

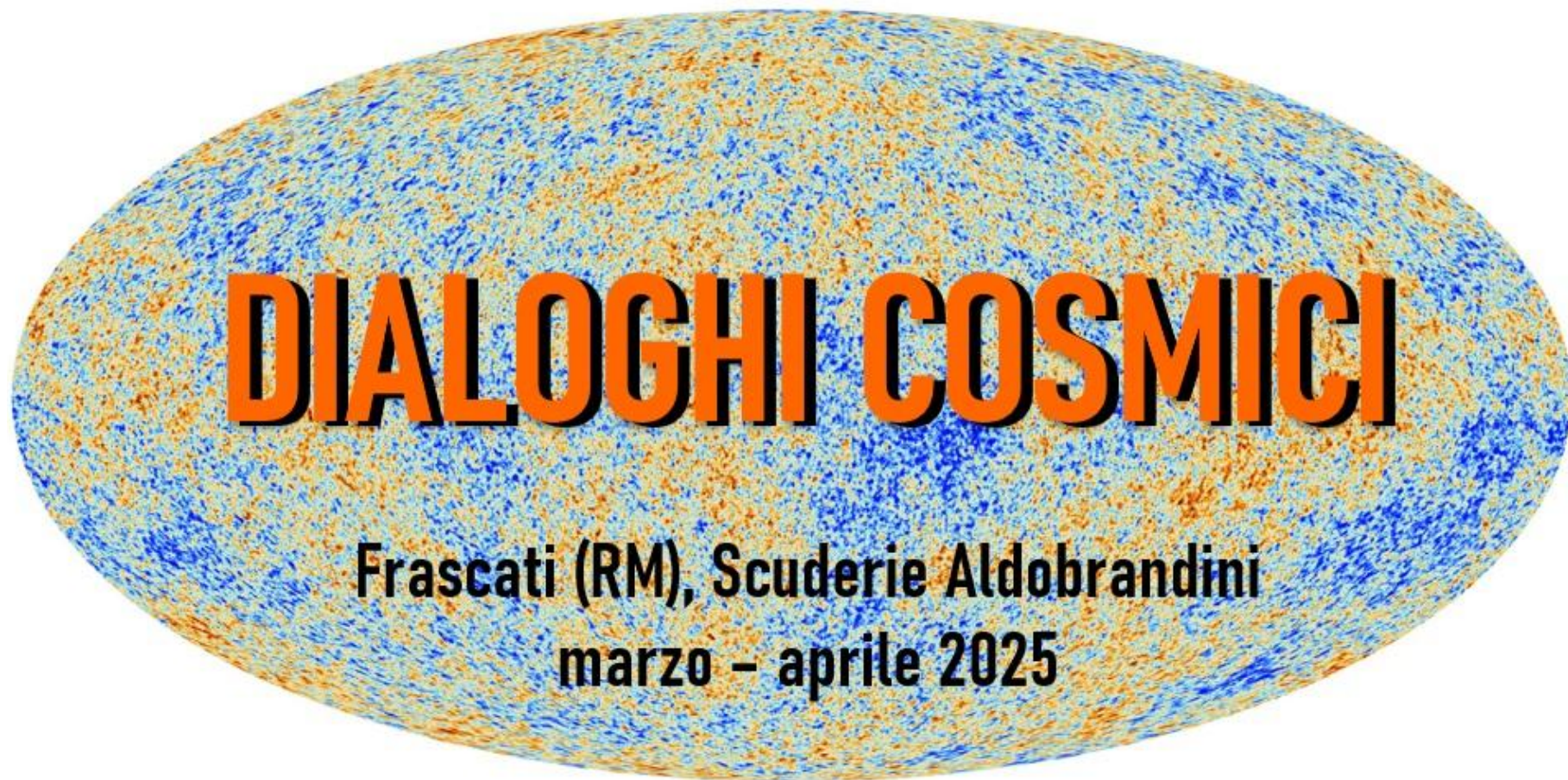
L'ATA organizza



In collaborazione con



Con il patrocinio di



DIALOGHI COSMICI

Frascati (RM), Scuderie Aldobrandini
marzo - aprile 2025

Paolo de Bernardis - Dipartimento di Fisica, Sapienza
Dialogo 2 – 8/marzo/2025

2) L'interpretazione fisica dell'espansione dell'Universo

Photo: ©ESA and the Planck Collaboration



Dialoghi cosmici – 2

- Perché l'universo si espande ?
- Perché lo fa con velocità proporzionale alla distanza ?
- Perché non collassa su se stesso a causa della gravitazione ?

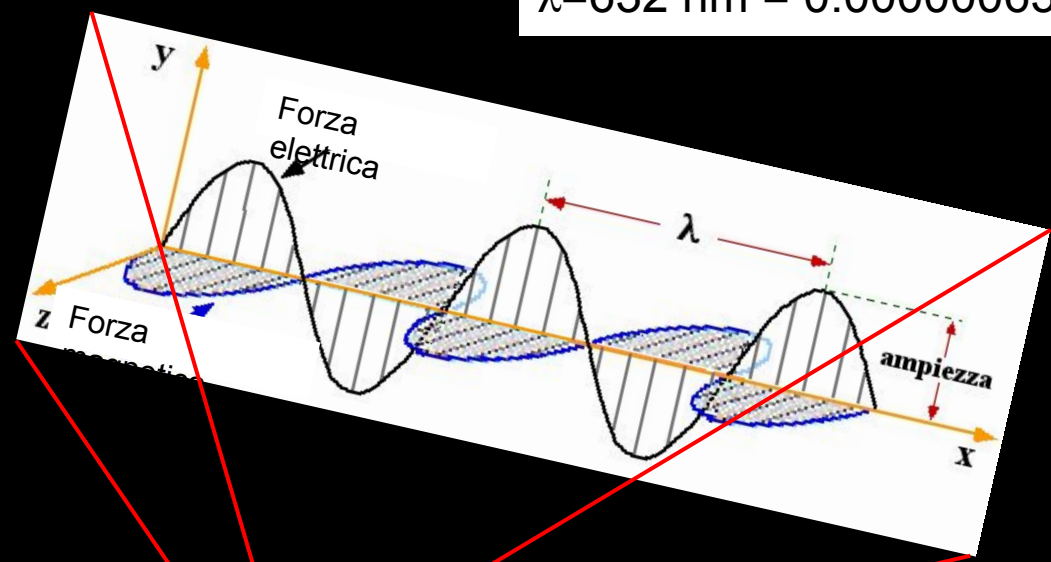
- Oggi cercheremo di rispondere a queste domande.

- Ma prima di tutto un riassunto della puntata precedente.

1. *L'universo omogeneo e isotropo e la sua espansione*
2. *L'interpretazione fisica dell'espansione dell'Universo*
3. *La storia dell'universo*
4. *Le strutture cosmiche*
5. *Origine e struttura dell'universo*
6. *Evento finale: star party*



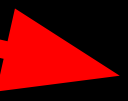
$$\lambda = 632 \text{ nm} = 0.000000632$$

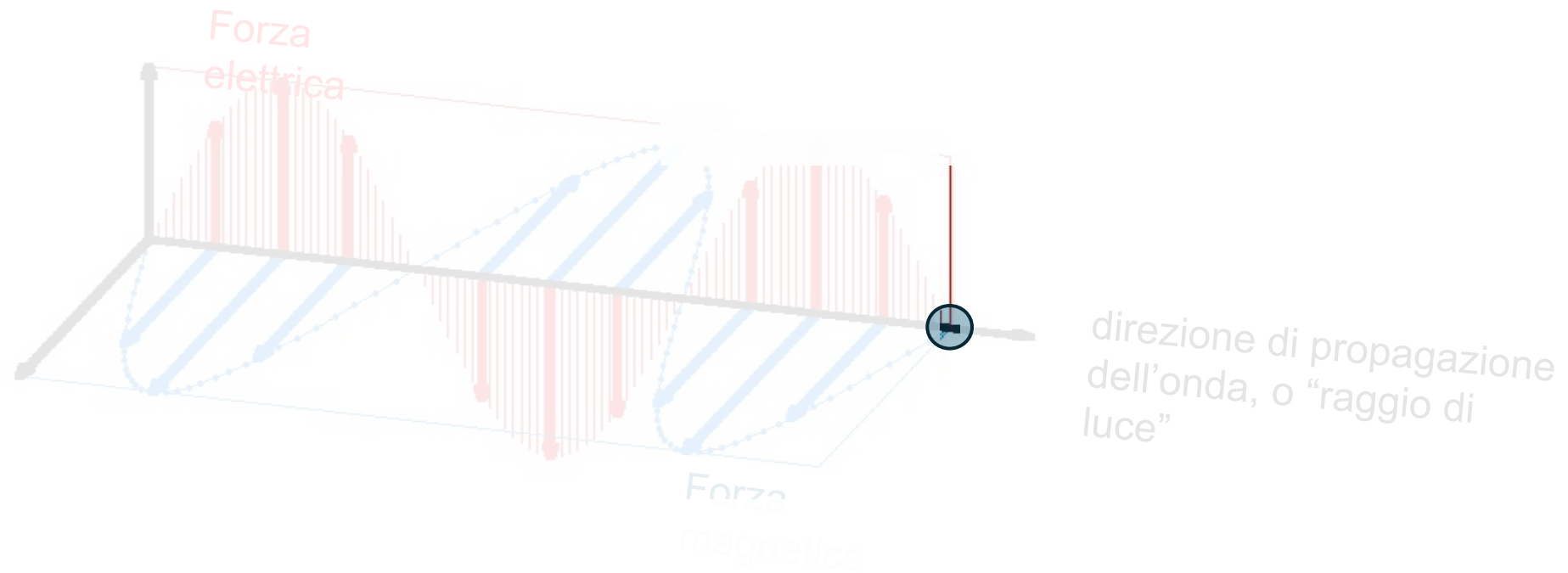


Raggio di luce



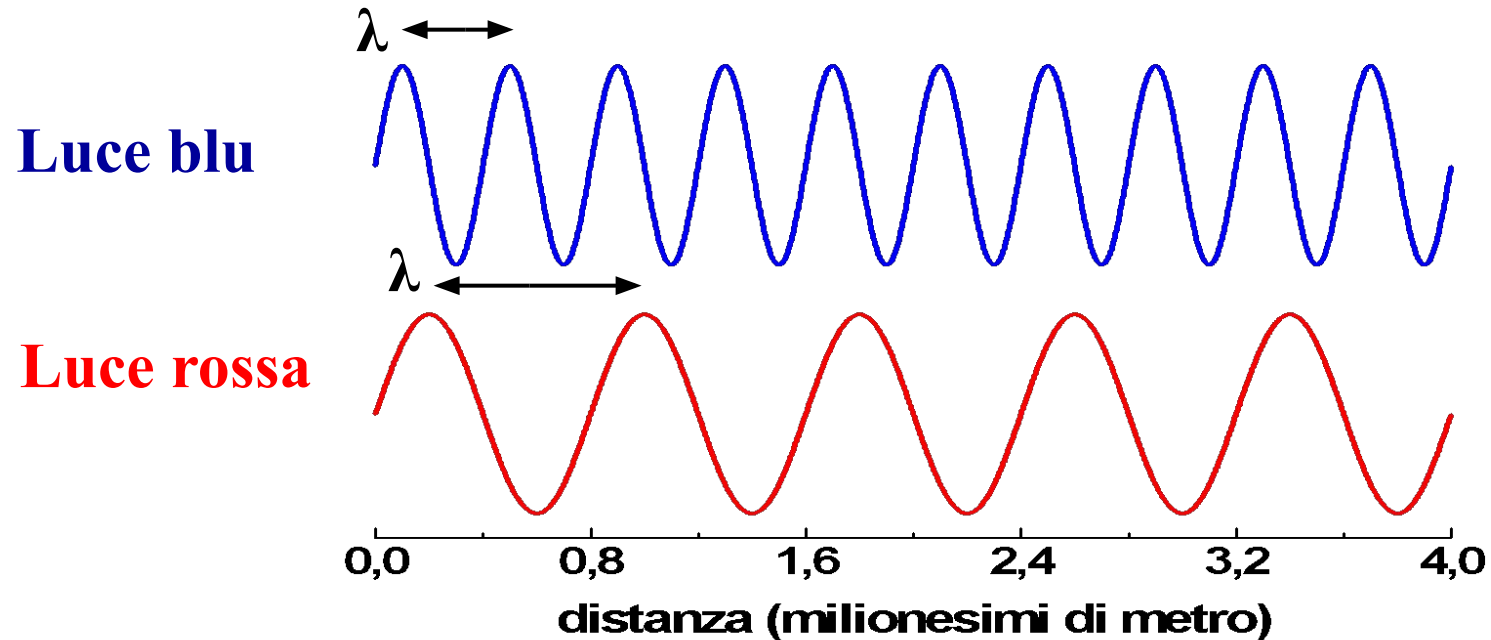
direzione di propagazione





L'onda elettromagnetica si propaga ad una velocità di 299792458 m/s
(un miliardo di chilometri all'ora !)

- La luce è formata da onde elettromagnetiche. Il **colore** della luce dipende dalla sua lunghezza d'onda λ



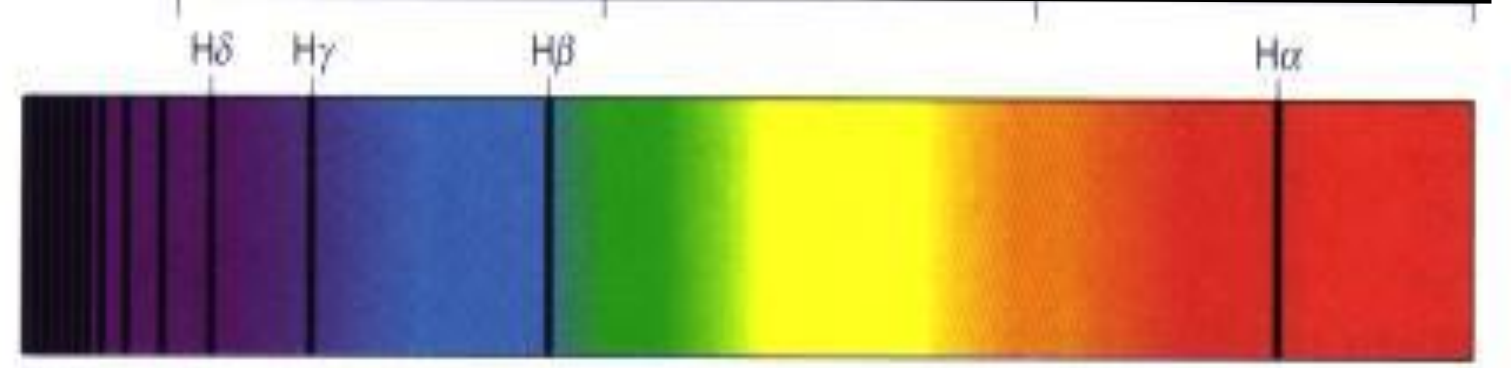
- I sensori presenti nei nostri occhi reagiscono in modo diverso alle diverse lunghezze d'onda della luce, producendo una sensazione diversa che il nostro cervello visualizza come un colore diverso.
- Le onde elettromagnetiche si manifestano in modo diverso a seconda della lunghezza d'onda: dai metri ai picometri (millesimi di miliardesimo di metro) si hanno onde radio, microonde, raggi infrarossi, luce visibile, raggi ultravioletti, X, gamma



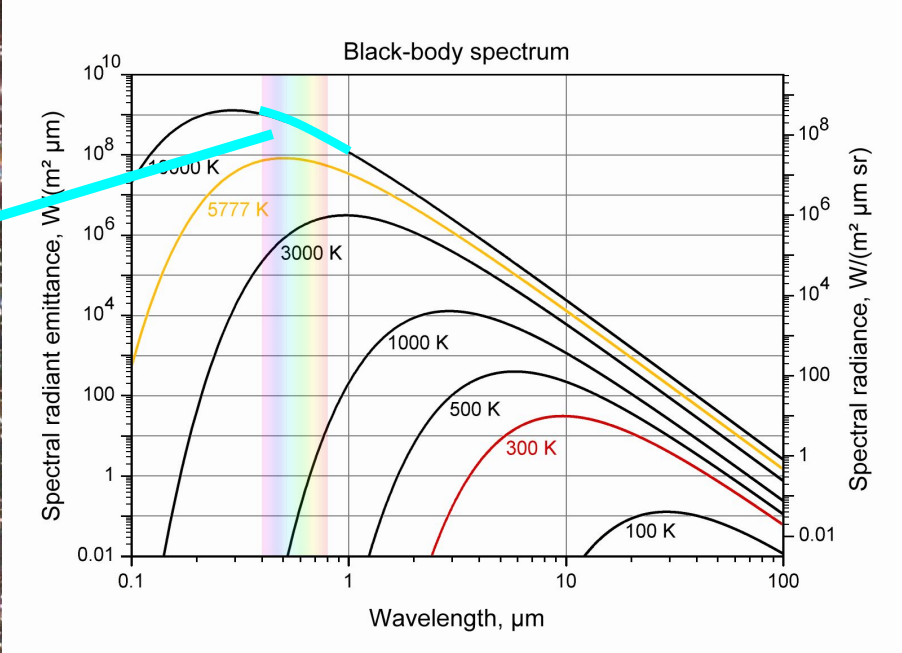
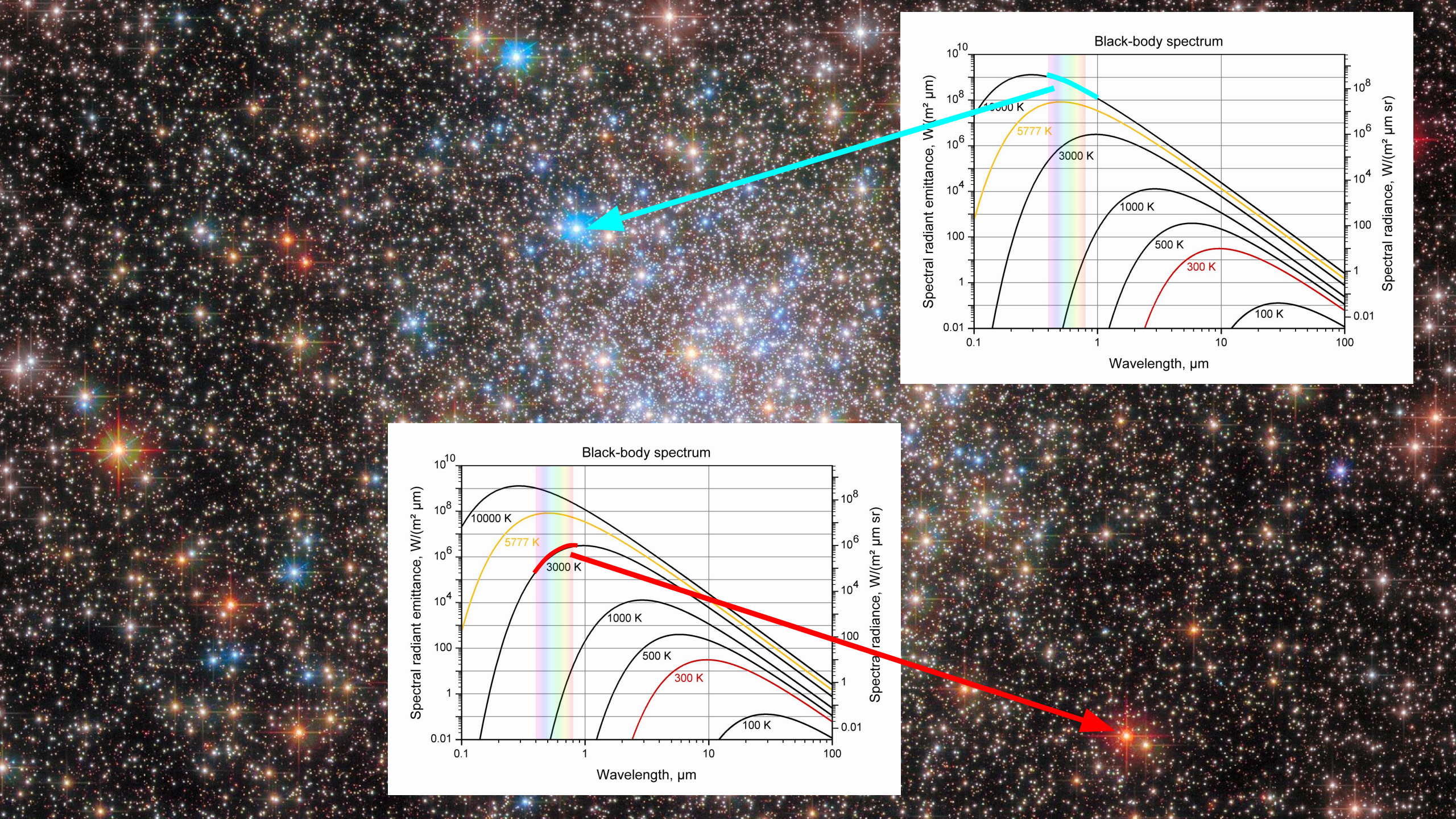
spettr

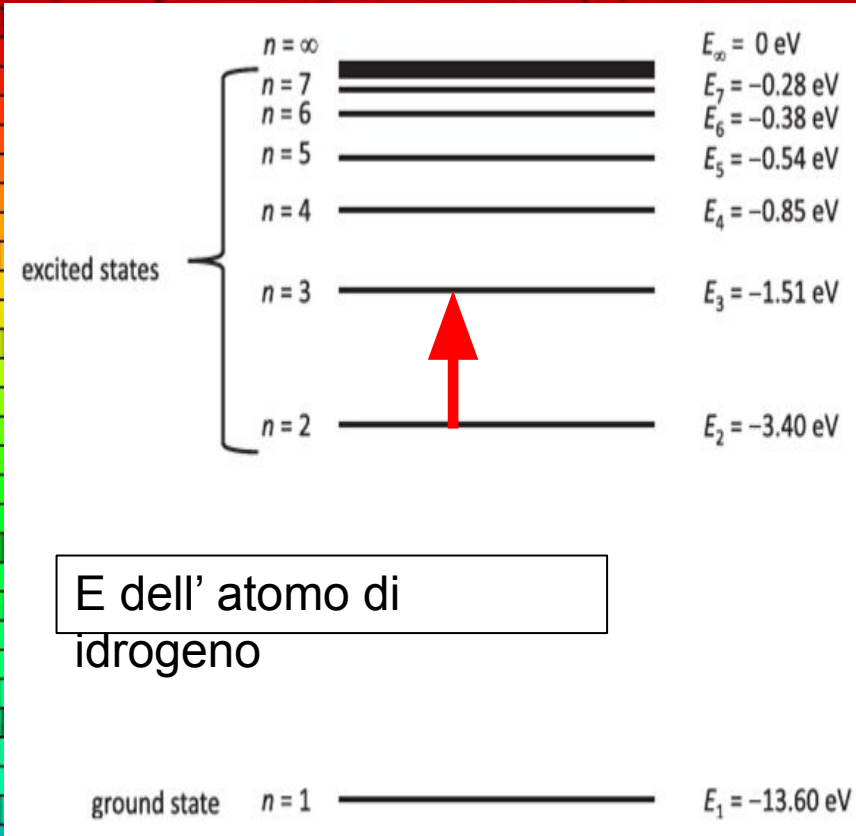


spettr Lunghezza d'onda (miliardesimi di metro) 400 500 600 700



Isaac Newton

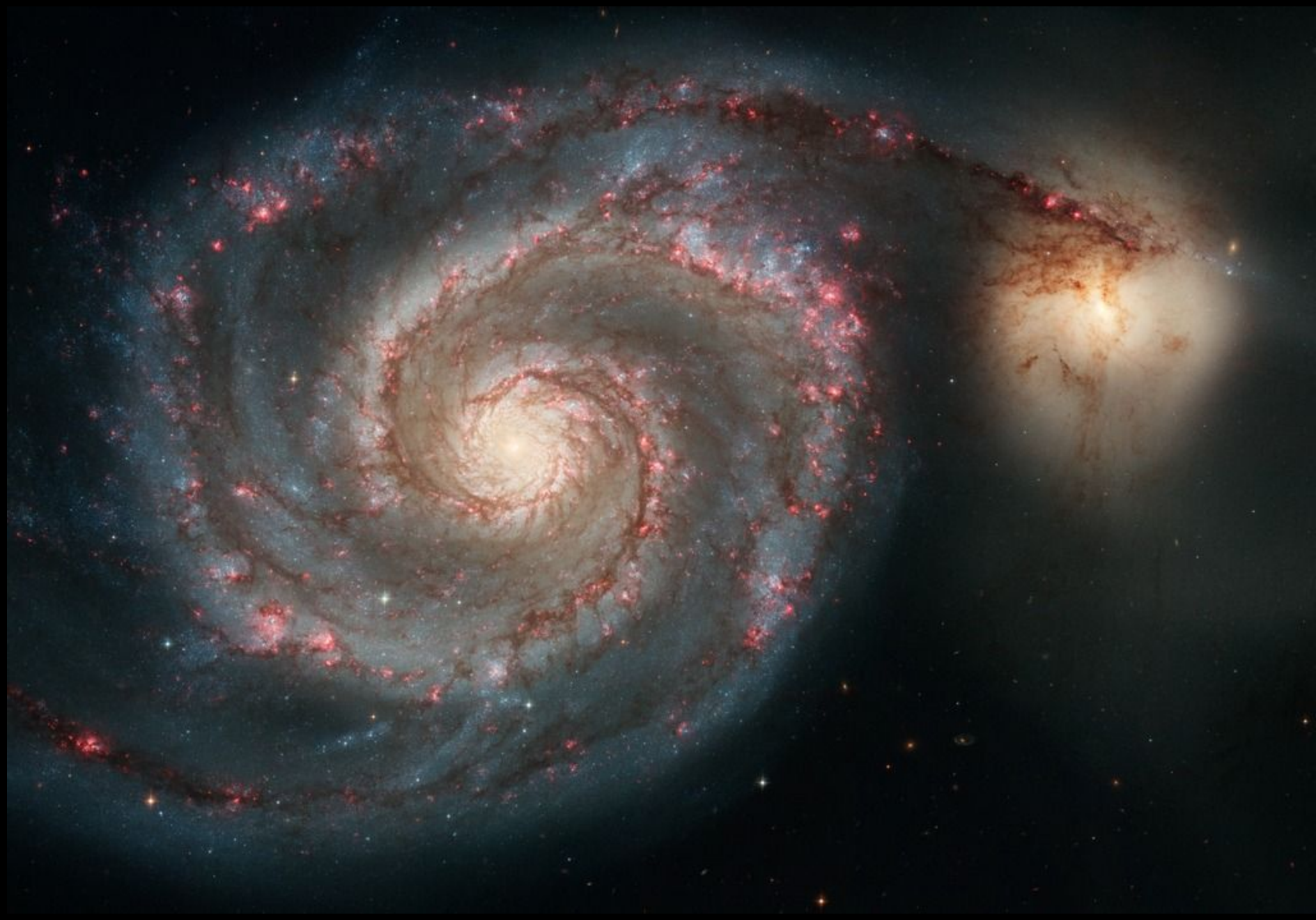


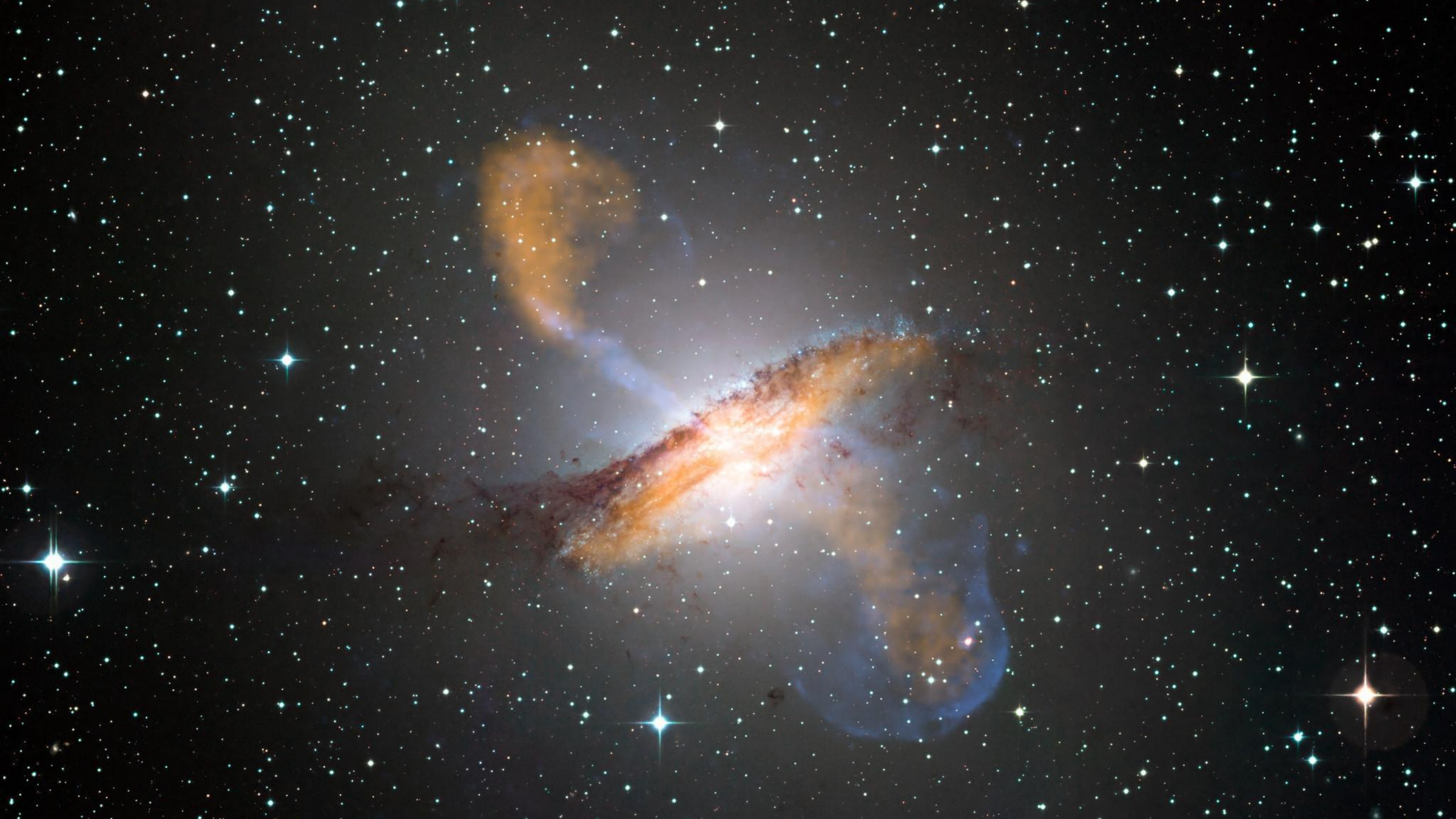


E dell' atomo di idrogeno





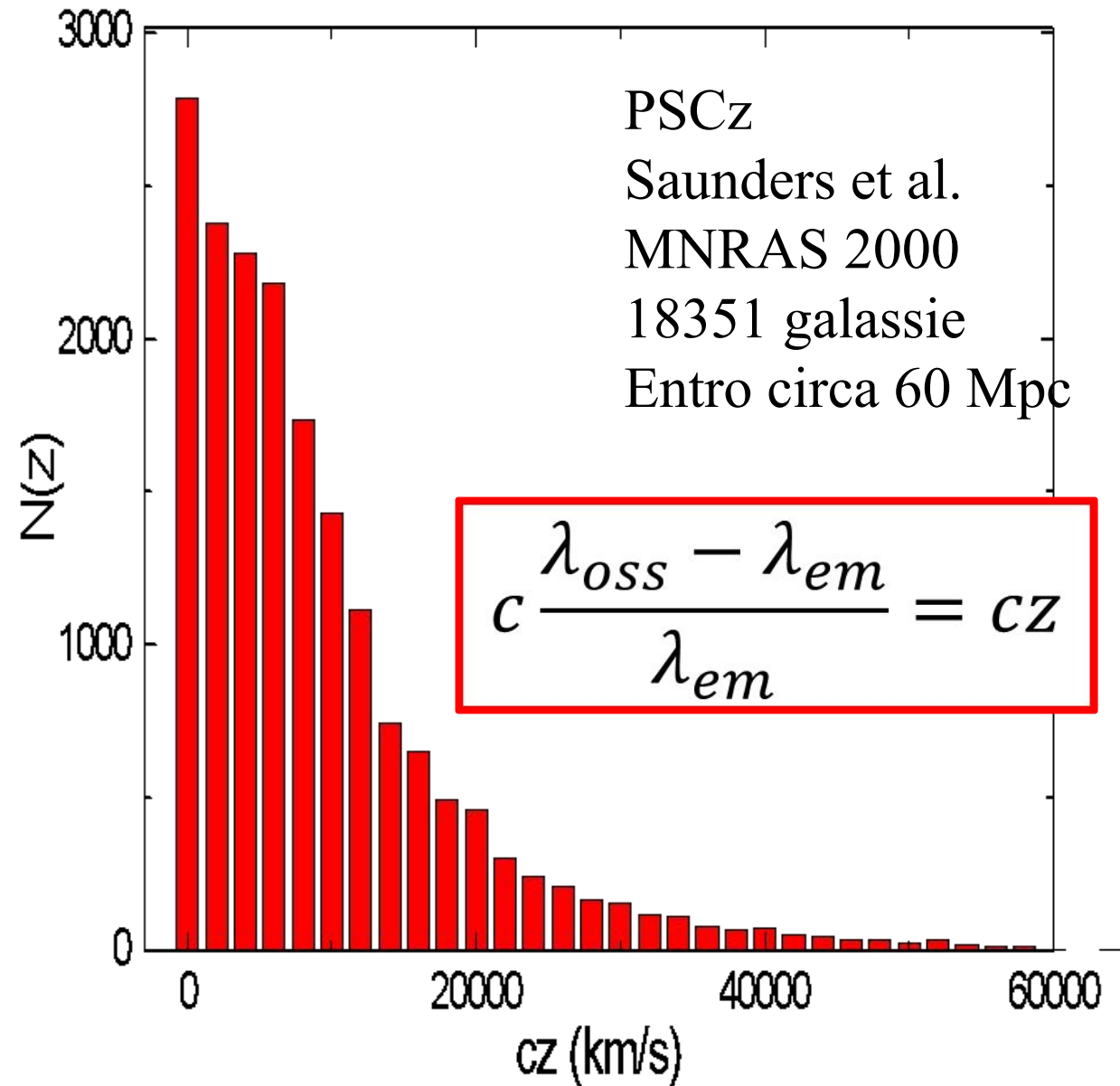
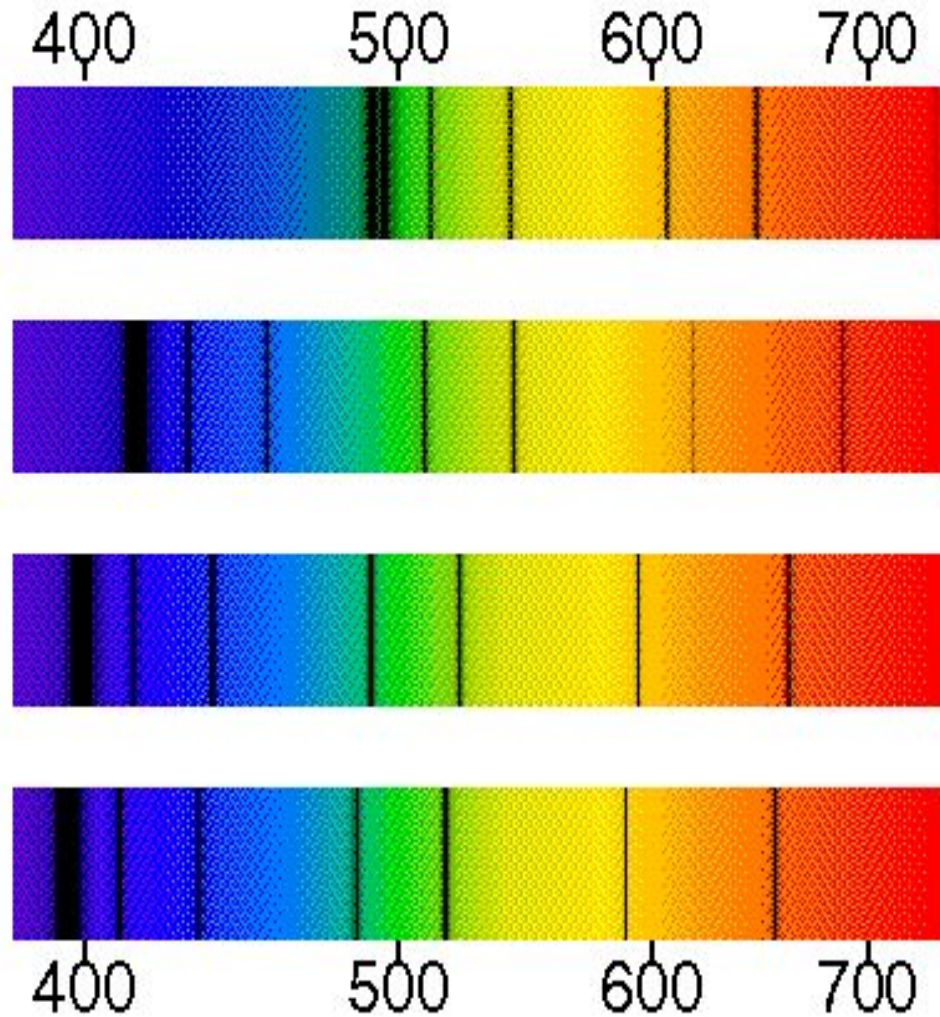








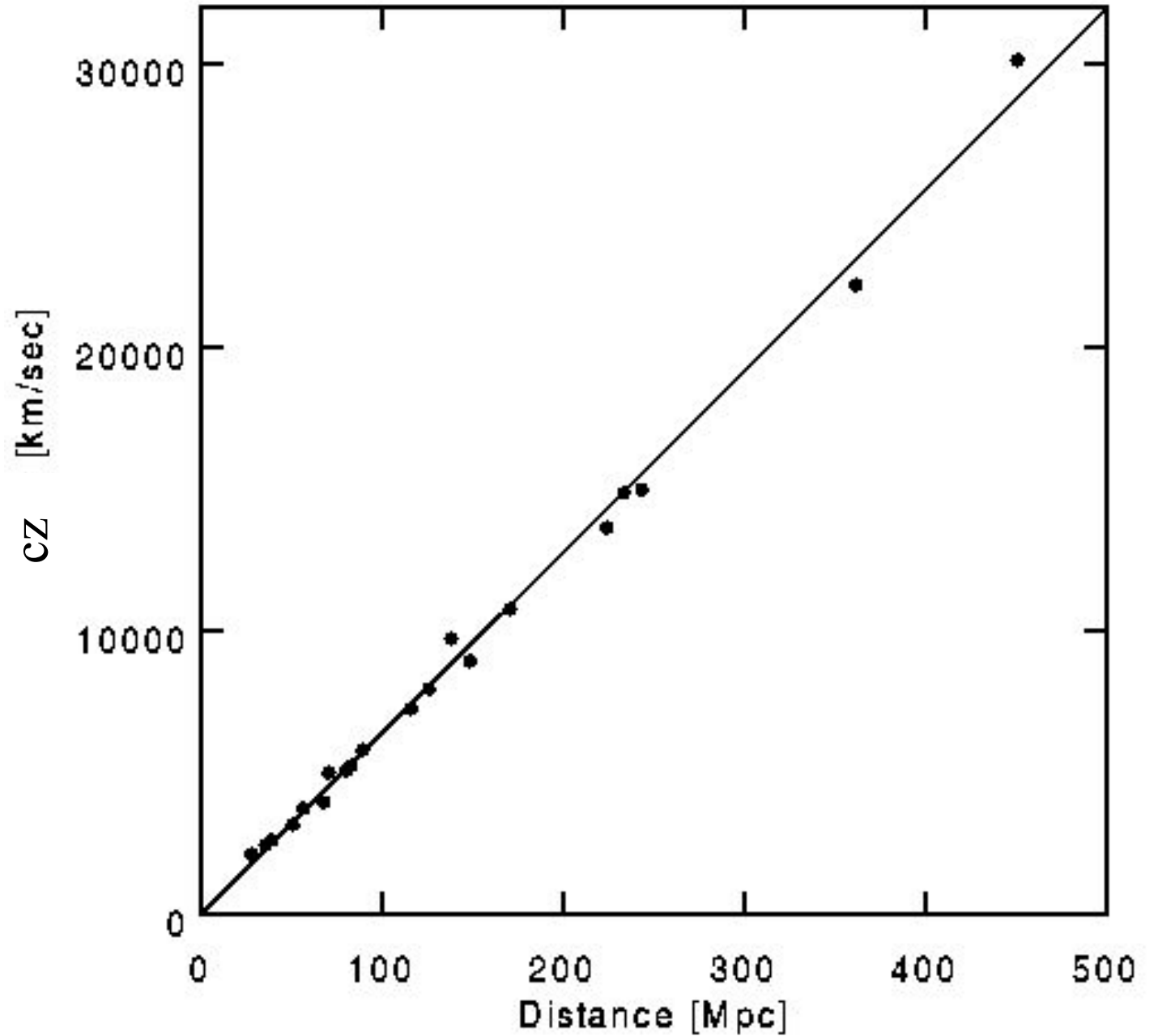
Redshift delle galassie



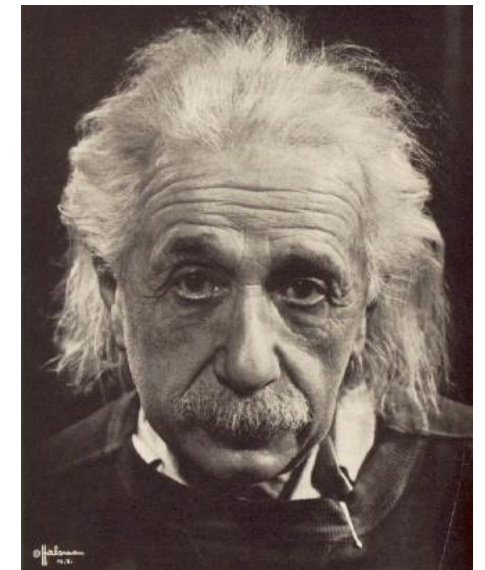
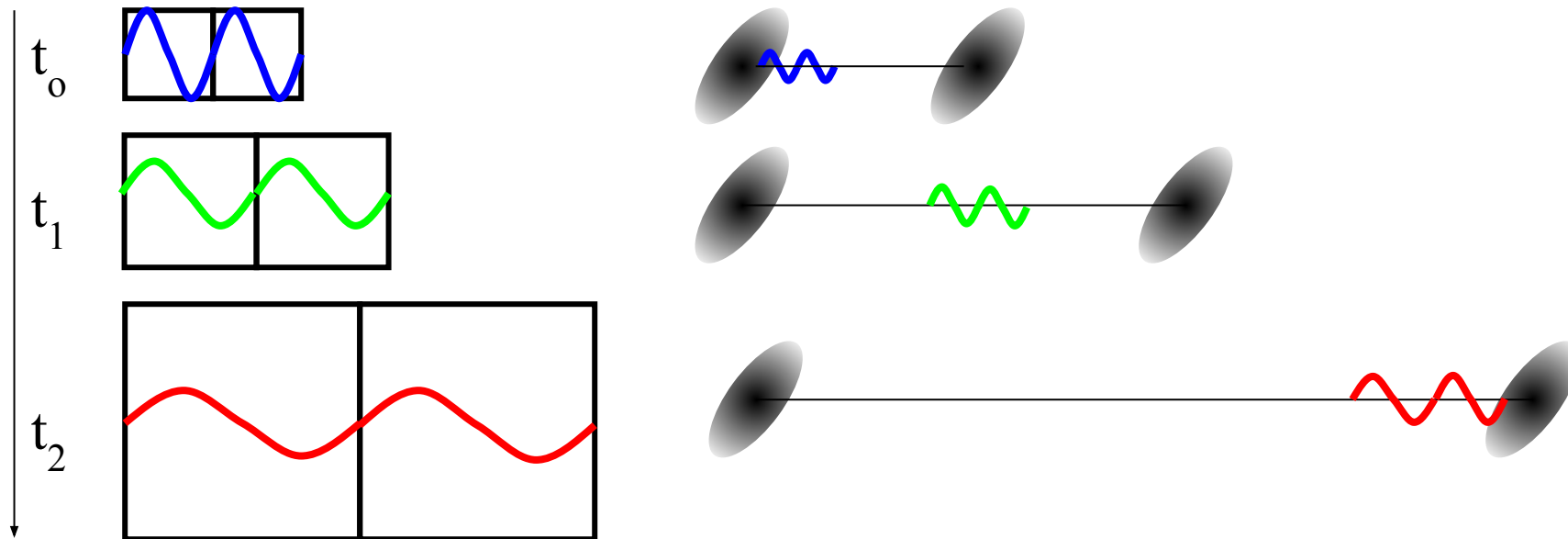
- Legge di Hubble
ottenuta tramite le
Supernovae 1a

$$cz = H_0 D$$

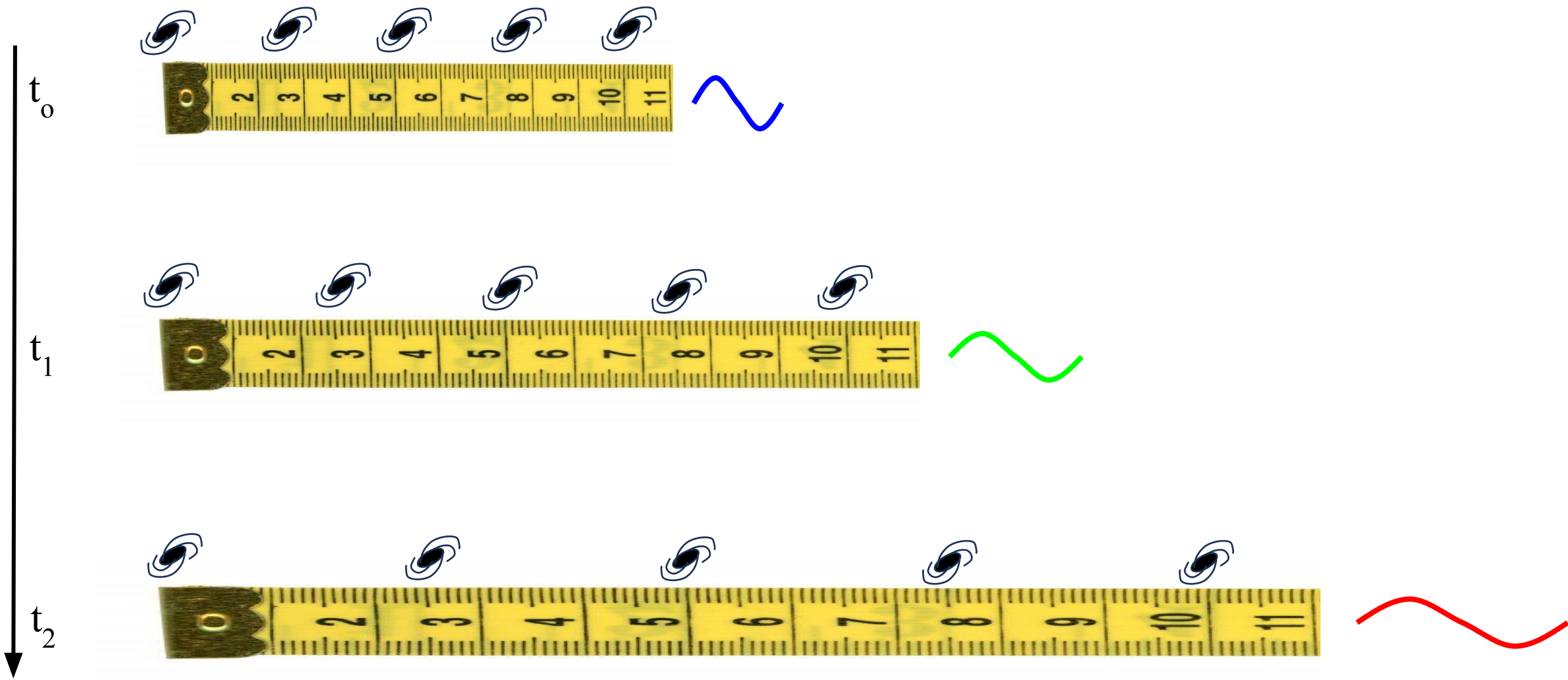
Legge di Hubble-Lemaitre



- **Secondo la relatività generale di Einstein:** in un universo in espansione, le lunghezze d'onda λ della luce 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 a noi
 - più lungo è il tempo che impiega
 - maggiore è l'espansione dell'universo tra l'emissione e la ricezione
 - più la lunghezza d'onda viene allungata (redshift e legge di Hubble-Lemaitre).

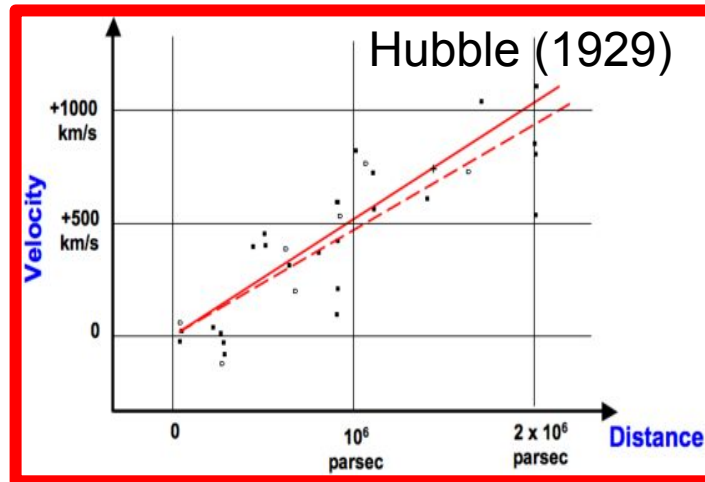
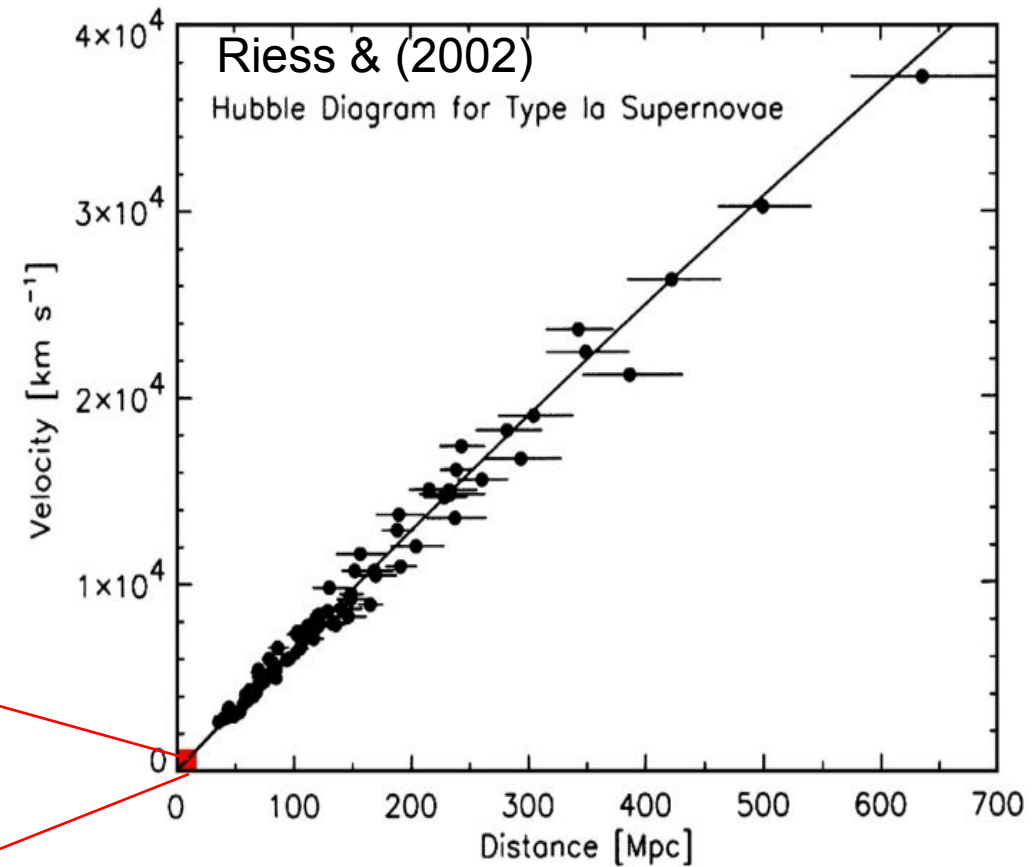


Notare che con questa interpretazione z può essere tranquillamente maggiore di 1

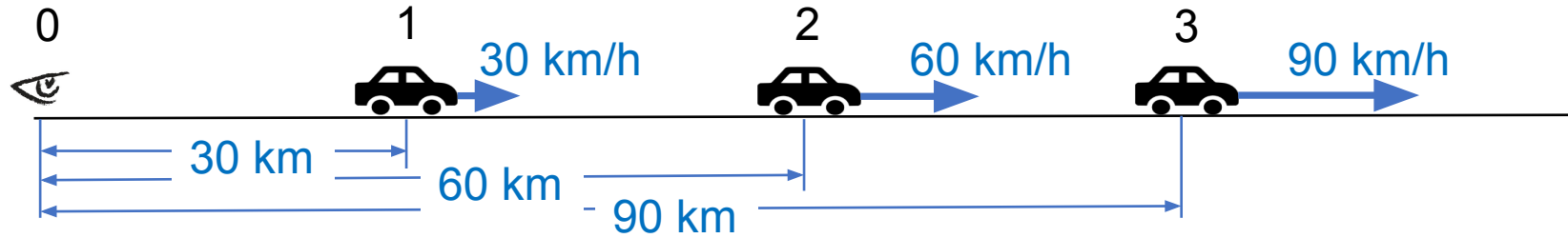


Dall'espansione: big bang ed età dell'universo

- Legge empirica di Hubble-Lemaitre
- Il *redshift* è proporzionale alla *distanza*.
- Maggiore è la distanza, maggiore è lo spostamento percentuale delle lunghezze d'onda osservate rispetto a quelle emesse.
- Oggi sappiamo che è verificata fino a distanze enormi.
- **La legge di Hubble-Lemaitre permette anche di stimare l'età dell'universo**

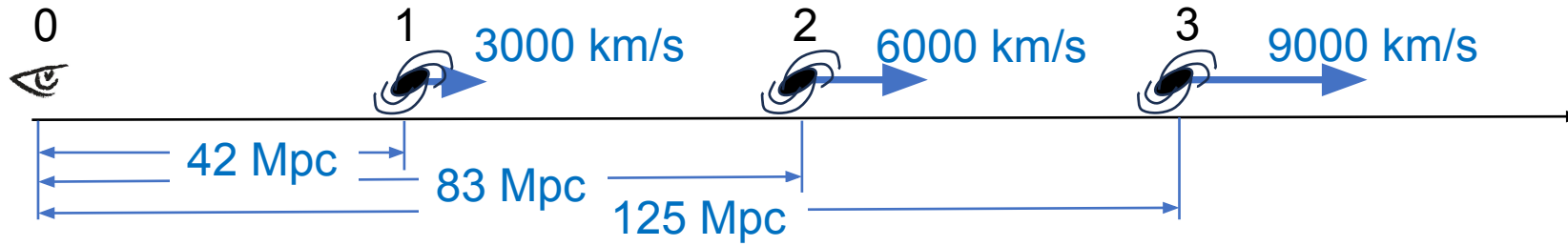


Dall'espansione: big bang ed età dell'universo



- L'auto 1 si trova a 30 km di distanza dall'osservatore 0, e si sta allontanando a 30 km/h. Se si è mossa a velocità costante, un'ora fa si trovava proprio nella posizione 0 dell'osservatore.
- L'auto 2 si trova a 60 km di distanza (distanza doppia della 1) e si sta allontanando a velocità doppia: 60 km/h. Se si è mossa a velocità costante, un'ora fa si trovava anch'essa proprio nella posizione 0 dell'osservatore.
- L'auto 3 si trova a 90 km di distanza (distanza tripla della 1) e si sta allontanando a velocità tripla: 90 km/h. Se si è mossa a velocità costante, un'ora fa anche questa si trovava proprio nella posizione 0 dell'osservatore.
- Se le velocità v sono proporzionali alle distanze D , **ad un tempo $t_0 = D/v$ precedente all'osservazione le auto si trovavano tutte nello stesso punto.**
- Se le velocità sono proporzionali alle distanze, è facile ricavare l'ora di inizio del viaggio dal rapporto tra D e v , che è costante.

- Prendiamo ora tre galassie tra quelle di cui si sa distanza e velocità (dal diagramma di Hubble-Lemaitre). Ad esempio:

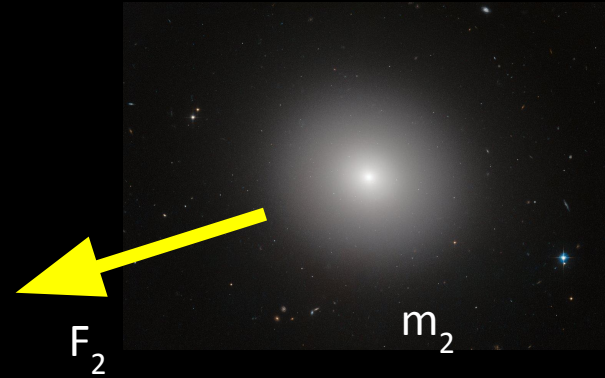
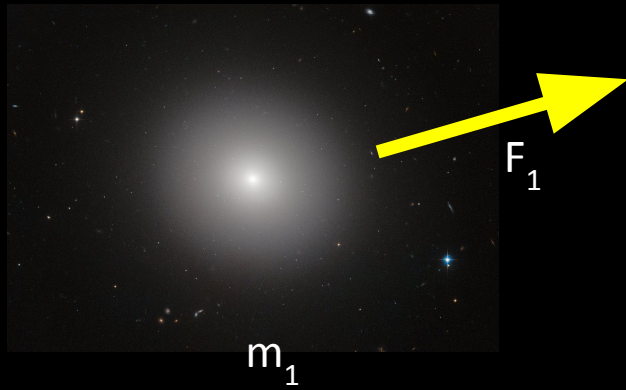


- Ad un tempo $t_0 = 14$ miliardi di anni fa le 3 galassie erano tutte nello stesso punto (!).
- Si può pensare che 14 miliardi di anni sia l'età dell'universo: a quell'epoca tutti i punti occupati oggi dalle galassie erano a distanza zero gli uni dagli altri.
- Per come lo abbiamo stimato noi, 14 miliardi di anni è il tempo passato dal momento in cui tutti i punti dell'universo hanno iniziato ad allontanarsi gli uni dagli altri. Potremmo chiamare questo evento "big bang".
- Il rapporto tra v e D è la costante di Hubble. Il suo inverso è il tempo dall'inizio.

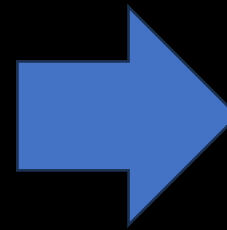
La dinamica dell'universo

- Se è vero che l'universo si sta espandendo, e che lo ha fatto a partire da uno stato iniziale a densità e temperatura altissime circa 14 miliardi di anni fa ... ci si chiede ora:
 - **Perchè** è successo tutto questo ?
 - L'espansione c'è sempre stata ?
 - E' sempre avvenuta alla stessa velocità ?
- Finora abbiamo studiato la **cinematica** dell'universo, prendendo atto dell'espansione dello spazio e del conseguente moto di allontanamento delle galassie.
- Adesso dobbiamo studiarne la **dinamica**, in modo da ricondurre il fenomeno alla sua causa.
- Il movimento (l'accelerazione \vec{a}) è legata alla forza \vec{F} applicata all'oggetto che si muove, e alla sua massa m : si può esprimere questo fatto in termini matematici, scrivendo che $\vec{F} = m\vec{a}$
- A parità di forza applicata, l'accelerazione risultante è tanto più piccola quanto più grande è la massa.

La dinamica dell'universo

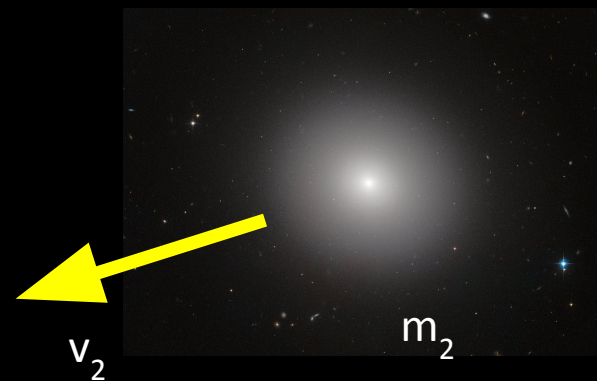
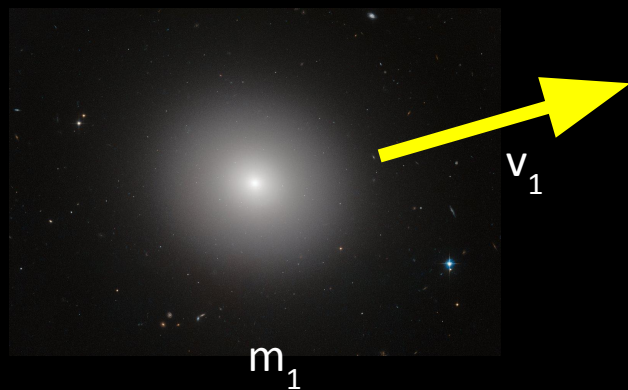


$$F_1 = G \frac{m_1 m_2}{D^2}$$
$$F_2 = -G \frac{m_1 m_2}{D^2}$$

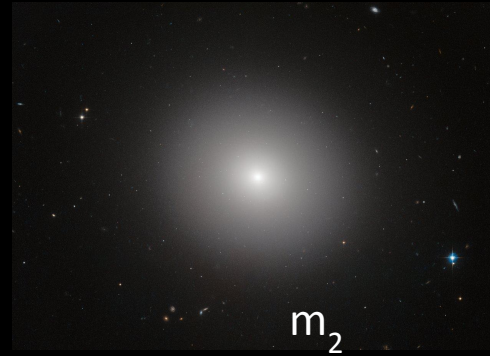
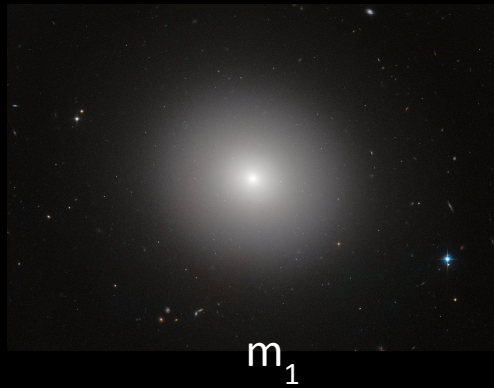


$$a_1 = \frac{F_1}{m_1} = G \frac{m_2}{D^2}$$
$$a_2 = \frac{F_2}{m_2} = -G \frac{m_1}{D^2}$$

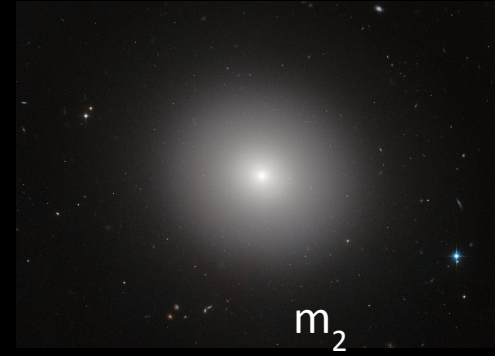
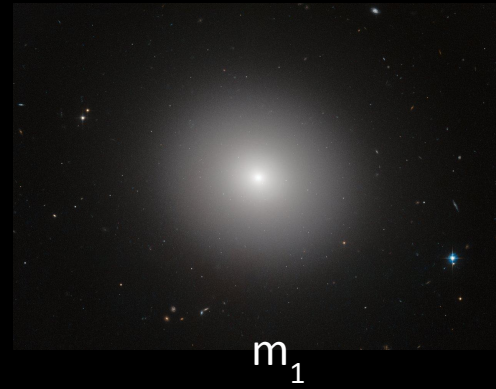
La dinamica dell'universo



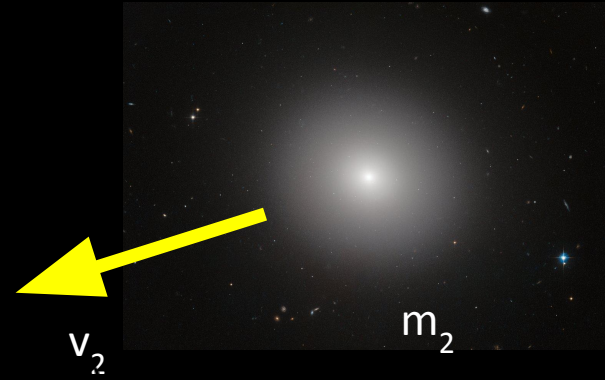
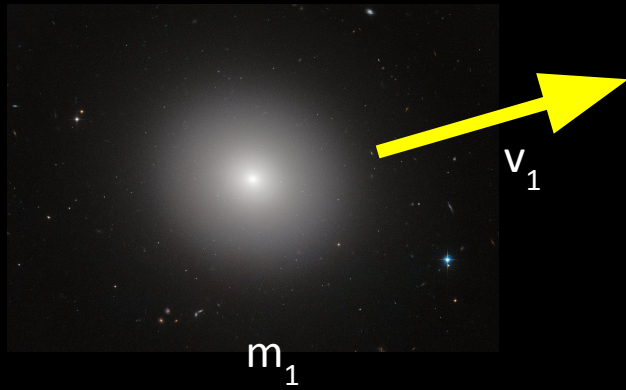
La dinamica dell'universo



La dinamica dell'universo



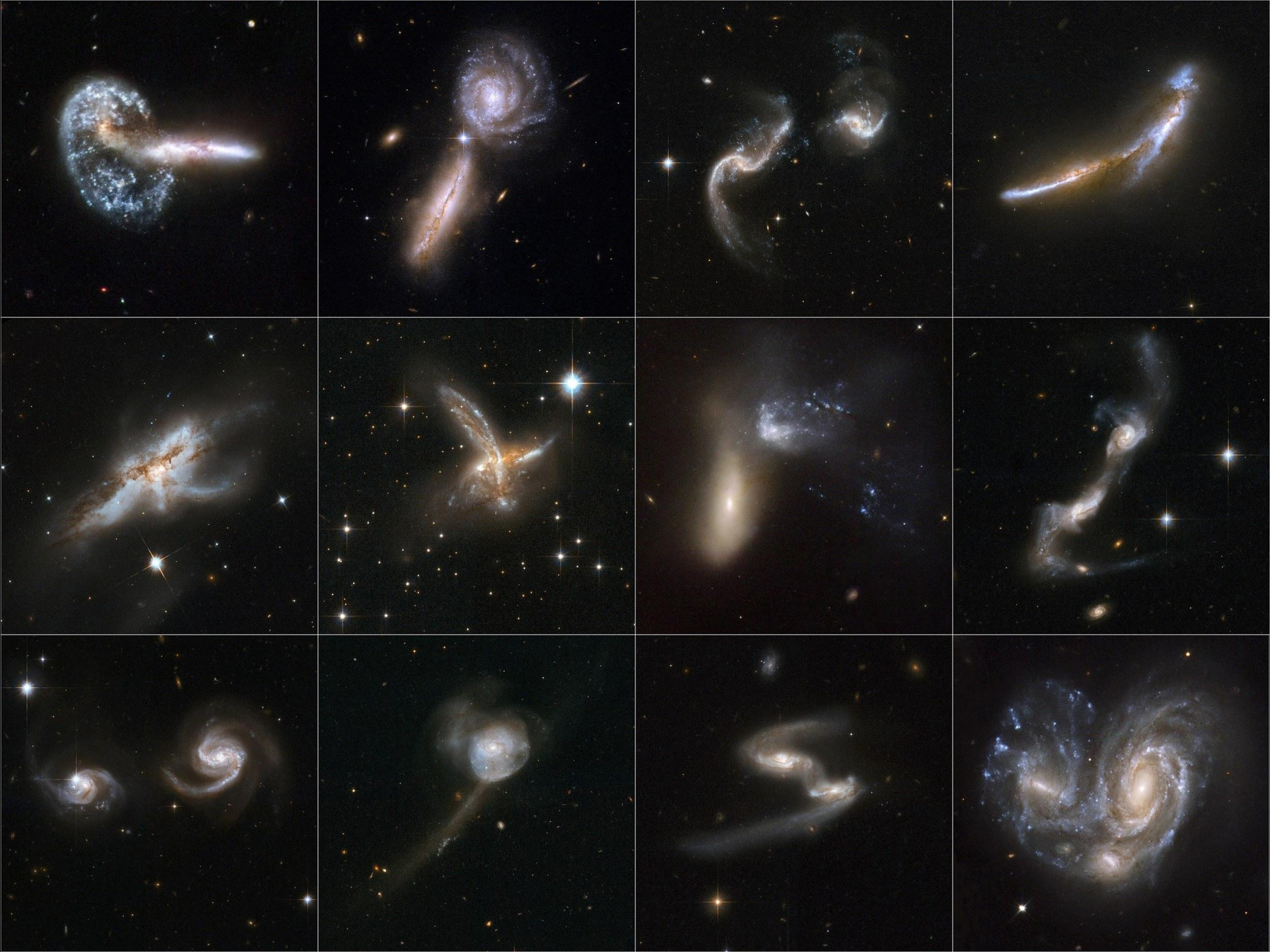
La dinamica dell'universo



$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2$$

$$U_1 = -G \frac{m_1 m_2}{D}$$

$$E = K_1 + U_1 = \text{costante}$$



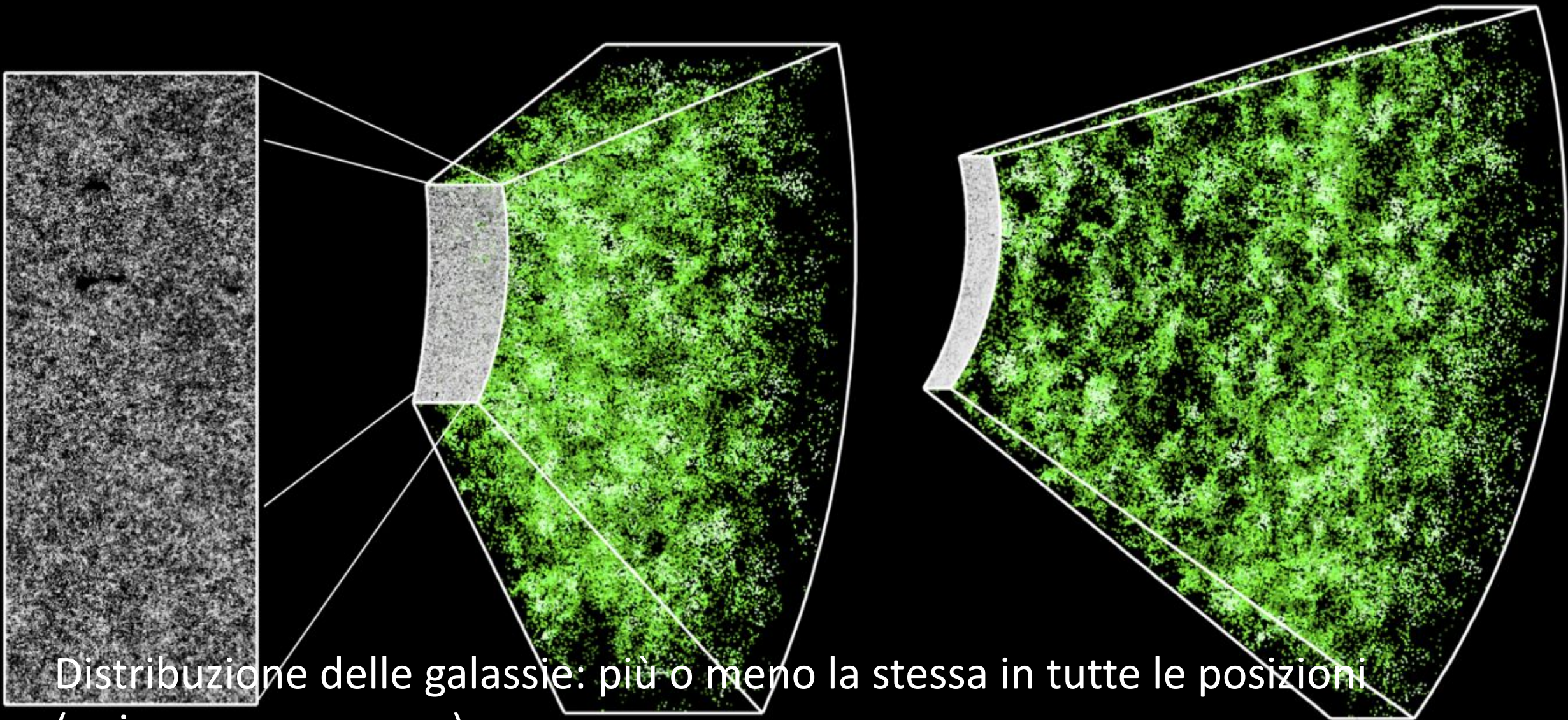
Dinamica dell'universo

- Vogliamo studiare la dinamica dell'universo.
- La prima cosa che dobbiamo fare è semplificare il problema.
- Se dovessimo seguire il movimento (energia cinetica) di ciascuna galassia a causa delle forze dovute a infinite altre (potenziale gravitazionale dovuto alle masse) non arriveremmo da nessuna parte. Sono troppe (potrebbero essere addirittura un numero infinito, in un universo infinitamente esteso).
- Come in un gas non seguiamo il movimento delle singole molecole, ma lo descriviamo tramite quantità macroscopiche (pressione, temperatura, densità) così approssimeremo l'universo come un fluido omogeneo e isotropo: stessa densità di masse ovunque.
- Ci sono buoni motivi osservativi che ci permettono di farlo.





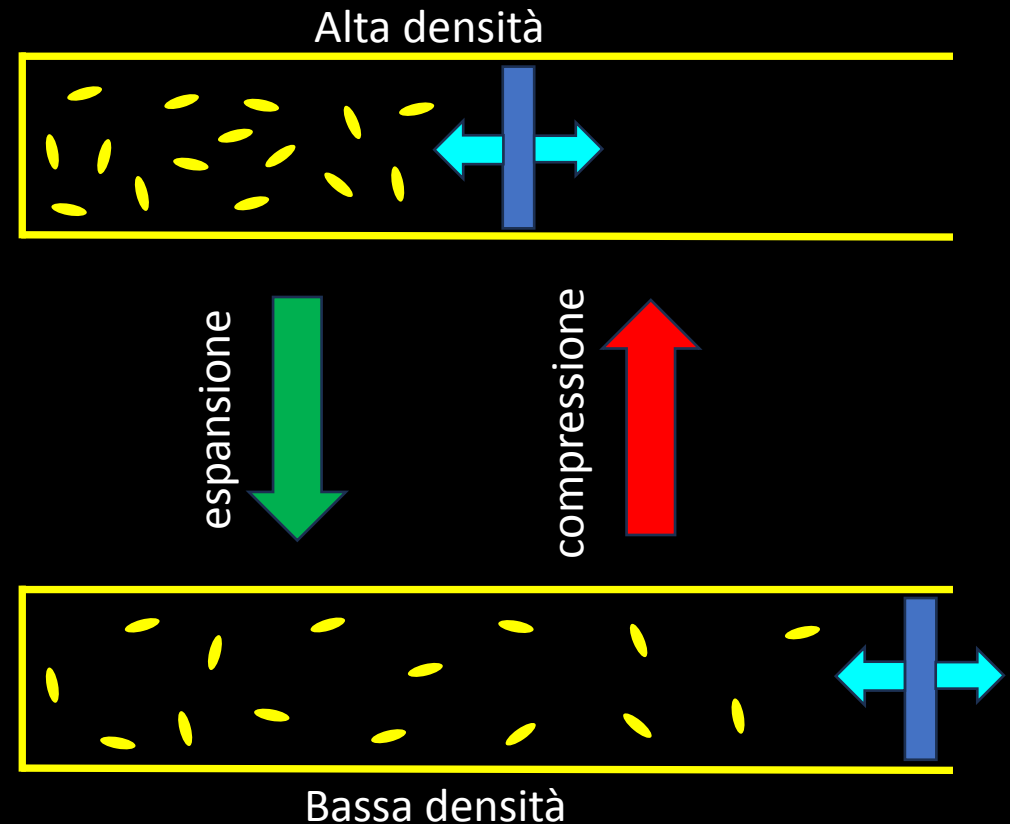
Distribuzione delle galassie: più o meno la stessa in tutte le direzioni
(universo isotropo)



Distribuzione delle galassie: più o meno la stessa in tutte le posizioni
(universo omogeneo)

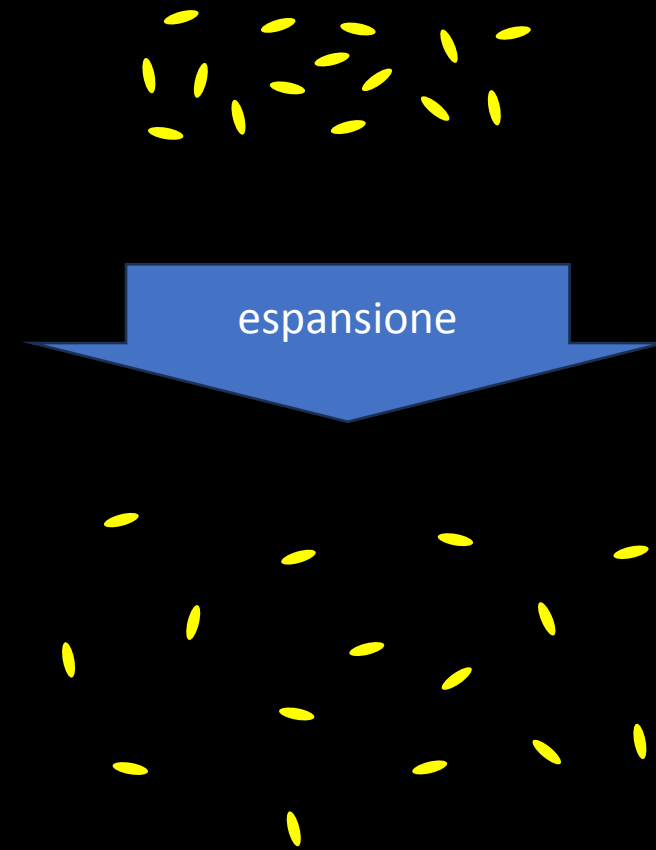
Dinamica dell'universo

- Possiamo quindi semplificare la nostra trattazione assumendo che l'universo sia un fluido *isotropo e omogeneo a grandi scale* (principio cosmologico).
- Questo permette di non preoccuparci di calcolare il movimento di ciascuna galassia, ma di preoccuparci *solo di come cambia la distanza media tra le galassie*, cioè come cambia la *densità* del fluido universo.
- Quando le galassie in media si allontanano (universo in espansione) la densità diminuisce (come la densità di un gas che si trova in un pistone che si espande). E' quello che il fluido universo sta facendo adesso (legge di Hubble-Lemaitre).
- Quando le galassie in media si avvicinano la densità del fluido universo aumenta (come la densità di un gas che si trova in un pistone che si comprime).



Dinamica dell'universo

- In passato l'universo si è espanso o si è contratto? E in futuro continuerà ad espandersi o si fermerà e si contrarrà?
- La risposta è fornita dalla legge di *conservazione dell'energia*, a patto di utilizzarla correttamente.
- Abbiamo l'energia cinetica del movimento di espansione delle masse del fluido, e l'energia potenziale gravitazionale dovuta alla forza di gravitazione universale attrattiva di tutte le masse del fluido.
- La somma delle due deve rimanere costante, e pari al valore che ha all'inizio del processo.



Densità alta,
distanze piccole:
Energia potenziale
grande e negativa;
velocità alte,
energia cinetica
grande e positiva

Densità più bassa,
distanze maggiori:
Energia potenziale
meno negativa;
velocità più basse,
energia cinetica
positiva ma minore

Per mantenere l'energia complessiva costante durante l'espansione, la velocità di espansione dovrebbe diminuire nel tempo,.. ma dobbiamo fare attenzione....

Dinamica dell'universo

- Per le due galassie di esempio:
 - ci aspettiamo che l'avvicinamento sia diverso se partono da ferme o se partono con una velocità (spinta) iniziale, e in questo secondo caso dobbiamo anche sapere in che direzione è la spinta iniziale. (energia cinetica iniziale)
 - ci aspettiamo che l'avvicinamento sia diverso se partono molto lontane o se sono vicine già alla partenza. (energia potenziale iniziale)
- Anche per l'universo ci dovremo preoccupare delle condizioni iniziali, cioè della quantità di energia totale iniziale da mantenere costante.
- Dovremo inoltre preoccuparci del fatto che secondo la relatività generale di Einstein *tutte* le forme di *massa-energia*, non solo la massa, contribuiscono al fenomeno.
- Tutto questo ci porta alla necessità di *censire* preliminarmente *tutte* le forme di massa-energia presenti nell'universo, in modo da sapere qual'è l'energia totale presente.

Materia normale (barionica)

- La materia di questo tipo interagisce con la luce (interazione elettromagnetica)
- Possiamo valutare quanta è perché emette, assorbe o diffonde la luce e le onde elettromagnetiche.
- Gli esseri viventi, i pianeti, le stelle, la materia interstellare, ecc. sono tutti fatti di atomi, cioè di materia barionica.
- Misurando la luminosità di tutta la materia luminosa che conosciamo nell' universo , riusciamo a stimare la massa presente per unità di volume, cioè la densità.
- Stima più recente:
 - $\rho_B = (4.4 \pm 0.1) \times 10^{-28} kg/m^3$
 - $\rho_B = 0.00000000000000000000000000000044 kg/m^3$
- Per confronto $\rho_{H_2O} = 1000 kg/m^3$



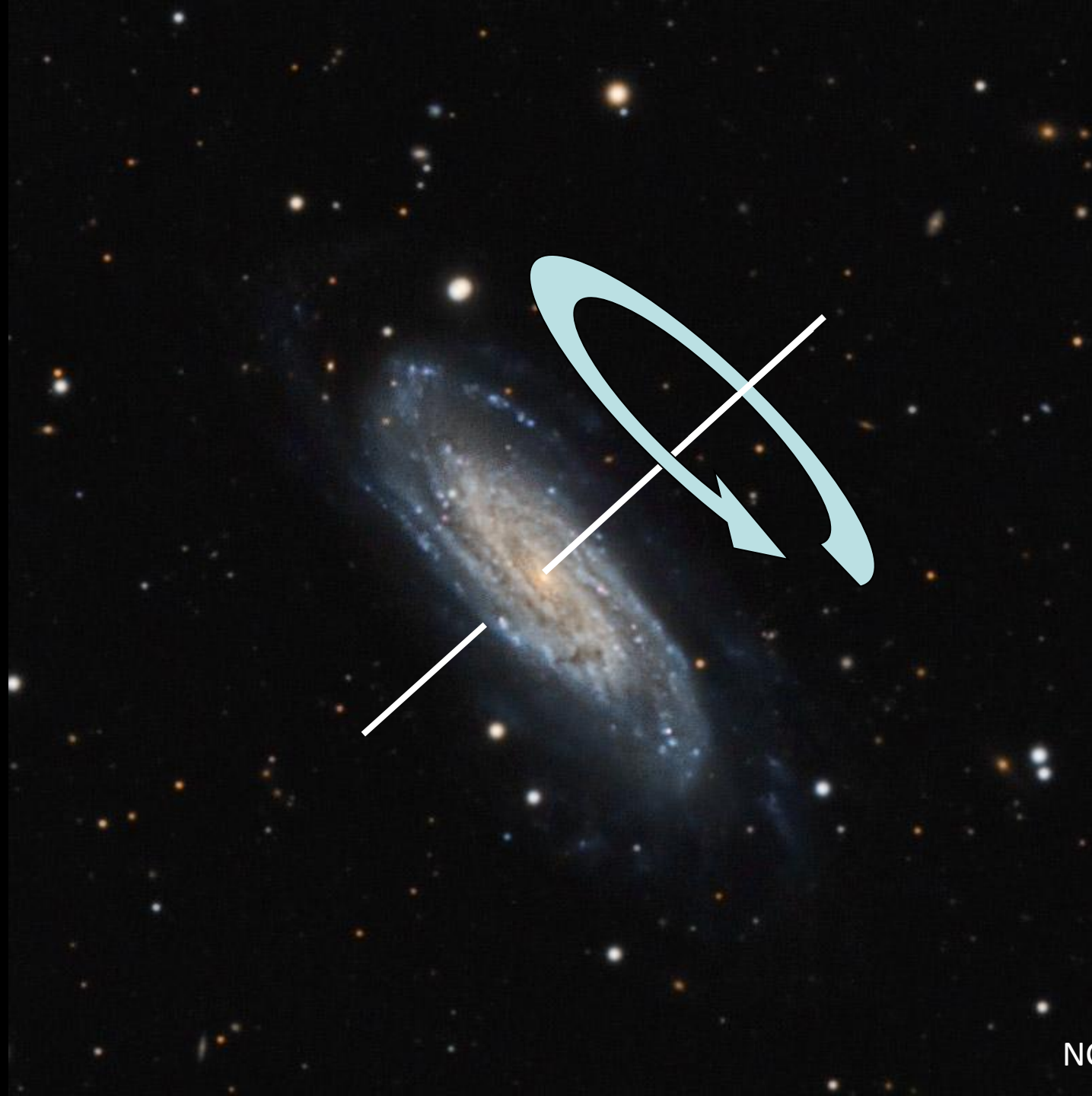
Materia oscura (non barionica)

- Questo tipo di materia non interagisce elettromagneticamente, quindi non possiamo osservarla tramite luce e onde elettromagnetiche.
- Esempio: i neutrini
- Possiamo accorgerci della sua presenza nell'universo solo tramite la sua interazione gravitazionale, che è molto più debole di quella elettromagnetica.
- La *dinamica* delle stelle nelle galassie e negli ammassi di galassie non può essere spiegata se non si assume che siano presenti *grandi quantità di materia oscura*, addirittura più della materia normale.
- Evidenze ulteriori provengono dai fenomeni di lente gravitazionale.

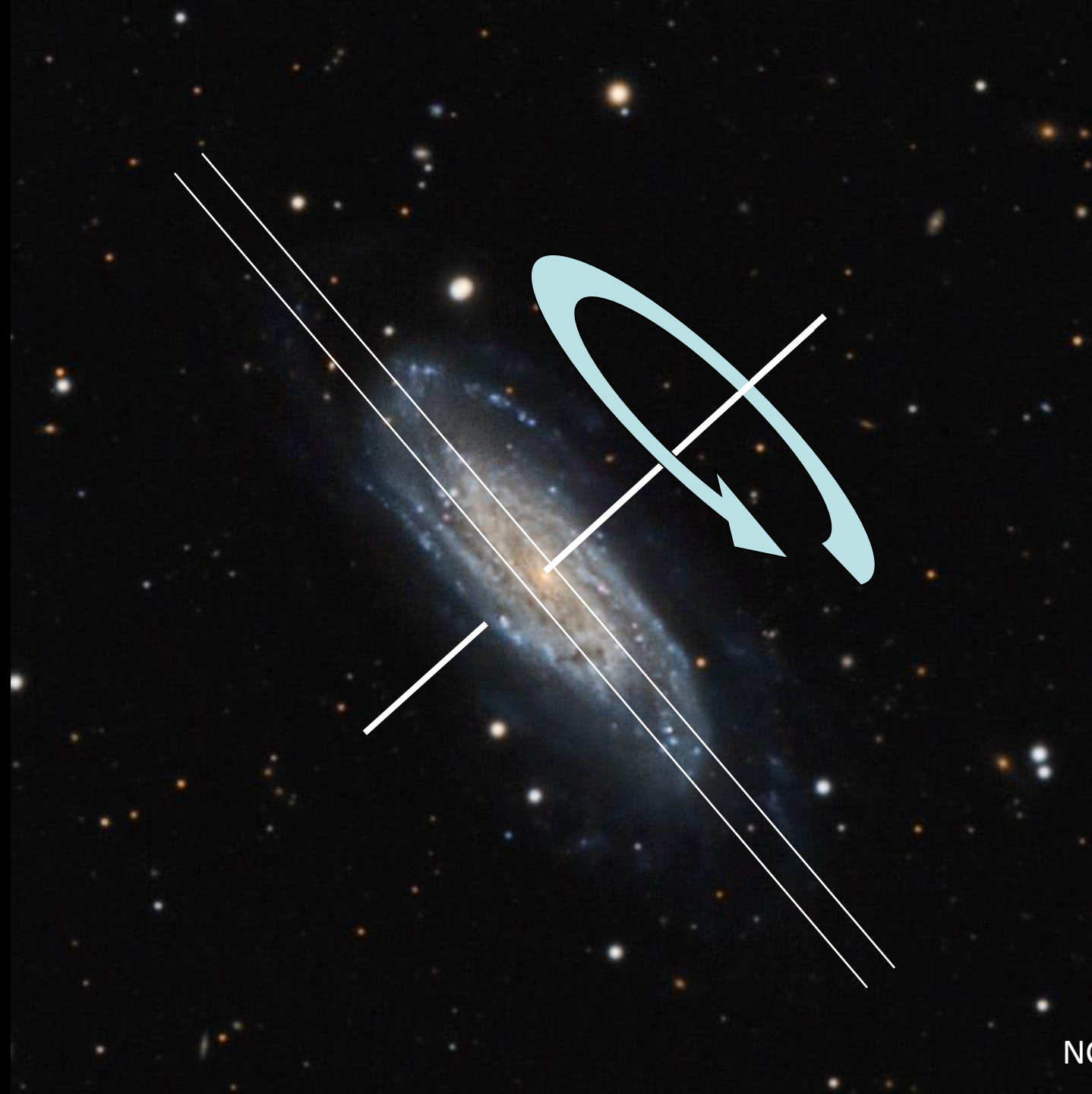




NGC3198

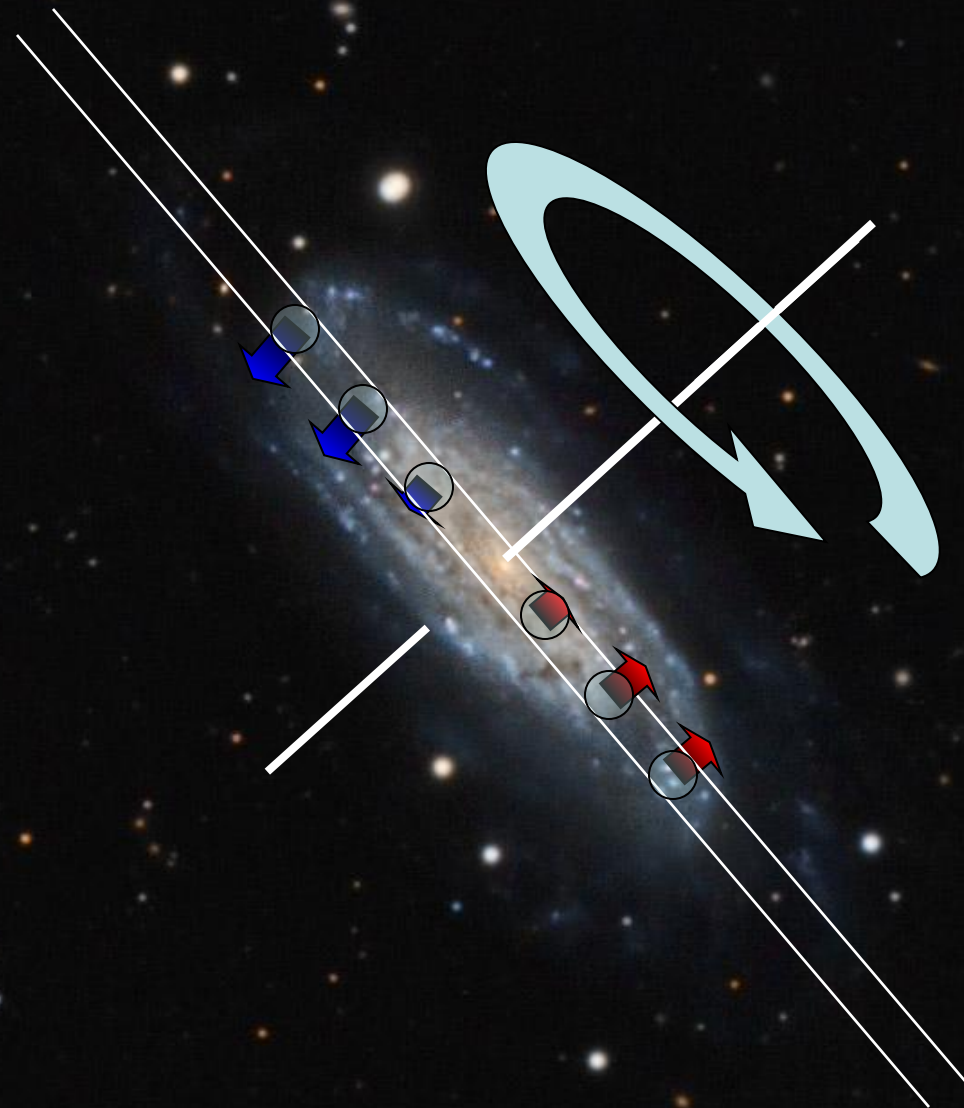


NGC3198

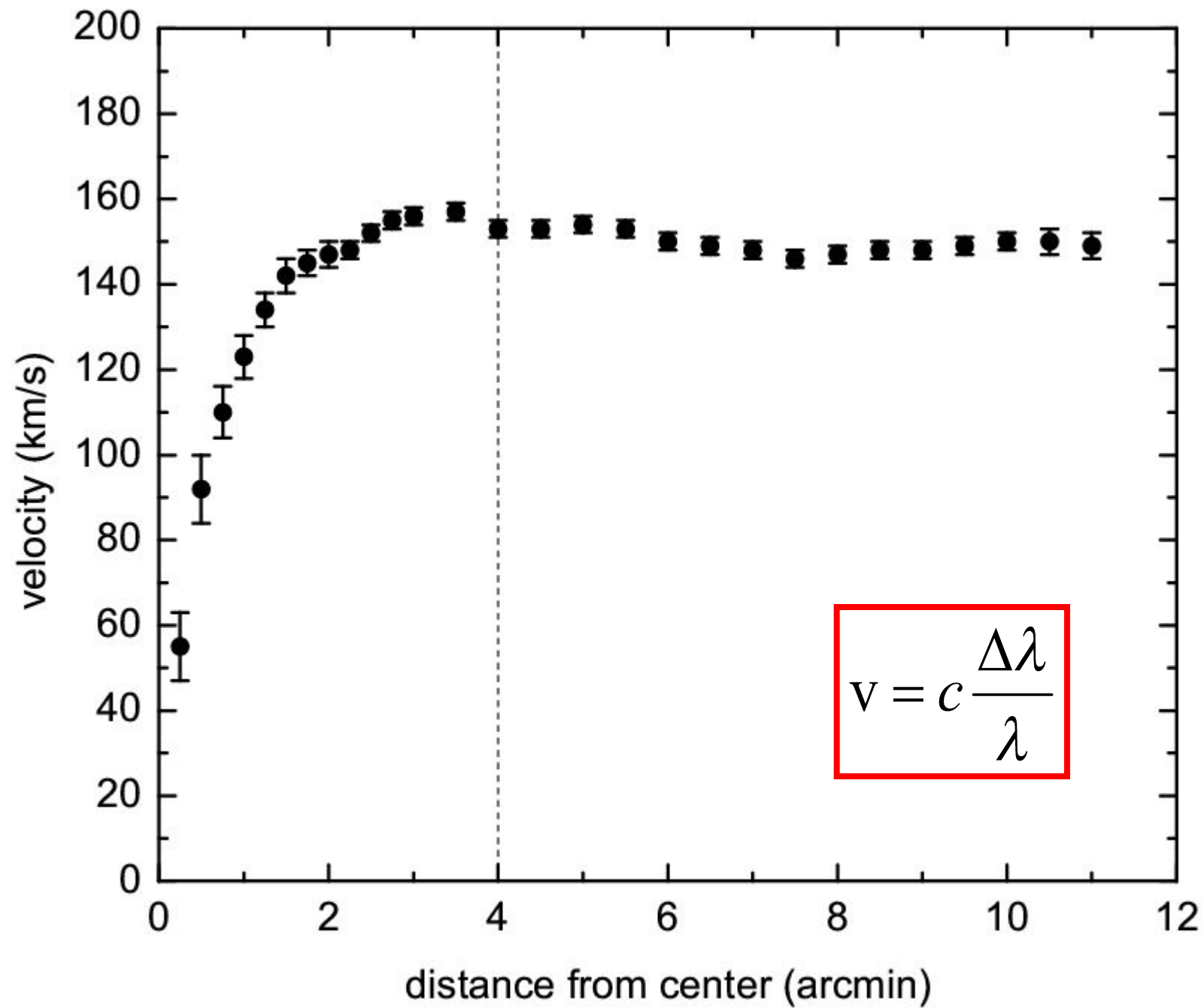


NGC3198

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



NGC3198



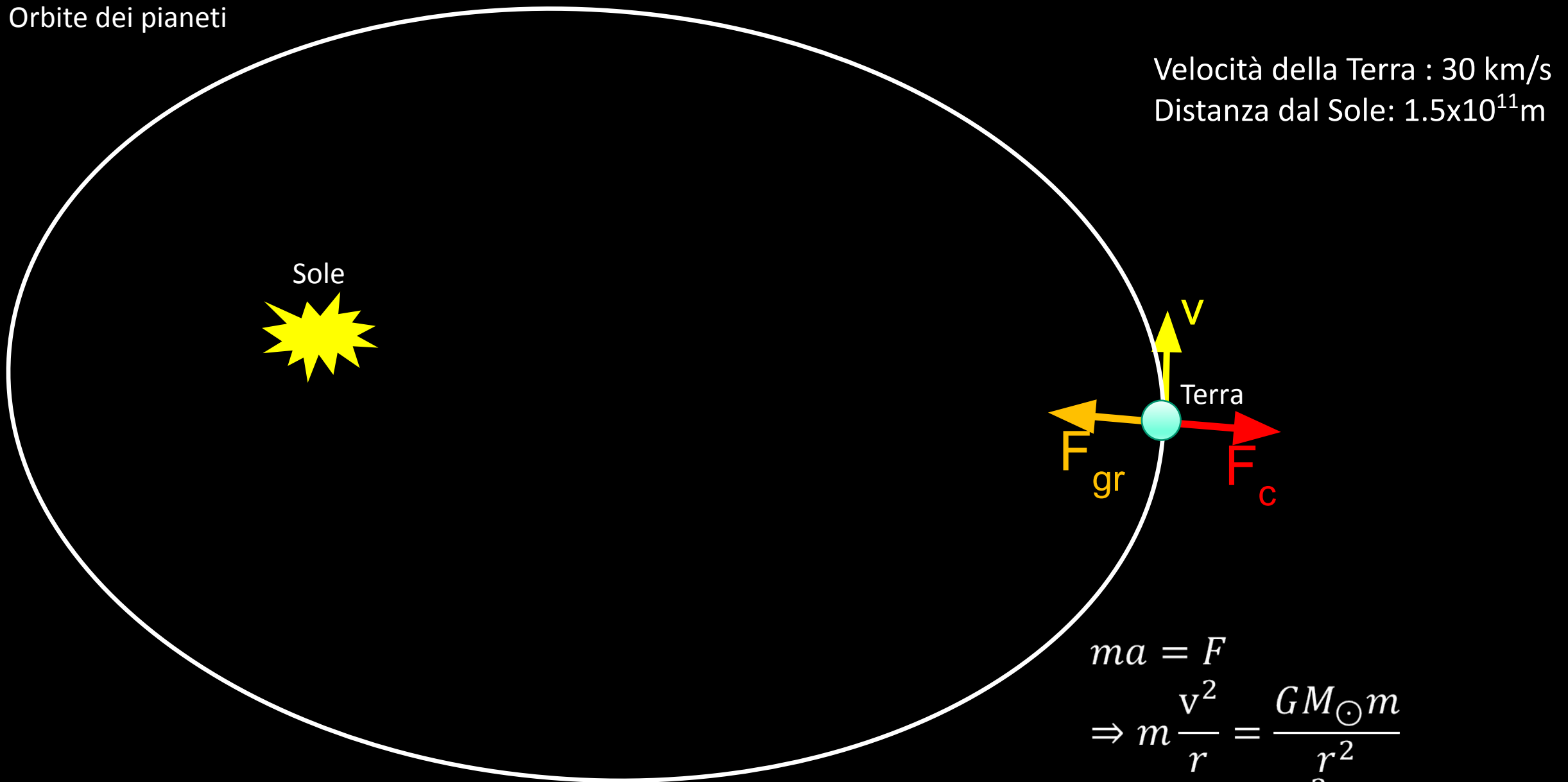


v

F_v

F_c

Orbite dei pianeti

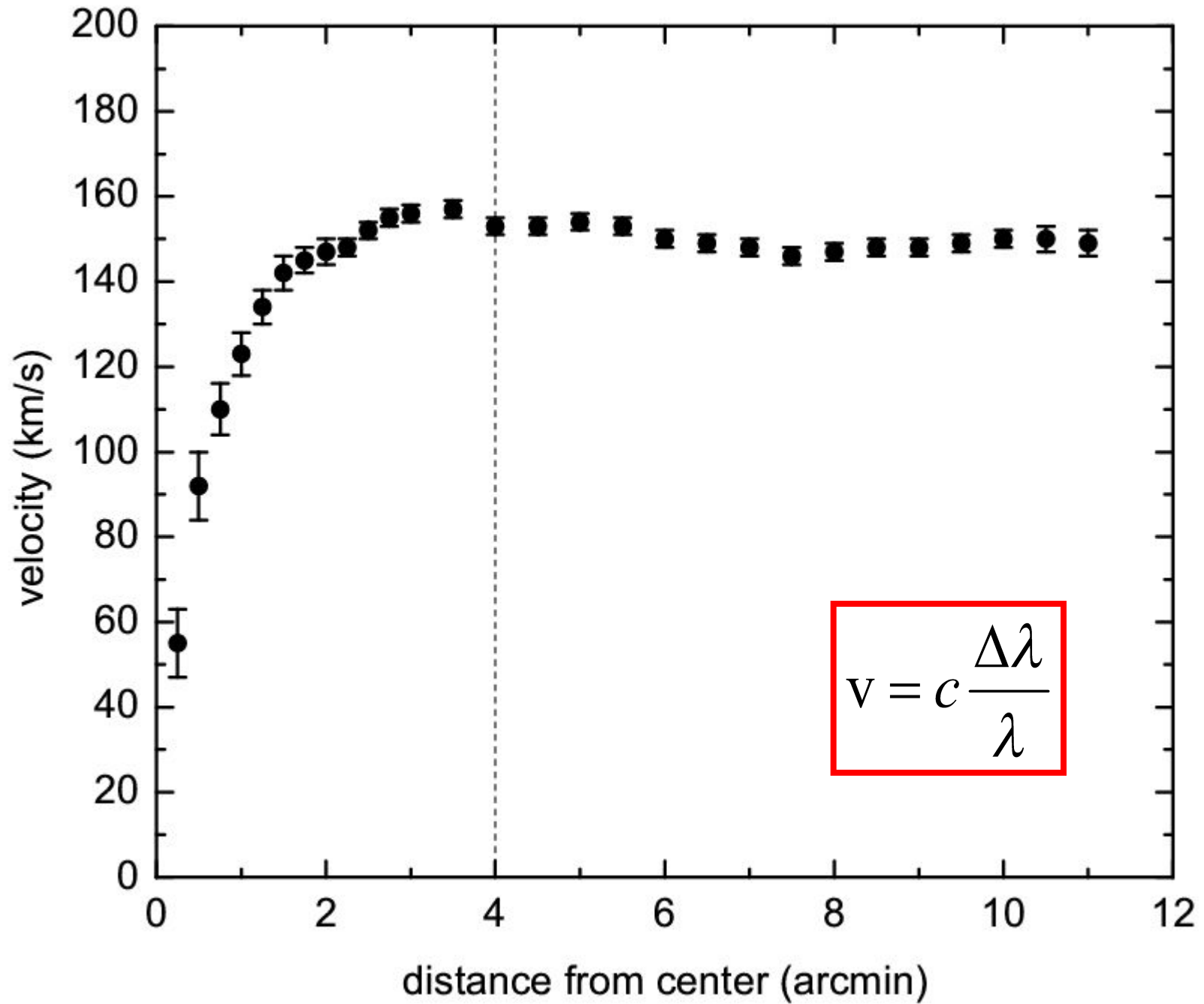


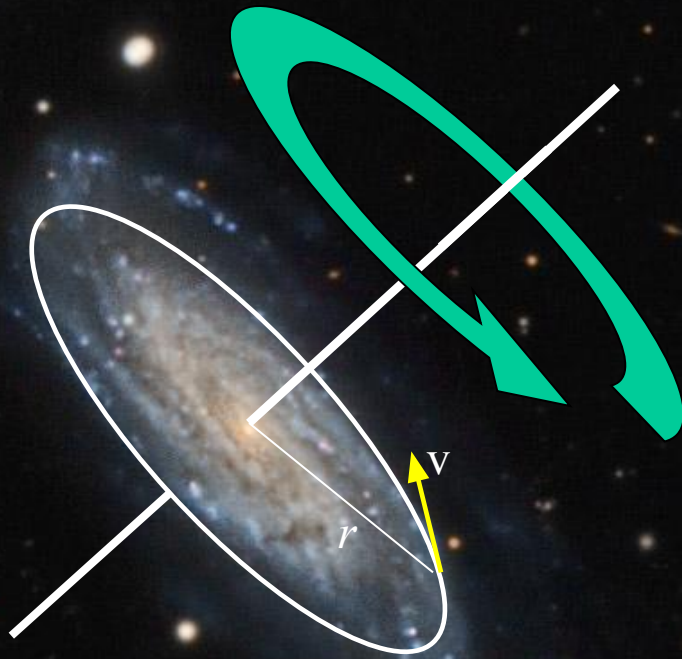
Velocità della Terra : 30 km/s
Distanza dal Sole: $1.5 \times 10^{11} \text{m}$



$$\begin{aligned} ma &= F \\ \Rightarrow m \frac{v^2}{r} &= \frac{GM_{\odot}m}{r^2} \\ \Rightarrow M_{\odot} &= \frac{rv^2}{G} = 2 \times 10^{30} \text{kg} \end{aligned}$$

Curva di rotazione
di una galassia a spirale





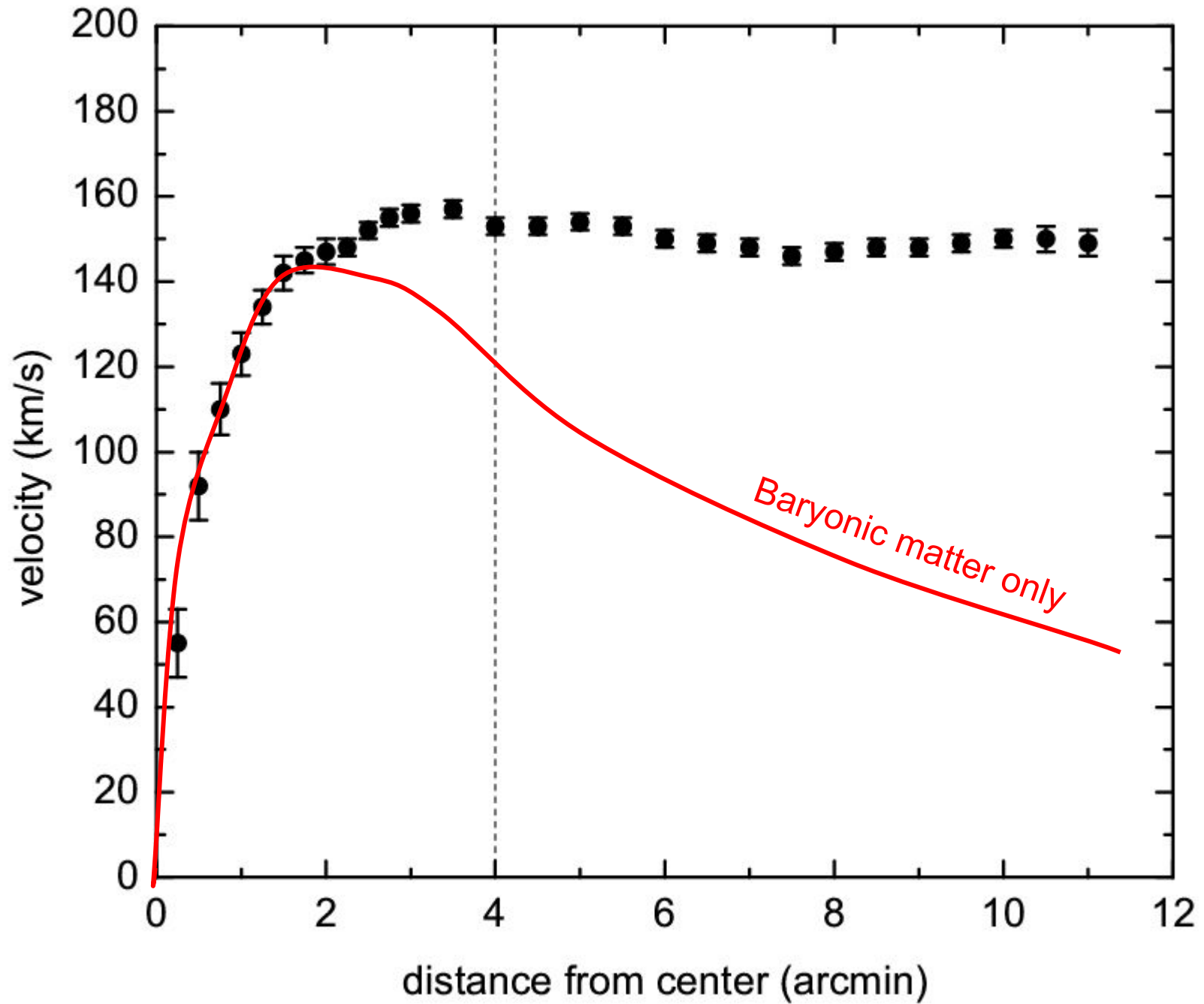
Velocità di una stella periferica v : circa 150 km/s
Distanza dal centro r : circa 10^{20} m
Quanta forza (massa) serve per mantenerla su questa orbita con questa velocità ?

$$M = \frac{rv^2}{G} = 3 \times 10^{40} kg$$

La massa delle stelle non è sufficiente !
Nemmeno se ci aggiungiamo la materia interstellare.

Serve materia che non interagisce elettromagneticamente, che chiamiamo materia oscura.

Curva di rotazione
di una galassia a spirale



Curve di rotazione come la precedente sono state misurate per migliaia di galassie a spirale, compresa la nostra, e si assomigliano tutte. Si tratta quindi di un fenomeno generale.



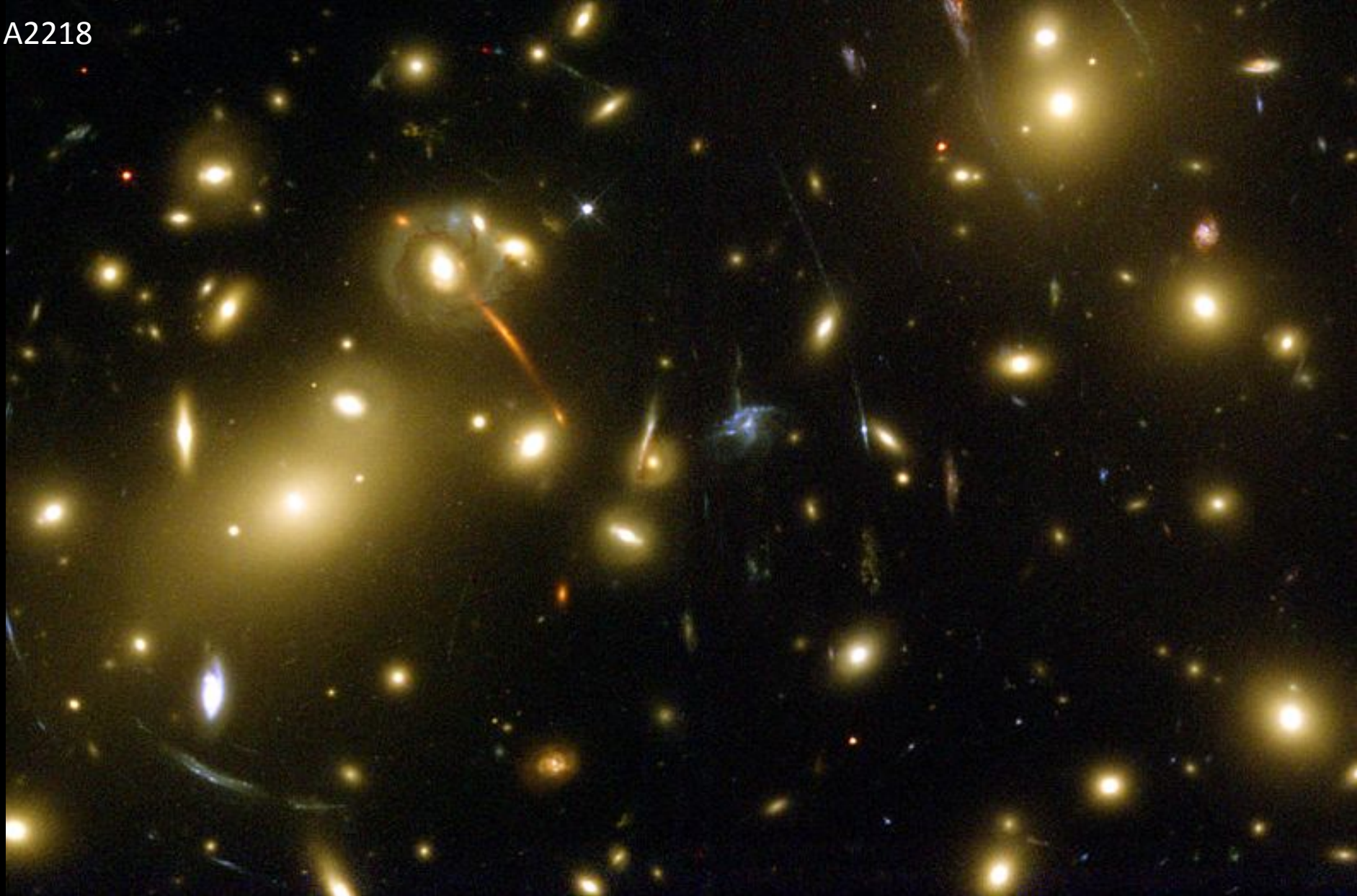
L'ipotesi più accreditata oggi è che ciascuna galassia sia immersa in un alone di **materia oscura**, materia che ha massa ma non interagisce con la luce (non emette né assorbe fotoni)

Alle stesse conclusioni, che invocano la presenza di materia oscura, si arriva studiando i movimenti delle galassie negli ammassi di galassie: Troppo veloci per essere spiegati dalla sola materia ordinaria.

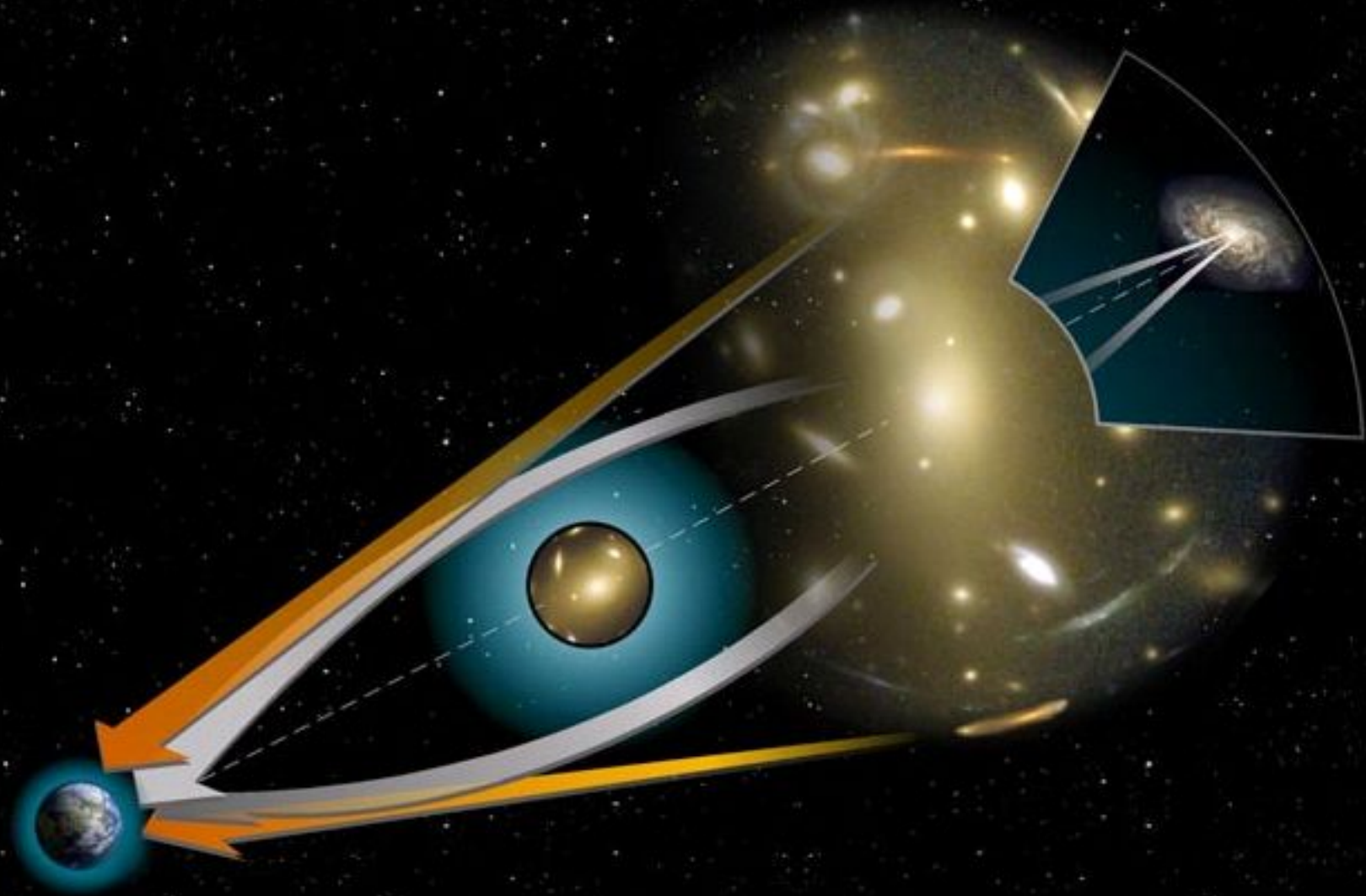


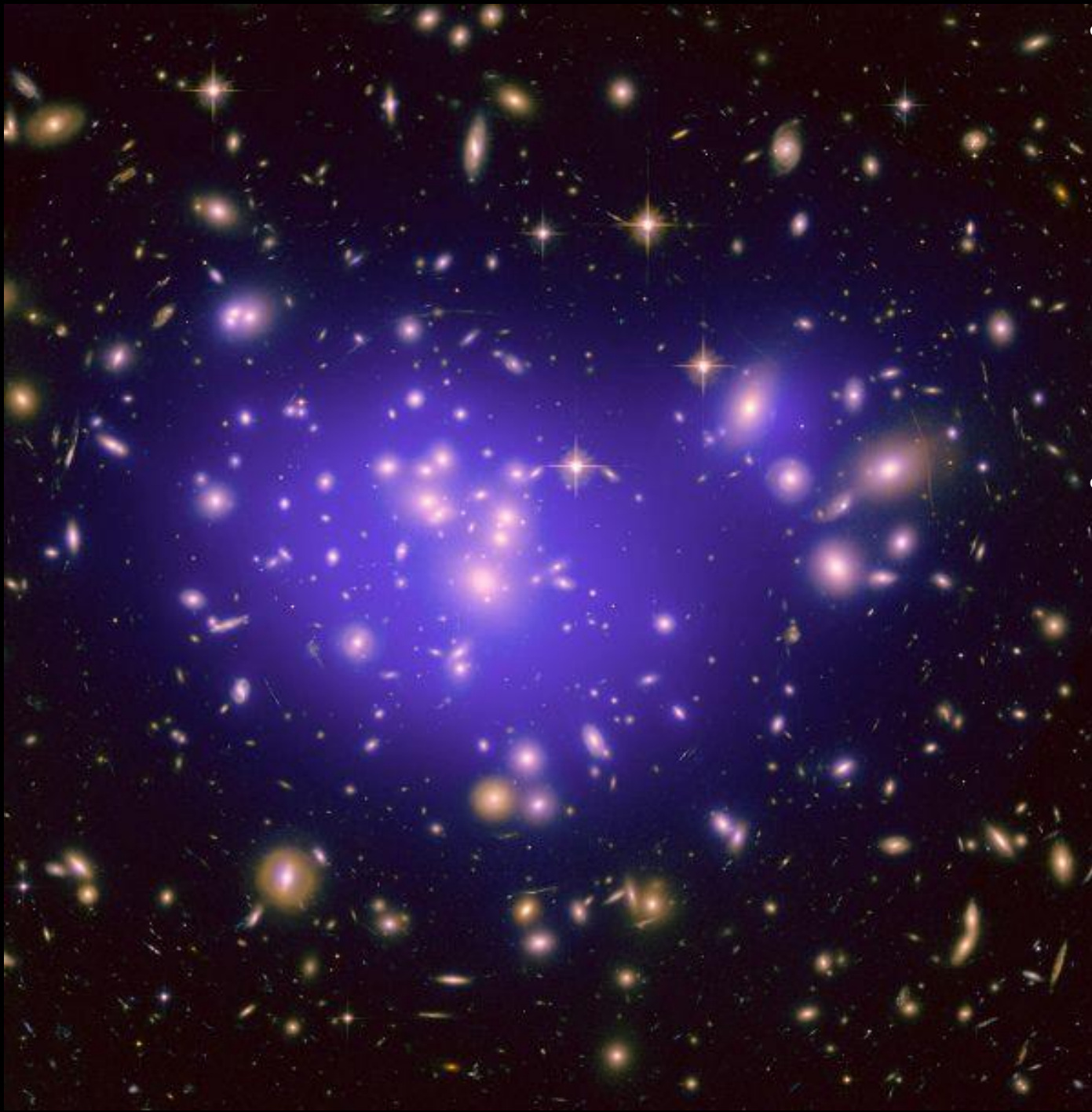
Coma

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)



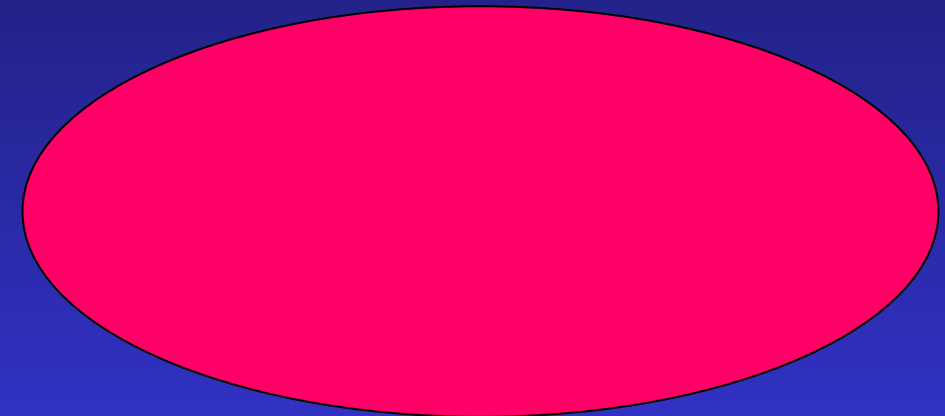
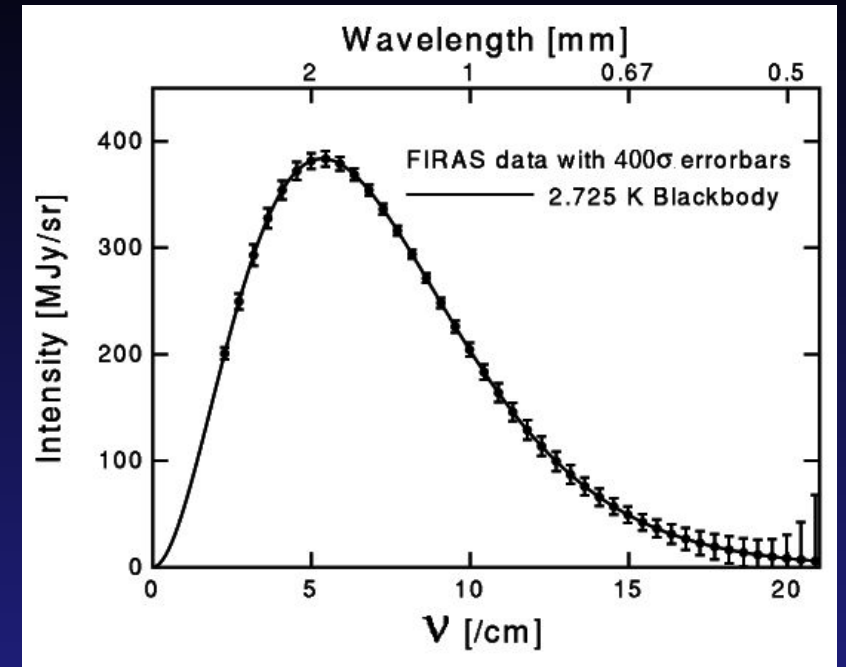


- Il fatto che negli ammassi di galassie ci sia molta più massa di quella delle sole stelle è confermato anche dall'emissione di raggi X negli ammassi.
- A causa della grande quantità di materia oscura, il gas dell'ammasso cade verso le regioni centrali riscaldandosi moltissimo (fino a 10 milioni di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

$$\rho_{NB} \cong 2.2 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

massa-energia sotto forma di radiazione

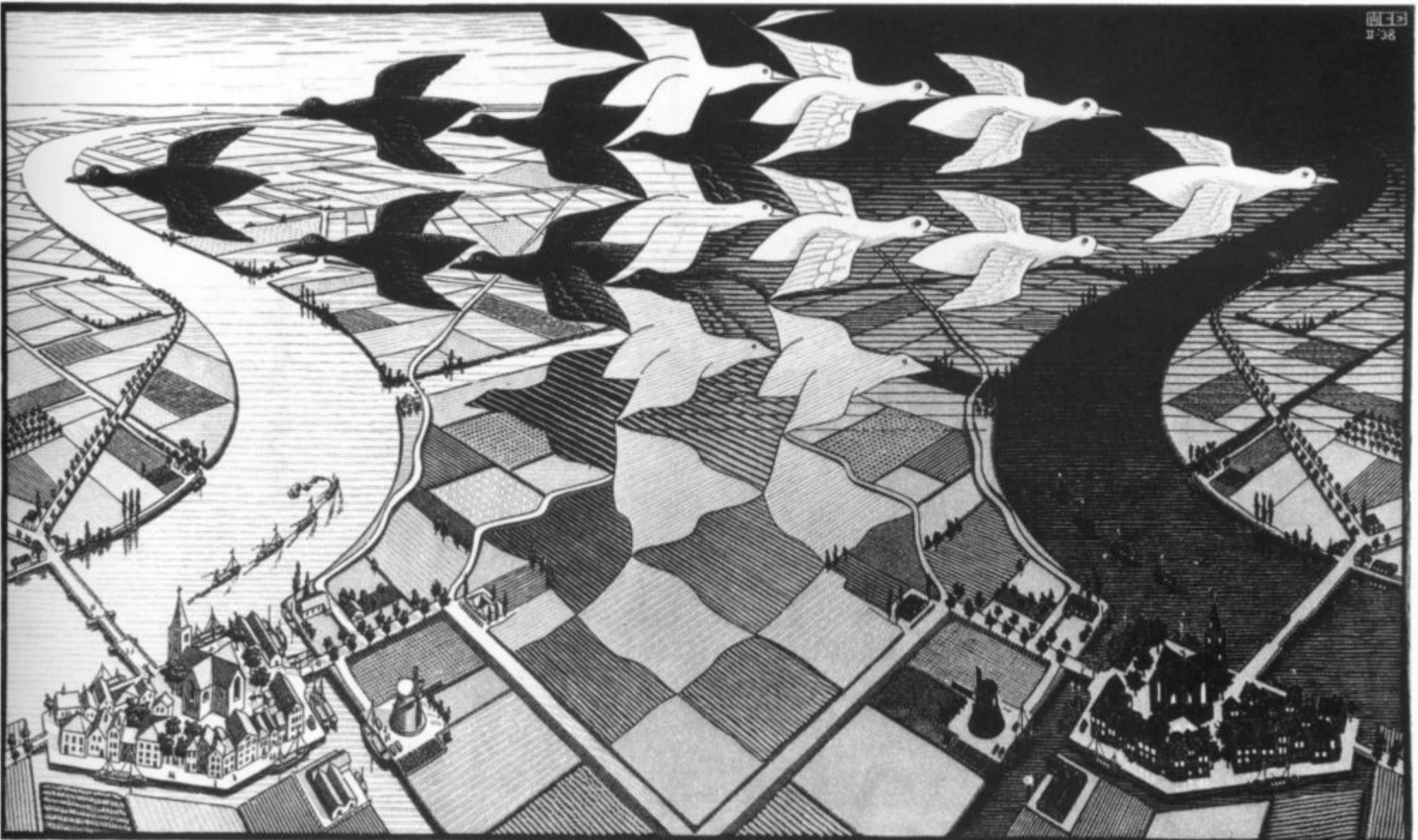
- La *luce e le onde elettromagnetiche* riempiono l'universo, e sono anche loro una forma di energia, energia elettromagnetica.
- La luce delle stelle non è il campo di radiazione più importante, perché negli enormi spazi intergalattici lontano dalle stelle è estremamente debole.
- Il fondo cosmico di microonde (ne parleremo più avanti) è un perfetto corpo nero (radiazione presente in condizioni di equilibrio termico) con una temperatura $T_0=2.725\text{K}$, e riempie l'intero universo, per cui la sua densità media di energia è molto maggiore di quella della luce delle stelle.
- La somma di tutte le densità di energia in radiazione (incluso le particelle relativistiche) può essere convertita in densità di massa-energia grazie alla relazione di Einstein
$$m = \frac{E}{c^2} \rightarrow \rho_R = \frac{\rho_\gamma}{c^2}$$
- Quantitativamente oggi $\rho_R \cong 9 \times 10^{-31} \text{kg/m}^3$, molto minore di quelle in materia barionica e non barionica.



Energia del vuoto: materia e antimateria

materia

antimateria



Energia del vuoto: materia e antimateria

		materia three generations of matter (elementary fermions)			antimateria three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
		I	II	III	I	II	III		
QUARKS		u up 1.2 MeV/c ²	c charm 1.28 GeV/c ²	t top 173.1 GeV/c ²	\bar{u} antiup 1.2 MeV/c ²	\bar{c} anticharm 1.28 GeV/c ²	\bar{t} antitop 173.1 GeV/c ²	g gluon	H higgs 124.97 GeV/c ²
		d down 4.7 MeV/c ²	s strange 96 MeV/c ²	b bottom 4.18 GeV/c ²	\bar{d} antidown 4.7 MeV/c ²	\bar{s} antistrange 96 MeV/c ²	\bar{b} antibottom 4.18 GeV/c ²	γ photon	
		e electron 0.511 MeV/c ²	μ muon 105.66 MeV/c ²	τ tau 1.7766 GeV/c ²	e^+ positron 0.511 MeV/c ²	$\bar{\mu}$ antimuon 105.66 MeV/c ²	$\bar{\tau}$ antitau 1.7766 GeV/c ²	Z Z ⁰ boson 91.18 GeV/c ²	
LEPTONS		ν_e electron neutrino 0.2 eV/c ²	ν_μ muon neutrino 0.17 MeV/c ²	ν_τ tau neutrino 182 MeV/c ²	$\bar{\nu}_e$ electron antineutrino 0.2 eV/c ²	$\bar{\nu}_\mu$ muon antineutrino 0.17 MeV/c ²	$\bar{\nu}_\tau$ tau antineutrino 182 MeV/c ²	W^+ W ⁺ boson 80.385 GeV/c ²	W^- W ⁻ boson 80.385 GeV/c ²

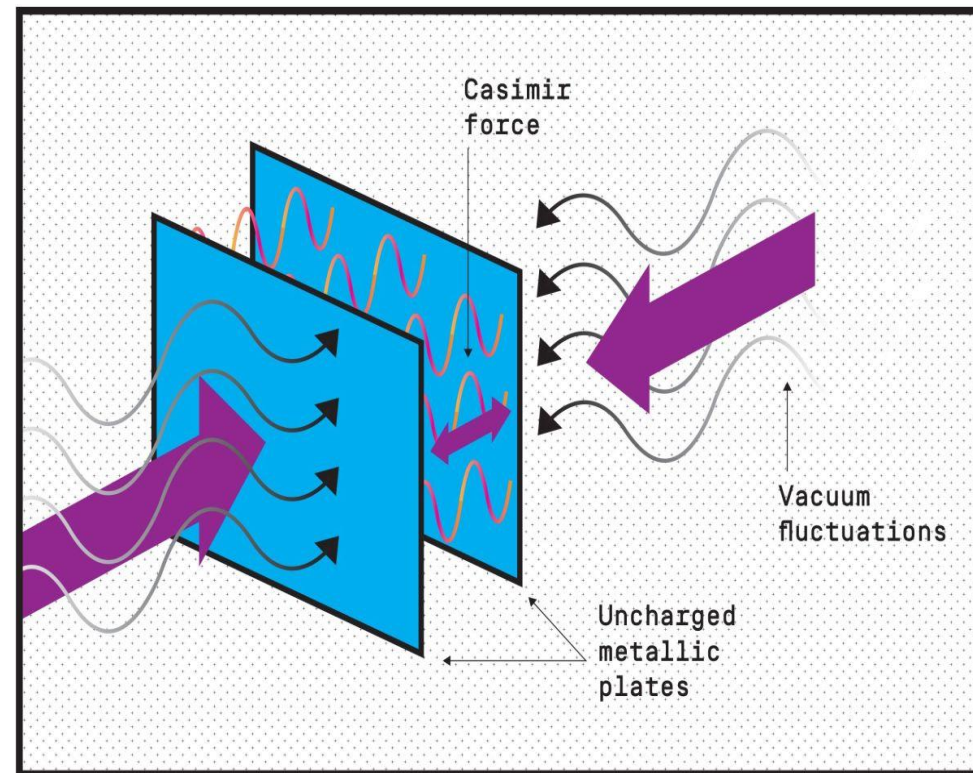
GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS
SCALAR BOSONS

Energia del vuoto: materia e antimateria

- Quando una particella si incontra con una antiparticella, si annichilano in un lampo di luce, formando una coppia di fotoni che mantiene la loro massa-energia $2mc^2$
- Un fotone di energia sufficiente può trasformarsi in una coppia di particelle ed antiparticelle, che mantiene la sua massa-energia
- Nel vuoto, coppie di particelle e antiparticelle si formano e annichilano continuamente per tempi brevissimi $\Delta t \sim \frac{\hbar}{2mc^2}$
(fluttuazioni del vuoto)
- A queste fluttuazioni corrisponde una densità di energia, detta *energia del vuoto*

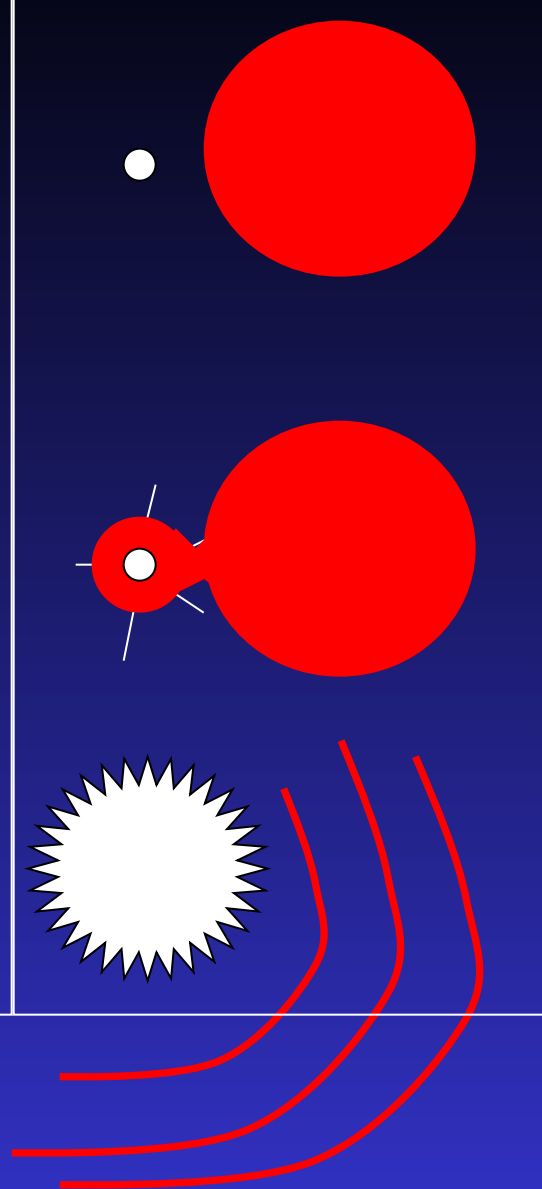
Energia del vuoto

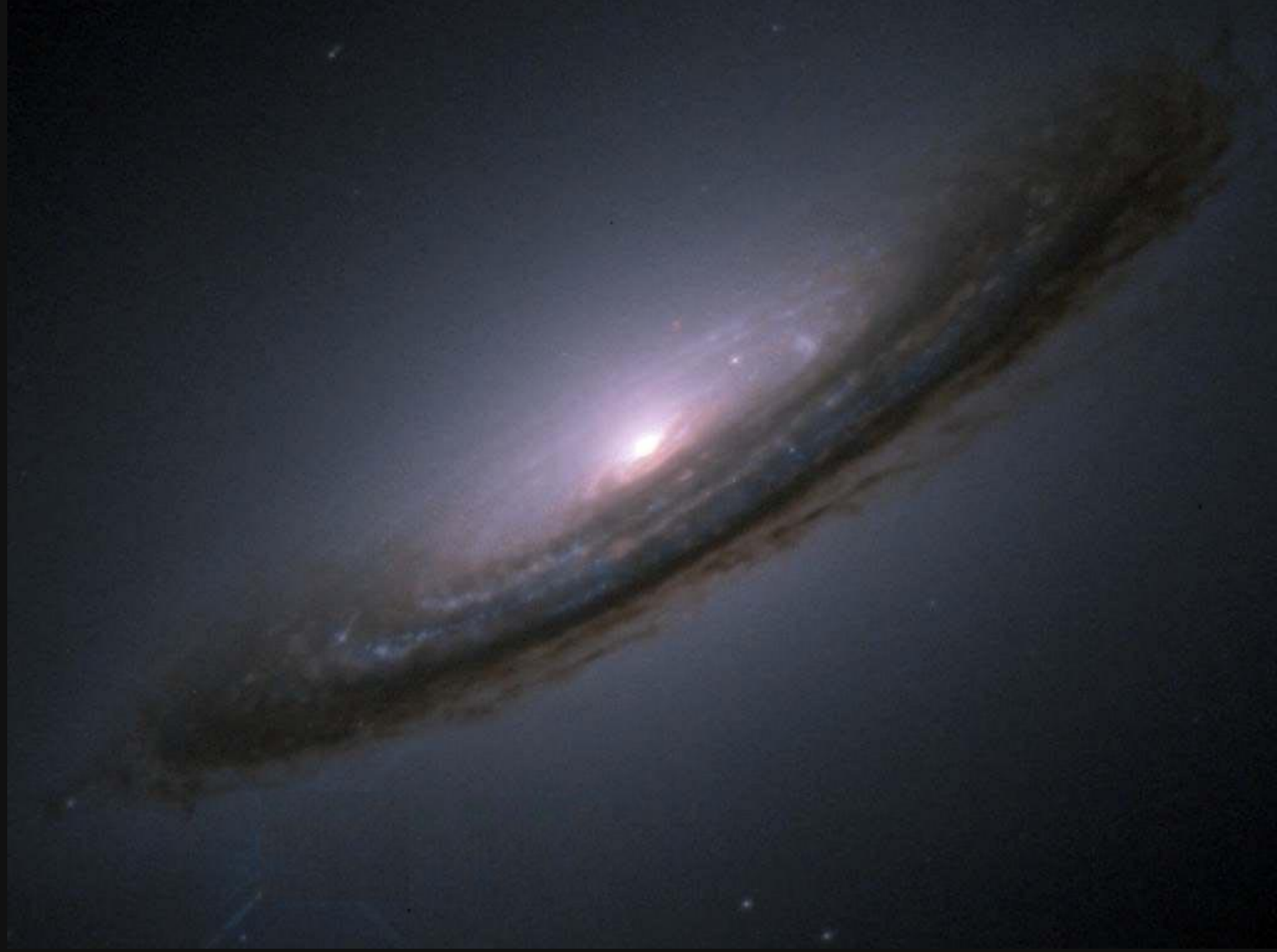
- Differenze di energia del vuoto sono state misurate grazie all'effetto Casimir o alla misura dell'emissione stimolata in cavità a radiofrequenza.
- Ma non si riesce ancora a valutare in assoluto la densità di energia del vuoto dovuta a tutte le possibili coppie particelle antiparticelle.
- Ha la strana proprietà di produrre una pressione negativa, e di non diluirsi se il volume aumenta.
- Nel caso dell'universo, a differenza delle altre forme di energia, quella del vuoto fa **accelerare** l'espansione dello spazio. L'espansione accelerata dell'universo è stata osservata grazie alle misure di esplosioni di supernovae in galassie lontane.

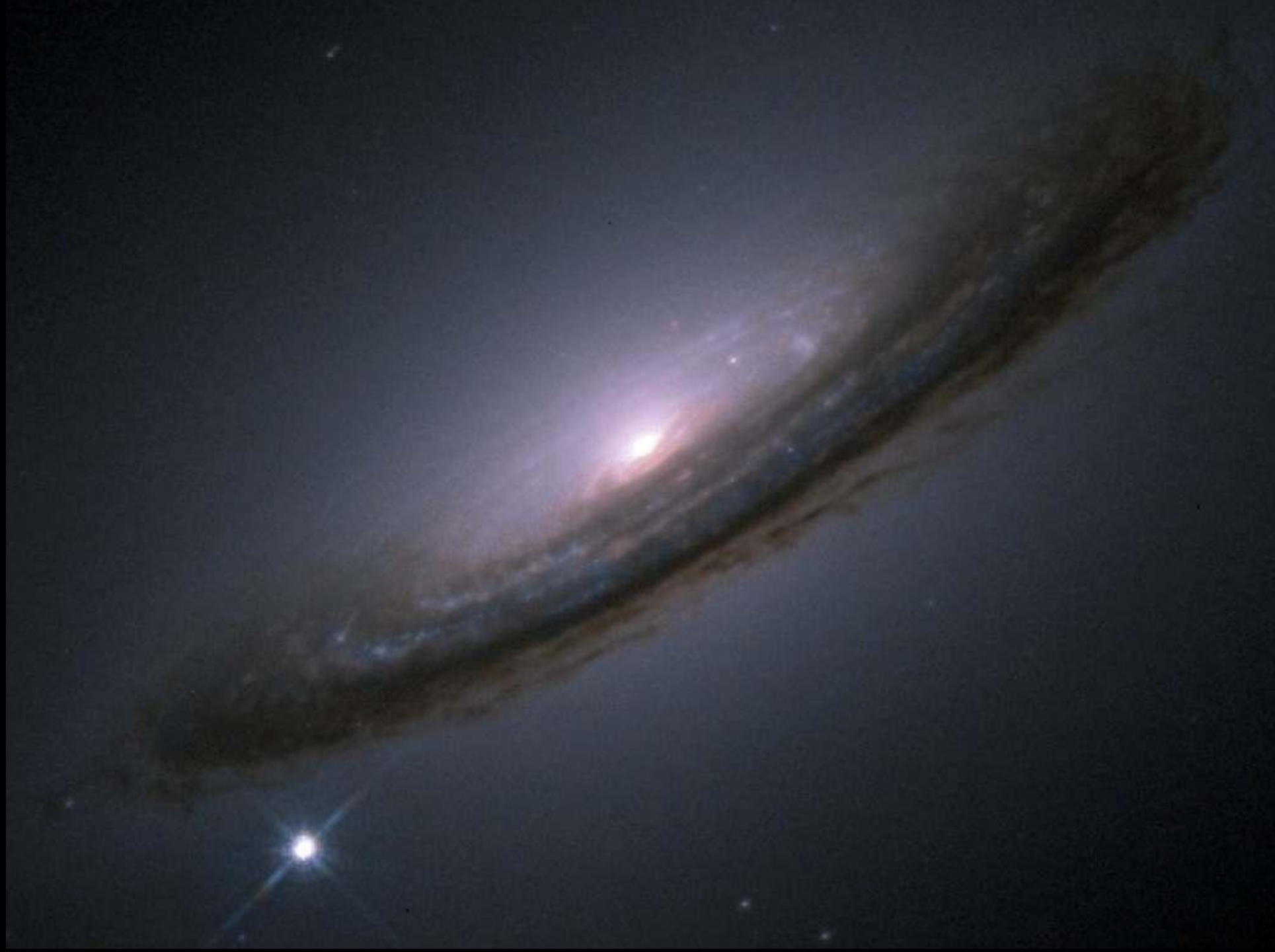


SNe1a

- Un fenomeno raro
- Sistema doppio : gigante rossa e nana bianca
- Il materiale della gigante rossa accresce la massa della nana bianca
- Quando la massa della nana bianca si avvicina alla massa di Chandrasekhar ($1.4M_{\text{sun}}$), la pressione interna non può più resistere all' autogravità e la stella implode, espellendo le parti più esterne.





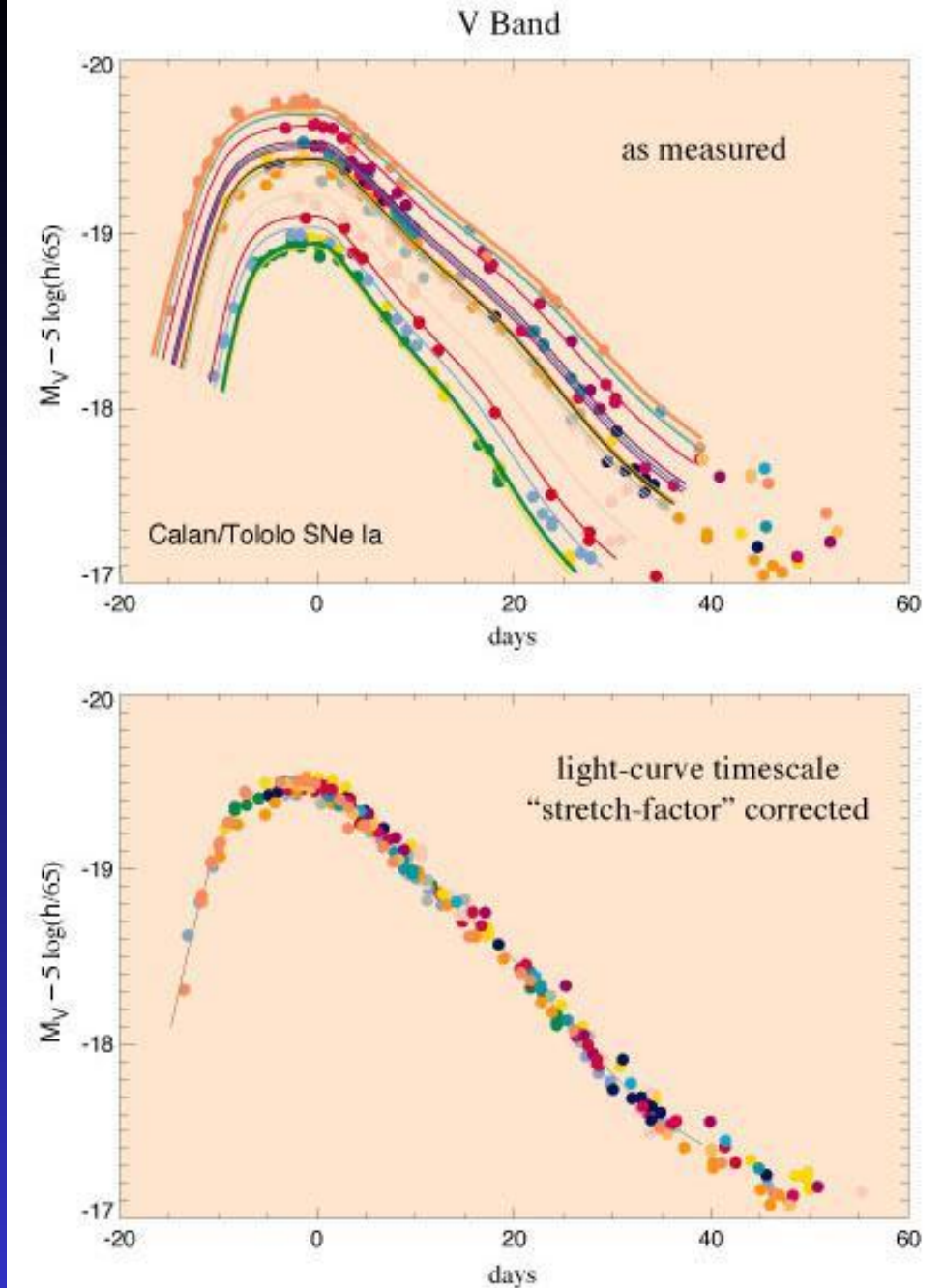


SNe1a

- La luminosità e la curva di luce che osserviamo sono il risultato del decadimento di nuclei radioattivi prodotti durante l'implosione della parte più interna della stella.

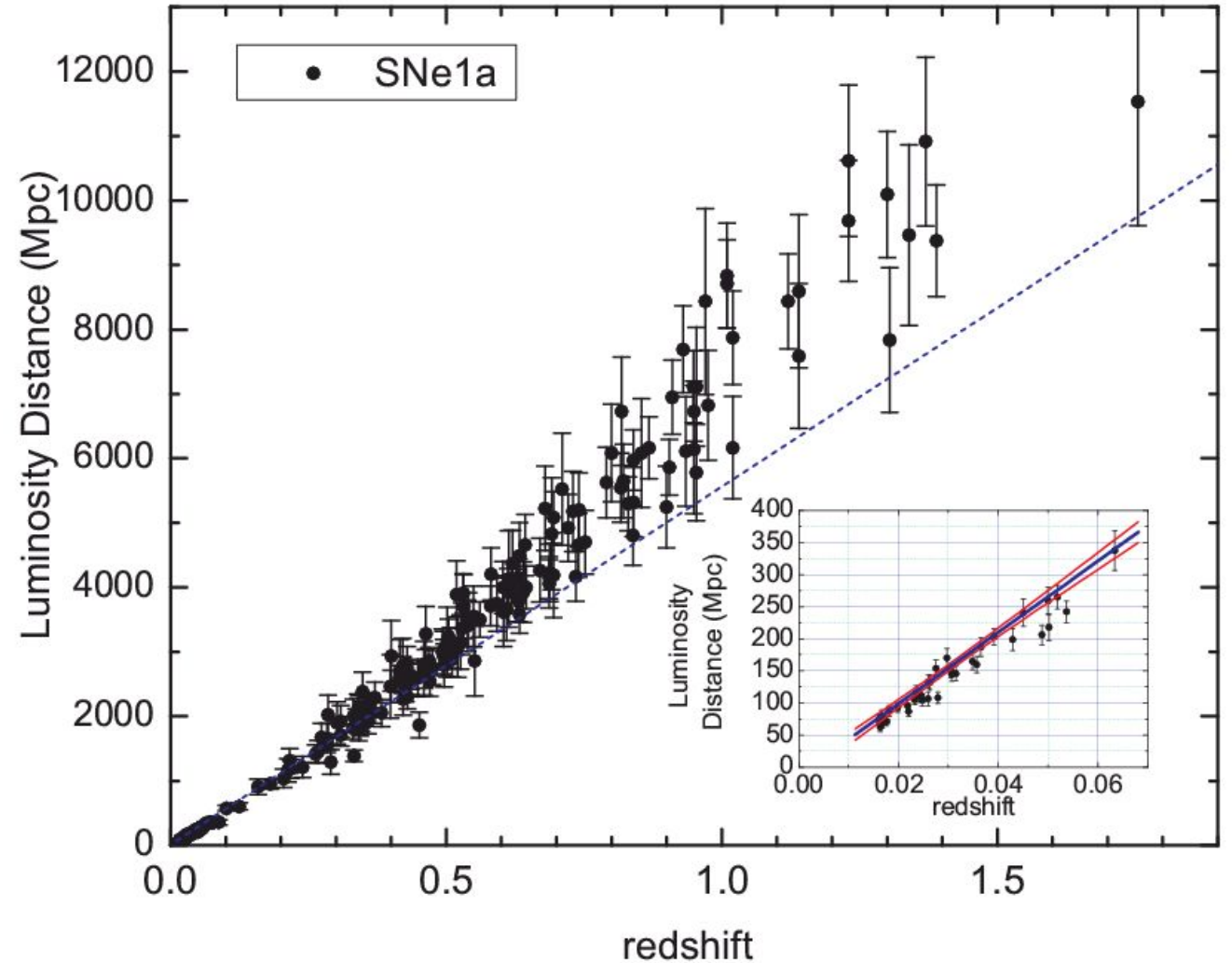


- Siccome la composizione e la massa iniziale sono le stesse per tutte le nane bianche vicino alla massa di Chandrasekar, la luminosità assoluta è circa la stessa per tutte le SN di questo tipo (SNe1a).
- Si devono applicare delle correzioni empiriche.



Energia Oscura

- Le supernovae con grande redshift sembrano essere sistematicamente più deboli di quello che ci si aspetterebbe.
- Questo potrebbe essere dovuto all'accelerazione dell'universo: se l'universo accelera la sua espansione, in passato si espandeva più lentamente, quindi ha impiegato più tempo per arrivare alla densità attuale.
- Di conseguenza, per un dato redshift (e quindi fissate dimensioni e densità al momento dell'emissione), la radiazione impiega più tempo ad arrivare a noi, e quindi proviene da distanze maggiori, e quindi è più debole.
- Per spiegare quantitativamente il fenomeno, ci vuole una sufficiente densità di massa energia sottoforma di energia del vuoto (chiamata energia oscura in questo contesto):



$$\rho_V \cong 7 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

Riassumendo: composizione dell'universo

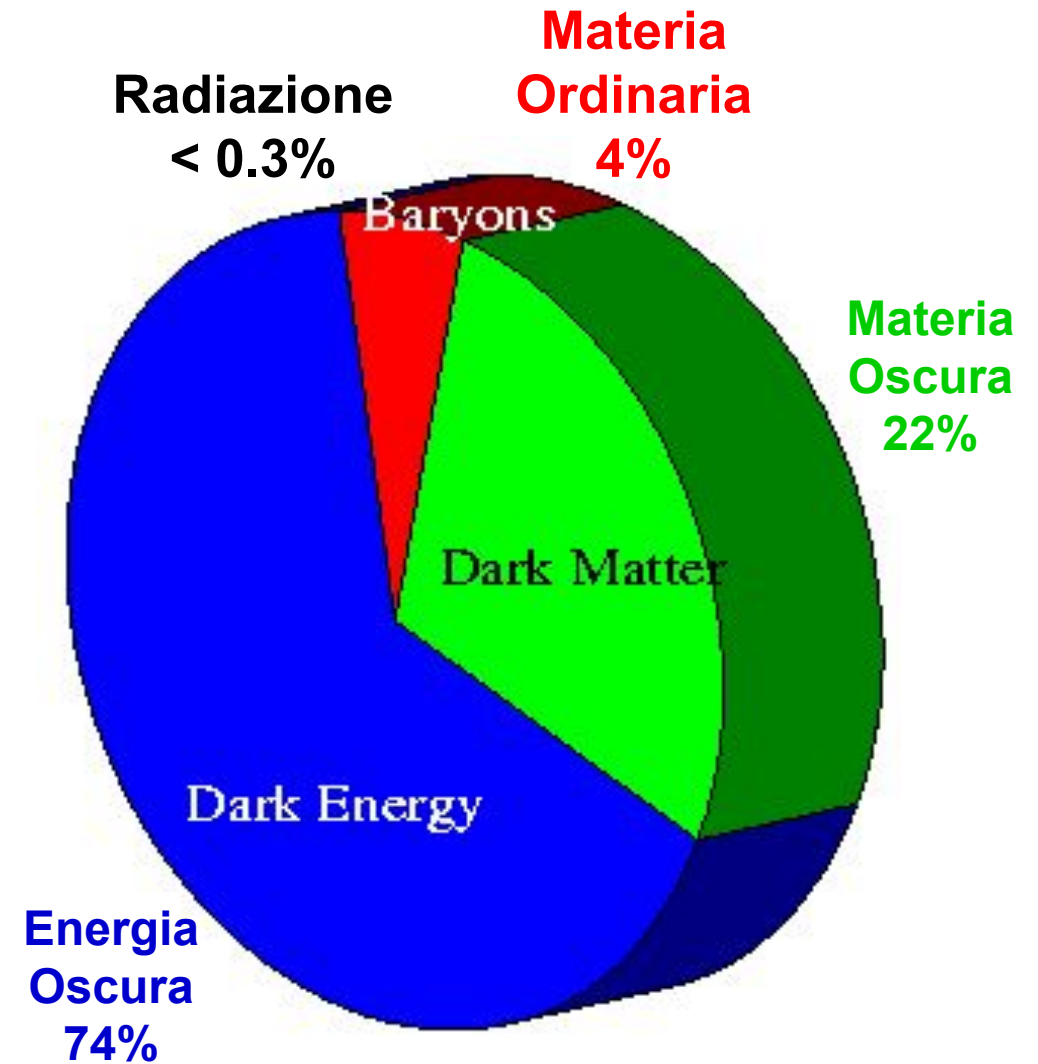
- Per i pre-socratici:

- terra,
- acqua,
- aria,
- fuoco

25 secoli

- Oggi, per gli scienziati:

- radiazione $\rho_R \cong 9 \times 10^{-31} \text{ kg/m}^3$
- materia ordinaria $\rho_B \cong 4.4 \times 10^{-28} \text{ kg/m}^3$
- materia oscura $\rho_{NB} \cong 2.2 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$
- energia oscura $\rho_V \cong 7 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$



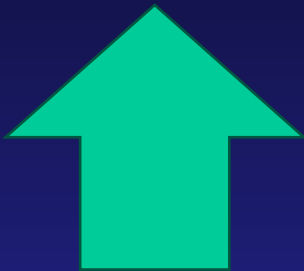
Evoluzione delle densità di massa-energia

- Come variano le densità di massa-energia all'aumentare o diminuire delle distanze nell'universo? Scriviamo le distanze dell'universo $r = r_o a(t)$, con $a(t_o) = 1$. Quando $a(t)$ aumenta o diminuisce, tutte le distanze dell'universo aumentano (espansione) o diminuiscono (contrazione).
- Per la **materia barionica** e per quella **non barionica**, il numero di particelle e quindi la massa si conserva, mentre il volume aumenta come il cubo delle distanze, cioè come $a^3(t)$. Quindi $\rho_B = \frac{\rho_{Bo}}{a^3(t)}$ e anche $\rho_{NB} = \frac{\rho_{NBo}}{a^3(t)}$.
- Per la radiazione invece il numero di fotoni si conserva, ma con l'espansione ciascuno dei fotoni allunga la sua lunghezza d'onda e quindi diminuisce ulteriormente la sua energia perché $E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ e quindi $E_\gamma = E_{\gamma o} \frac{\lambda_o}{\lambda} = \frac{E_{\gamma o}}{a(t)}$.
- Quindi per la radiazione $\rho_R = \frac{\rho_{Ro}}{a^4(t)}$
- Invece la densità di energia oscura non cambia con l'espansione: $\rho_V = \rho_{Vo}$.
- Ora possiamo scrivere l'equazione di conservazione dell'energia.

Equazione di Friedmann

- Con calcoli opportuni si arriva a scrivere una equazione per $a(t)$:

$$(\dot{a})^2 - H_0^2 \left[\frac{\Omega_{Ro}}{a^2} + \frac{\Omega_{Bo} + \Omega_{NB0}}{a} + \Omega_V a^2 \right] = H_0^2 [1 - \Omega_{Ro} - \Omega_{Bo} - \Omega_V]$$



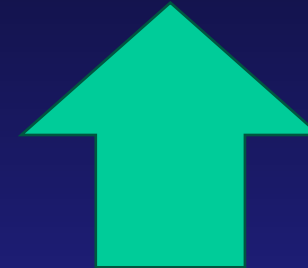
**Densità di
energia
cinetica**

+



**Densità di
energia
potenziale**

=



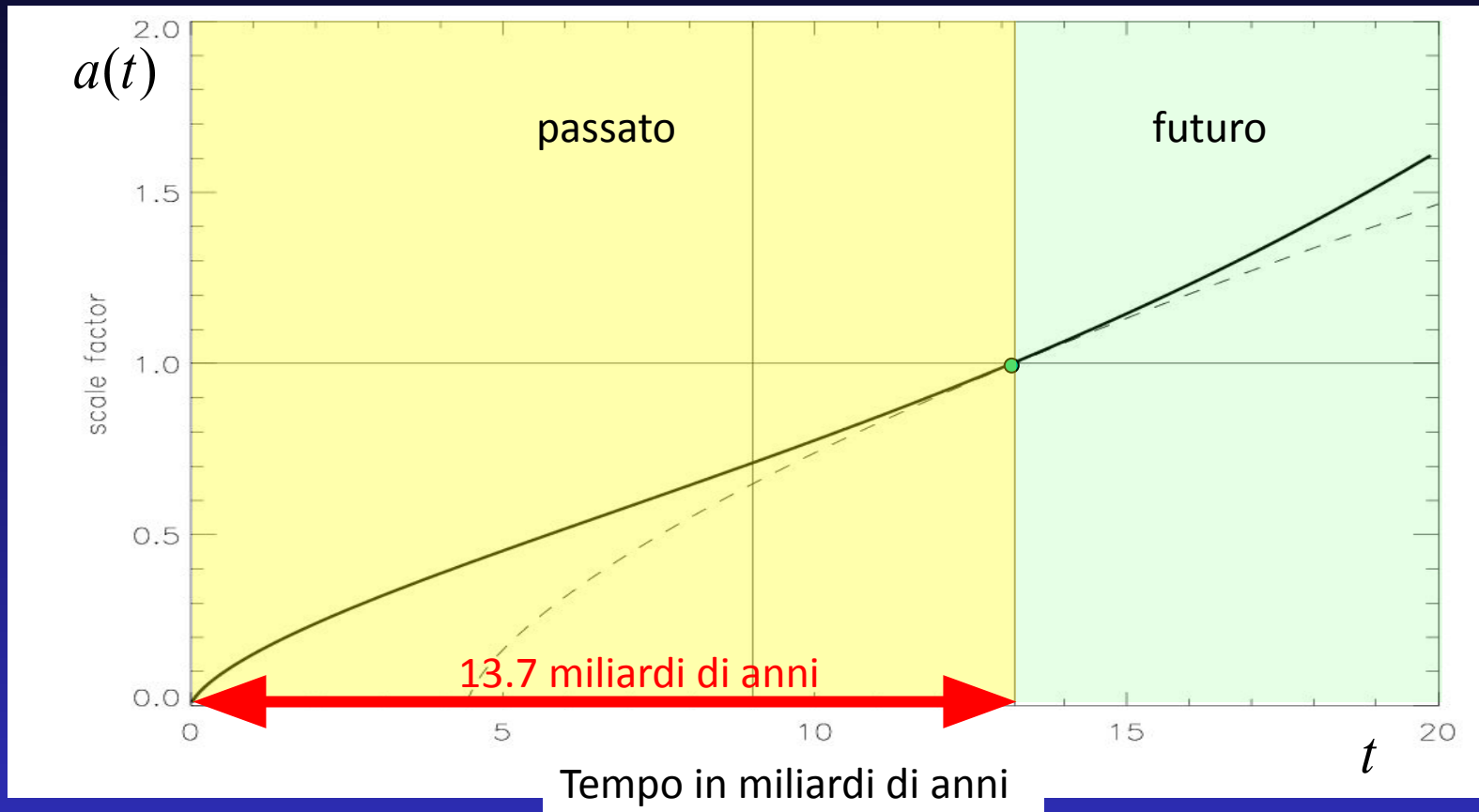
**Densità di
energia
totale**

Nota 1: le Ω sono i parametri di densità, proporzionali alle densità ρ trovate prima

Nota 2: allo stesso risultato si arriva usando le equazioni della relatività generale di Einstein

Soluzione dell'equazione di Friedmann

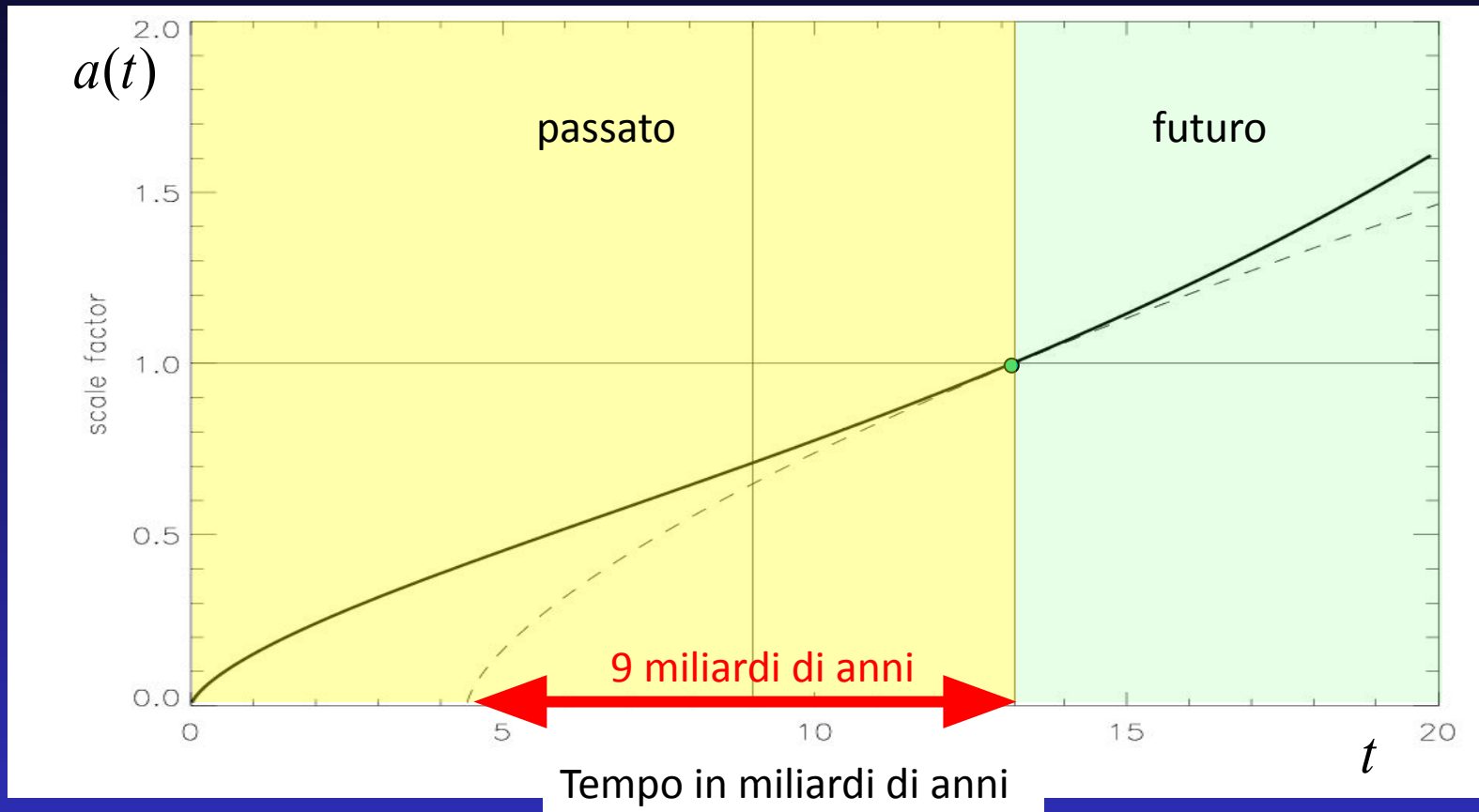
- Sapendo tutti i parametri, possiamo risolvere l'equazione, trovando $a(t)$, il fattore che moltiplica tutte le distanze attuali dell'universo e quindi al passare del tempo lo fa contrarre (se $a(t)$ diminuisce) o espandere (se $a(t)$ aumenta) mantenendolo omogeneo e isotropo.



- Il grafico mostra che l'universo si è espanso da uno stato in cui tutte le distanze erano zero (**big bang** a densità infinita) allo stato attuale, ed ha impiegato 13.7 miliardi di anni.

Soluzione dell' equazione di Friedmann

- Sapendo tutti i parametri, possiamo risolvere l'equazione, trovando $a(t)$, il fattore che moltiplica tutte le distanze attuali dell'universo e quindi al passare del tempo lo fa contrarre (se $a(t)$ diminuisce) o espandere (se $a(t)$ aumenta) mantenendolo omogeneo e isotropo.



- Se non ci fosse energia oscura (del vuoto) varrebbe la curva tratteggiata, sempre decelerata. L'età dell'universo sarebbe *solo* 9 miliardi di anni. **Insufficiente.**



NGC 6397

Età = 13.5 miliardi di anni



HD 140283

Età = 12 .. 14.5 miliardi di anni

Equazione di Friedmann

$$(\dot{a})^2 - H_o^2 \left[\frac{\Omega_{Ro}}{a^2} + \frac{\Omega_{Bo} + \Omega_{NB0}}{a} + \Omega_V a^2 \right] = H_o^2 [1 - \Omega_{Ro} - \Omega_{Bo} - \Omega_V]$$



Densità di
energia
cinetica

+



Densità di
energia
potenziale

=



Densità di
energia
totale

- L'equazione di Friedmann ci mostra che al **big bang** la densità era elevatissima (infinita ?) e quindi anche l'energia potenziale era negativa ed elevatissima.
- Di conseguenza l'energia cinetica doveva essere elevatissima (e positiva).
- L'universo iniziale era quindi enormemente denso e caldo. Nel prossimo dialogo ci occuperemo della storia dell'universo, a partire da quello stato singolare.