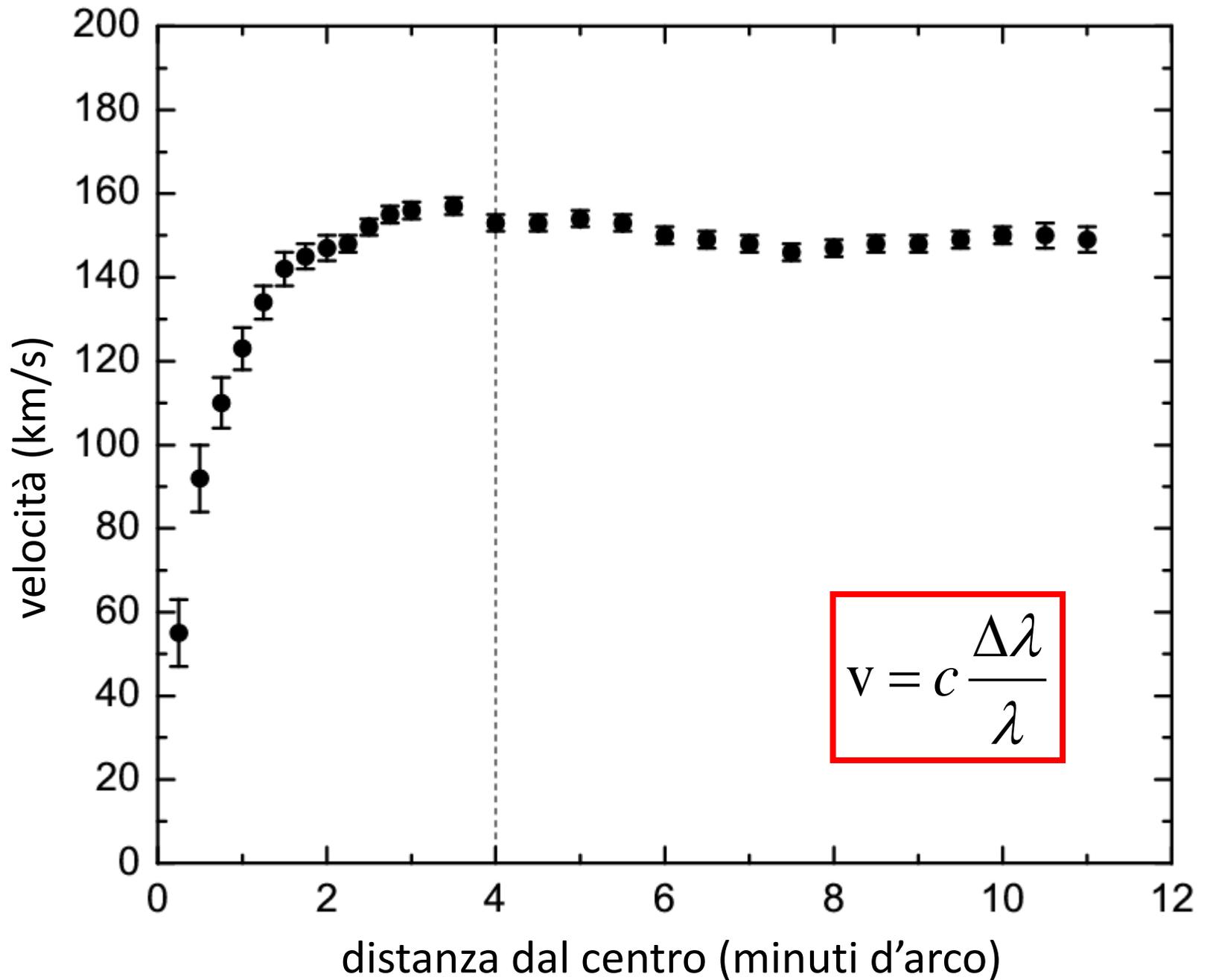


NGC3198

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$



NGC3198



# Newton : accelerazione forza

- Tutte le volte che una massa si muove in modo accelerato (non rettilineo e uniforme), stanno agendo una o più forze.
- Nel caso delle orbite circolari, ci deve essere una forza diretta verso il centro pari al prodotto della massa per l'accelerazione centripeta.



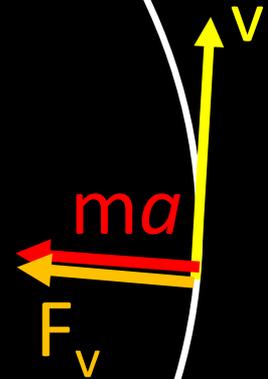


$v$

$ma$

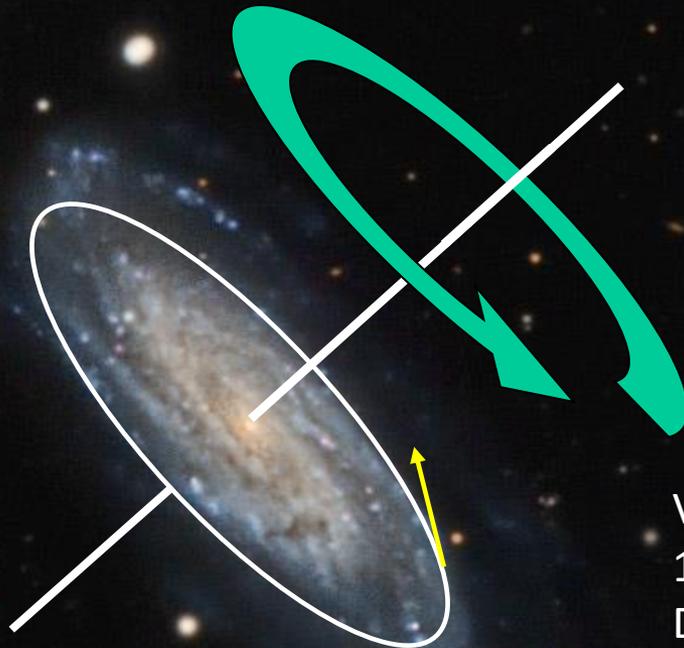
$F_v$

Orbite dei pianeti intorno al sole :  
Forza gravitazionale



Velocità della terra : 30 km/s  
Distanza  $1.5 \times 10^{11}$  m  
Massa del sole  $2 \times 10^{30}$  kg

$$ma = F$$
$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$
$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$



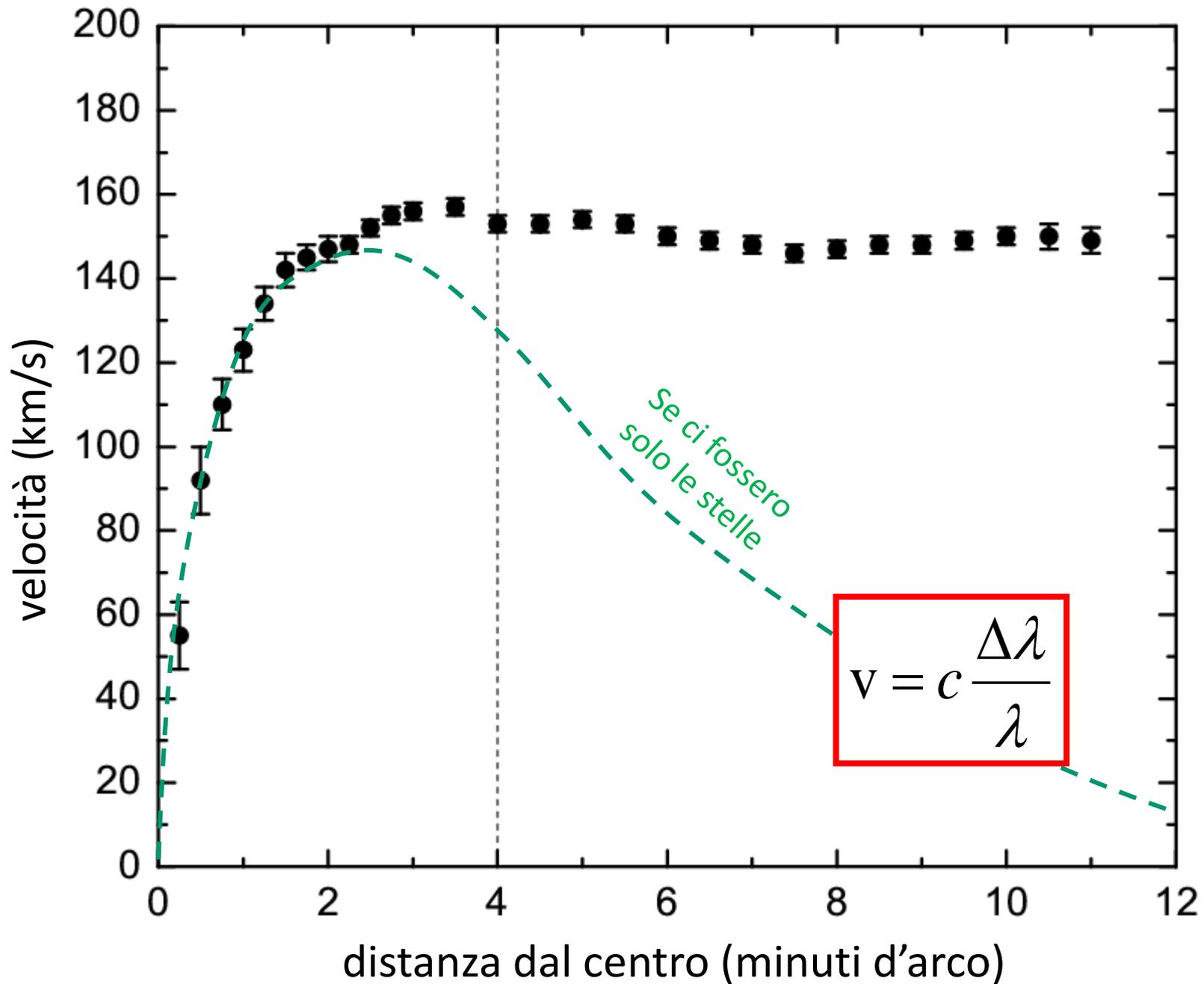
Velocità di una stella periferica :  
100-200 km/s

Distanza dal centro :  $10^{20}$  m

Quanta forza (massa) serve per  
mantenerla su questa orbita con questa  
velocità ?

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

La massa delle stelle non è sufficiente



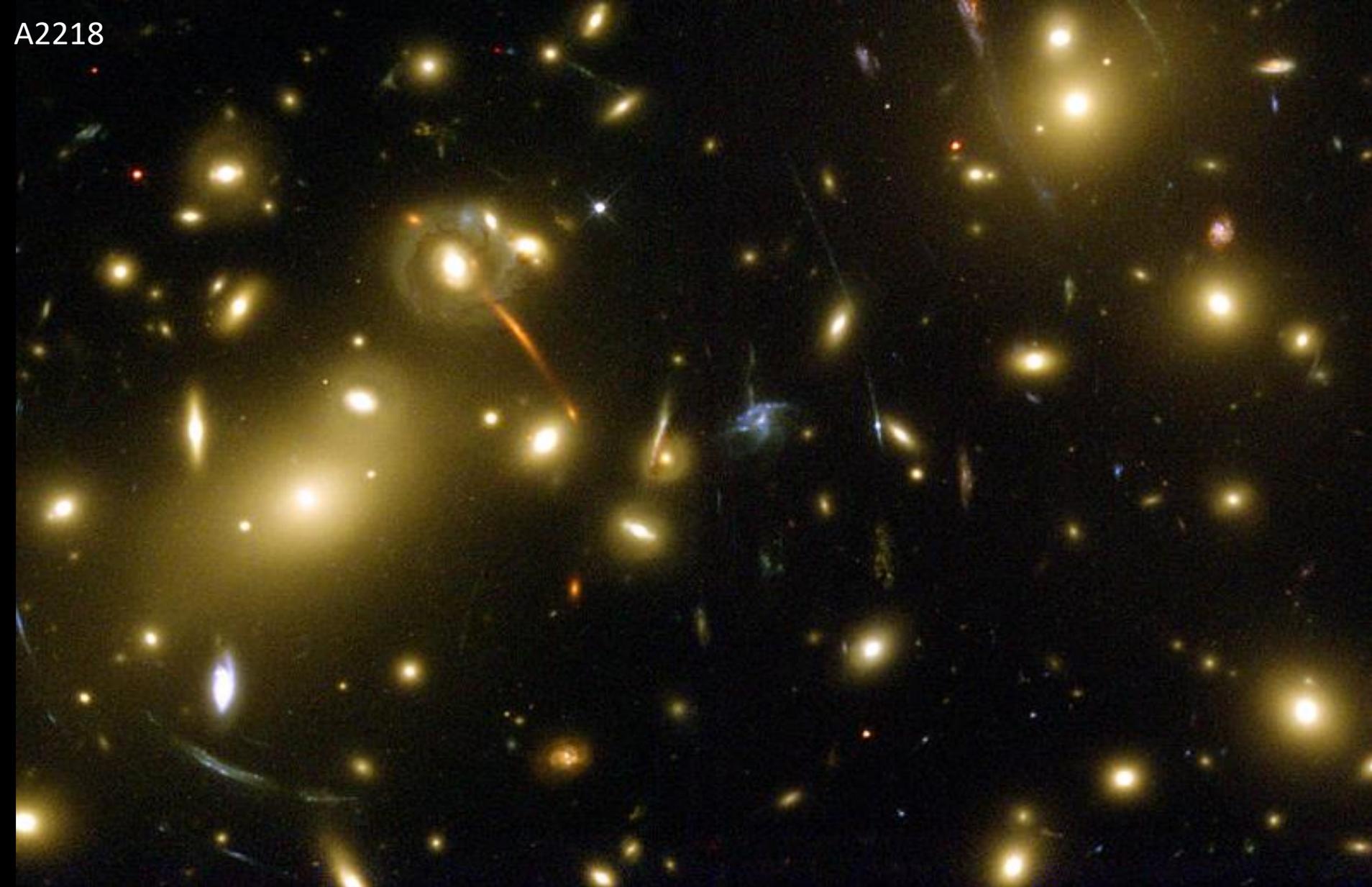


L'ipotesi più accreditata oggi è che ciascuna galassia sia immersa in un alone di **materia oscura**, materia che **ha massa ma non interagisce con la luce** (non emette ne' assorbe fotoni)

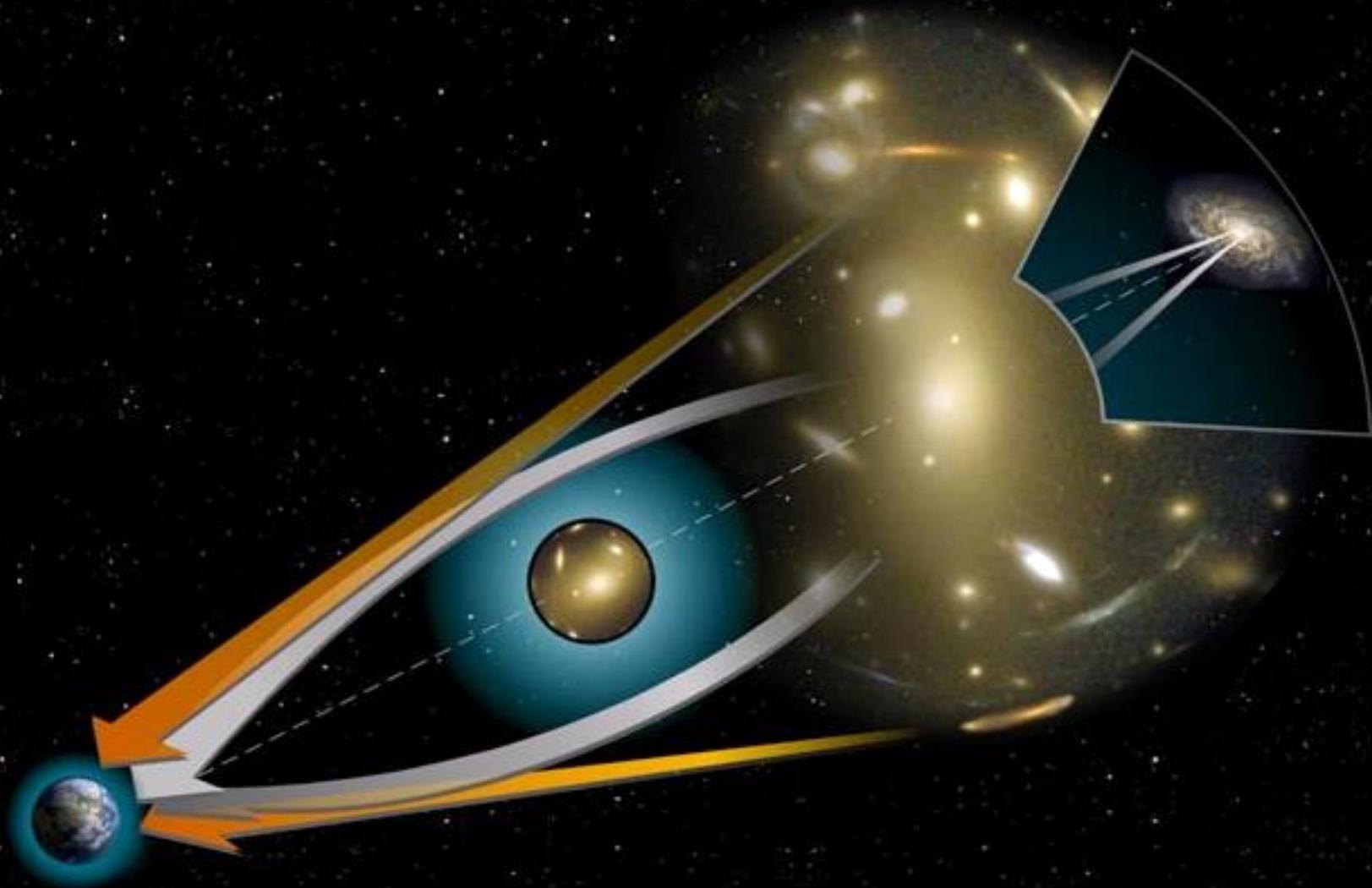
Alle stesse conclusioni si arriva  
studiando i movimenti delle galassie  
negli ammassi di galassie  
(dimensioni tipiche  $10^{23}m$ )

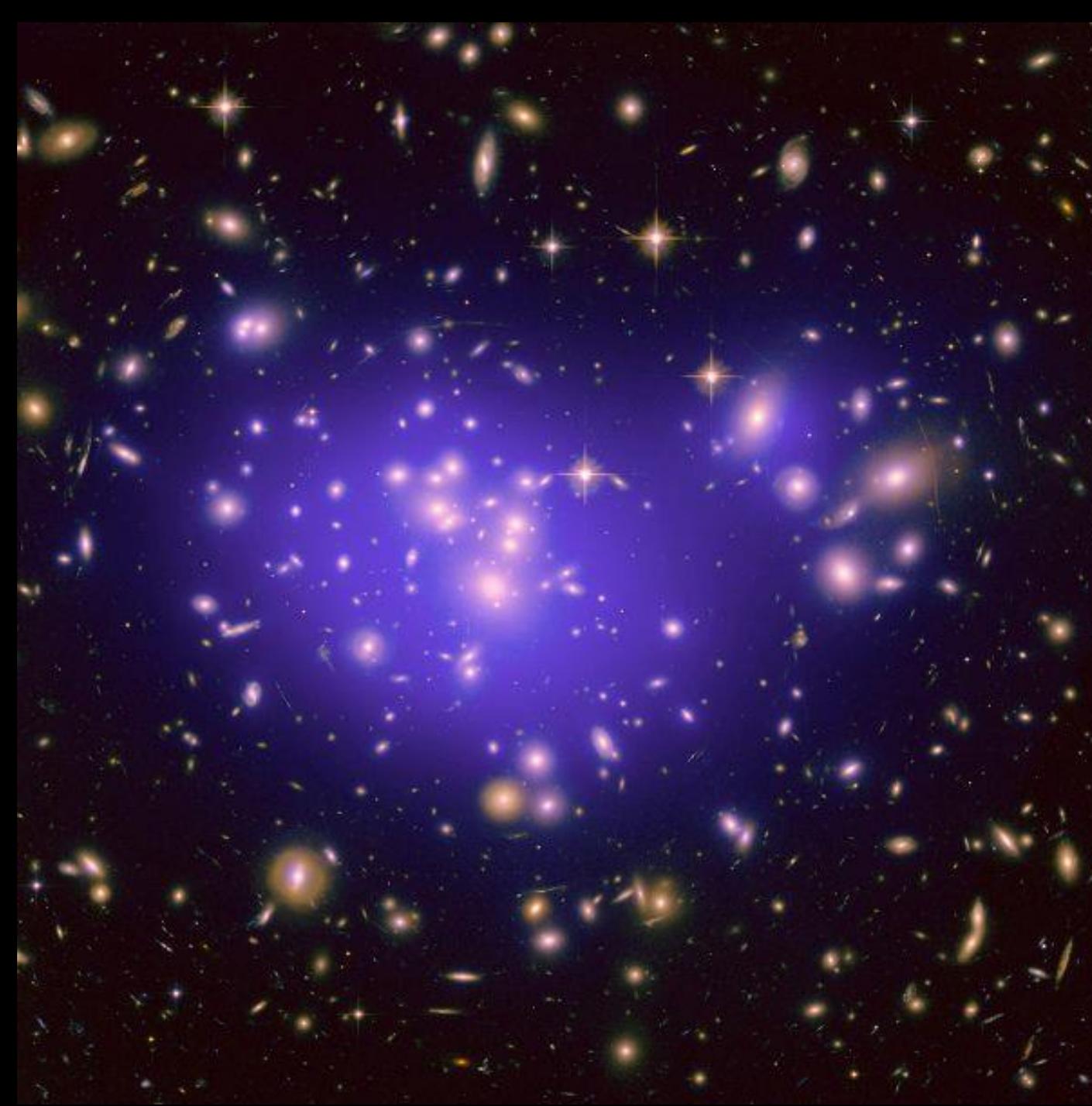
Coma

A2218



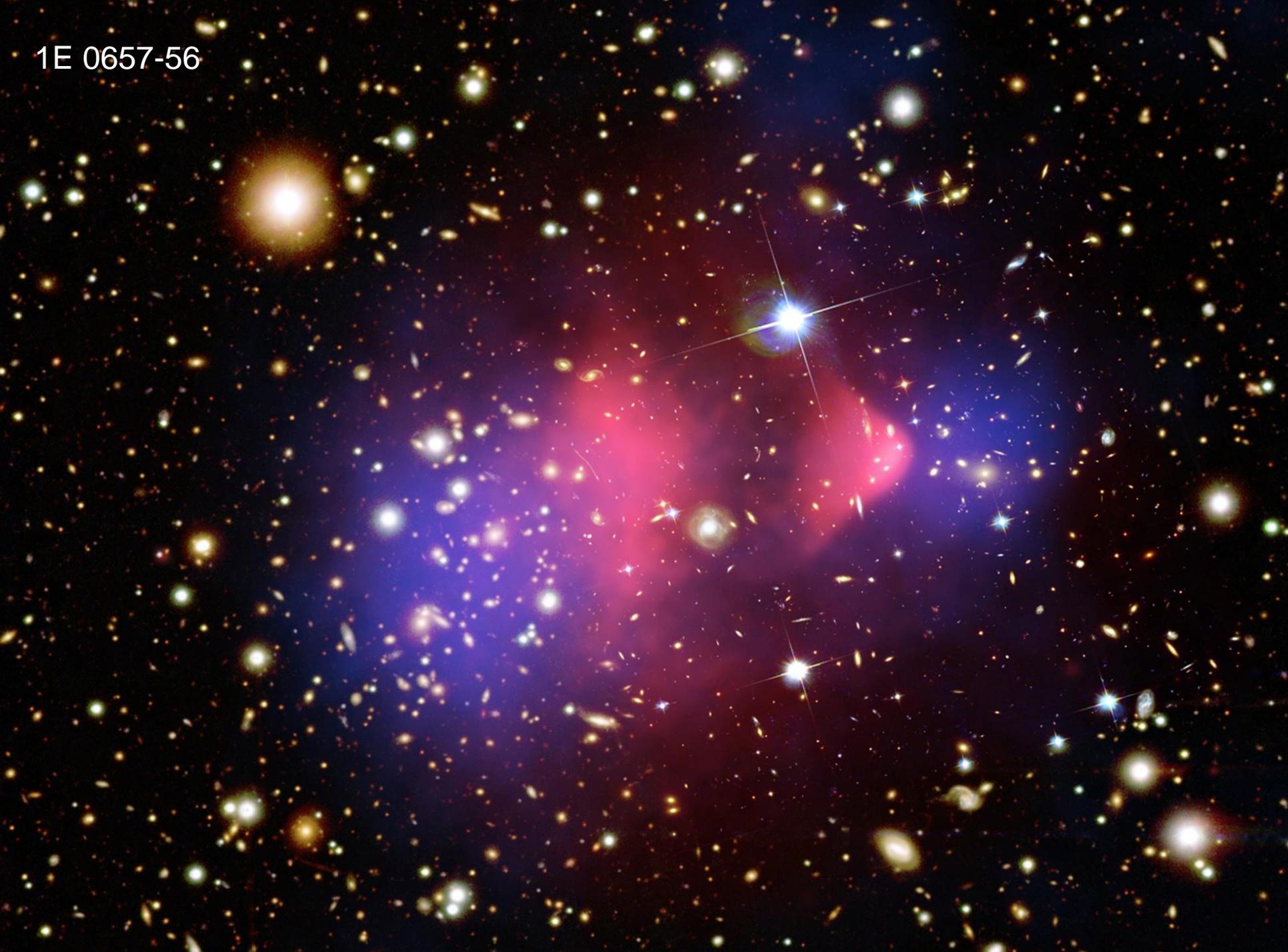
La materia oscura negli ammassi di galassie è responsabile della deflessione della luce proveniente da sorgenti lontane che passa vicino all' ammasso (uno degli effetti più peculiari previsti dalla relatività generale, ed utilizzato per la sua conferma fin dal 1919)





- Il fatto che ci sia molta più massa di quella delle stelle negli ammassi di galassie è confermato anche dall'emissione di raggi X negli ammassi.
- A causa della grande quantità di materia oscura, il gas dell'ammasso cade verso le regioni centrali riscaldandosi moltissimo (fino a 10 milioni di gradi) ed emettendo grandi quantità di raggi X

1E 0657-56

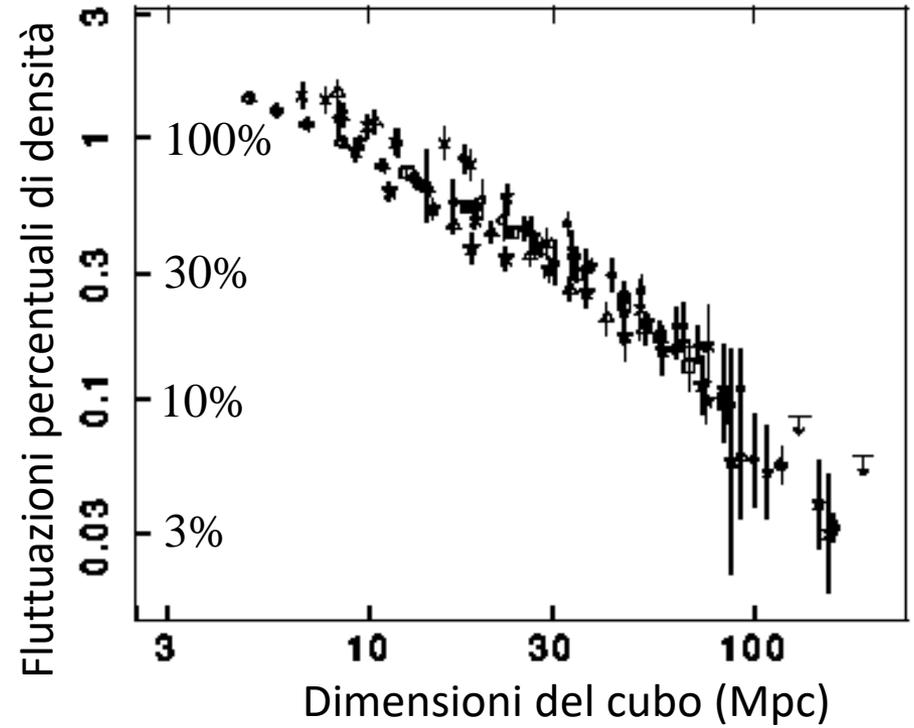
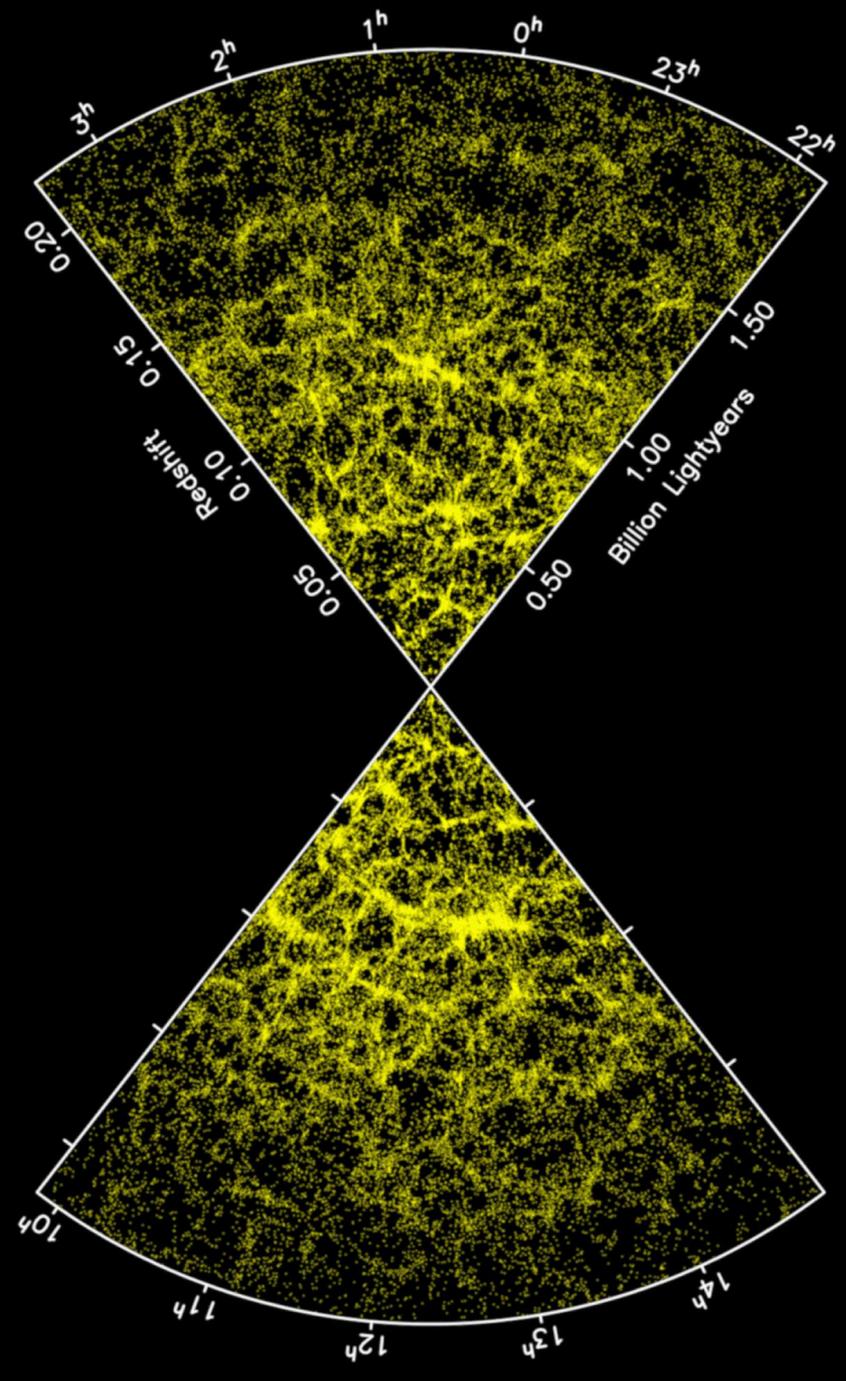


# Micro - Macro

- Anche in questo caso, per spiegare un fenomeno macroscopico (a scala addirittura galattica,  $10^{21}\text{m}$ ) si deve interrogare il mondo microscopico, alla ricerca di particelle elementari con caratteristiche tali da spiegare il fenomeno dell'esistenza di una ipotetica «materia oscura».
- WIMPs: particelle massive debolmente interagenti – non interagiscono elettromagneticamente, ma interagiscono gravitazionalmente (come i neutrini).
- Non sono ancora state osservate in laboratorio, ma sono previste da alcune teorie che vanno oltre il modello standard delle particelle elementari.
- La materia oscura è ancora una ipotesi, interessante e in accordo con molte osservazioni, ma non ancora consolidata. Serviranno i risultati di nuovi esperimenti di laboratorio – molti in corso, molti in fase progettuale.

# Esempio 3: l'espansione dell'intero universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- La cosmologia studia l'universo globalmente.
- Per farlo, in prima approssimazione, considera un universo isotropo ed omogeneo.
- E' una approssimazione di ordine zero, valida solo se vogliamo studiare le proprietà medie dell'universo su scale molto grandi (decine di Mpc).
- A scale piccole l'universo non è omogeneo e isotropo, è composto da una gerarchia di strutture (ammassi di galassie, galassie, stelle ...) più o meno come un gas a livello macroscopico può essere omogeneo e isotropo ma è composto da atomi che a loro volta sono composti da particelle elementari ... eppure definiamo una unica densità, una unica temperatura, etc. .. del gas, parametri macroscopici che usiamo per descriverne il comportamento.
- Qui ci occupiamo della densità media e della temperatura media dell'universo, inteso come gas di galassie. E a questo livello l'universo è davvero omogeneo e isotropo (*principio cosmologico*).



Peacock and Dodds (1994, MNRAS, 267, 1020)

- L'universo è omogeneo e isotropo alle grandi scale (>100 Mpc =  $3 \times 10^{24}$  m)

# Esempio 3: l'espansione dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- Studiare la dinamica dell'universo significa studiare come variano la sua densità media e temperatura media nel tempo.
- Ad esempio se la densità diminuisce, vuol dire che per unità di volume c'è sempre meno massa (galassie). Vuol dire che le galassie si allontanano le une dalle altre, in maniera isotropa, mantenendo così la densità uniforme, seppure non costante nel tempo.
- Per descrivere l'espansione isotropa, o la contrazione isotropa, si usa il **fattore di scala**  $a(t)$ , con  $a(t_0)=1$  oggi.
- E' un fattore tale che consente di trovare il valore di qualsiasi distanza  $\chi$  all'epoca  $t$  se oggi quella distanza vale  $\chi_0$ :

$$\chi(t) = \chi_0 a(t)$$

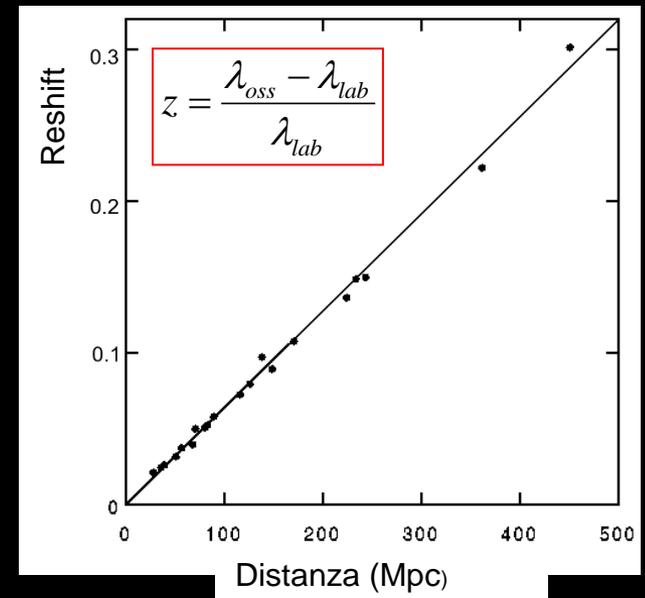
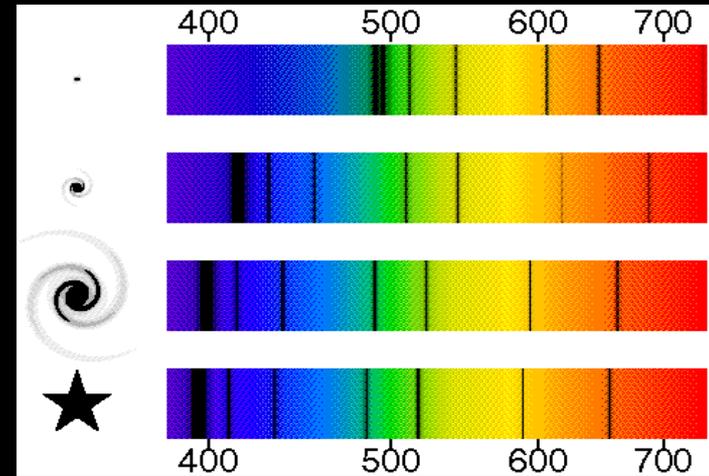
- Il valore di  $a(t)$  è comune a tutte le distanze cosmologiche nell'universo. E' un modo per esprimere il fatto che variano tutte insieme, nello stesso modo.

## Esempio 3: l'espansione dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- Nella nostra approssimazione omogenea ed isotropa, trovare l'evoluzione dell'universo significa semplicemente determinare come la funzione  $a(t)$  varia nel tempo.
- Se  $a(t)$  aumenta, l'universo si espande; se  $a(t)$  diminuisce, l'universo si contrae.
- Quello che si trova, è che  $a(t)$  oggi aumenta, quindi l'universo si sta espandendo.
- Come ce ne siamo accorti ?
- E come ce lo spieghiamo ?

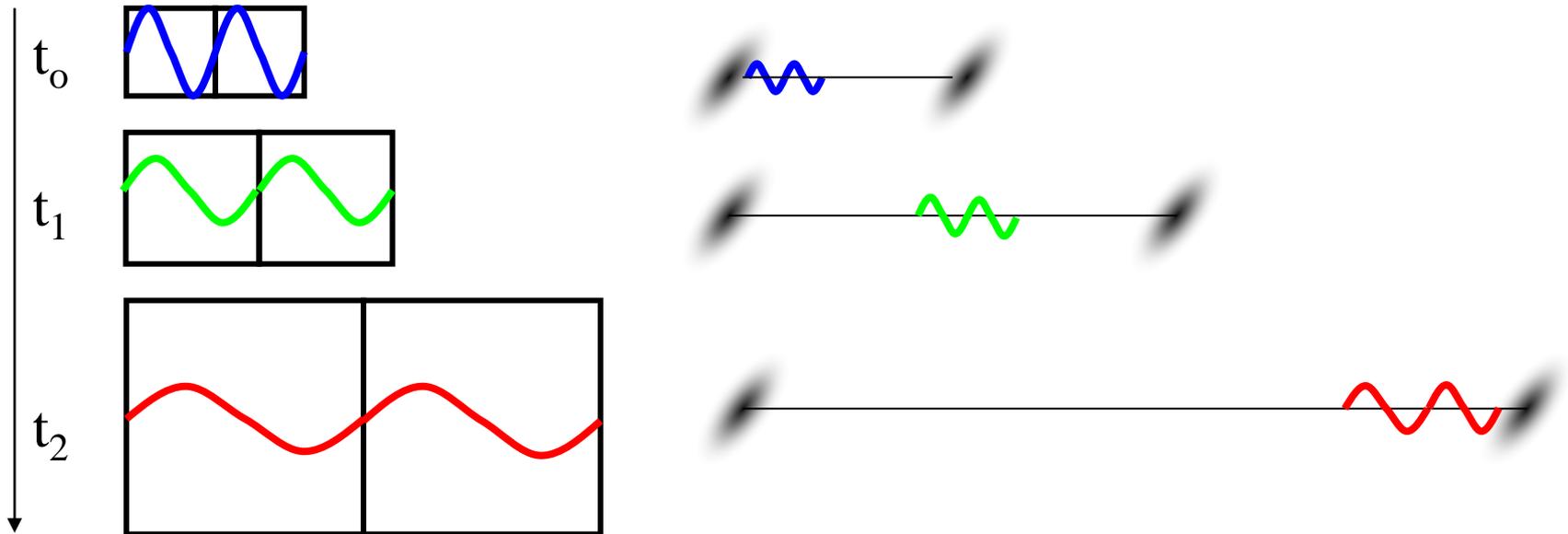
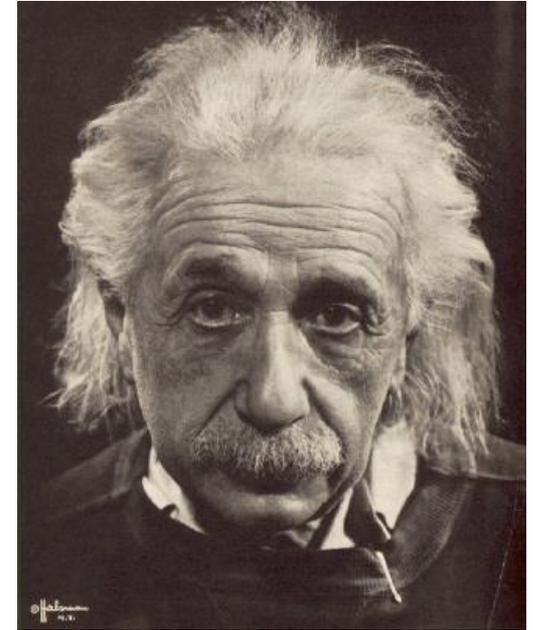
# L'espansione dell'Universo

- 100 anni fa, usando spettrometri al fuoco di grandi telescopi, si scoperse il fenomeno del redshift cosmologico.
- Redshift ( $z$ ): spostamento percentuale della lunghezza d'onda della luce proveniente da sorgenti lontane, riferito a quello della stessa transizione atomica misurata in laboratorio.
- Le sorgenti più lontane mostrano un redshift maggiore del 100%
- E' il risultato dell'espansione dell'universo.

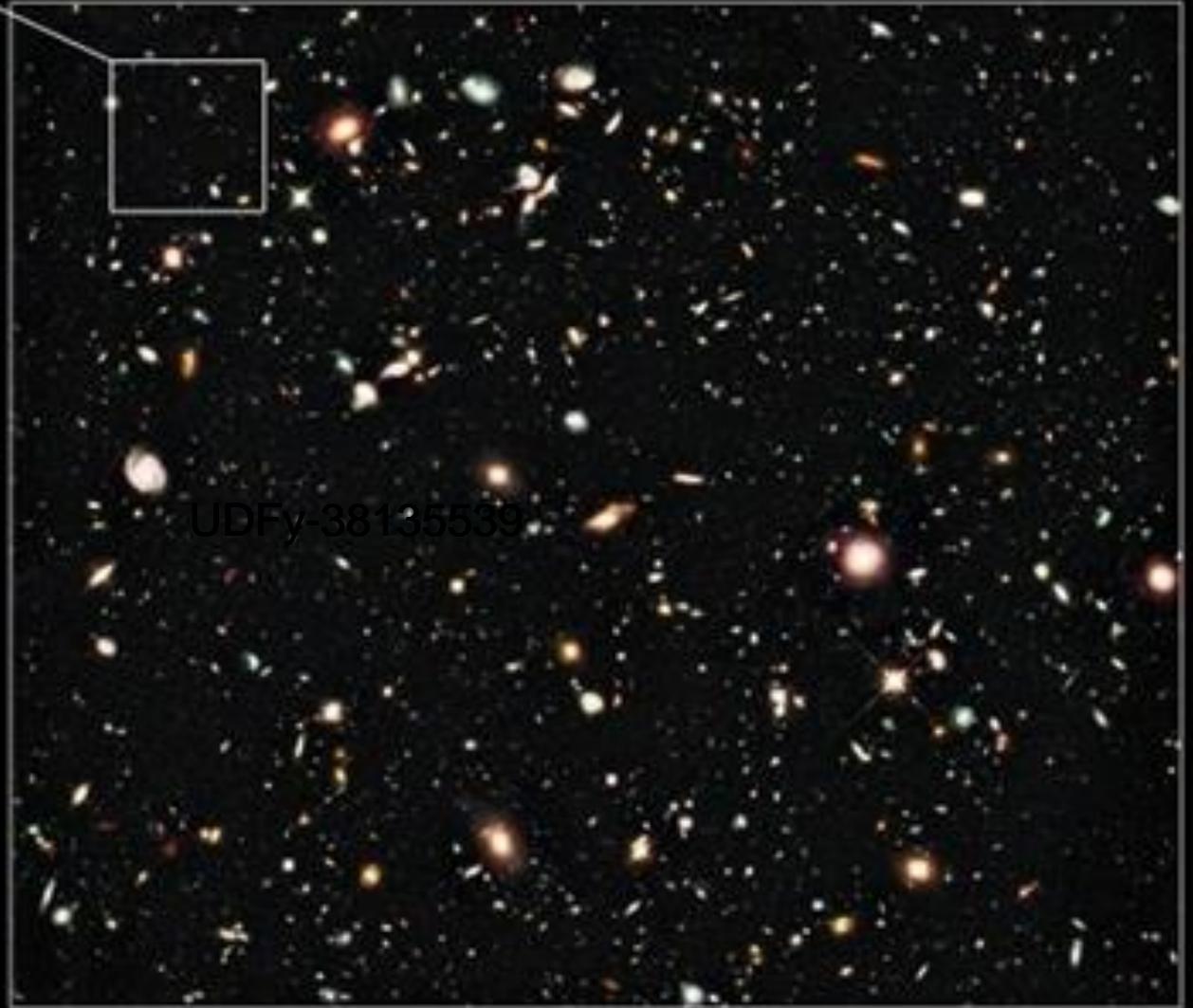
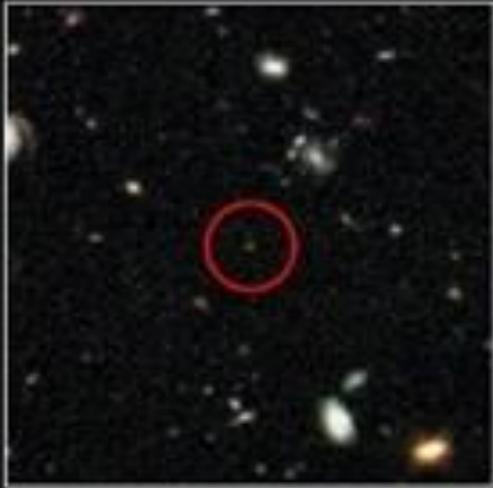


# Percorrendo distanze cosmologiche, la luce cambia colore

- **La relatività generale di Einstein** prevede che, in un universo in espansione, le lunghezze d'onda  $\lambda$  dei fotoni si allungano esattamente quanto le altre lunghezze. Quindi:
  - più distante è una galassia,
  - più è lungo il cammino che la luce deve percorrere prima di arrivare ai nostri telescopi,
  - più lungo è il tempo che impiega,
  - maggiore è l'espansione dell'universo dal momento dell'emissione a quello dalla ricezione,
  - e più la lunghezza d'onda viene allungata (redshift e legge di Hubble).

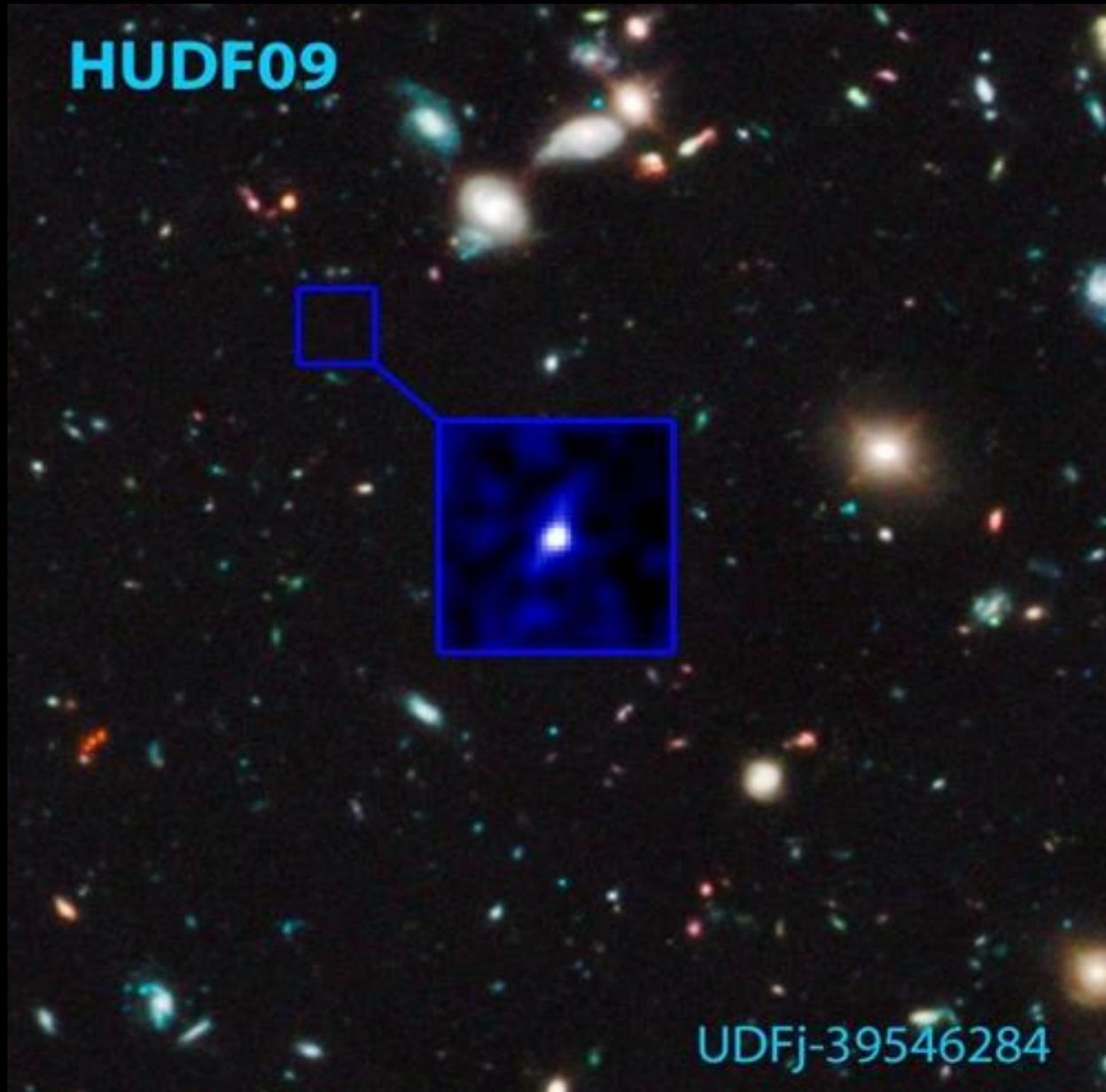


# UDFy-38135539



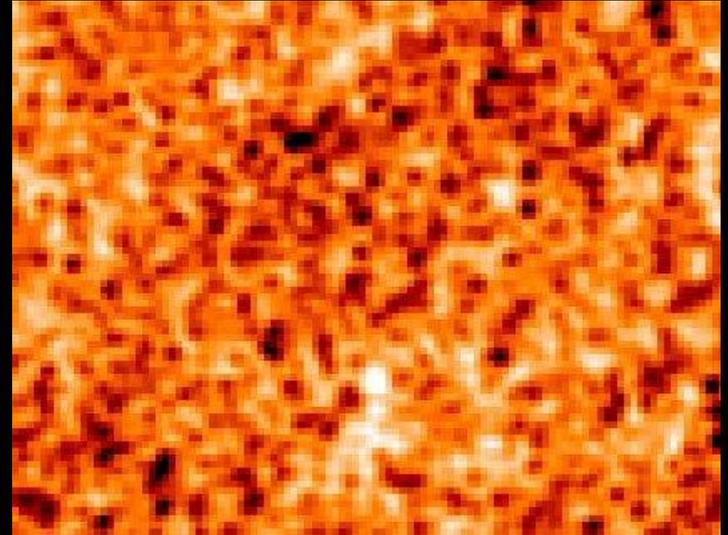
SINFONI-ESO

$z = 8.55$      $d = 13.1$  Miliardi di anni luce



$z = 10.3$   $d = 13.2$  Miliardi di anni luce (... con confidenza dell' 80%)

Granulazione solare



Gas incandescente  
sulla superficie del  
Sole (5500 K)

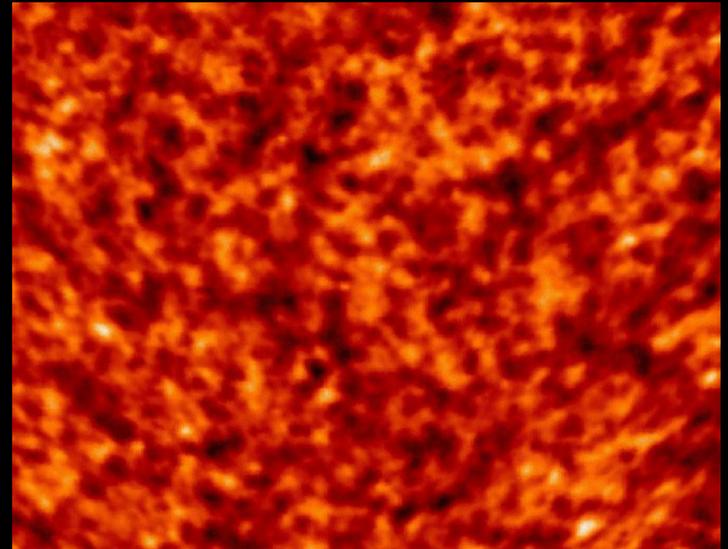
8 minuti luce

Qui, ora

Gas incandescente  
nell' universo  
primordiale (l'  
universo diventa  
trasparente a 3000 K)

14 miliardi di anni luce

Qui, ora



Mappa di BOOMERanG dell' Universo Primordiale

# Esempio 3: l'espansione dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- Per interpretare fisicamente il fenomeno dell'espansione dell'universo, si devono usare le leggi della fisica rilevanti in questo caso.
- Ci si deve quindi chiedere quali sono le forze che agiscono sul sistema.
- A scale così grandi, l'unica forza rilevante è quella gravitazionale. L'espansione dell'universo deve quindi essere il risultato dell'azione della forza gravitazionale sulla massa-energia presente nell'universo.
- La teoria che descrive l'interazione gravitazionale a queste scale è la relatività generale di A. Einstein. Che deve tenere conto di tutte le forme di massa energia presenti: materia, luce, altri campi....
- Usando la relatività generale si arriva a scrivere una equazione del moto, che riguarda il fattore di scala. L'equazione di Friedmann.

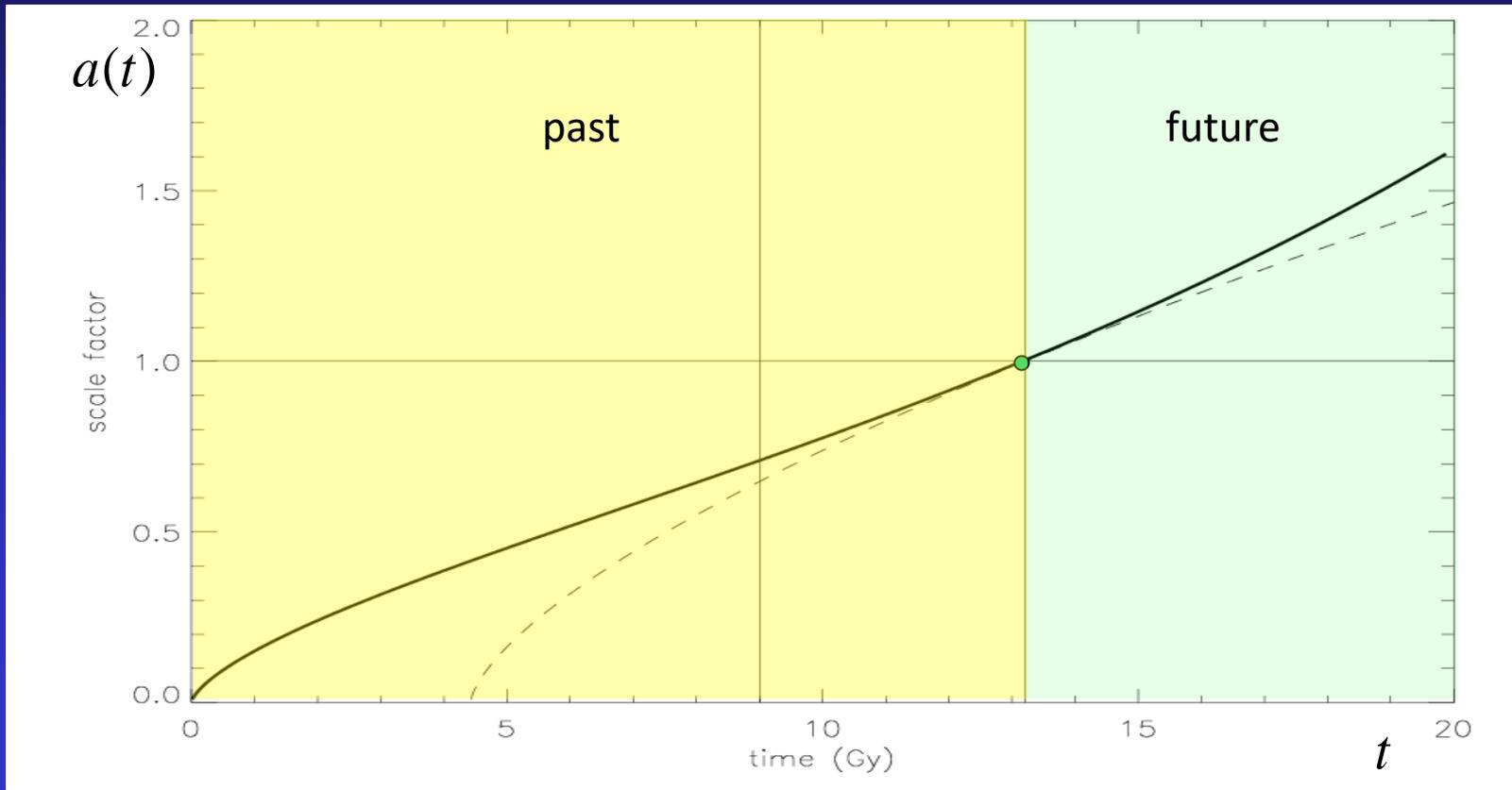
# L'equazione di Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_o^2 \left[ \frac{\Omega_{Ro}}{a^4} + \frac{\Omega_{Mo}}{a^3} + \frac{(1-\Omega_o)}{a^2} + \Omega_{\Lambda} \right]$$

- Corrisponde ad imporre che la somma di energia cinetica e di tutte le forme di energia potenziale rimanga costante.
- Il termine in  $\dot{a}^2$  è quello di energia cinetica
- I termini con  $\Omega_{Ro}$   $\Omega_{Mo}$   $\Omega_{\Lambda}$  rappresentano le diverse forme di massa-energia presenti nell'universo: rispettivamente la radiazione, la materia (normale e oscura), l'energia del vuoto.
- Il termine con  $\Omega_o$  rappresenta la somma delle energie, costante.
- I parametri  $\Omega_i$  rappresentano la frazione di energia in una certa forma rispetto al totale. Se li conosciamo, potremmo risolvere l'equazione e trovare  $a(t)$ .
- Da questa equazione è evidente che l'evoluzione a grandissima scala dell'universo dipende dal tipo di particelle e campi che compongono l'universo stesso. Da quanto sappiamo:

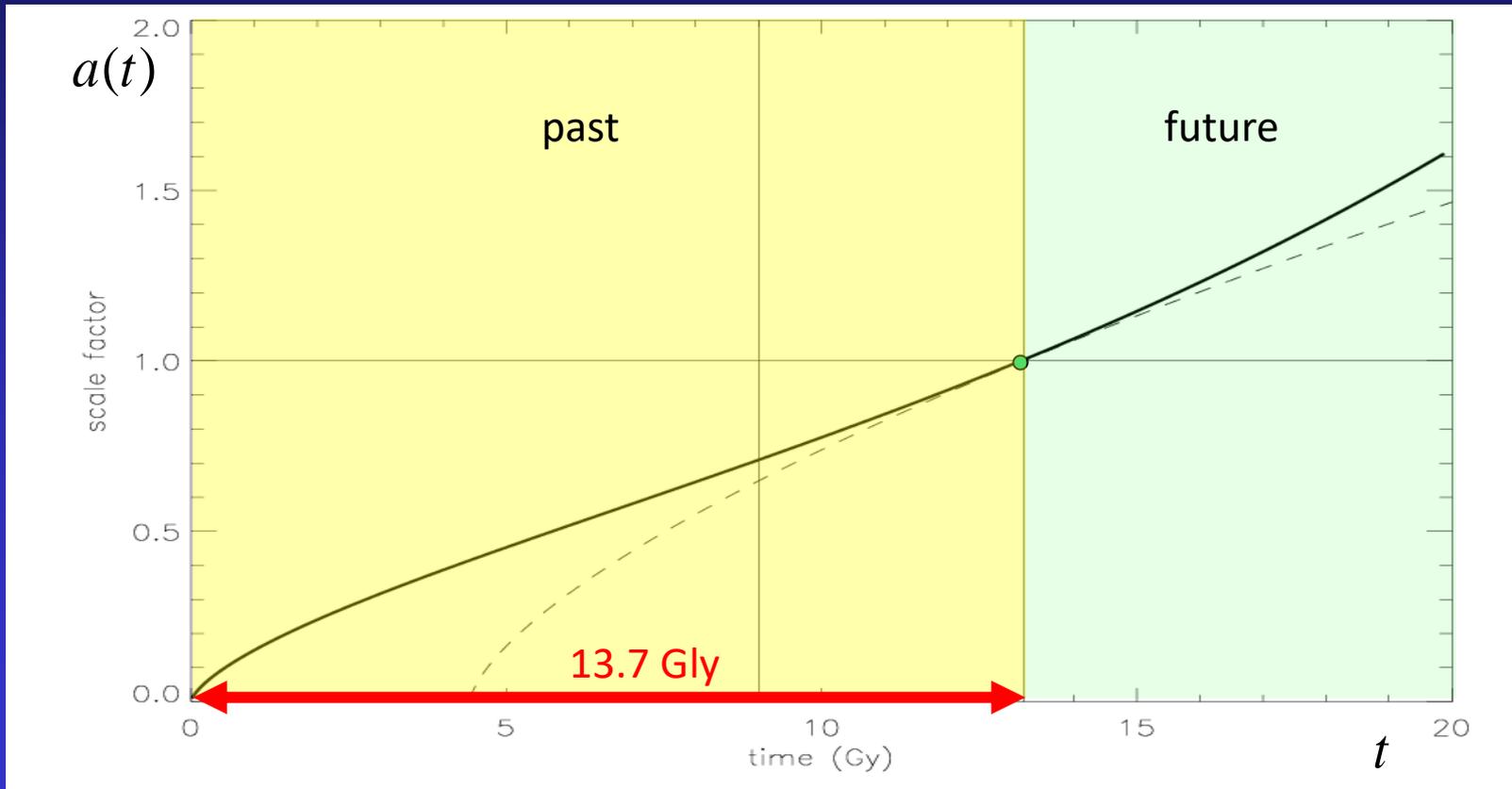
# L'equazione di Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_o^2 \left[ \frac{\Omega_{Ro}}{a^4} + \frac{\Omega_{Mo}}{a^3} + \frac{(1-\Omega_o)}{a^2} + \Omega_{\Lambda} \right]$$



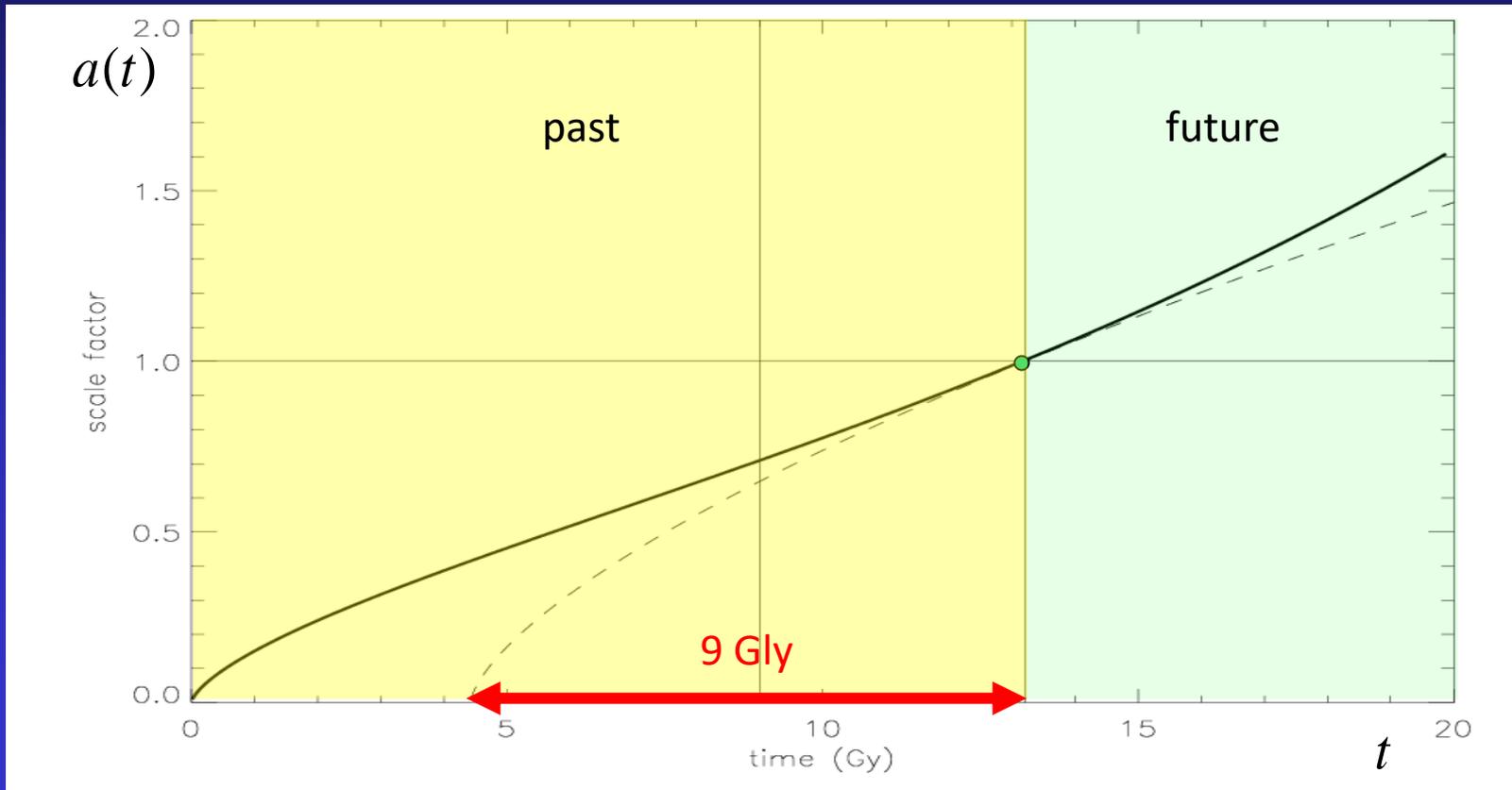
# L'equazione di Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_o^2 \left[ \frac{\Omega_{Ro}}{a^4} + \frac{\Omega_{Mo}}{a^3} + \frac{(1-\Omega_o)}{a^2} + \Omega_\Lambda \right]$$



# L'equazione di Friedmann

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_o^2 \left[ \frac{\Omega_{Ro}}{a^4} + \frac{\Omega_{Mo}}{a^3} + \frac{(1-\Omega_o)}{a^2} + \Omega_\Lambda \right]$$





NGC 6397

# Esempio 4: l'evoluzione **termica** dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- Un mezzo che si espande, isolato, si raffredda. La termodinamica ci dimostra che è inevitabile.
- L'universo deve fare lo stesso: Se nel passato era più denso, doveva essere anche più caldo.
- Quanto ? Dipende da quanto ci addentriamo nel passato dell'universo. Comunque c'è una storia termica dell'universo.
- Temperatura significa energia cinetica. Ad epoche sempre più primordiali, e temperature sempre più alte, l'energia cinetica disponibile è sempre maggiore, e quindi le particelle presenti nell'universo interagiscono in modi sempre più energetici e diversi.
- Energie cinetiche elevate significano urti violenti. Tanto violenti che nelle prime fasi dell'universo non potevano esistere stati legati (dai più deboli ai più forti: galassie, stelle, molecole, atomi, nuclei, barioni ...)  

Gravitazione	Elettromagnetica	Nucleare Forte
- L'espansione e il conseguente raffreddamento dell'universo consente la formazione di oggetti legati sempre più debolmente. All'inizio c'erano solo particelle elementari e antiparticelle elementari.

Planck: erede *anche* di BOOMERanG

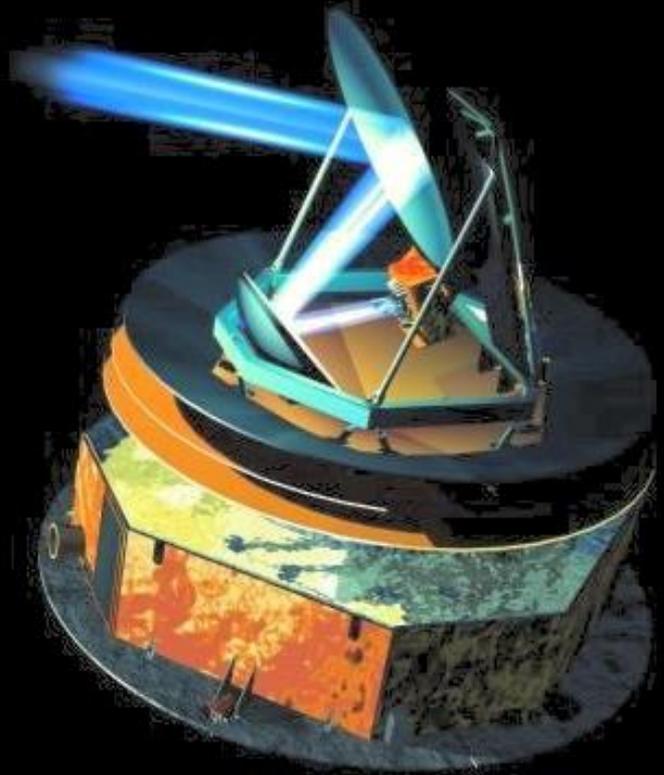
- Stessa strategia di osservazione / scansione
- Stessa strategia multifrequenza
- Stessi rivelatori spider-web per HFI
- Stessi rivelatori PSB per HFI
- Stessi metodi di analisi dei dati



**PLANCK**

Looking back to the dawn of time  
Un regard vers l'aube du temps

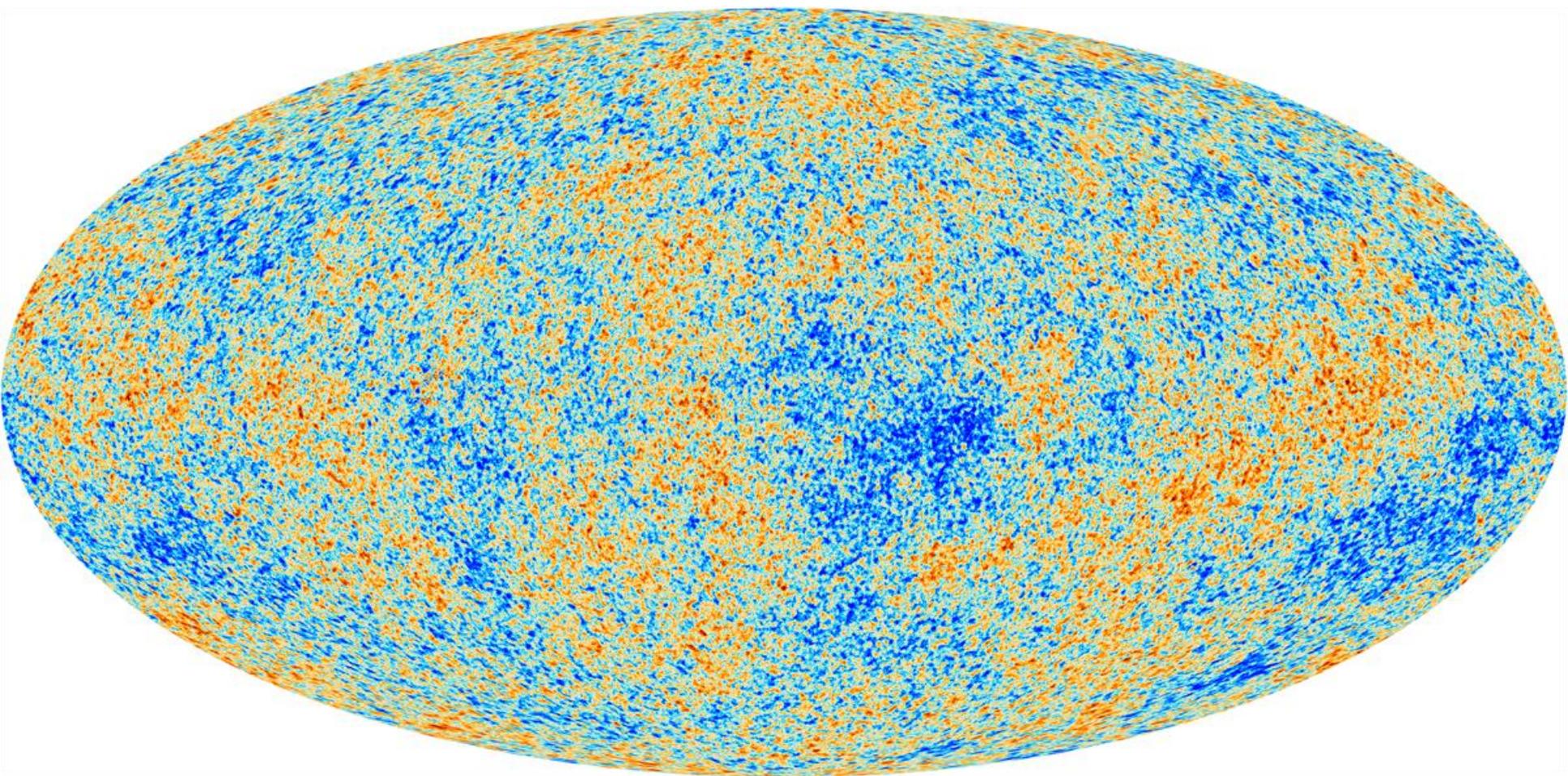




Telescopio fuori  
asse, diametro  
specchio principale  
1.8 m



The CMB component



Angular scale

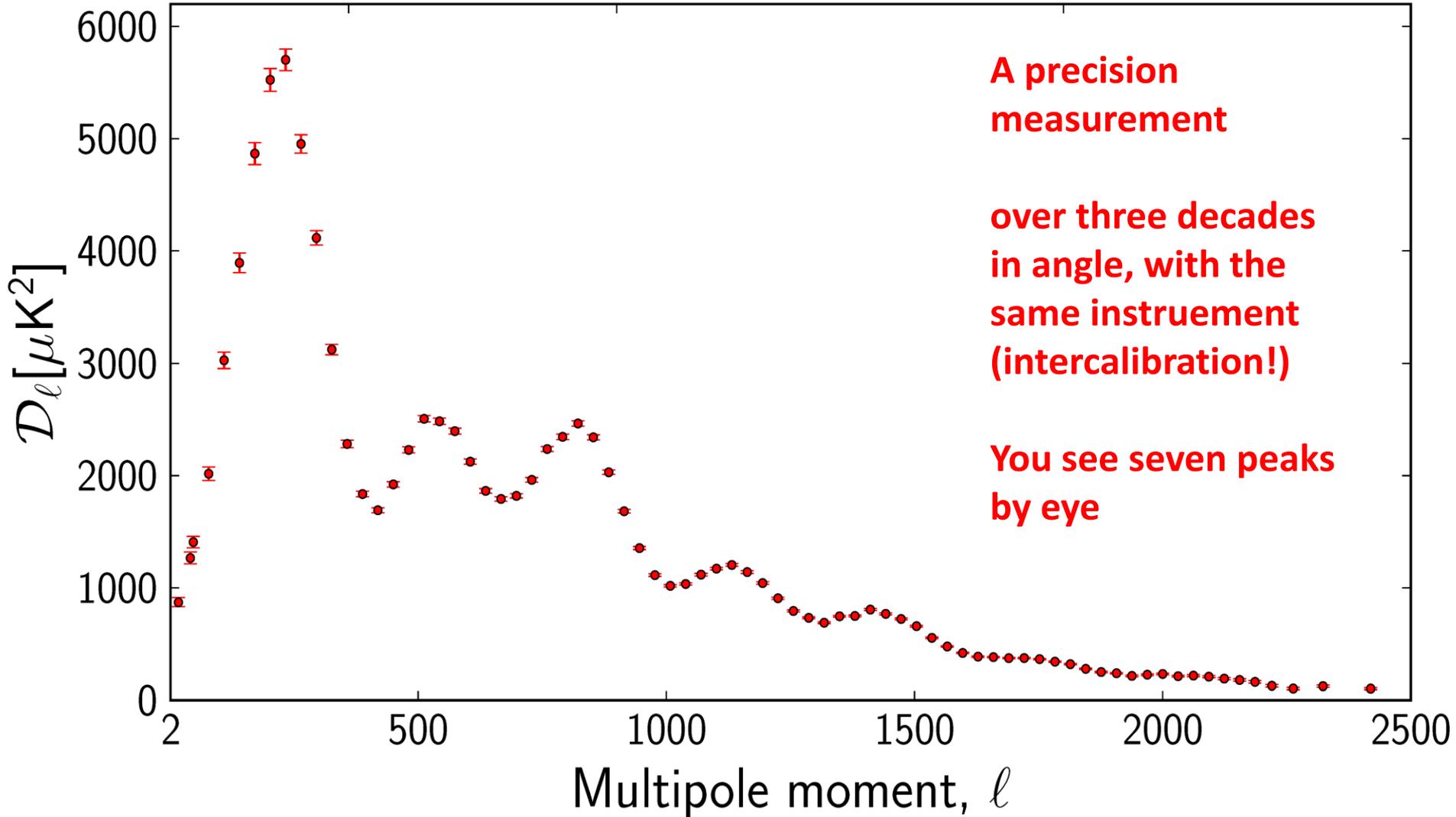
90°

0.5°

0.2°

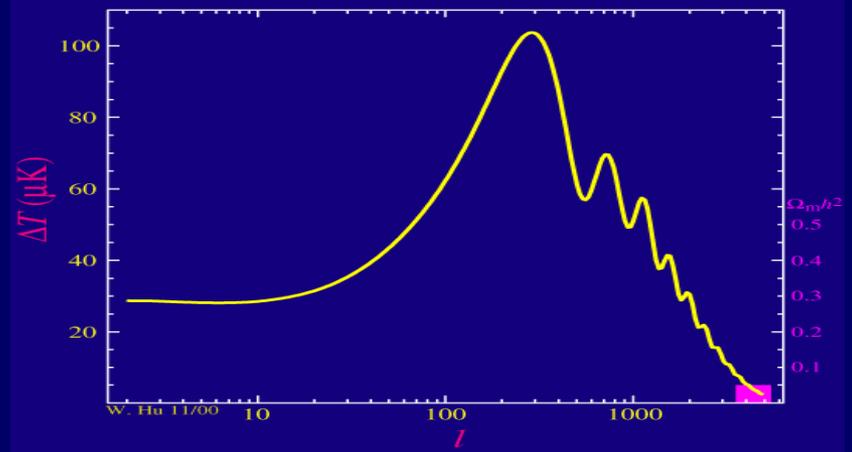
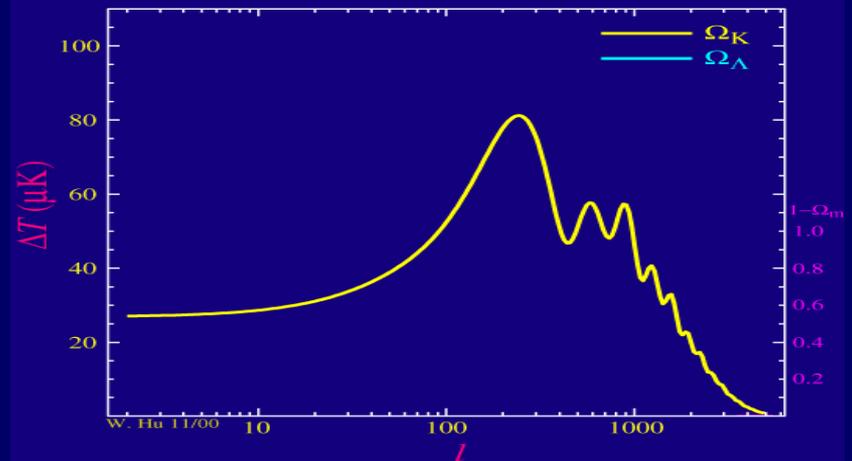
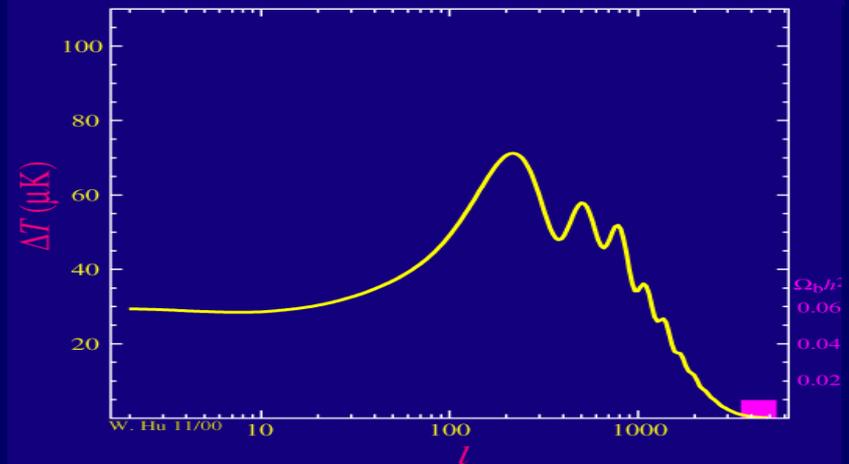
0.1°

0.07°



# Composizione

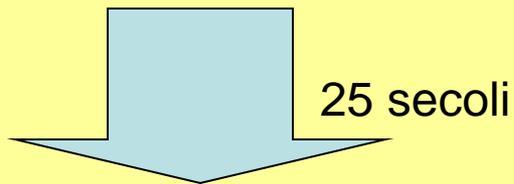
- Ma di che cosa è fatto l'universo ?
- Lo spettro di potenza dipende dalla composizione dell'universo, cioè dalle percentuali delle possibili forme di massa-energia presenti nell'universo.



# Di che cosa è fatto l' Universo ?

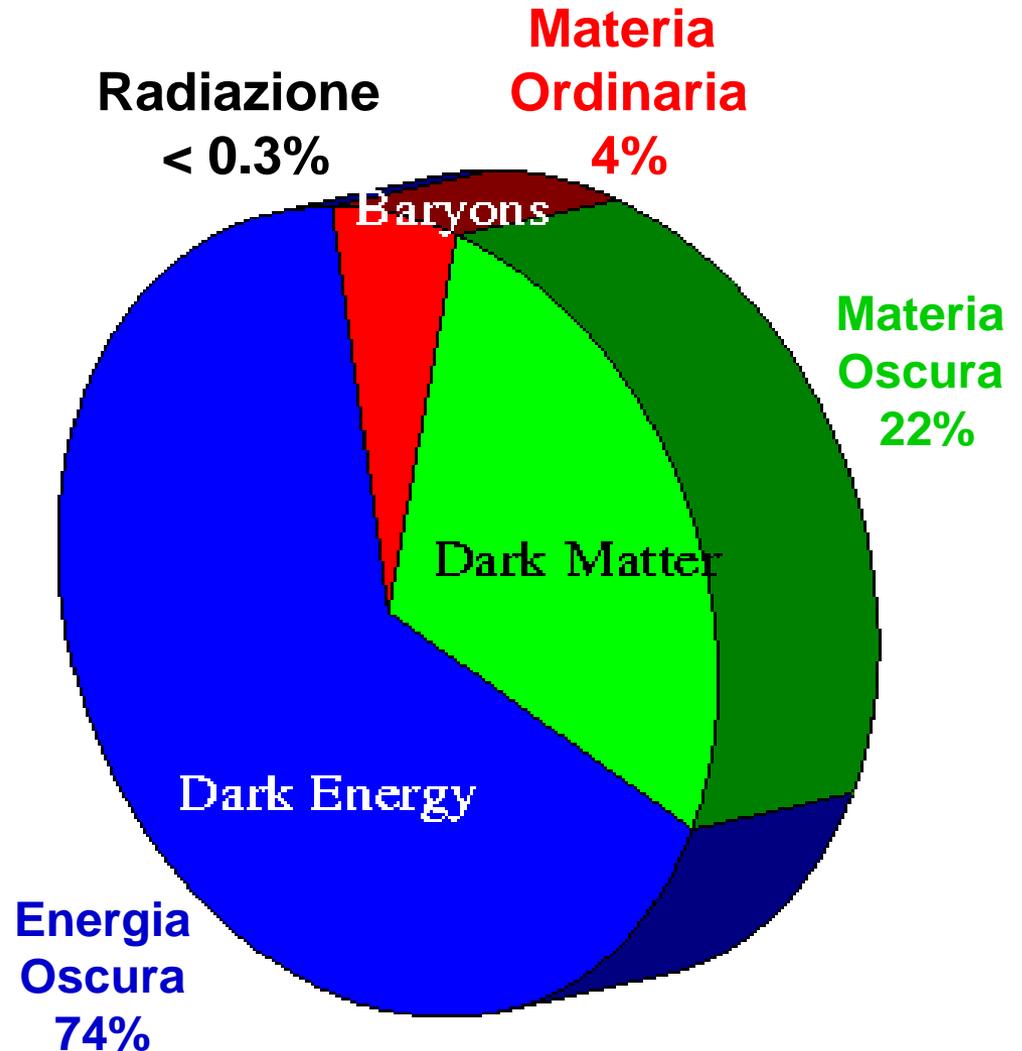
- Per i PreSocratici:

- terra,
- acqua,
- aria,
- fuoco



- Oggi, per lo scienziato medio:

- radiazione (luce),
- materia ordinaria,
- **materia oscura,**
- **energia oscura.**



Dai dati di Planck

# Conclusioni

- Il funzionamento dell'universo e delle sue strutture dipende dalle particelle elementari che sono presenti.
- Le osservazioni dell'universo, oltre a permetterci di studiare la sua struttura ed evoluzione, ci permettono di studiare la fisica fondamentale, e sono sinergiche alle misure di fisica dirette.
- Materia oscura, energia oscura, asimmetria materia-antimateria, inflazione cosmica ....
- Le sfide per i fisici di domani !