

Studiare il passato remoto dell'universo per capire la fisica fondamentale

Paolo de Bernardis

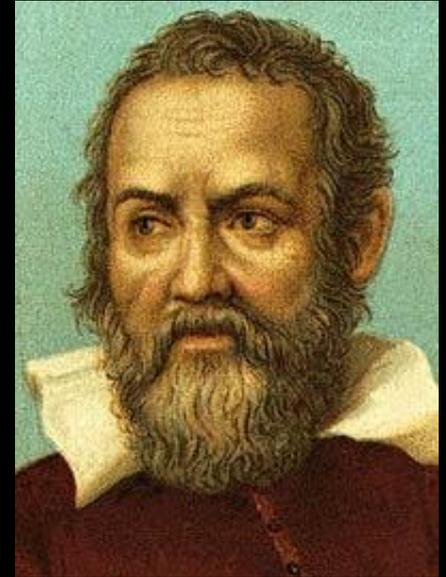
Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma

Un tuffo nel sapere: colloqui in rete

28 aprile 2021

L'Universo come laboratorio

- Già Galileo Galilei pensò di usare l'universo come laboratorio, in un caso in cui gli strumenti che aveva a disposizione si dimostrarono insufficienti a raggiungere la precisione necessaria alla misura.
- In *"Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze"* Galileo discute della *"velocità del lume"*, e descrive un tentativo di misura di qualche tempo prima, l'esperimento delle due lanterne.
- Ammette che ha fallito... *".. Veramente non l'ho sperimentata, salvo che in lontananza piccola, cioè manco d'un miglio, dal che non ho potuto assicurarmi se veramente la comparsa del lume opposto sia istantanea; ma ben, se non istantanea, velocissima, e direi momentanea, è ella..."*
- Insoddisfatto del suo esperimento e del suo *cronometro ad acqua*, si rivolge al laboratorio della natura.



L'Universo come laboratorio

- Il suo ragionamento si concentra sulla propagazione della luce dai fulmini, osservati in lontananza, durante i temporali.
- Gli sembra evidente che si possa identificare un punto di partenza, dal quale la luce successivamente si dipana, e che quindi la luce impieghi del tempo a propagarsi.
- Oggi sappiamo che questo argomento è sbagliato.
- Ma è comunque importante perché
 - Dimostra quanto Galileo fosse convinto della propagazione non istantanea della luce (a dispetto dell'*ipse dixit* Aristotelico seguito ciecamente alla sua epoca)
 - Dimostra il suo interesse ad usare «il gran libro della Natura» come ambiente di lavoro per le sue ricerche.

L'Universo come laboratorio

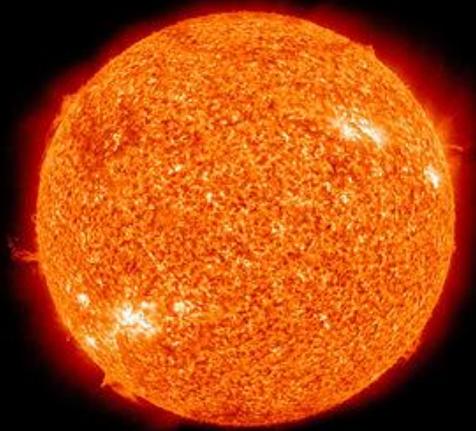
- Oggi, quattro secoli dopo :
 - Sappiamo che la luce si propaga nel vuoto senza attenuarsi, e che si propaga alla velocità di circa un miliardo di km/h :
 $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$
 - La prima determinazione di questa velocità è stata ottenuta grazie ad osservazioni astronomiche, e successivamente raffinata grazie ad esperimenti di laboratorio sempre più accurati, fino a diventare una delle costanti che descrivono la Natura.
- Grazie a telescopi sempre più potenti, abbiamo esplorato un volume di universo infinitamente più grande di quello osservato da Galileo.
- Così abbiamo capito che l'universo si espande e si raffredda, e contiene oggi una gerarchia di strutture: stelle, galassie, ammassi di galassie, superammassi ...
- Il loro studio ha permesso di capire, oltre all'evoluzione dell'universo, molti aspetti della fisica fondamentale.

L'Universo come laboratorio

- Tutto questo ci permette di usare l'universo come un laboratorio in cui, a seconda della zona osservata si possono studiare situazioni e fenomeni difficilmente ricreabili in laboratorio (vuoto quasi assoluto, densità enormi, ...)
- Il fatto che l'universo si espanda e quindi si raffreddi, e che guardando lontano riceviamo informazioni dal passato dell'universo significa che, a seconda dell'epoca sempre più remota osservata, si potrà osservare un ambiente a temperatura sempre più elevata.
- Cosmologi e fisici sfruttano sempre più spesso questo laboratorio primordiale, che permette di eseguire **misure**, oltre che di cosmologia, di fisica atomica, di fisica nucleare, e sulle interazioni più fondamentali della natura.
- Nel seguito vi offrirò una serie di esempi concreti, sia dell'uso degli oggetti più estremi che si trovano nell'universo, sia dell'uso del passato remoto dell'universo, come laboratori speciali per la fisica.

Esempio 1: le fusioni tra nuclei atomici fanno funzionare le stelle

Sole (fusione)



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

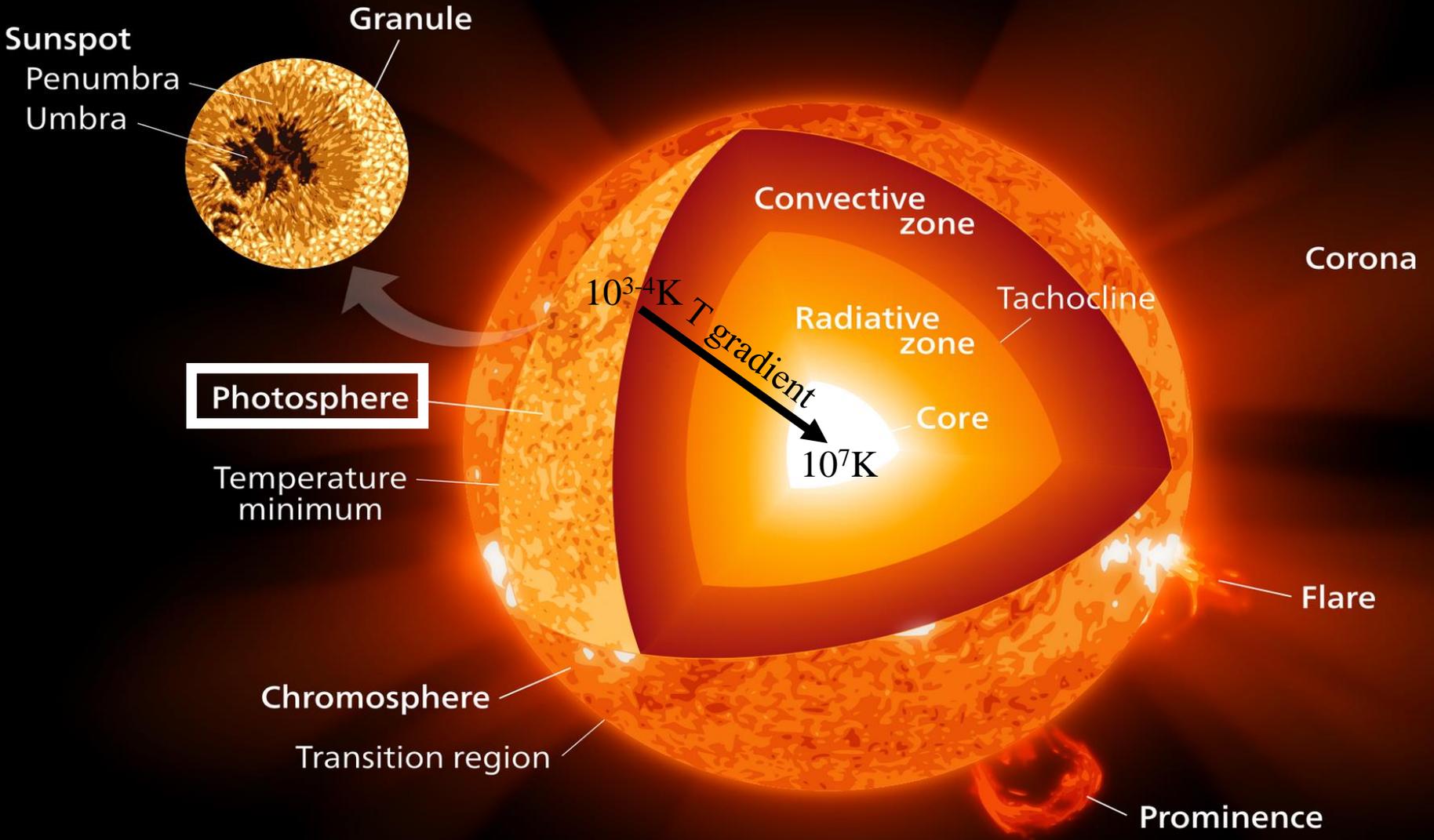
Centrale nucleare (fissione)



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

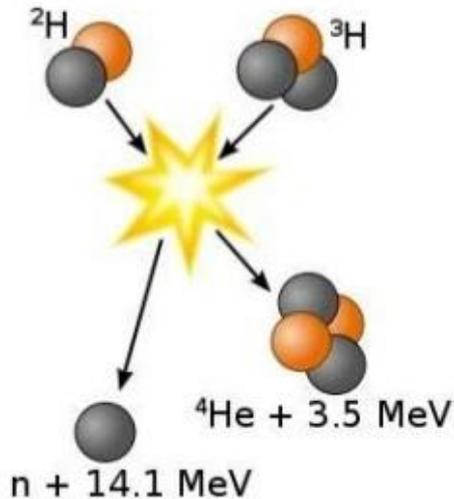
Una centrale nucleare è 200 milioni di miliardi di volte meno potente del Sole.

Struttura di una stella

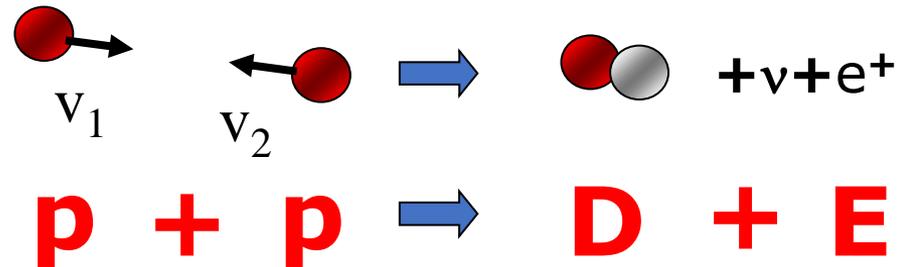


Fusione tra nuclei atomici

Fusione nucleare sulla Terra
(ITER, 2025-2030 ?)



Fusione nucleare nel Sole
(in funzione da più di 5 miliardi di anni)



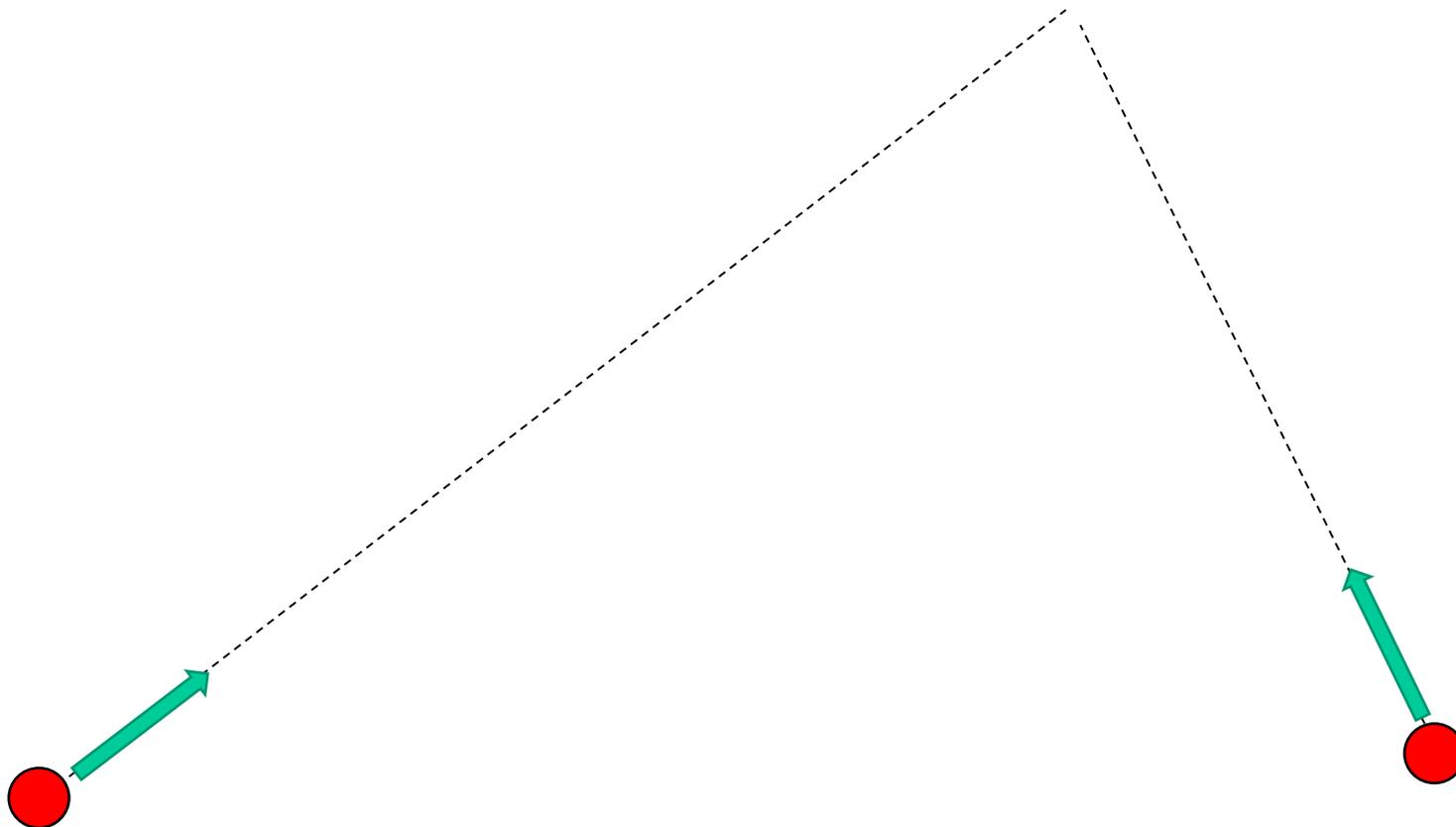
Se due protoni si avvicinano abbastanza, la forza nucleare forte, attrattiva, prevale, e si forma un sistema legato (un nucleo di deuterio), liberando sottoforma di energia la differenza di massa tra reagenti e prodotti.

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

1 kg di materia $\rightarrow 10^{17} \text{ J} = 1000 \text{ milioni di W} \times 3 \text{ anni}$

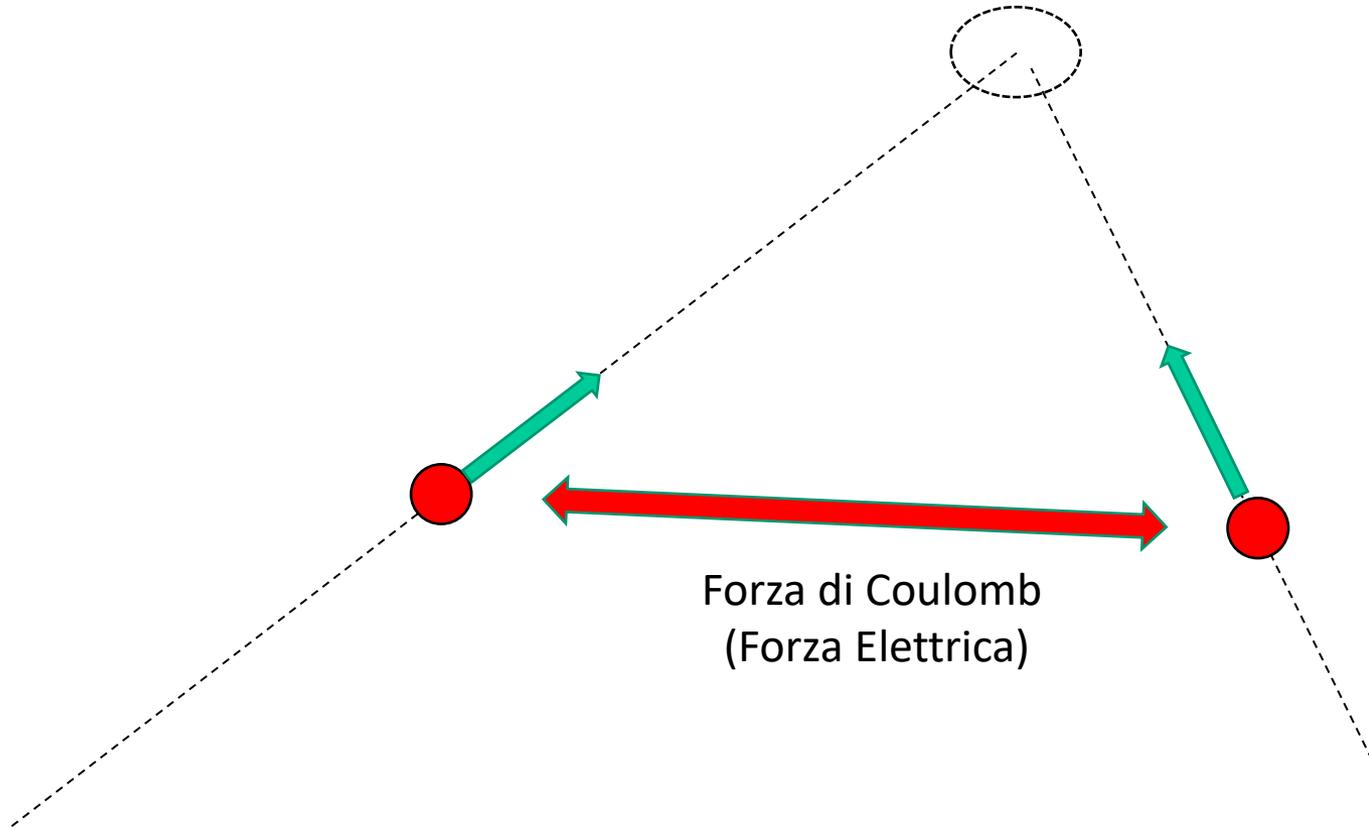
Che cosa avviene nel nucleo del Sole ?

Il fatto che i protoni si avvicinino abbastanza dipende dalla loro velocità, quindi dalla temperatura che c'è nel nucleo del Sole. La temperatura è di circa 10 milioni di gradi, e le velocità di agitazione termica sono in media di circa 10 km/s.



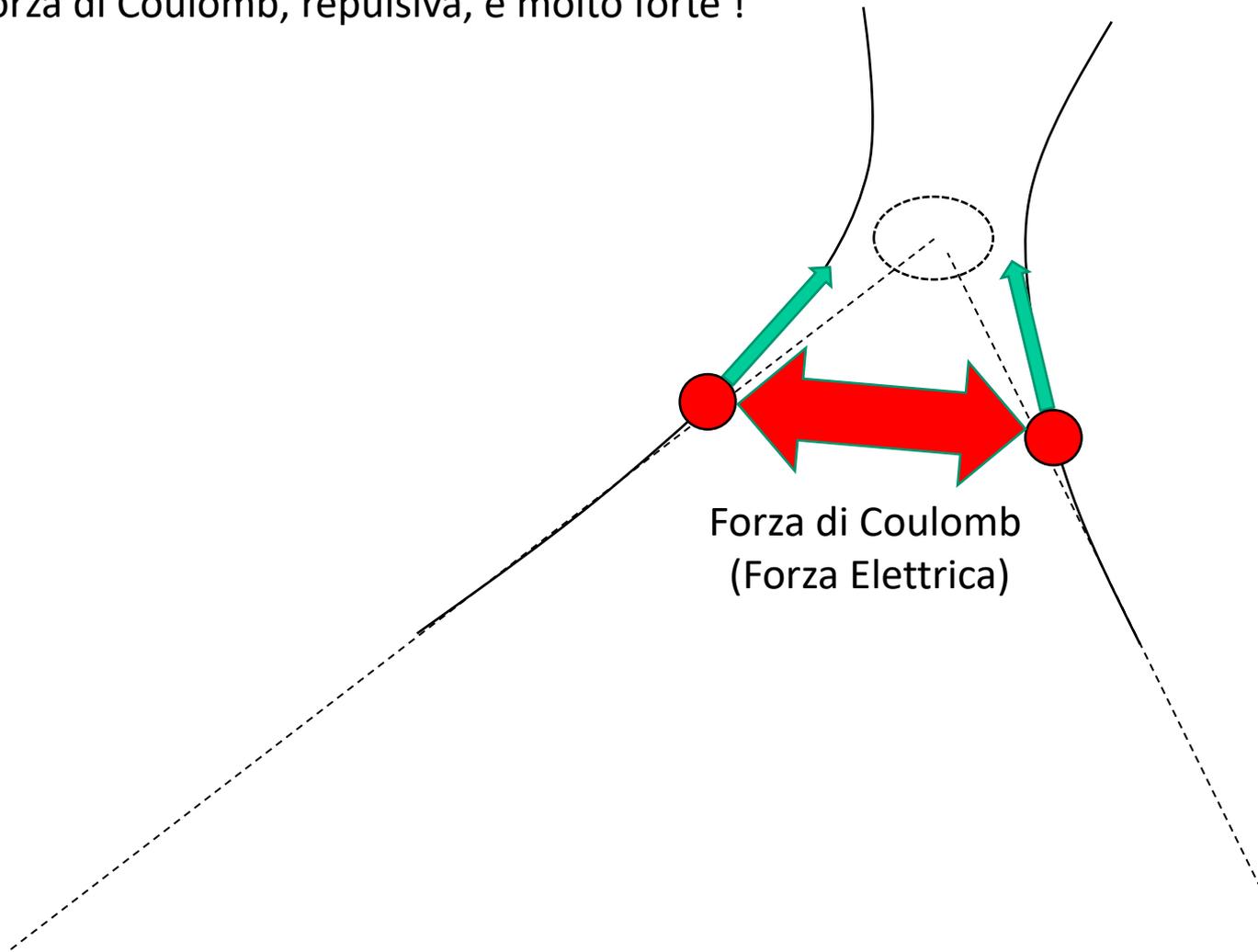
Che cosa avviene nel nucleo del Sole ?

Ma la forza di Coulomb, repulsiva, è molto forte !



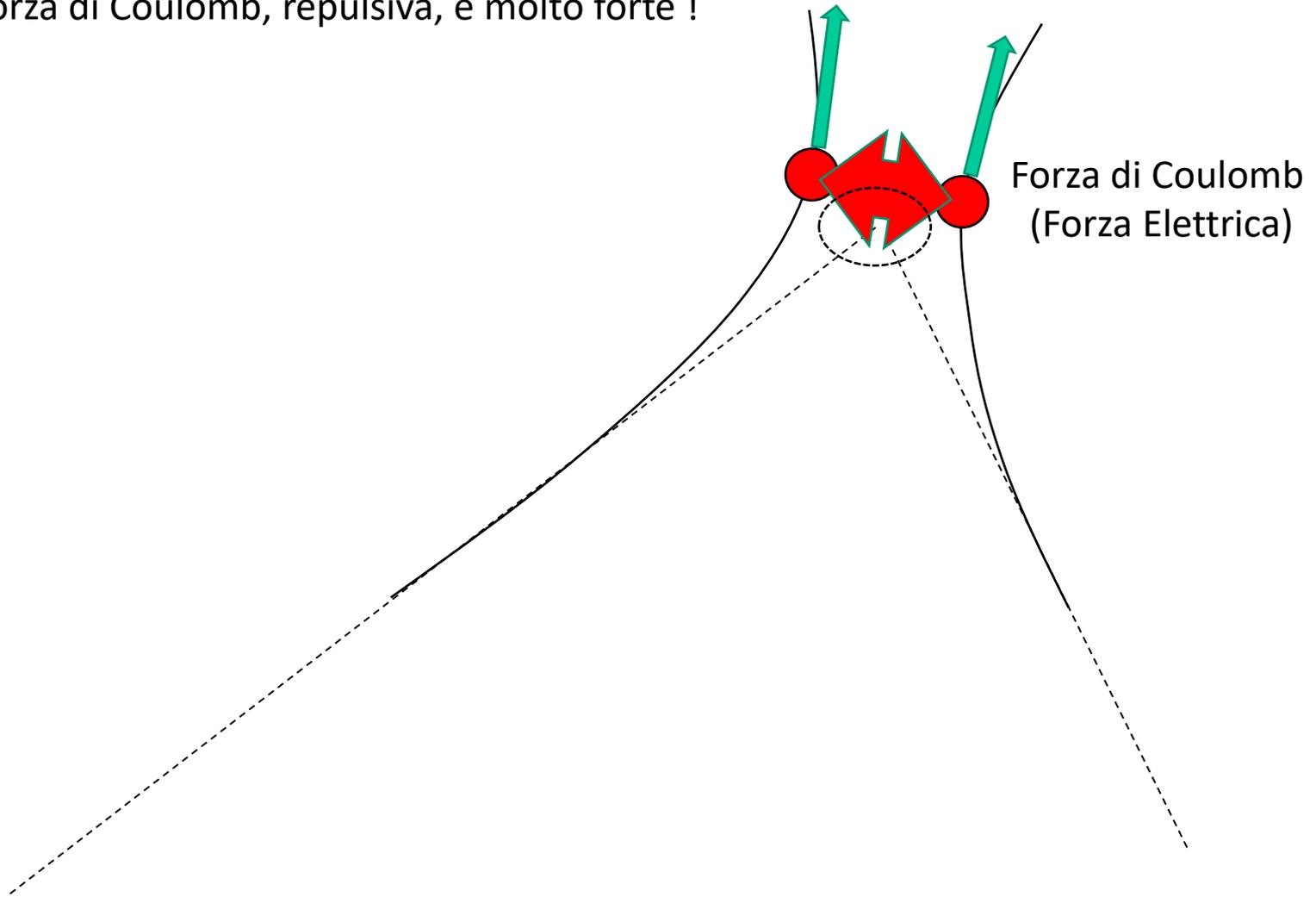
Che cosa avviene nel nucleo del Sole ?

Ma la forza di Coulomb, repulsiva, è molto forte !

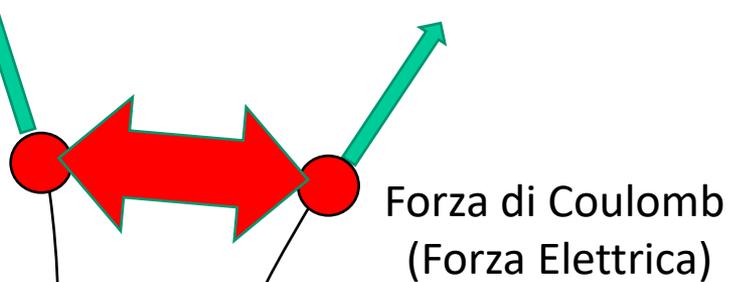


Che cosa avviene nel nucleo del Sole ?

Ma la forza di Coulomb, repulsiva, è molto forte !



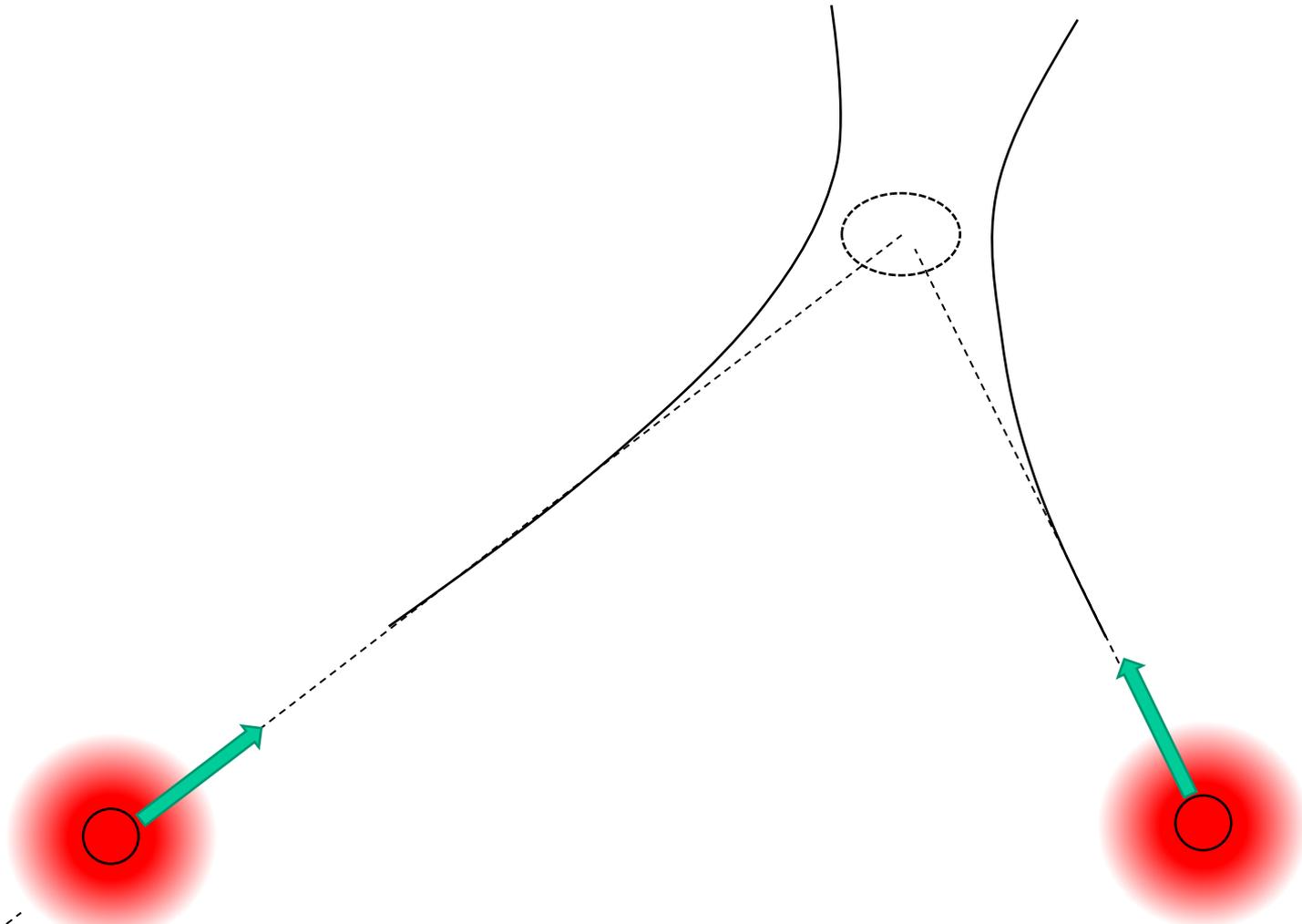
Ma la forza di Coulomb, repulsiva, è molto forte !



Forza di Coulomb
(Forza Elettrica)

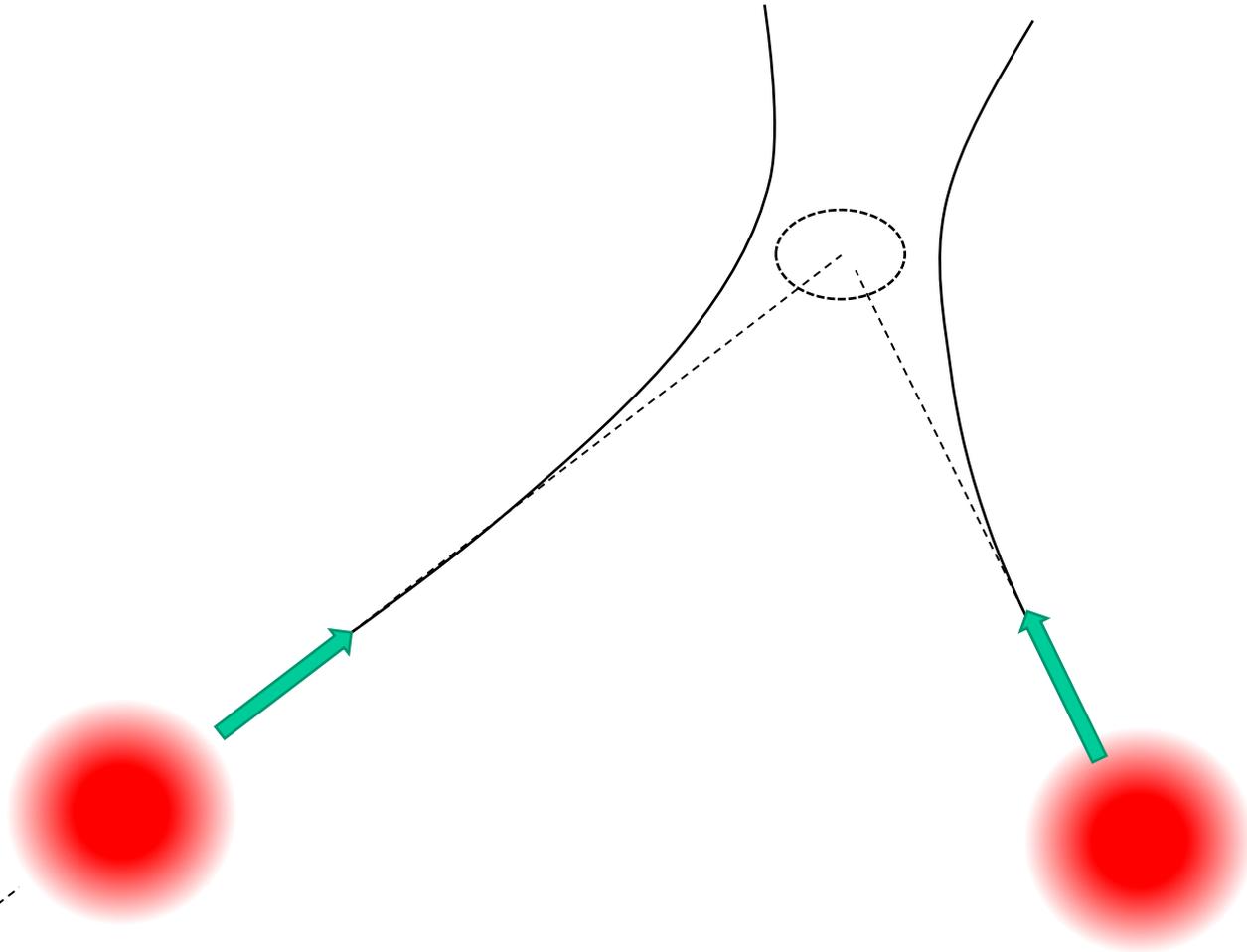
Ragionando classicamente, le due particelle si allontanano e non succede nulla ! Non possono avvenire le reazioni di fusione nucleare.

Che cosa avviene nel nucleo del Sole ?



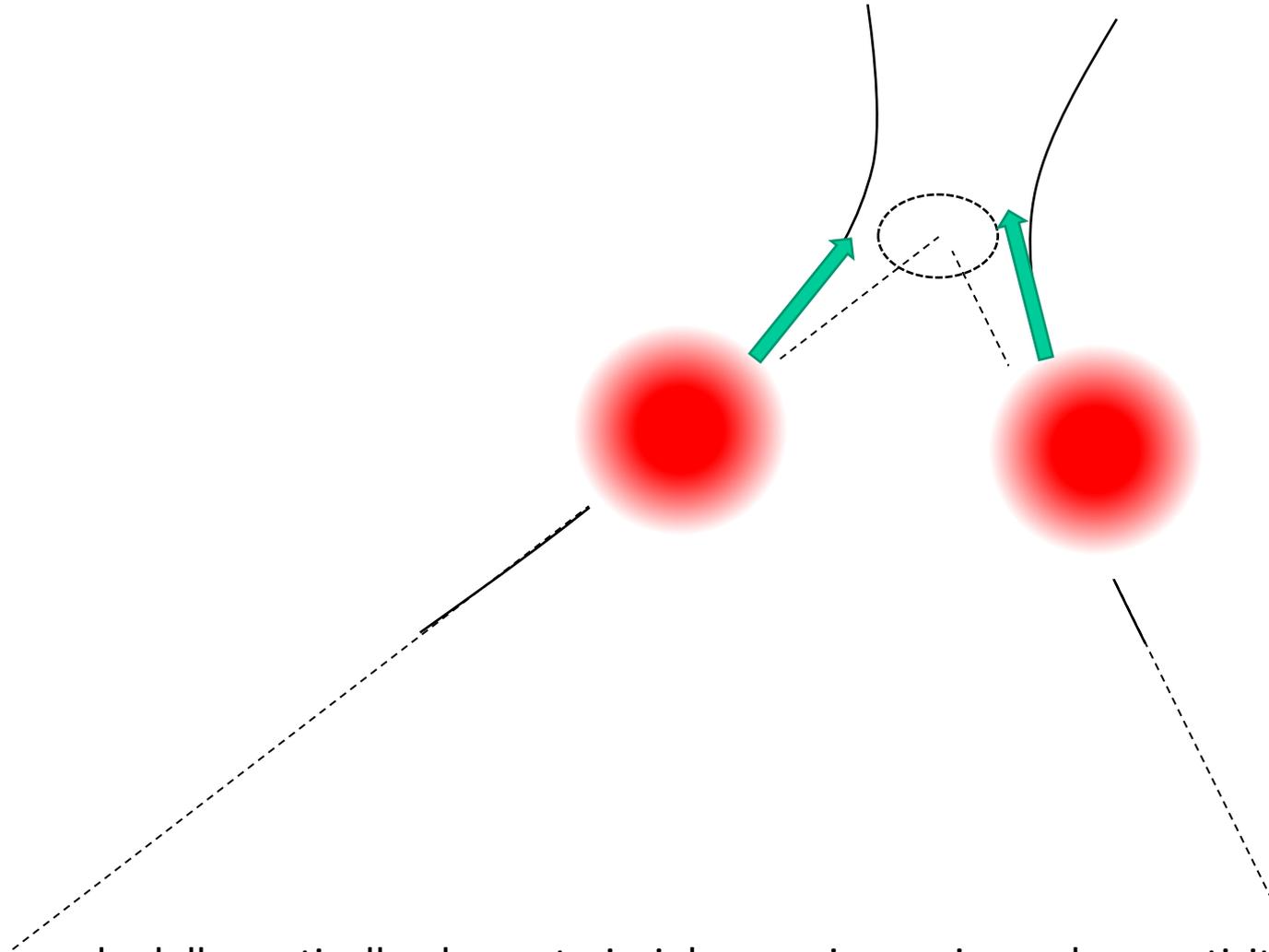
Ma nel mondo delle particelle elementari, si deve ragionare in modo quantistico !
Non possiamo misurare esattamente contemporaneamente la posizione e la velocità delle particelle (*principio di indeterminazione di Heisenberg*). Possiamo solo sapere che le particelle si trovano, con una certa probabilità,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

Che cosa avviene nel nucleo del Sole ?



Ma nel mondo delle particelle elementari, si deve ragionare in modo quantistico ! Non possiamo misurare 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.

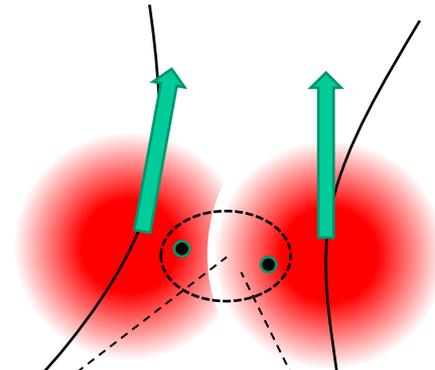
Che cosa avviene nel nucleo del Sole ?



Ma nel mondo delle particelle elementari, si deve ragionare in modo quantistico ! Non possiamo misurare 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.

Che cosa avviene nel nucleo del Sole ?

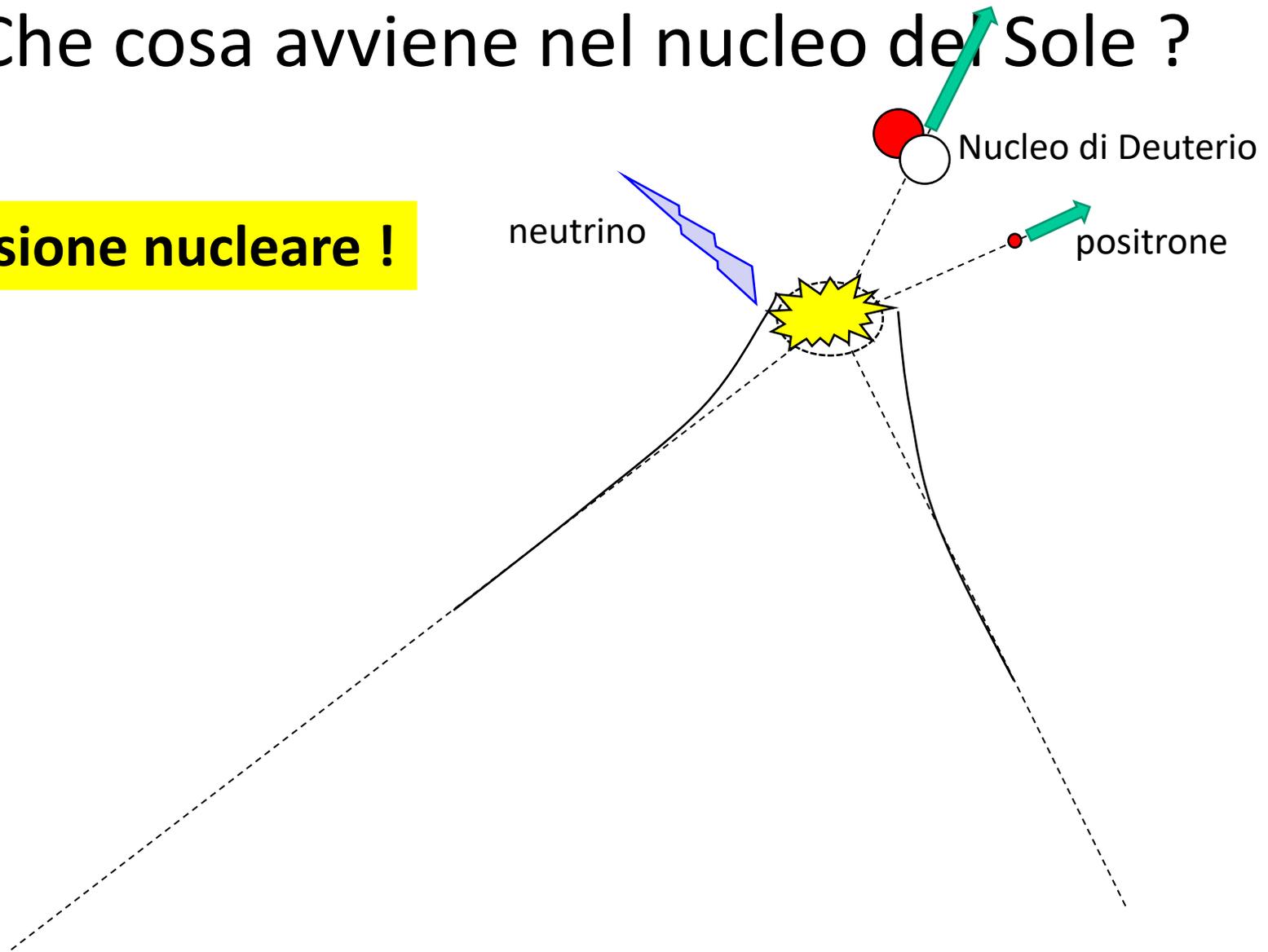
Non è molto probabile, ma, nonostante la repulsione Coulombiana, può capitare che le due particelle siano abbastanza vicine da fondersi.



Ma nel mondo delle particelle elementari, si deve ragionare in modo quantistico ! Non possiamo misurare 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.

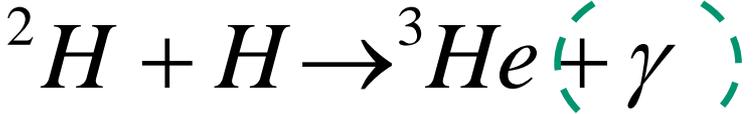
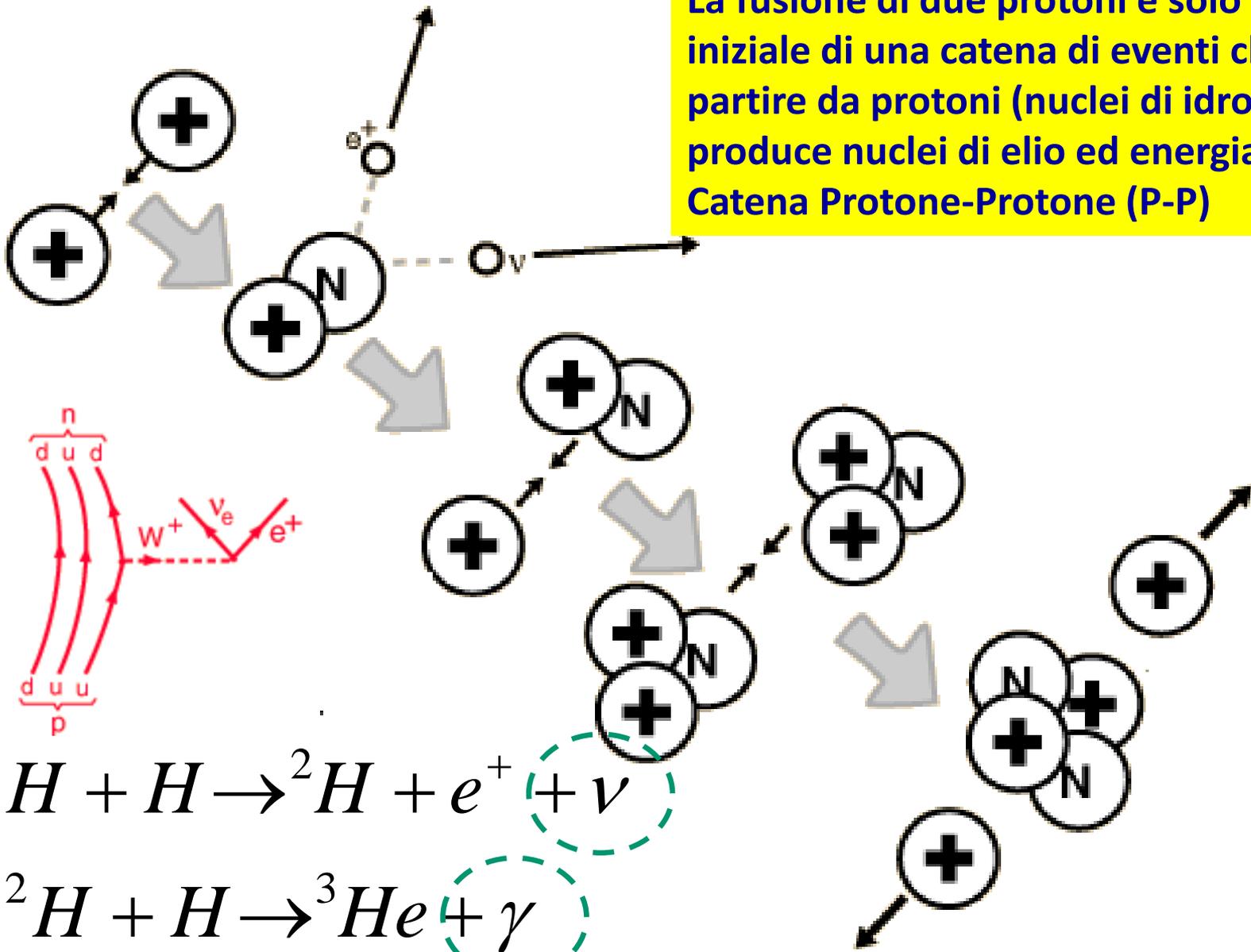
Che cosa avviene nel nucleo del Sole ?

Fusione nucleare !

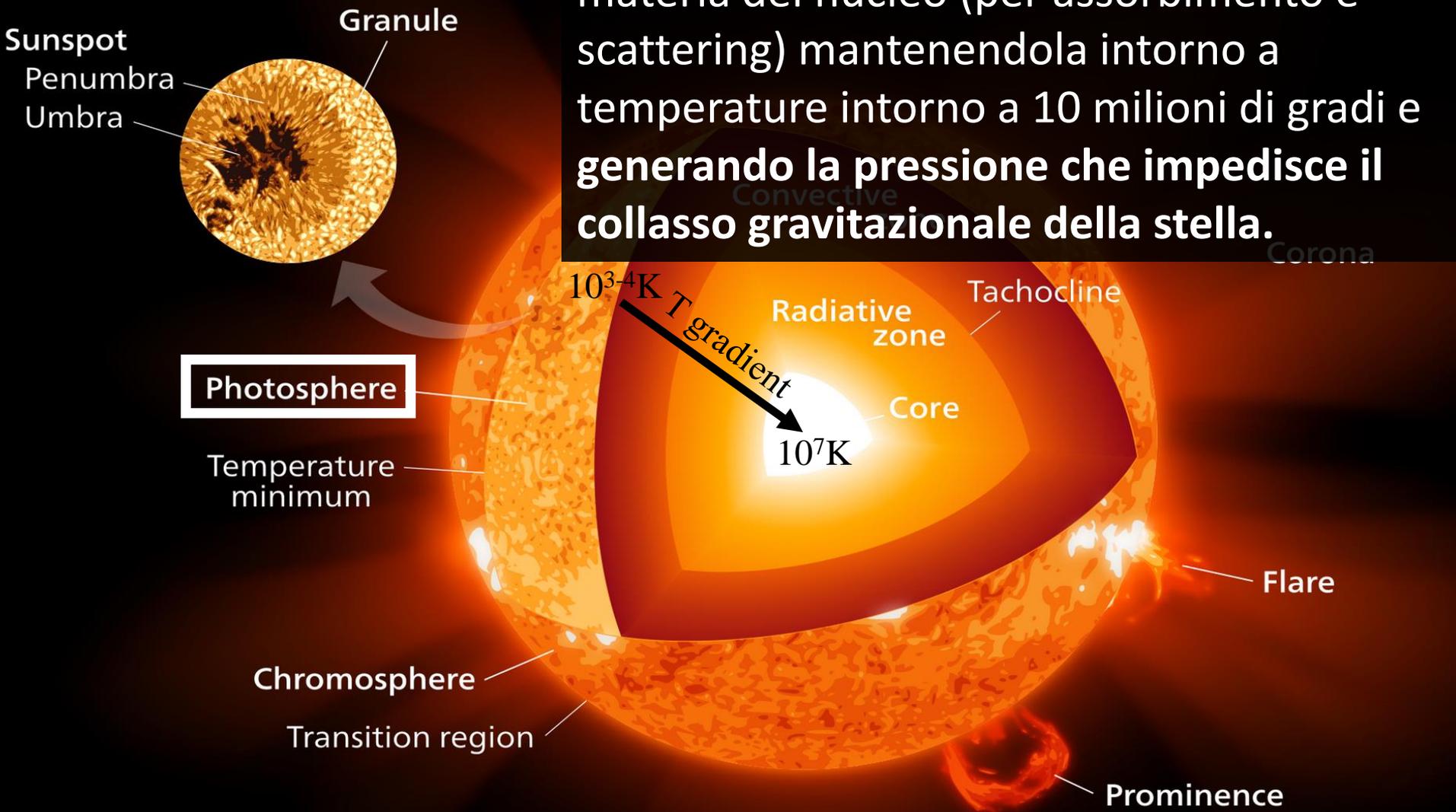


George Gamow negli anni '50 calcolò che con le velocità che hanno i protoni nel nucleo del sole, in media si verifica una fusione ogni miliardo di incontri. Con una probabilità bassissima, una parte per miliardo, si verifica un evento che classicamente sarebbe impossibile.

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.



Photosphere

Temperature minimum

Chromosphere

Transition region

$10^{3-4}K$

T gradient

10^7K

Core

Radiative zone

Tachocline

Convective

Corona

Flare

Prominence

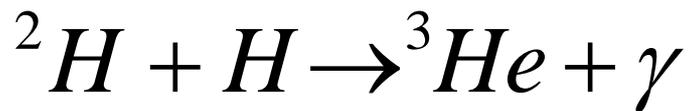
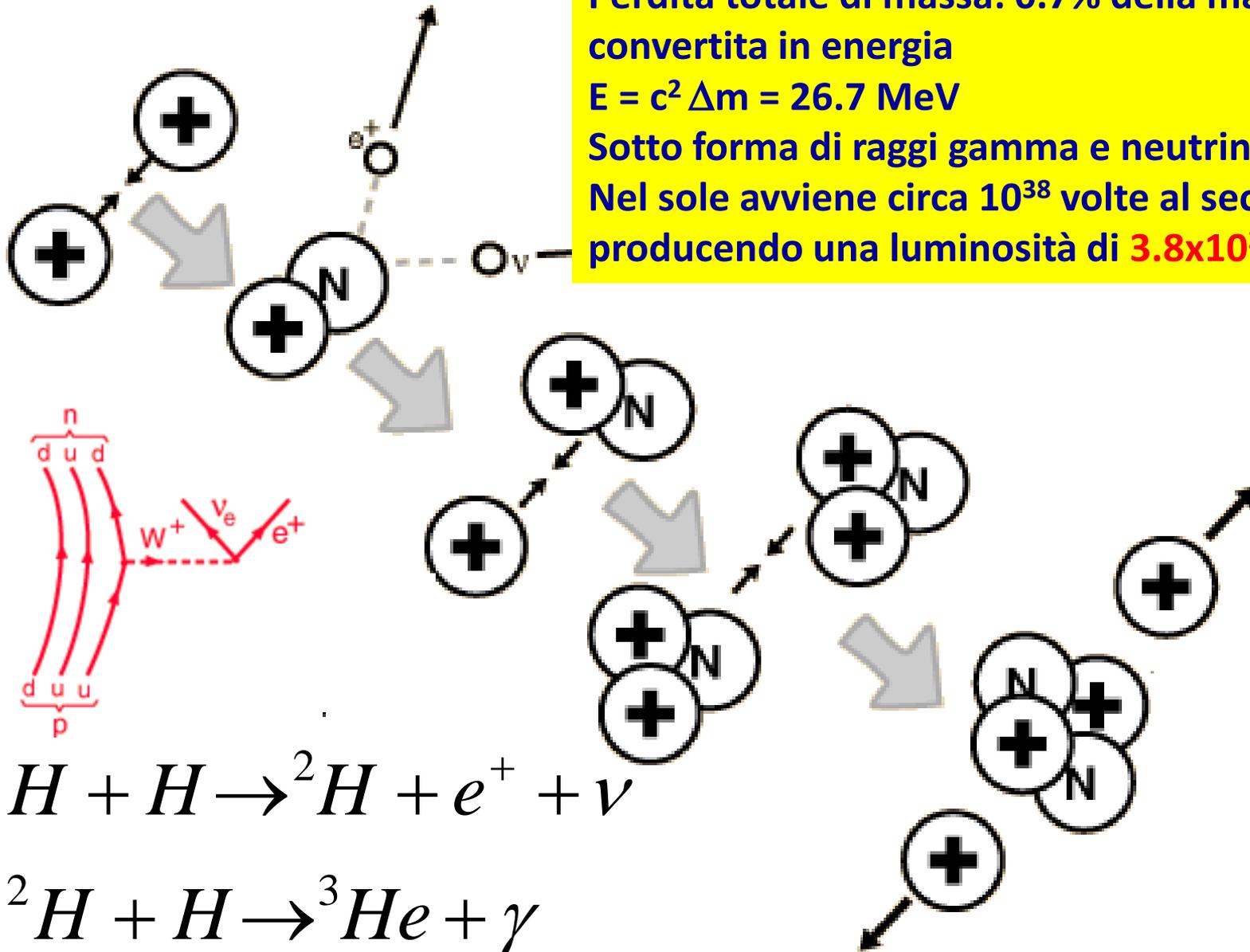
Sunspot

Penumbra

Umbra

Granule

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



Esempio 1: le fusioni tra nuclei atomici fanno funzionare le 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 enorme, una stella.
- L'energia sprigionata dalle reazioni nucleari fornisce la pressione che impedisce alla stella di collassare sotto la sua stessa gravità.
- Nel caso del Sole 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.

Esempio 2: stelle degeneri

- Che succede quando il combustibile nucleare finisce ?
- L'energia prodotta dalle fusioni non è più disponibile, e la stella, sopraffatta dalla sua stessa gravità, collassa, espellendo gli strati più esterni.
- Se non intervenisse un'altra forma di pressione, la stella collasserebbe su se stessa (classicamente senza limite).
- Invece, spesso si formano stelle densissime, ma non collassate: nane bianche o stelle di neutroni
- Sono oggetti *degeneri* in cui la pressione che controbilancia l'autogravità è di origine quantistica.



Esempio 2: stelle degeneri

- Nella foto, la nebulosa Eskimo (NGC 2392) è il risultato dell'evoluzione di una stella simile al sole.
- Quando ha finito di fondere l'idrogeno è diventata una stella gigante rossa, e poi, quando ha finito di bruciare elio ed elementi più pesanti è collassata nella stella *nana bianca* visibile al centro della foto, espellendo gli strati più esterni.
- Nella *nana bianca*, gli elettroni sono talmente vicini che un ulteriore avvicinamento è vietato dal principio di esclusione di Pauli: due elettroni diversi non possono occupare simultaneamente lo stesso stato quantico (cioè - grossolanamente - stessa velocità, posizione e spin).



Esempio 2: stelle degeneri

- Quando, durante il collasso, gli elettroni si avvicinano sempre di più, e iniziano ad essercene più di due considerabili nella stessa posizione, allora per il Principio di Esclusione devono distinguersi per le loro velocità.
- Più aumenta il numero di elettroni coincidenti, più deve aumentare la velocità degli “ultimi arrivati”, il che significa che si genera una pressione sempre più forte che a un certo punto riuscirà ad opporsi ad un ulteriore collasso della stella.
- Si è formata una nana bianca, una stella così densa che può avere la massa del Sole e il diametro della Terra. Uno stato degenero della materia, studiabile solo nell’universo.



Esempio 2: stelle degeneri

- Se la massa della stella è superiore a 1.4 volte la massa del Sole, nemmeno la pressione degli elettroni riesce a fermare il collasso.
- Gli elettroni aumentano talmente tanto le loro velocità da fondersi con i protoni che urtano.

- Si forma così una *stella di neutroni*, in cui la pressione che resiste all'autogravità diventa quella di degenerazione dei neutroni.



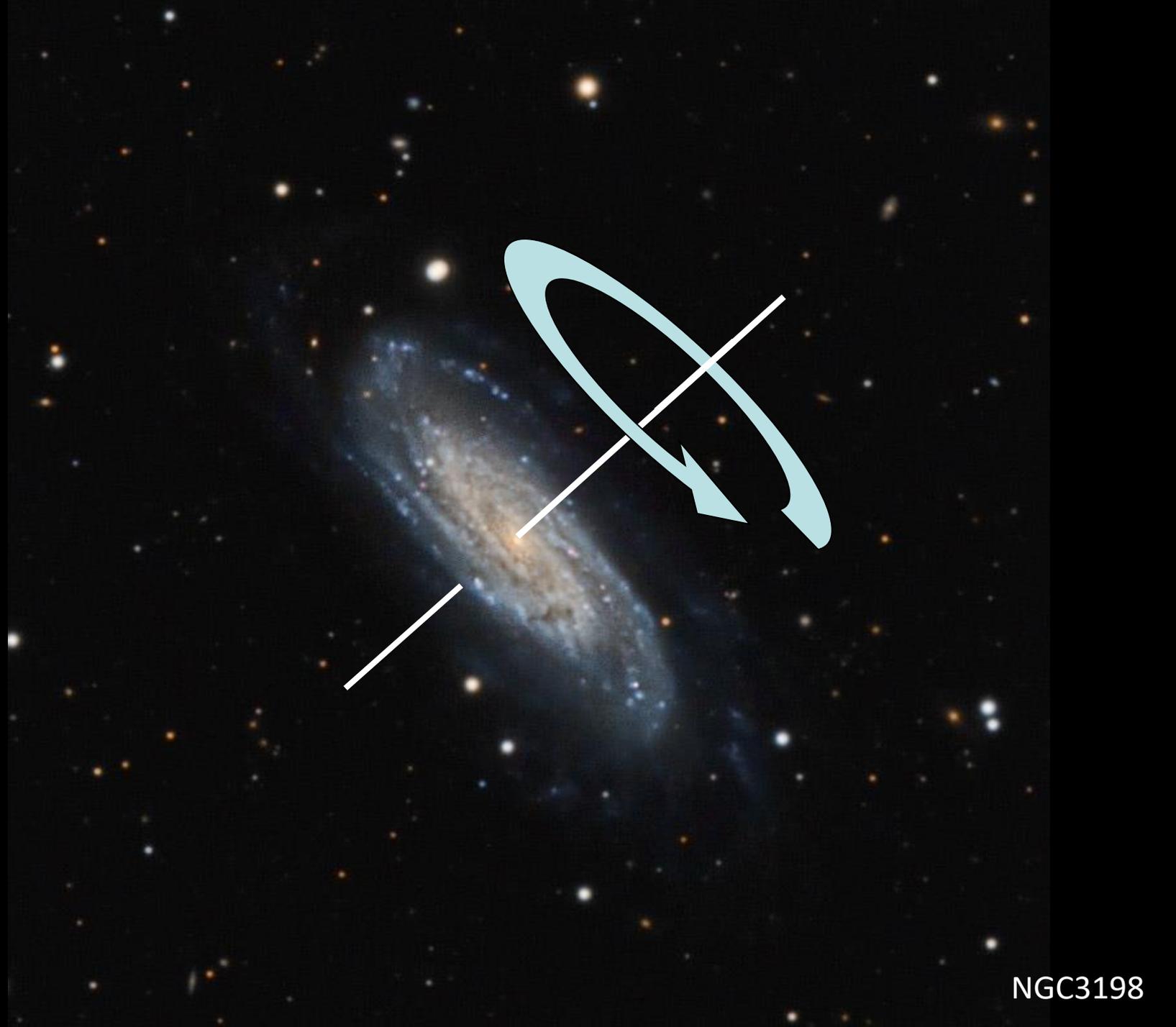
Densità = 6×10^{17} kg/m³ 100000 miliardi di volte più densa dell' acqua

Esempio 3: la dinamica delle galassie
dipende dalle proprietà delle particelle di
materia oscura

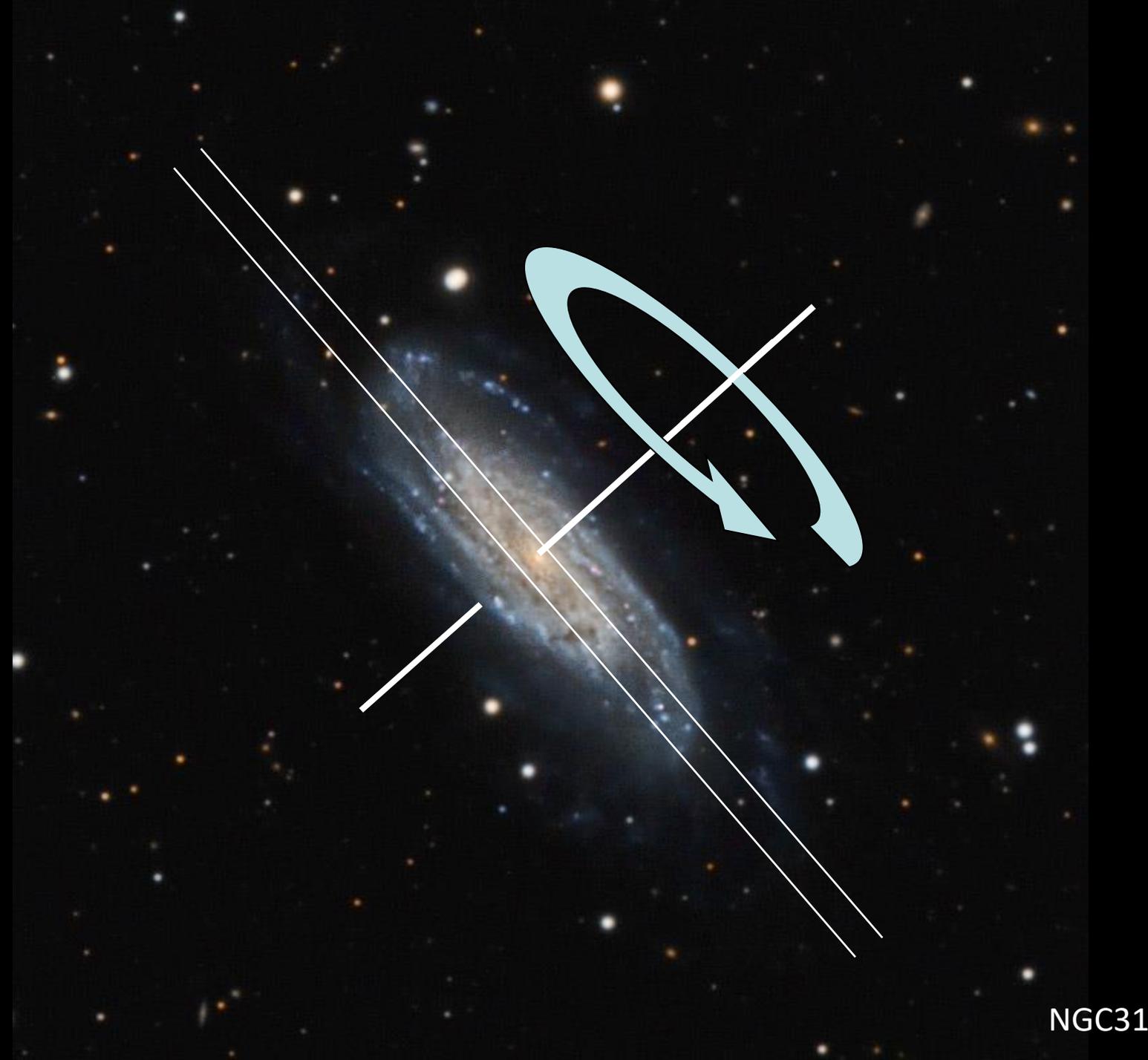




NGC3198



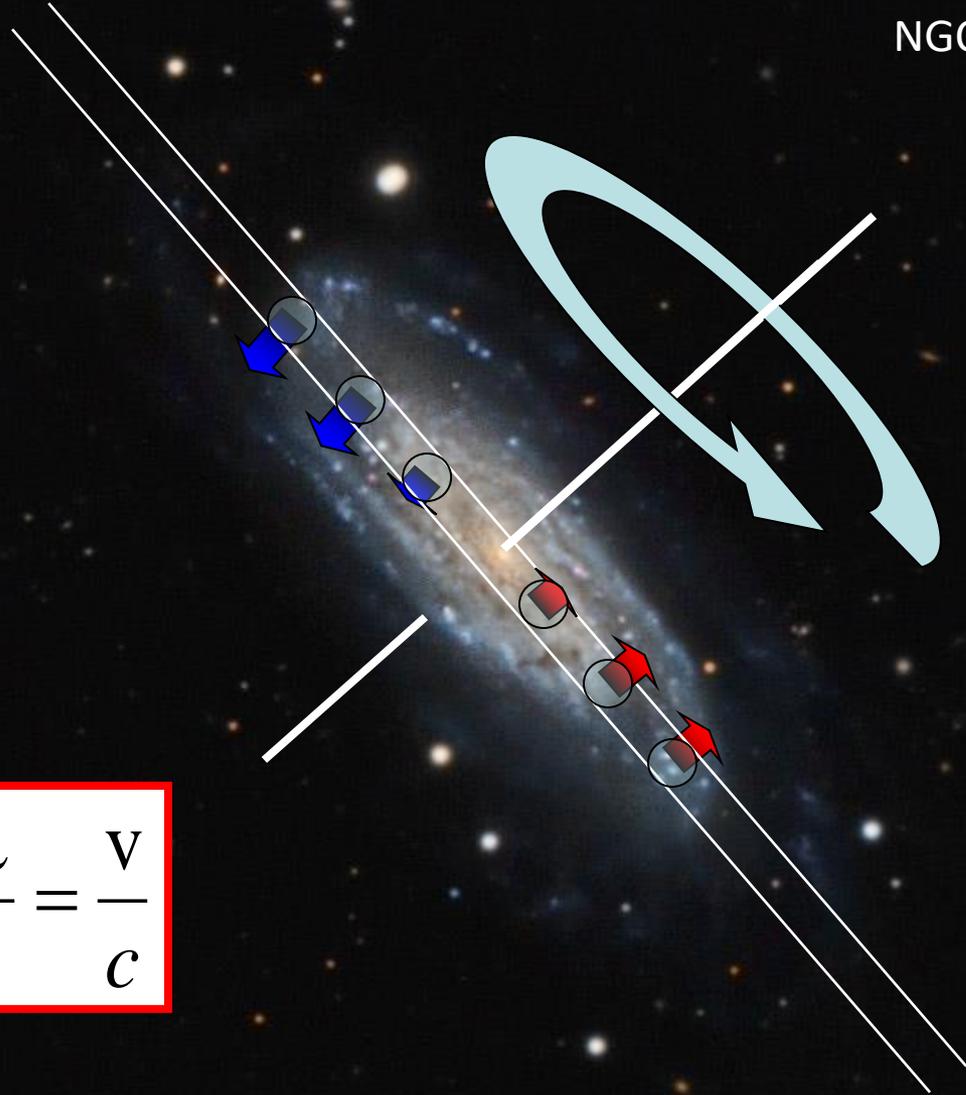
NGC3198

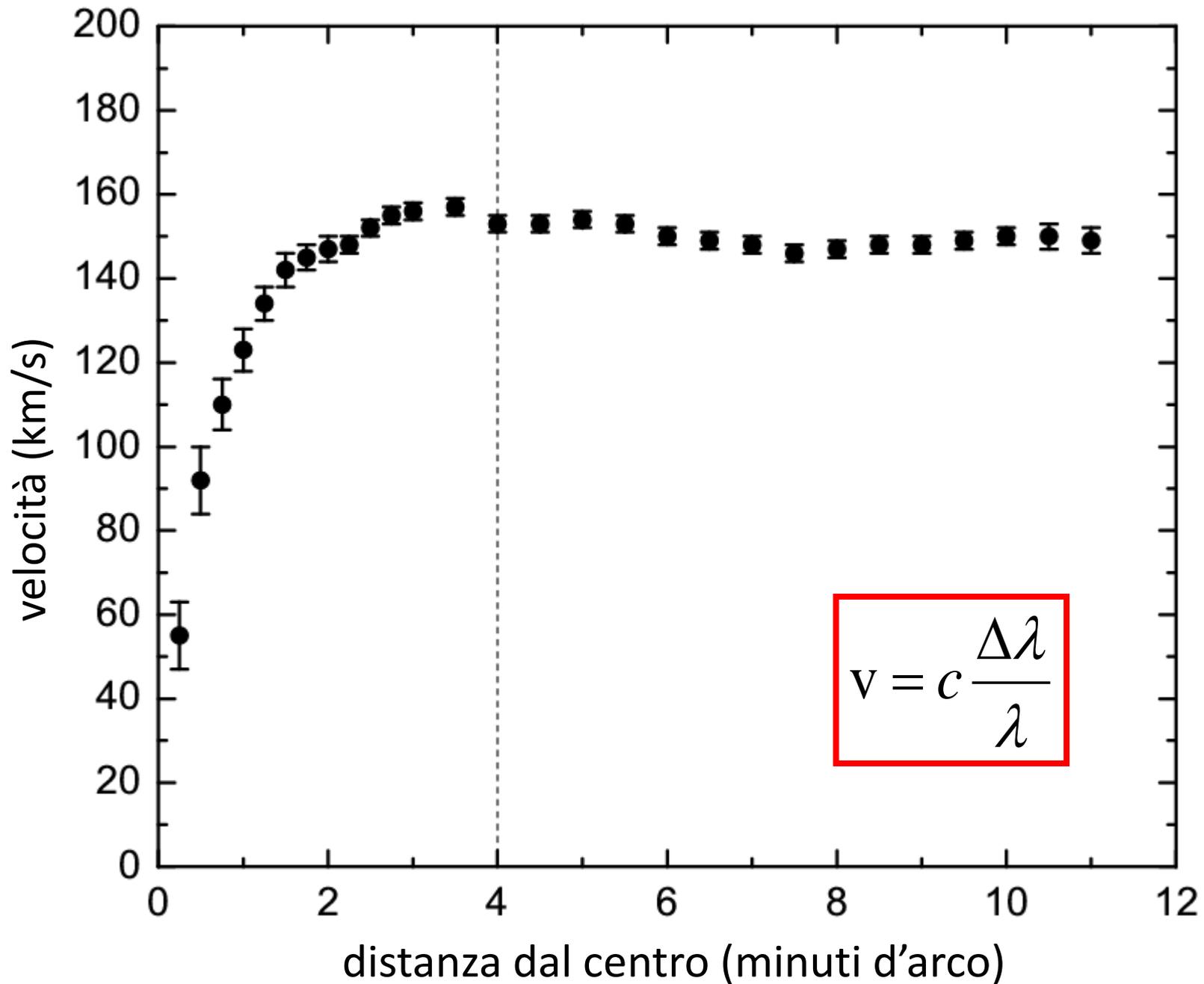


NGC3198

NGC3198

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





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.



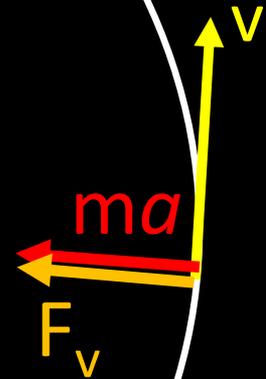


v

ma

F_v

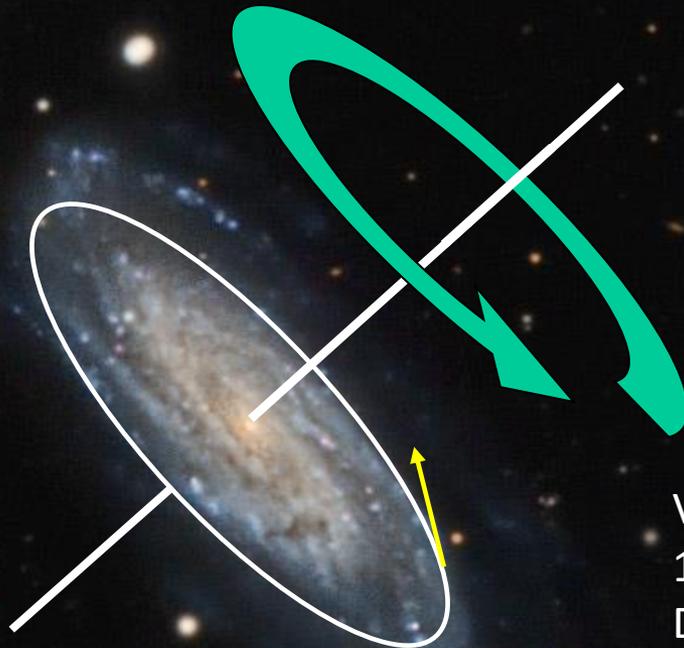
Orbite dei pianeti intorno al sole :
Forza gravitazionale



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

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

Orbite delle stelle intorno al centro delle galassie a spirale :
Forza gravitazionale



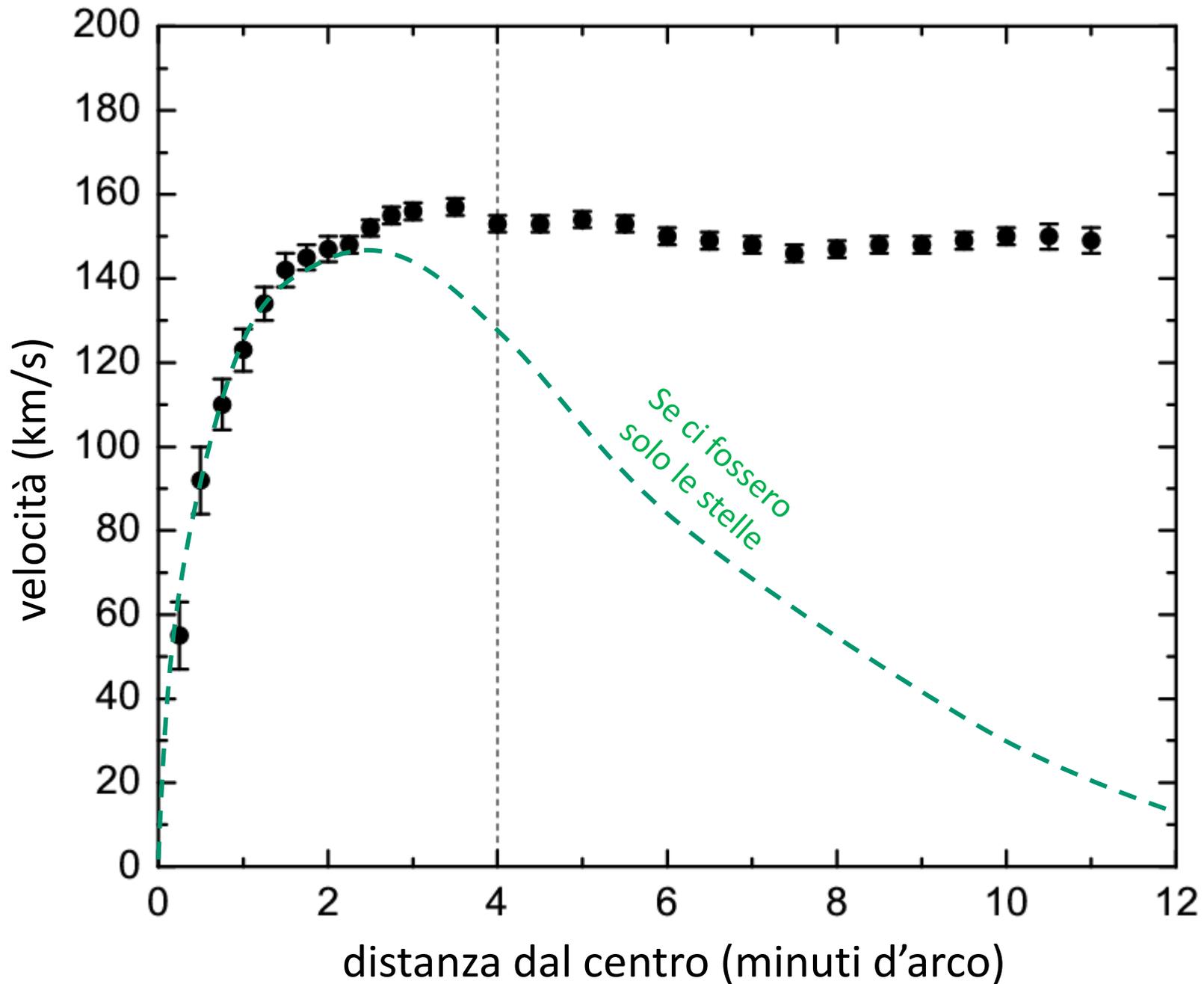
Velocità di una stella periferica :
100-200 km/s

Distanza dal centro : 10^{20} m

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

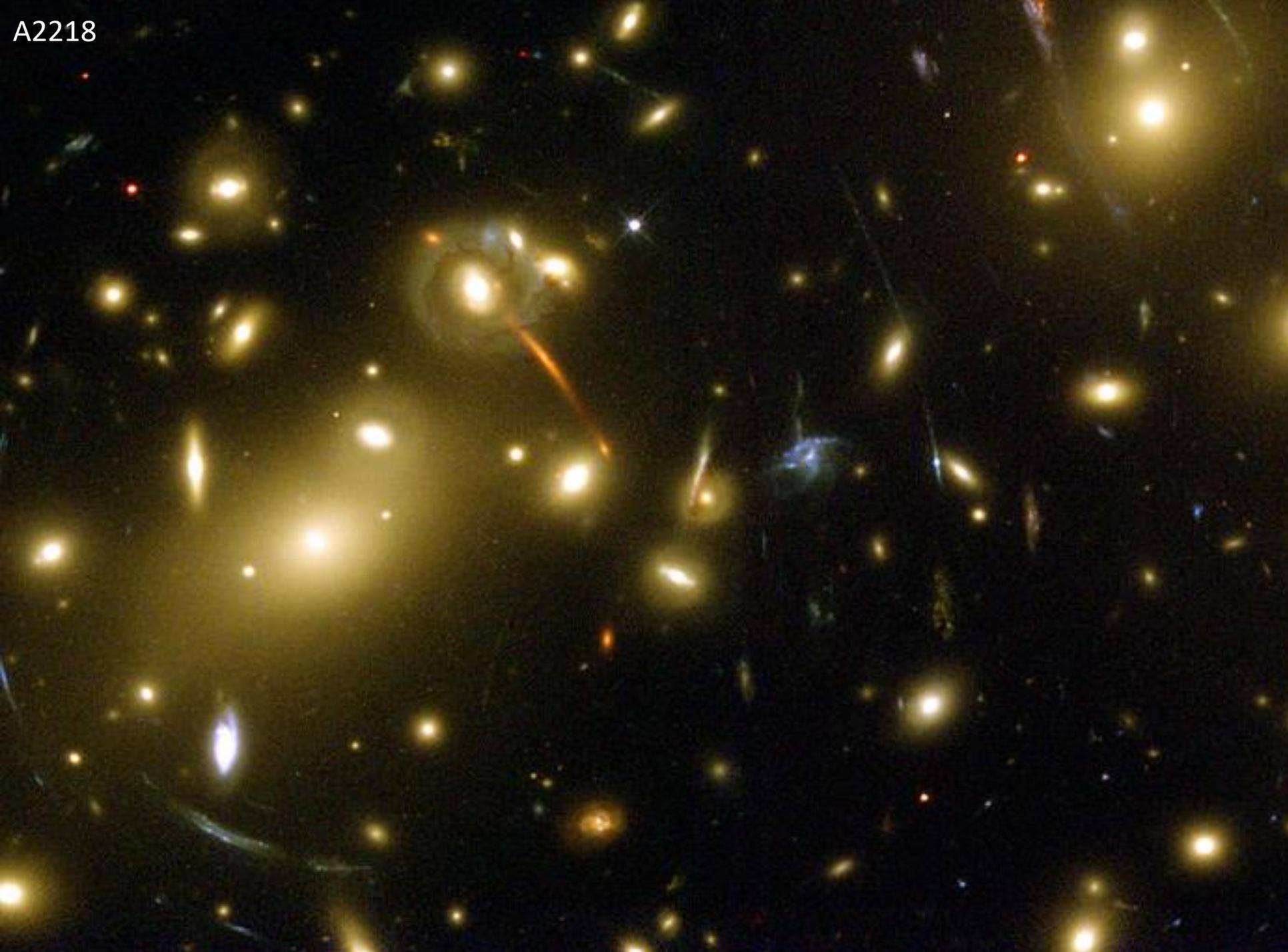
$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

La massa delle stelle non è sufficiente

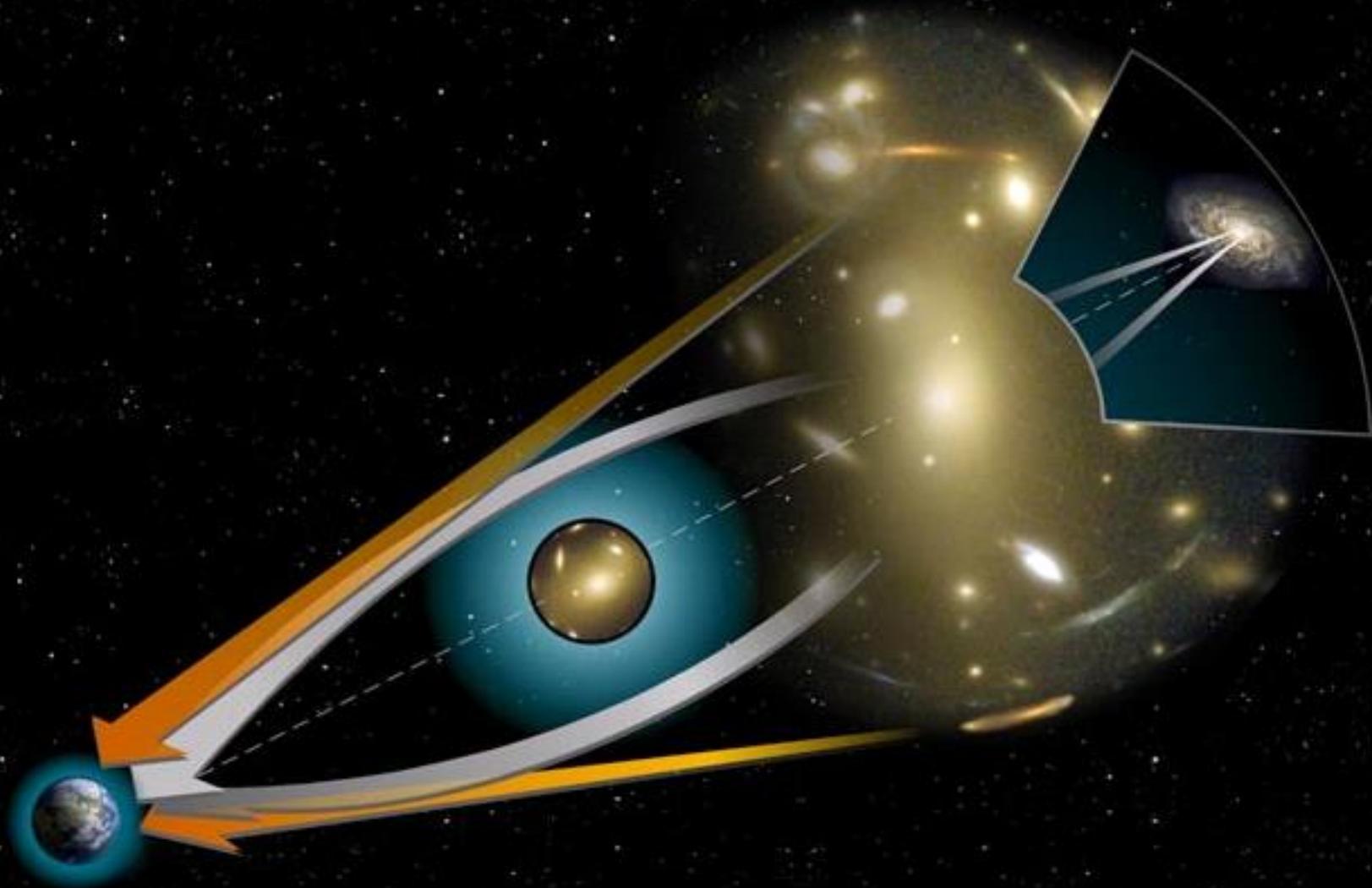


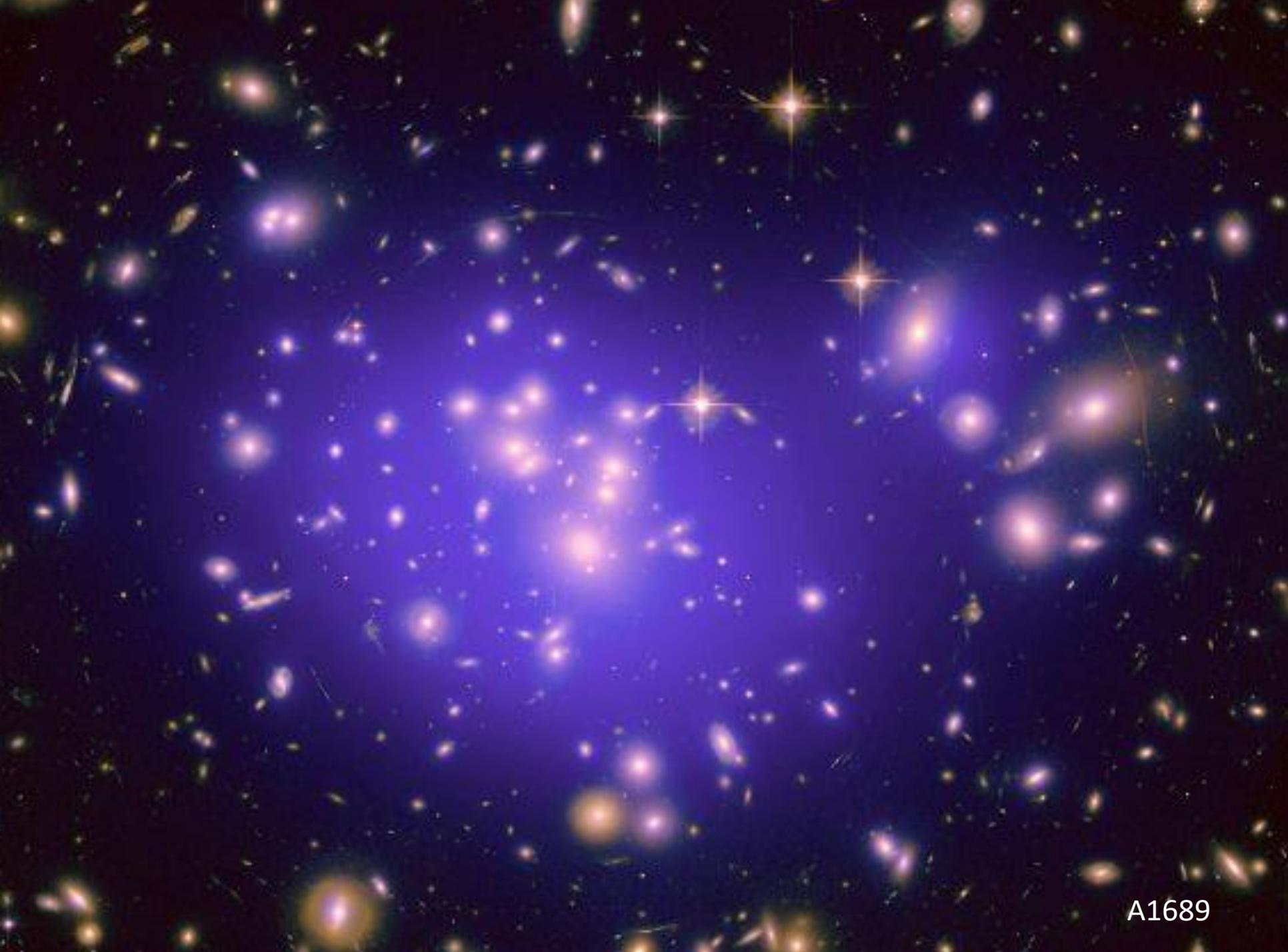


Coma



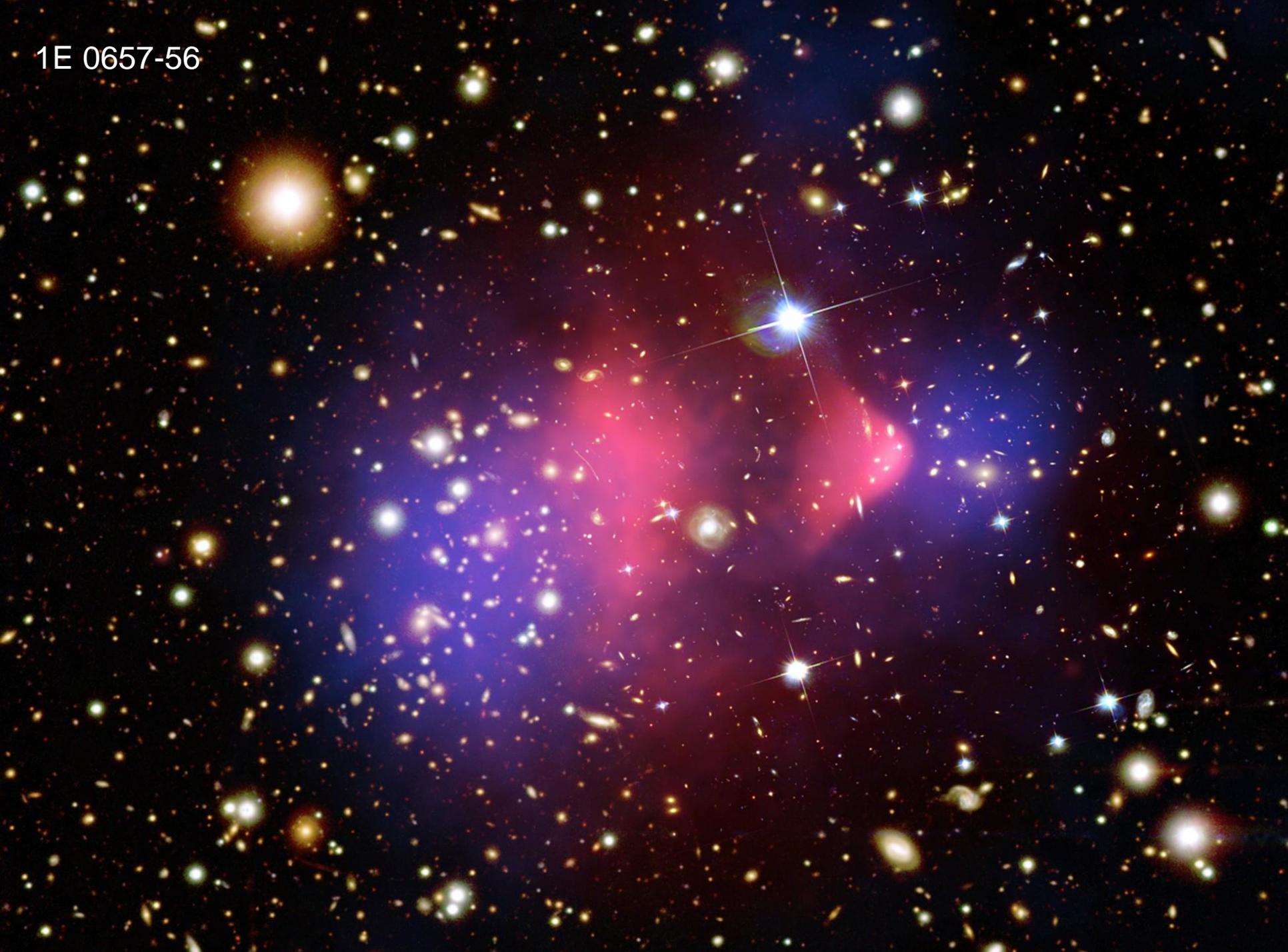
A2218

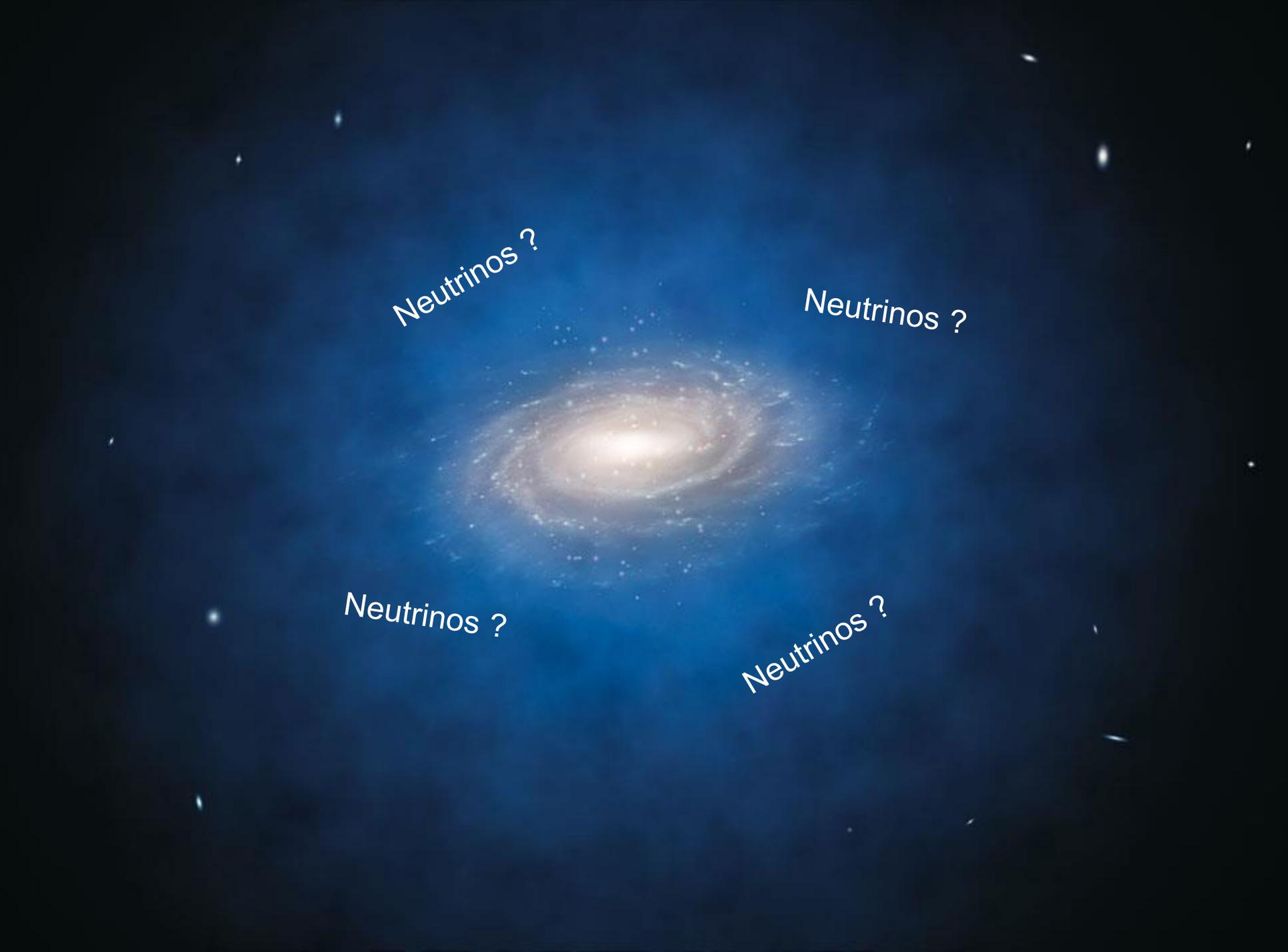




A1689

1E 0657-56



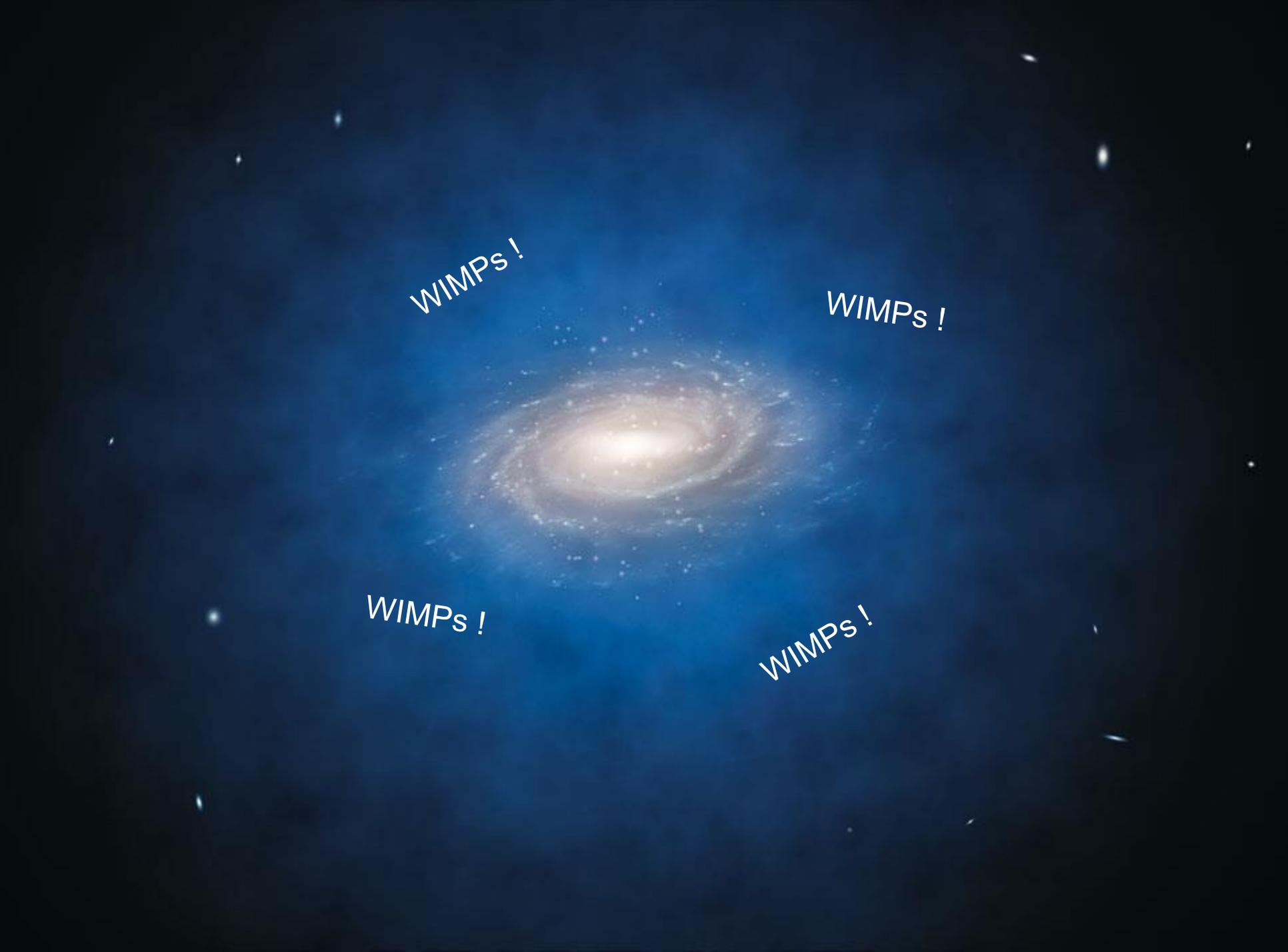


Neutrinos ?

Neutrinos ?

Neutrinos ?

Neutrinos ?



WIMPs!

WIMPs!

WIMPs!

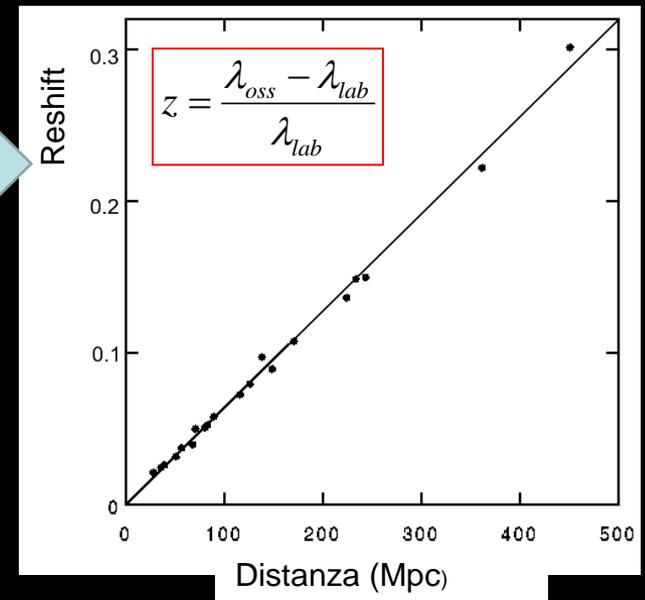
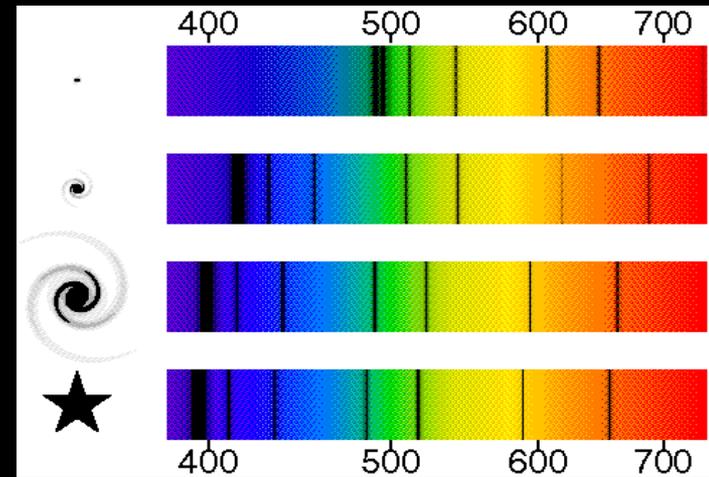
WIMPs!

Esempio 4: l'espansione dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono



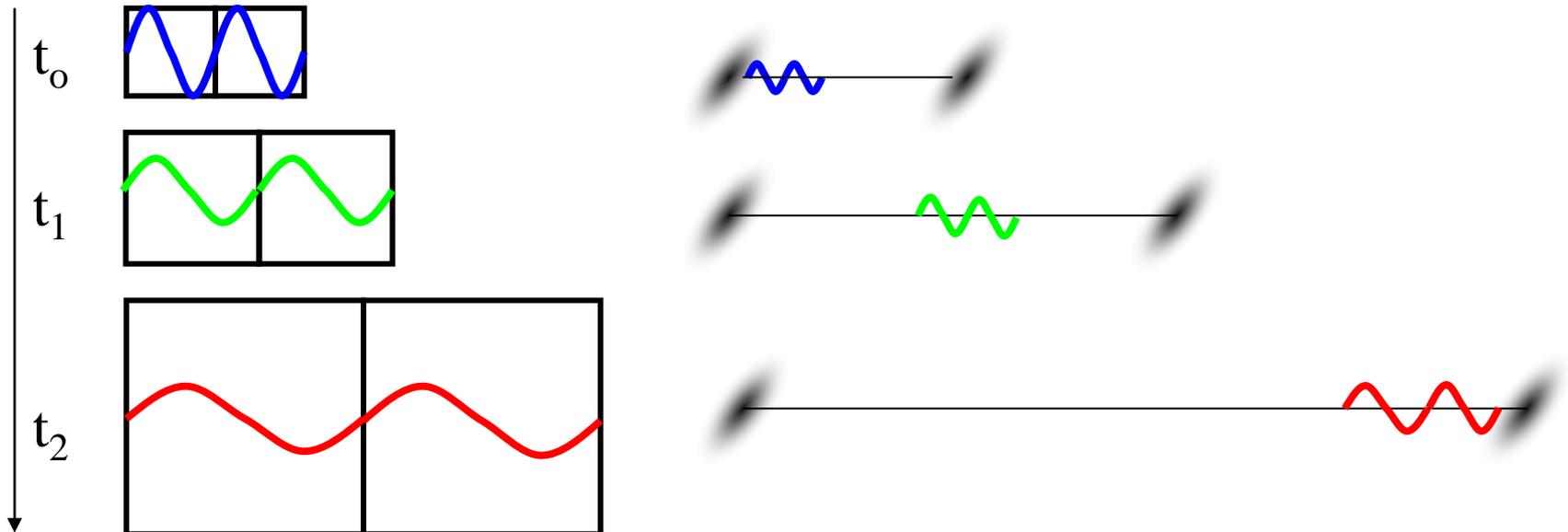
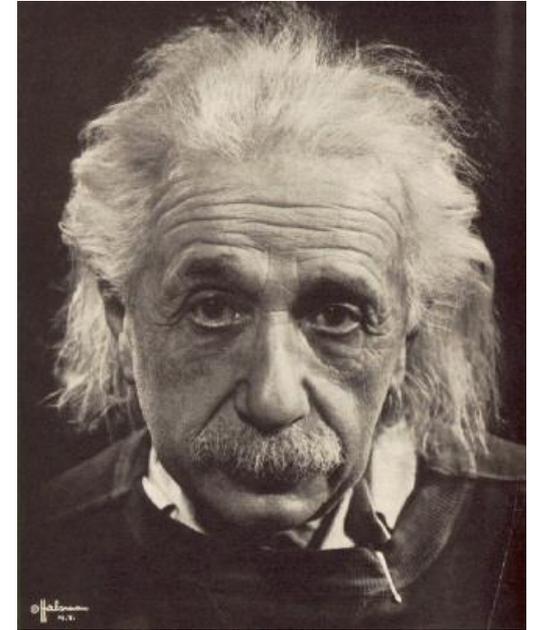
L'espansione dell'Universo

- 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 – Legge di Hubble
- E' il risultato dell'espansione dell'universo: lo spazio si espande, trascinando le galassie, e le distanze tra queste aumentano percentualmente nello stesso modo dappertutto.



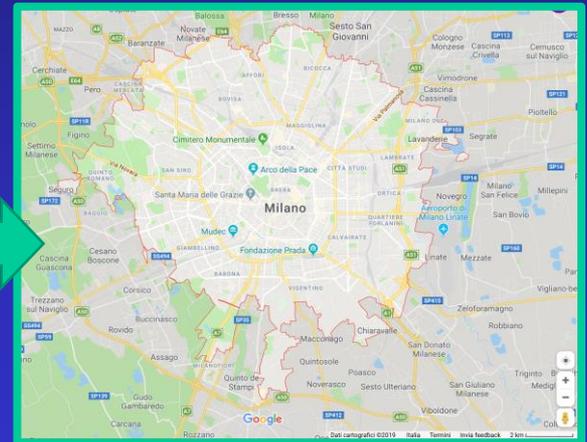
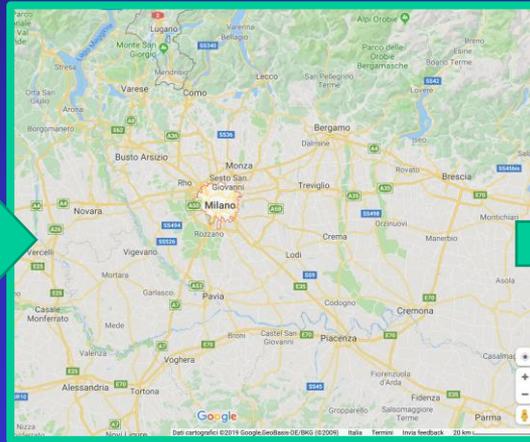
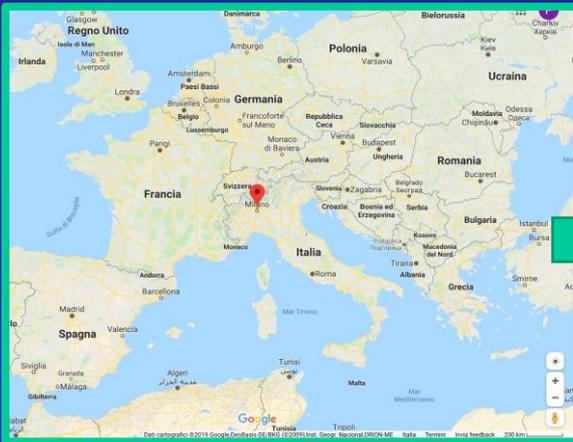
Percorrendo distanze cosmologiche, la luce cambia colore

- **La relatività generale di Einstein** prevede che, in un universo in espansione, le lunghezze d'onda λ 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).



L'equazione di Friedmann

- Sempre la relatività generale, la teoria che descrive al meglio la forza più importante agente nell'universo a grandi scale, la *gravitazione*, permette di scrivere *l'equazione di Friedmann*, che descrive *l'espansione dell'universo al passare del tempo*.
- In una espansione di questo genere, l'universo cambia come cambia una carta geografica quando si cambia la sua *scala*, ingrandendosi via via in modo omologo, e diminuendo la densità degli oggetti (ad es. le città) presenti nella mappa.



$$a = \frac{1}{10000000}$$

10000 città/mappa



$$a = \frac{1}{1000000}$$

100 città/mappa



$$a = \frac{1}{100000}$$

1 città/mappa

L'equazione di Friedmann

- Sempre la relatività generale, la teoria che descrive al meglio la forza più importante agente nell'universo a grandi scale, la *gravitazione*, permette di scrivere l'*equazione di Friedmann*, che descrive l'*espansione dell'universo al passare del tempo*.
- In una espansione di questo genere, l'universo cambia come cambia una carta geografica quando si cambia la sua scala, ingrandendosi via via, e diminuendo la densità di *galassie*, che si allontanano le une dalle altre. Il fattore di scala a ci dice quanto.



$$a = \frac{1}{100}$$

1000000 galassie/udv



$$a = \frac{1}{10}$$

1000 galassie/udv



$$a = \frac{1}{1}$$

10 galassie/udv

L'equazione di Friedmann

- Secondo la relatività generale, il fattore di scala dell'universo a dipende dal tempo, secondo questa equazione:

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

- Notate solo che l'espansione $a(t)$ dipende dal *contenuto*, cioè delle varie forme di massa-energia presenti (quantificate dai parametri di densità Ω_i).
- Tutte le forme di massa energia «gravitano» e quindi influiscono sulla dinamica dell'universo:
 - Materia normale e oscura Ω_M
 - Materia relativistica (includendo la luce – i fotoni - e i neutrini) Ω_R
 - Energia oscura (energia del vuoto) Ω_{Λ}
- Se vogliamo sapere come si espande l'universo, dobbiamo sapere di che cosa è fatto. Quante stelle, quanta materia oscura, quanta luce ..

L'equazione di Friedmann

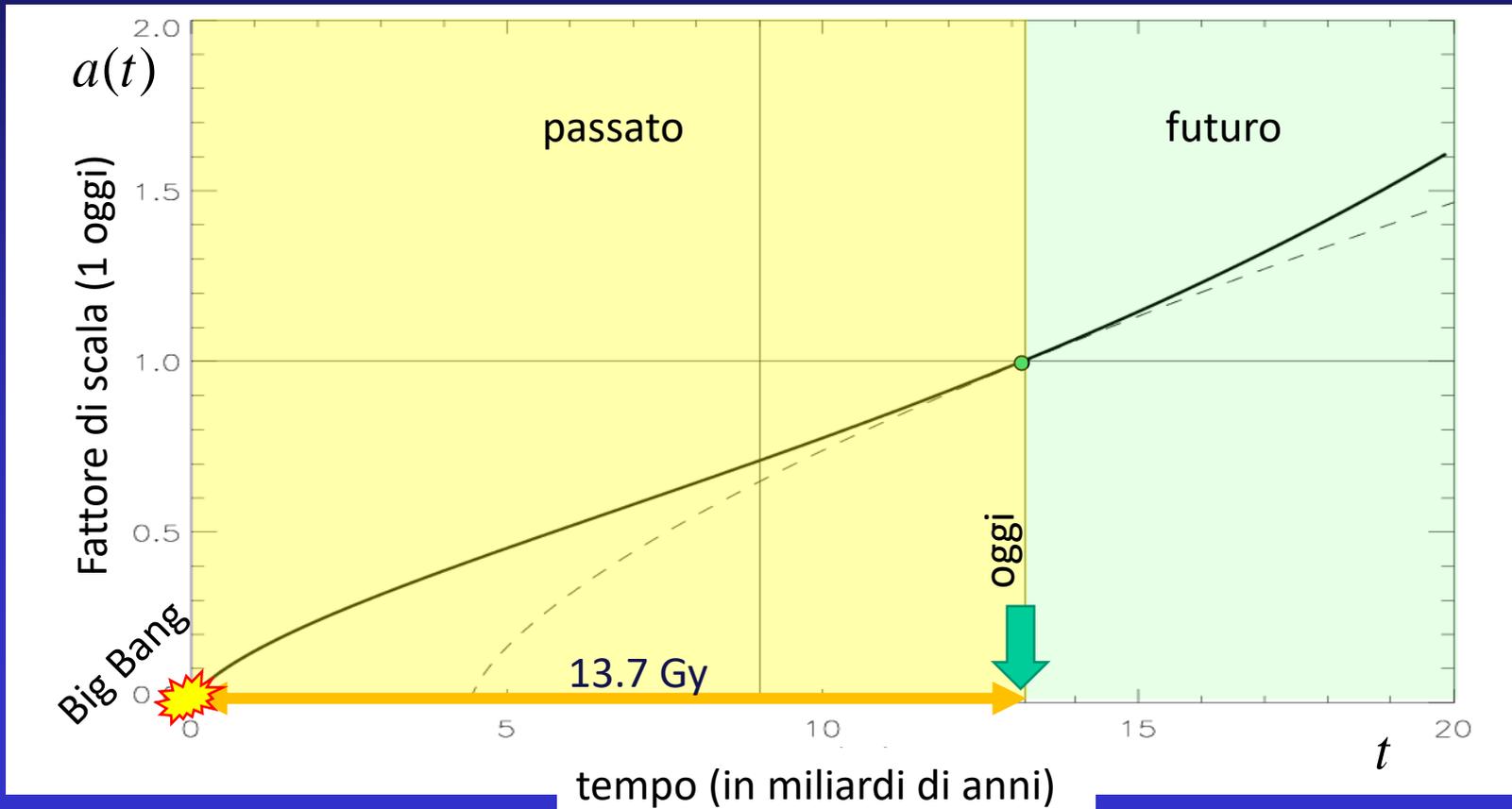
- Secondo la relatività generale, il fattore di scala dell'universo a dipende dal tempo secondo questa equazione

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

- Notate solo che l'espansione $a(t)$ dipende dal *contenuto*, cioè delle varie forme di massa-energia presenti (quantificate dai parametri di densità Ω_i).
- Tutte le forme di massa energia «gravitano» e quindi influiscono sulla dinamica dell'universo:
 - Materia normale e oscura Ω_M **4% e 22%**
 - Materia relativistica (includendo la luce – i fotoni - e i neutrini) Ω_R
 - Energia oscura (energia del vuoto) Ω_{Λ} **74%** **0.3%**
- Se vogliamo sapere come si espande l'universo, dobbiamo sapere di che cosa è fatto. Quante stelle, quanta materia oscura, quanta luce ..

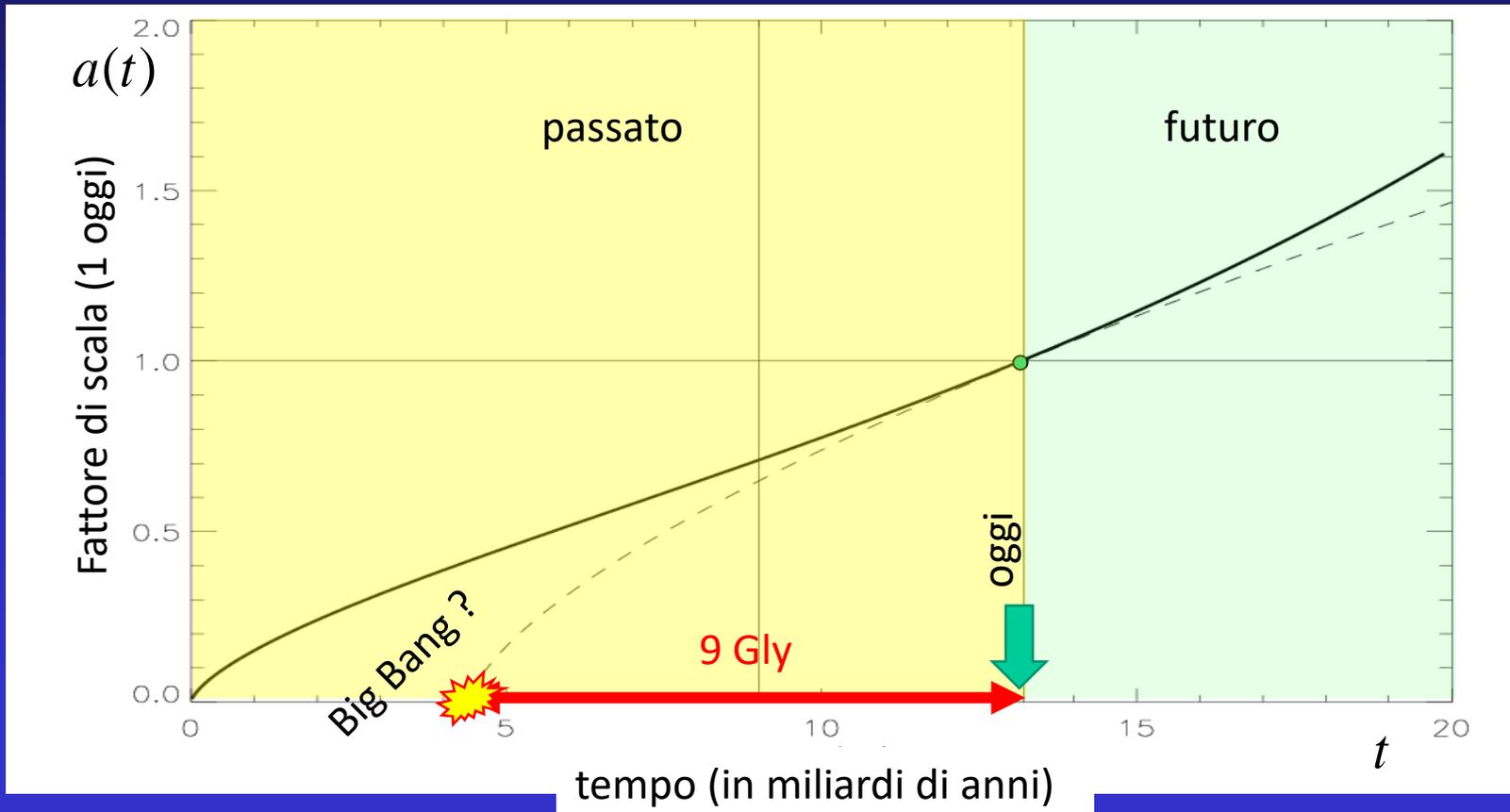
L'equazione di Friedmann

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



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 5: 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 ed 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.

Esempio 5: l'evoluzione **termica** dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t = \text{pochi } \mu\text{s}$ dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)

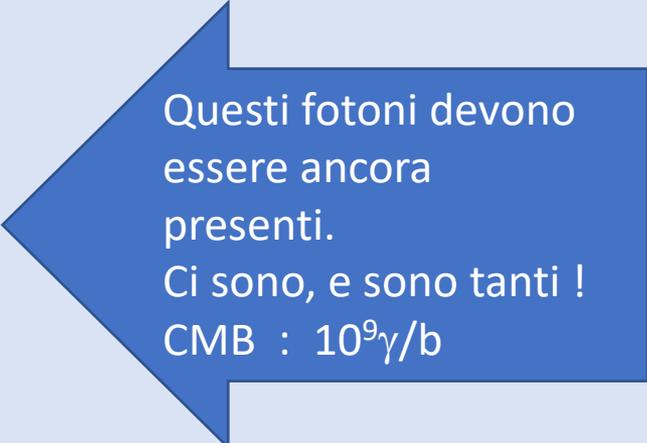
Universo opaco

Universo trasparente

tempo

Esempio 5: l'evoluzione **termica** dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t = \text{pochi } \mu\text{s}$ dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)



Questi fotoni devono essere ancora presenti.
Ci sono, e sono tanti !
CMB : $10^9 \gamma/b$

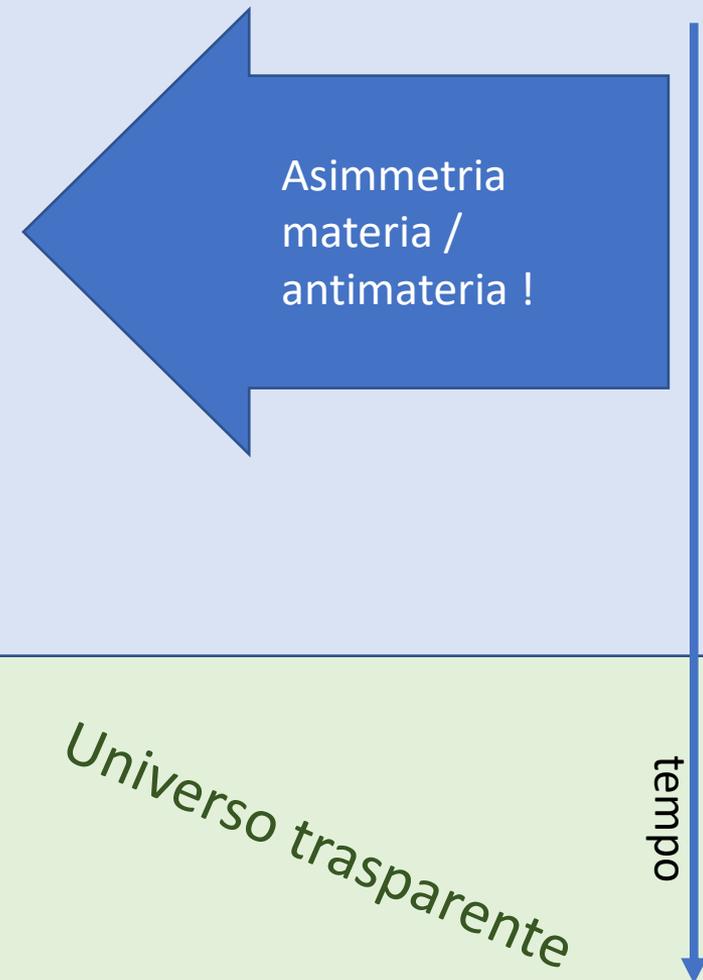
Universo trasparente

tempo



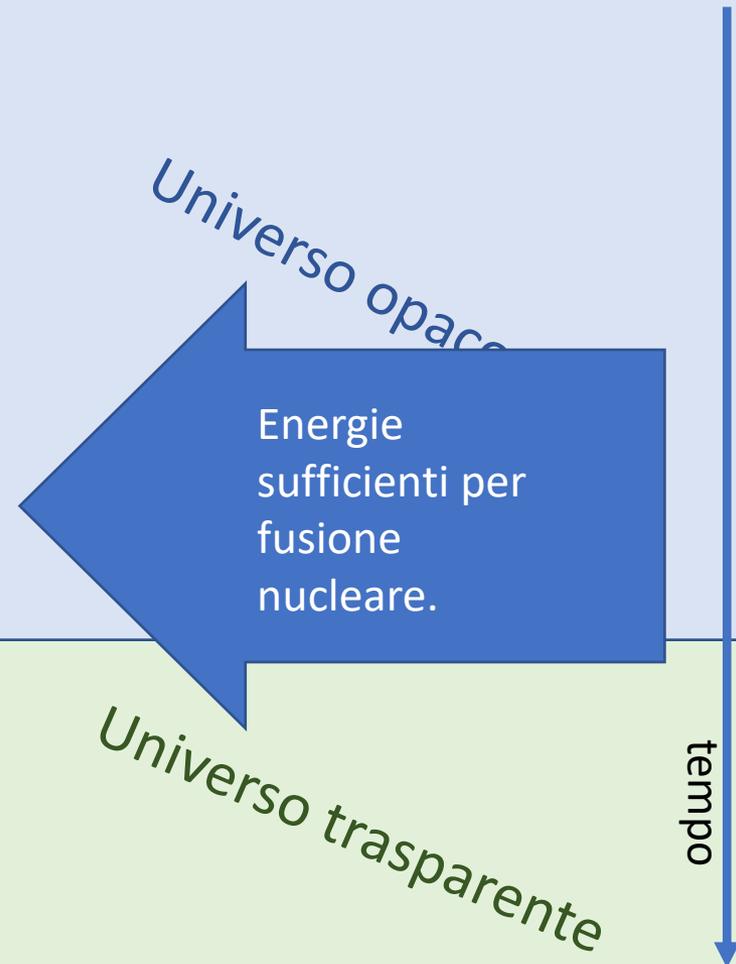
Esempio 5: l'evoluzione **termica** dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t = \text{pochi } \mu\text{s}$ dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)



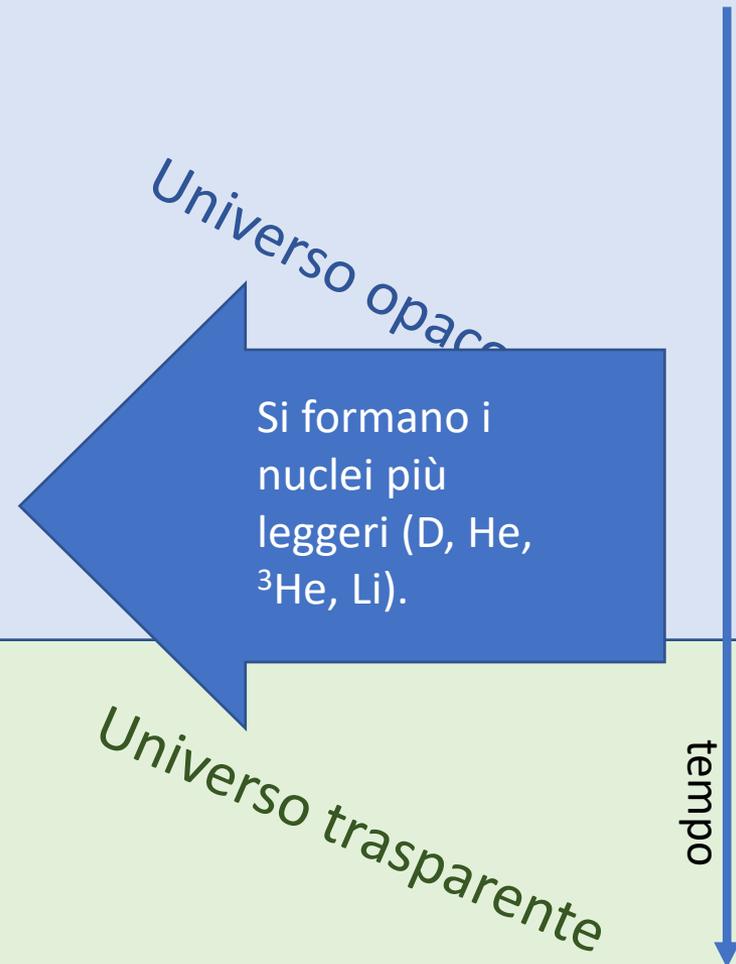
Esempio 5: l'evoluzione **termica** dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t = \text{pochi } \mu\text{s}$ dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)



Esempio 5: l'evoluzione **termica** dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t = \text{pochi } \mu\text{s}$ dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)



Esempio 5: l'evoluzione **termica** dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t =$ pochi μs dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)



Esempio 5: l'evoluzione **termica** dell'universo dipende dalle diverse forme di massa-energia che lo compongono

- **Big bang** ($t=0$)
- **Bariogenesi** (annichilazione di particelle e antiparticelle, *produzione di fotoni*, $t = \text{pochi } \mu\text{s}$ dopo il big bang)
- **Nucleosintesi** (i primi 3 minuti)
- **Ricombinazione** (formazione dei primi atomi: 380000 anni)
- **Formazione delle galassie** (100 milioni di anni)
- **Oggi** (13.7 miliardi di anni)

Universo opaco

Qui (3000K) l'universo da ionizzato diventa neutro, la luce può propagarsi in linea retta, astronomia

Universo trasparente

tempo

la luce più antica

- Proviene da oltre le più lontane galassie, e quindi dall'universo primordiale
- Secondo Marcello Palingenio (Zodiacus Vitae, circa 1530) oltre le stelle c'è una speciale luce, intensissima ma invisibile ai nostri occhi:

Lucem, quam nostri Solis longe minor est lux
Lucem, quam terreni oculi non cernere possum

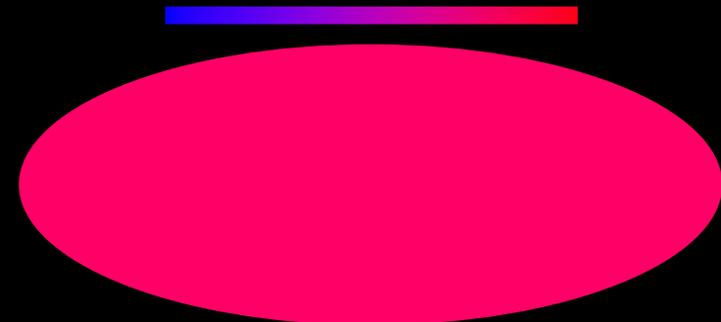
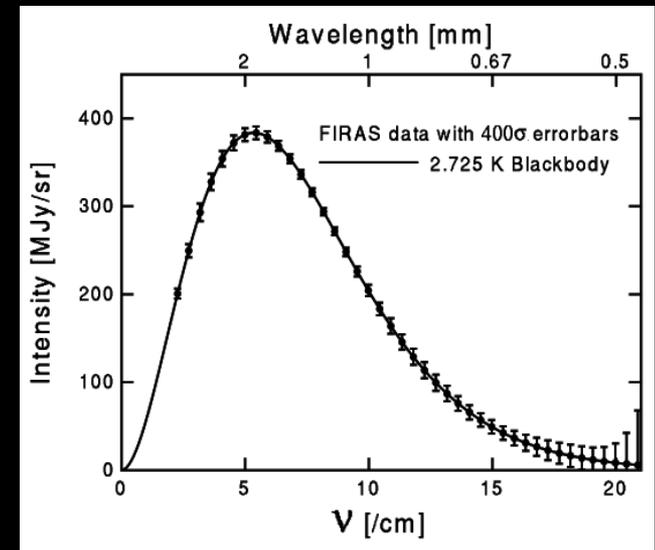
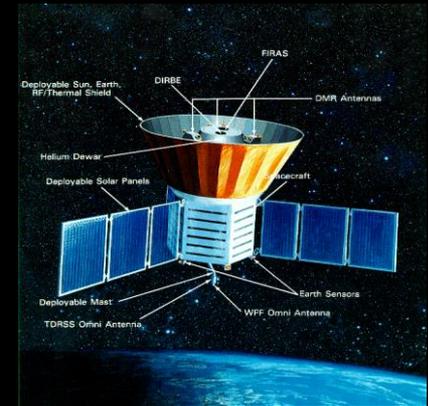
- Una intuizione, certo, ma sorprendentemente vicina a quanto possiamo prevedere con un ragionamento di tipo scientifico rigoroso.

Cercando la luce più antica

- Come dal Sole, che è denso e ionizzato, proviene radiazione di tipo termico (*di corpo nero*) anche dall' universo primordiale, che era ugualmente denso e ionizzato, deve provenire lo stesso tipo di radiazione.
- Ma il corpo nero prodotto nell' universo primordiale subisce anche un forte redshift.
- Mentre il corpo nero prodotto dal sole emette la maggior parte dei fotoni nel visibile, ad una lunghezza d'onda di $0.5\mu\text{m}$, quello primordiale deve emetterli ad una lunghezza d'onda un po' più lunga, che viene resa *molto* più lunga dalla successiva espansione dell' universo.

Cercando la luce più antica

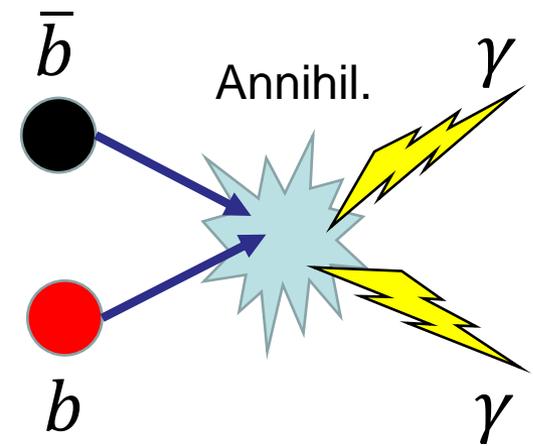
- Per studiare la radiazione proveniente dall'universo primordiale dobbiamo dotarci di telescopi per lunghezze d'onda lunghe.
- Quanto? Nessuno ce lo può dire, dipende da quante volte si è espanso l'universo da quando è diventato trasparente a oggi. Quindi si deve provare a osservare nell'IR, poi nel FIR, poi nelle microonde ...
- Costruendo telescopi per lunghezze d'onda sempre più lunghe, la radiazione cosmica di fondo (CMB, cosmic microwave background) è stata trovata nelle microonde.
- Satellite COBE, 1990, Nobel a Mather e Smooth



Cercando la luce più antica

- Già la sua esistenza, e la densità di questi fotoni, circa 400 per ogni cm^3 di universo, pone quesiti fondamentali per la fisica fondamentale, per come si sono formati alla bariogenesi, all'annichilazione di materia e antimateria.
- I fotoni del CMB sono molti di più dei barioni, circa un miliardo a uno. Ma dei barioni sono rimasti.
- Questo significa che c'è stata una lievissima (una parte per miliardo) violazione di simmetria nel processo di annichilazione materia/antimateria, pochi microsecondi dopo il big bang.
- Perché ? E' un quesito irrisolto e fondamentale.

Universo con materia e antimateria \longrightarrow Universo con soli fotoni CMB



Cercando la luce più antica

- La radiazione cosmica di fondo, proveniendo da così lontano e con una origine così remota nel tempo, è un mezzo straordinario di indagine, sia della cosmologia che della fisica fondamentale, in molti altri modi.
- Sono state ottenute *immagini dettagliate del CMB e quindi dell'universo primordiale*.
- Vedere come era fatto ci permette di capire molte cose su
 - Curvatura dell'universo (esperimento BOOMERanG, 2000)
 - Densità di massa-energia (barioni, materia oscura, energia oscura) e formazione delle strutture: esperimenti WMAP, Planck ...)
 - Struttura degli ammassi di galassie, osservati in controluce contro lo sfondo brillante del fondo di microonde (SPT, OLIMPO, 2018)
 - L'origine delle prime strutture, l'ipotetico processo di inflazione cosmica (esperimenti di polarizzazione, SO, S4, LiteBIRD ... 2028 ?)

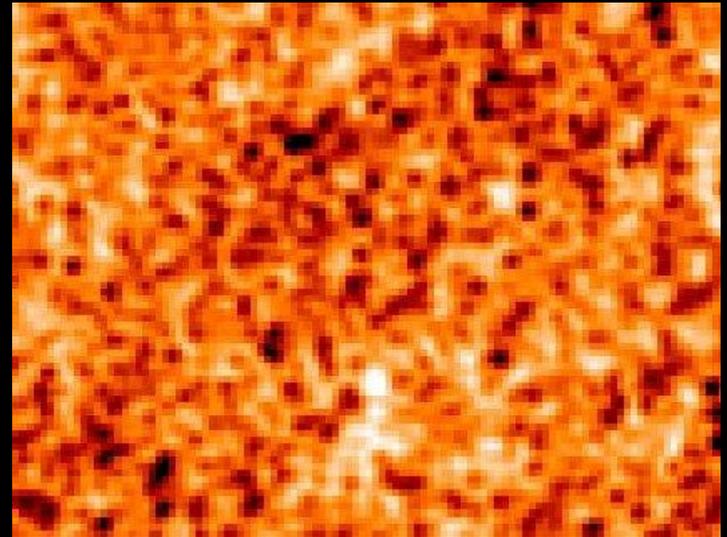
Cercando la luce più antica

- Ma la radiazione cosmica di fondo, proveniendo da così lontano e con una origine così remota nel tempo, è un mezzo straordinario di indagine, sia della cosmologia che della fisica fondamentale, in molti modi.
- Sono state ottenute *immagini dettagliate del CMB e quindi dell'universo primordiale*.
- Vedere come era fatto ci permette di capire molte cose su
 - ➔ Curvatura dell'universo (esperimento BOOMERanG, 2000)
 - Densità di massa-energia (barioni, materia oscura, energia oscura) e formazione delle strutture: esperimenti WMAP, Planck ...)
 - Struttura degli ammassi di galassie, osservati in controluce contro lo sfondo brillante del fondo di microonde (SPT, OLIMPO, 2018)
 - L'origine delle prime strutture, l'ipotetico processo di inflazione cosmica (esperimenti di polarizzazione, SO, S4, LiteBIRD ... 2028 ?)

BOOMERanG 29/12/1998



Granulazione solare



Gas incandescente
sulla superficie del
Sole (5500 K)

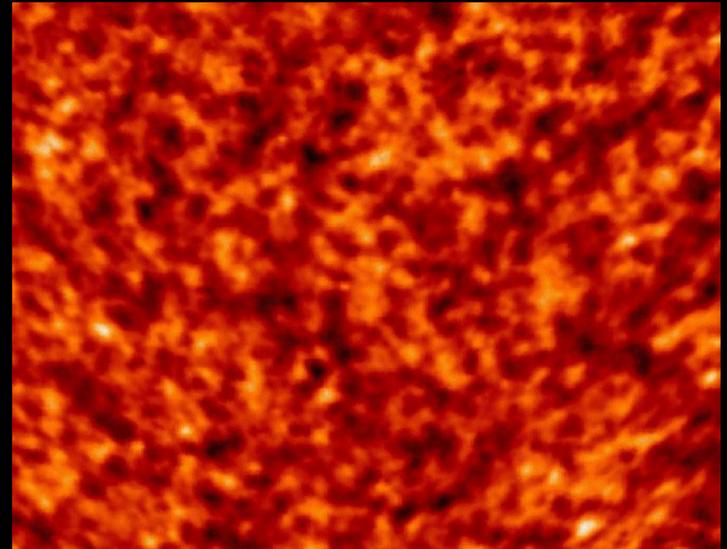
8 minuti luce

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

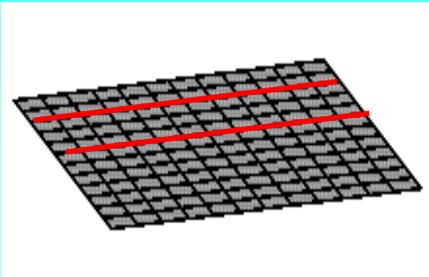
Che geometria ha il nostro universo ? Dipende da quanta massa-energia c'è !

Densita'
Critica

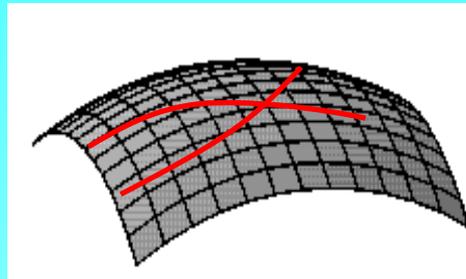
Densita'
piu' alta

Densita'
piu' bassa

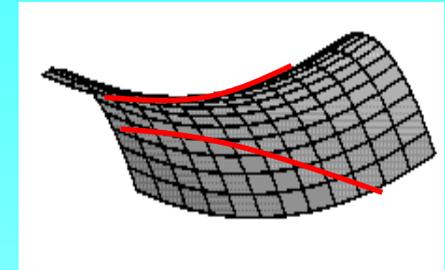
Spazio Euclideo in 2-D



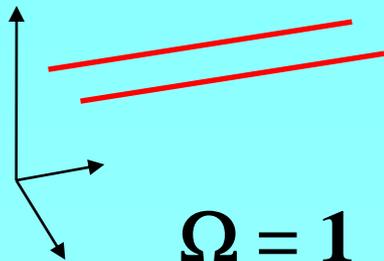
Spazio curvo in 2-D
(curvatura positiva)



Spazio curvo in 2-D
(curvatura negativa)

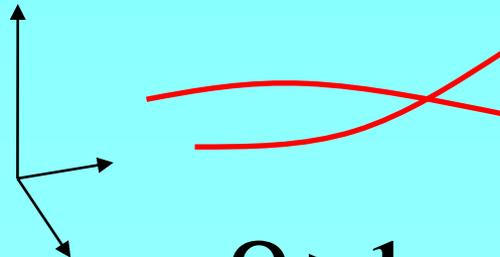


Spazio Euclideo in 3-D



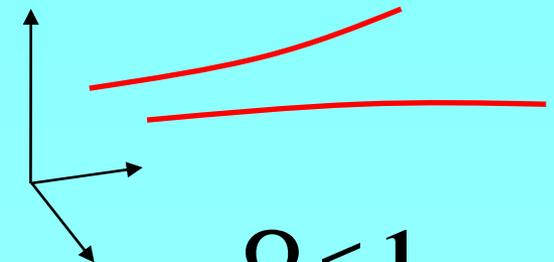
$$\Omega = 1$$

Spazio curvo in 3-D
(curvatura positiva)

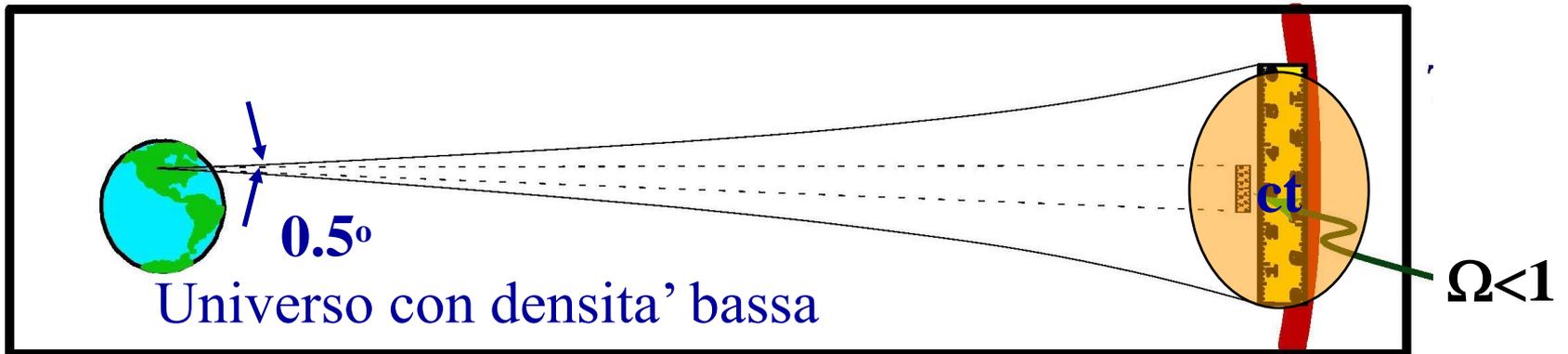
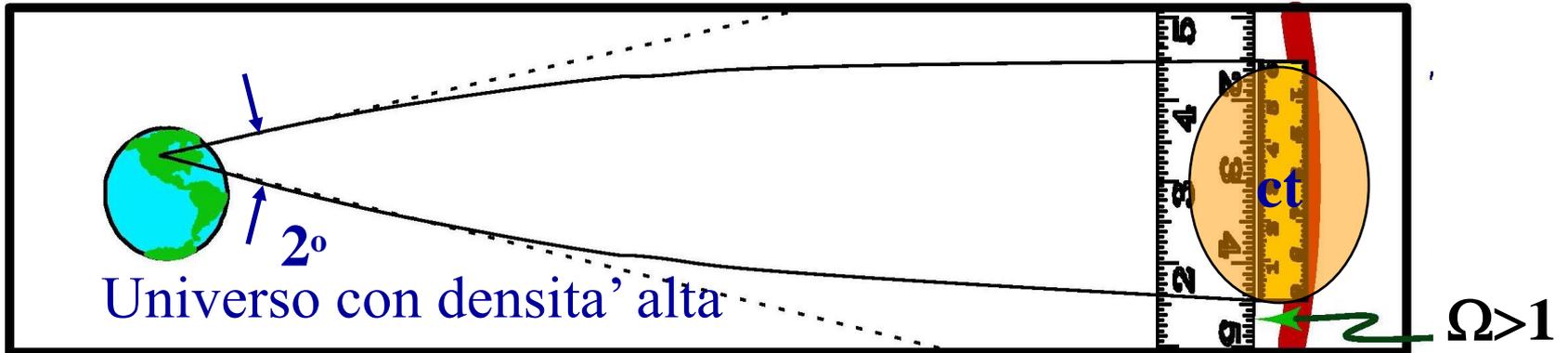


$$\Omega > 1$$

Spazio curvo in 3-D
(curvatura negativa)

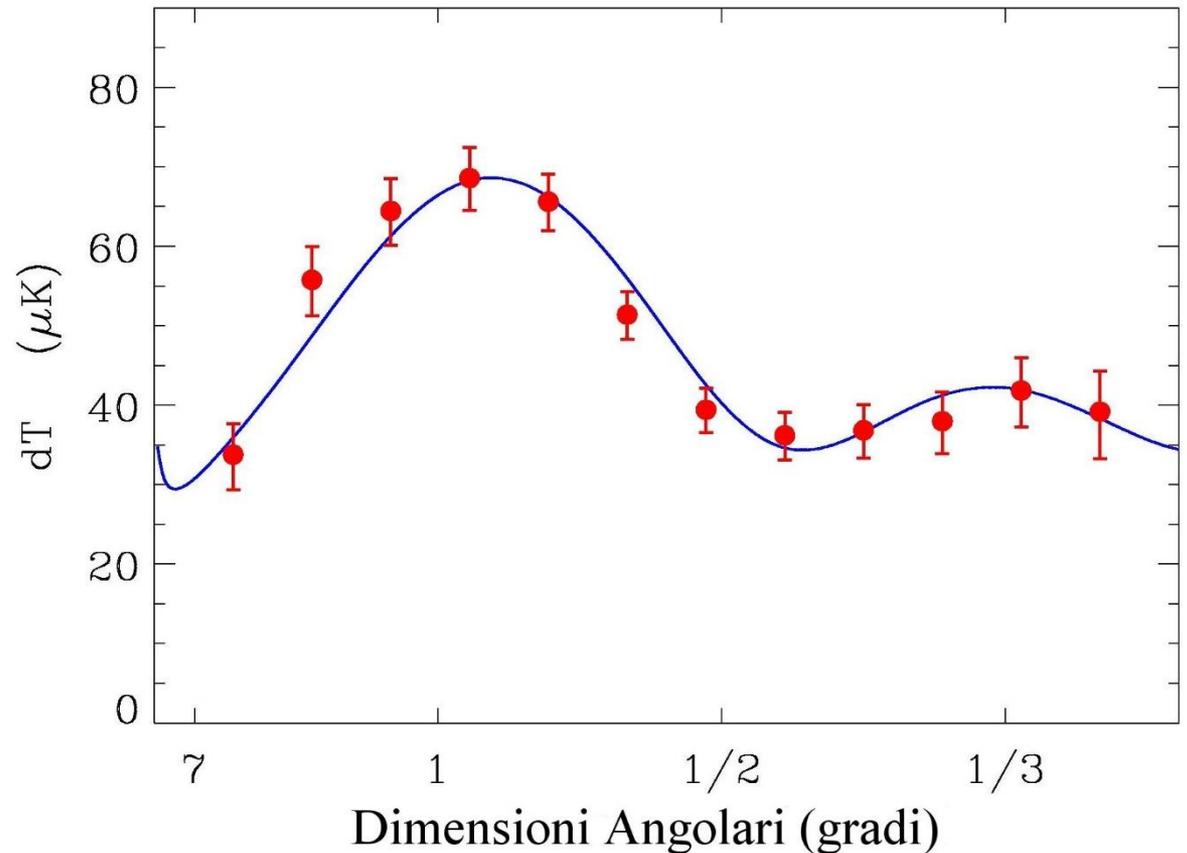


$$\Omega < 1$$



Di che dimensioni sono le strutture osservate ?

- Esiste una procedura matematica, chiamata spettro di potenza, che permette di rispondere alla domanda, calcolando qual' è l'abbondanza delle macchie di diverse dimensioni.
- Questa può essere confrontata con la teoria
- La maggior parte delle macchie hanno dimensioni intorno ad 1 grado, come previsto per una *geometria Euclidea, o piatta*, dell' Universo.



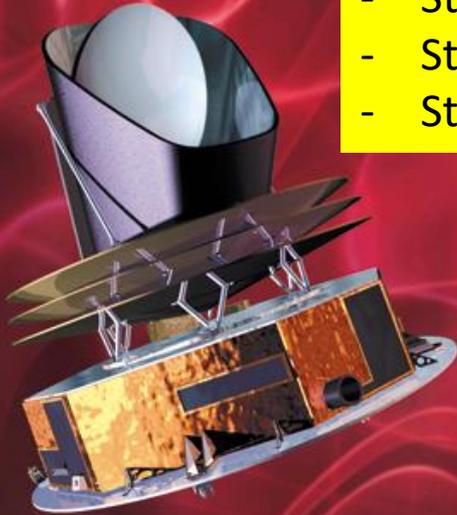
Quindi la densità totale di massa-energia nell' universo è pari alla densità critica $\rho_c=10^{-29}$ g/cm^3 .

Cercando la luce più antica

- Ma la radiazione cosmica di fondo, proveniendo da così lontano e con una origine così remota nel tempo, è un mezzo straordinario di indagine, sia della cosmologia che della fisica fondamentale, in molti modi.
- Sono state ottenute *immagini dettagliate del CMB e quindi dell'universo primordiale*.
- Vedere come era fatto ci permette di capire molte cose su
 - Curvatura dell'universo (esperimento BOOMERanG, 2000)
 -  Densità di massa-energia (barioni, materia oscura, energia oscura) e formazione delle strutture: esperimenti WMAP, Planck ...)
 - Struttura degli ammassi di galassie, osservati in controluce contro lo sfondo brillante del fondo di microonde (SPT, OLIMPO, 2018)
 - L'origine delle prime strutture, l'ipotetico processo di inflazione cosmica (esperimenti di polarizzazione, SO, S4, LiteBIRD ... 2028 ?)

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

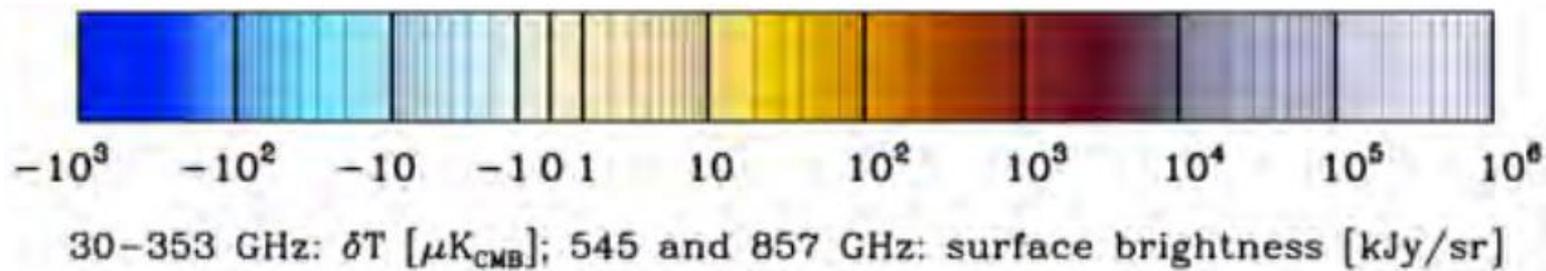
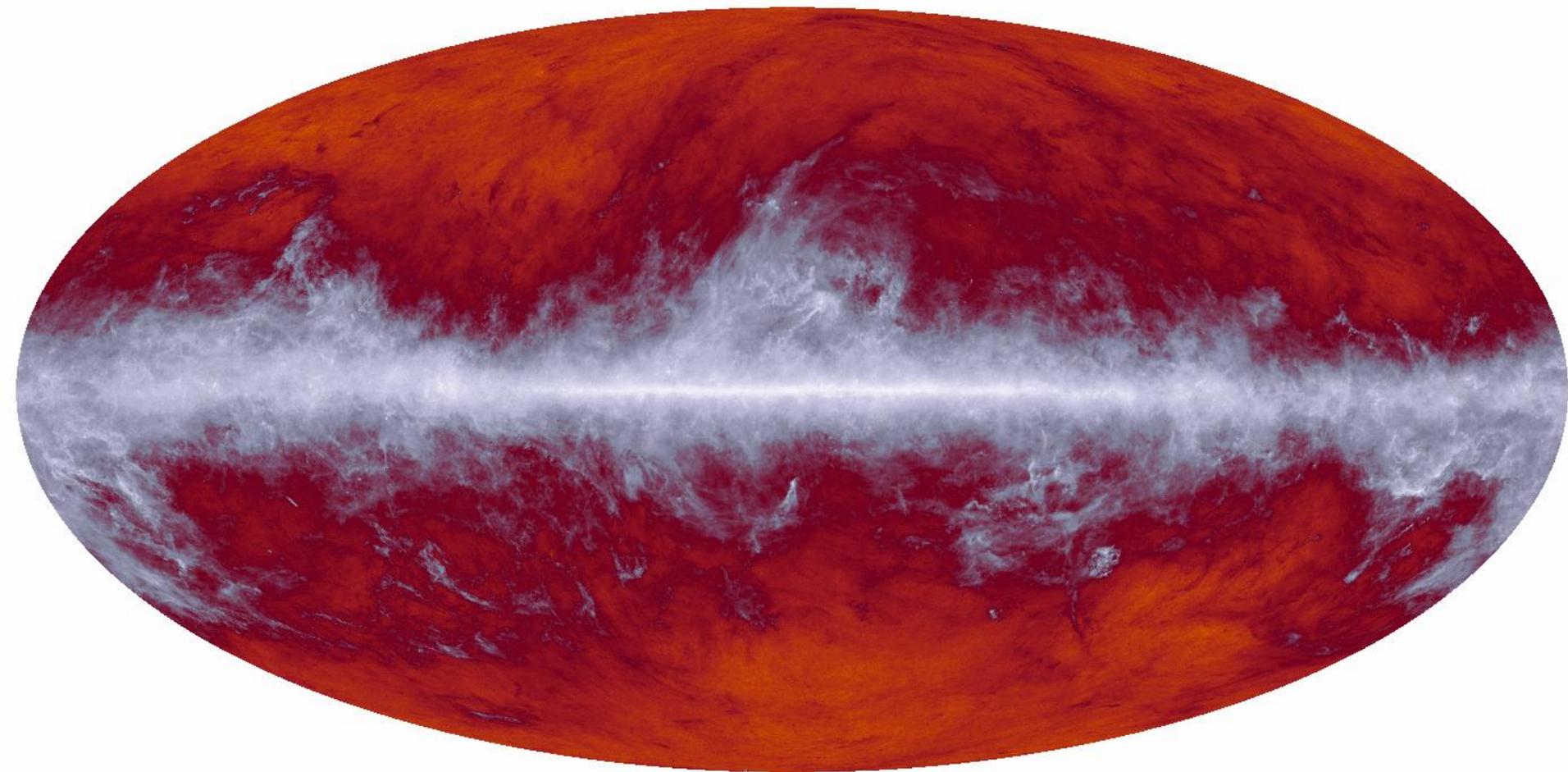
Looking back to the dawn of time
Un regard vers l'aube du temps



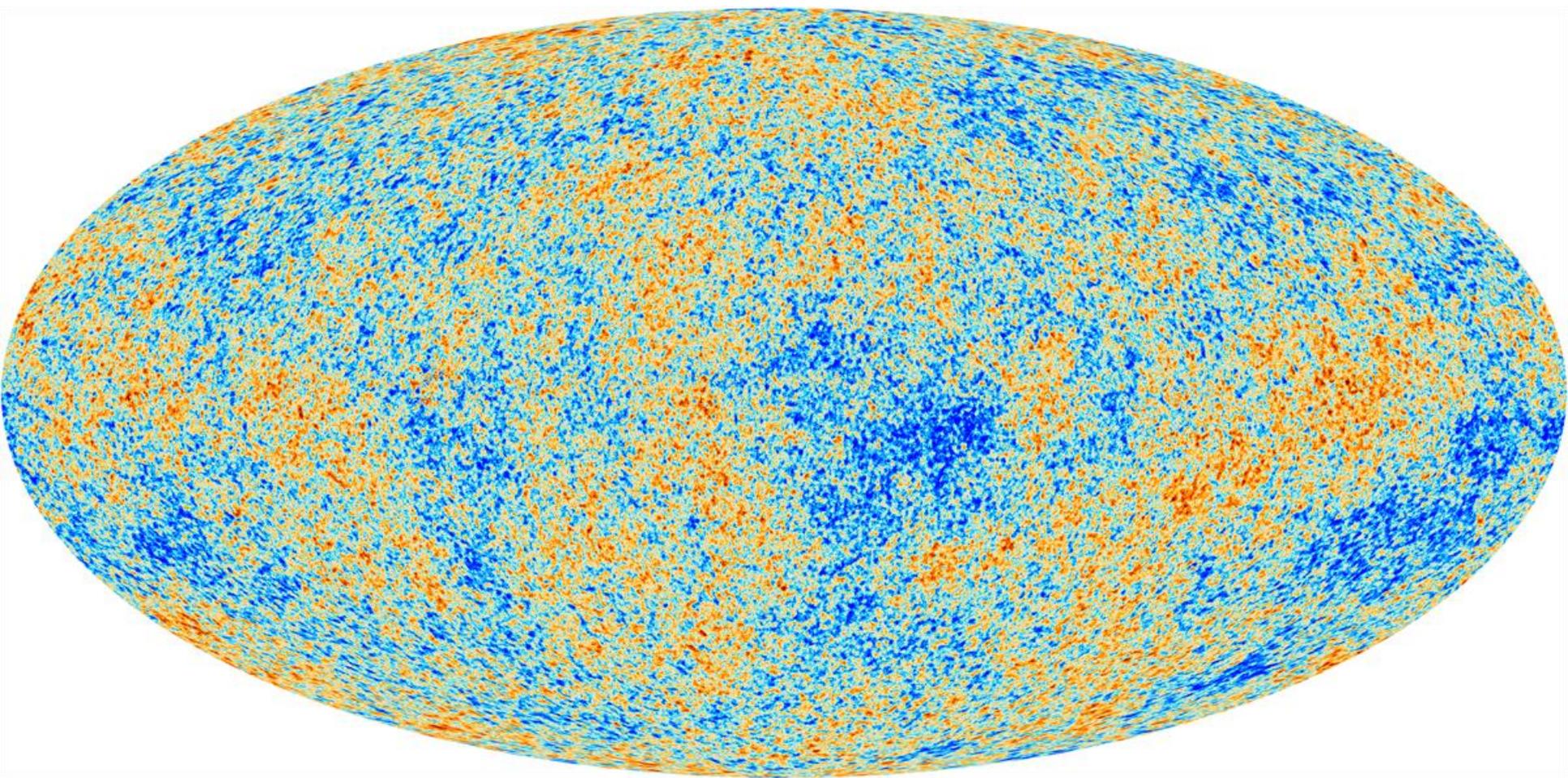
Planck Legacy Maps

6×10^6 pixels (5')

857 GHz

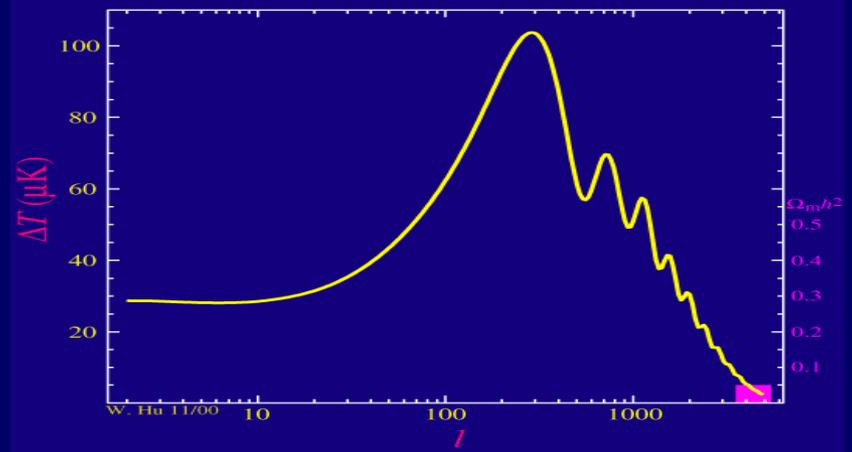
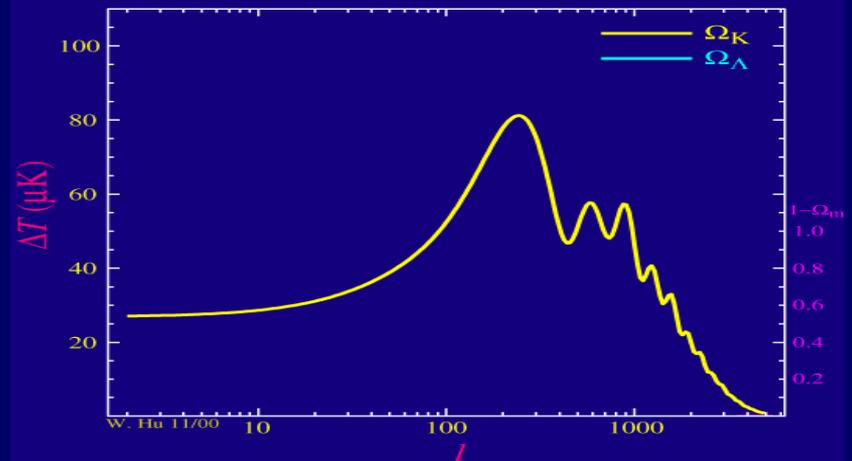
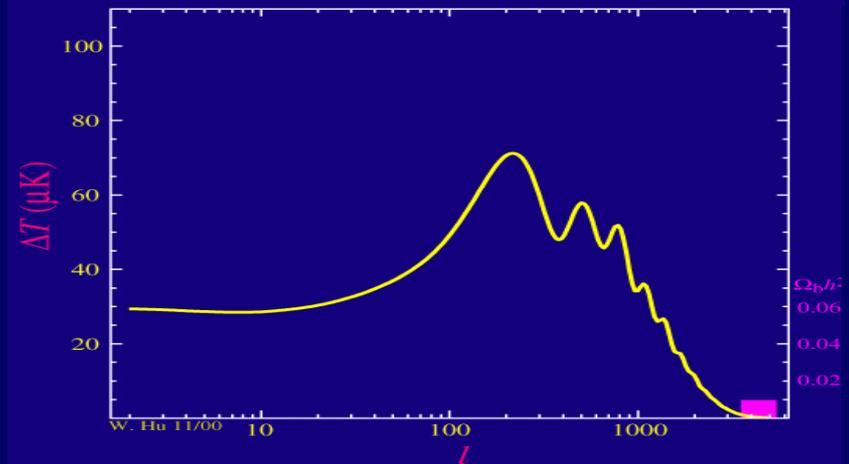


La mappa «definitiva» della CMB



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.



Angular scale

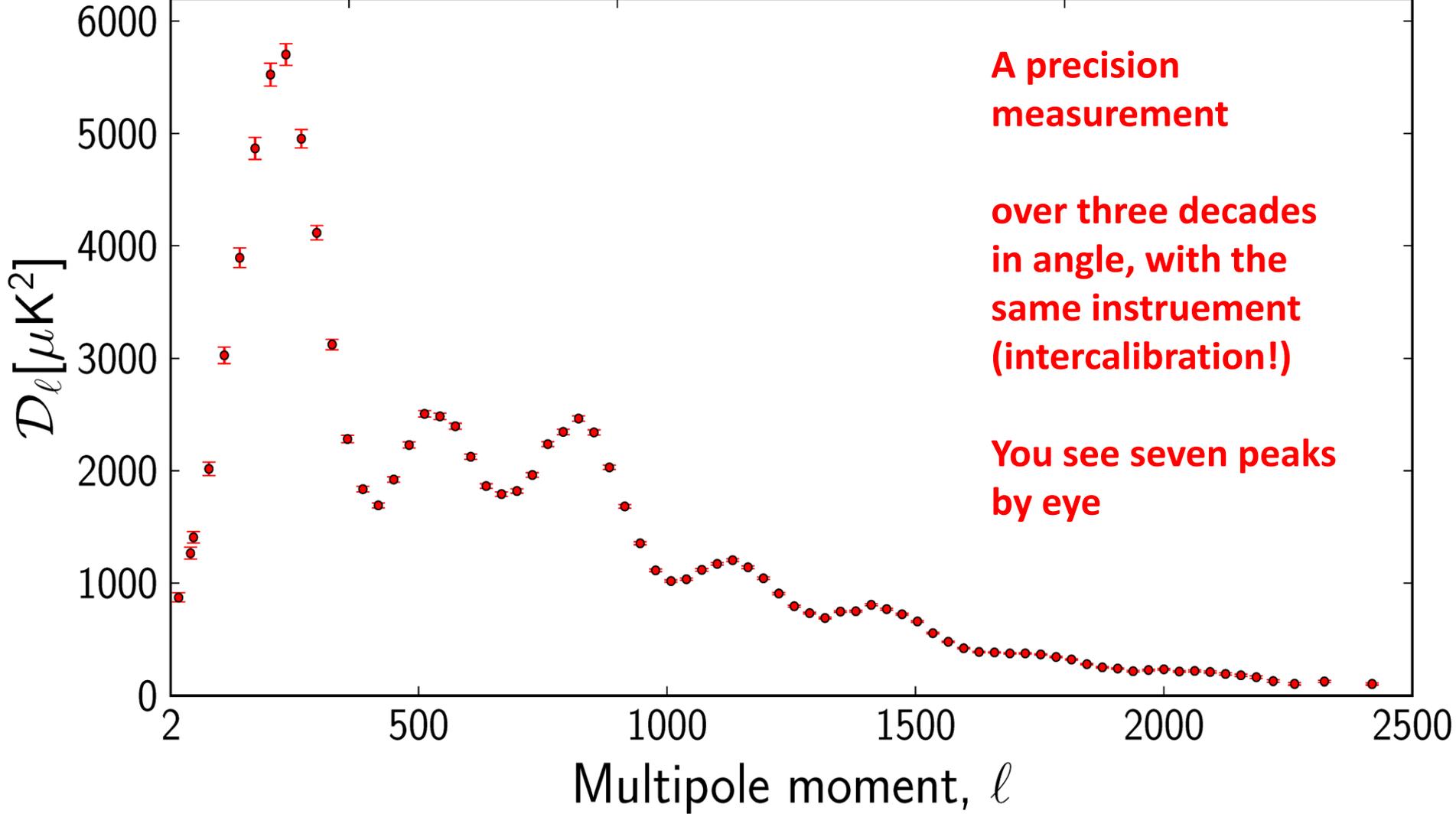
90°

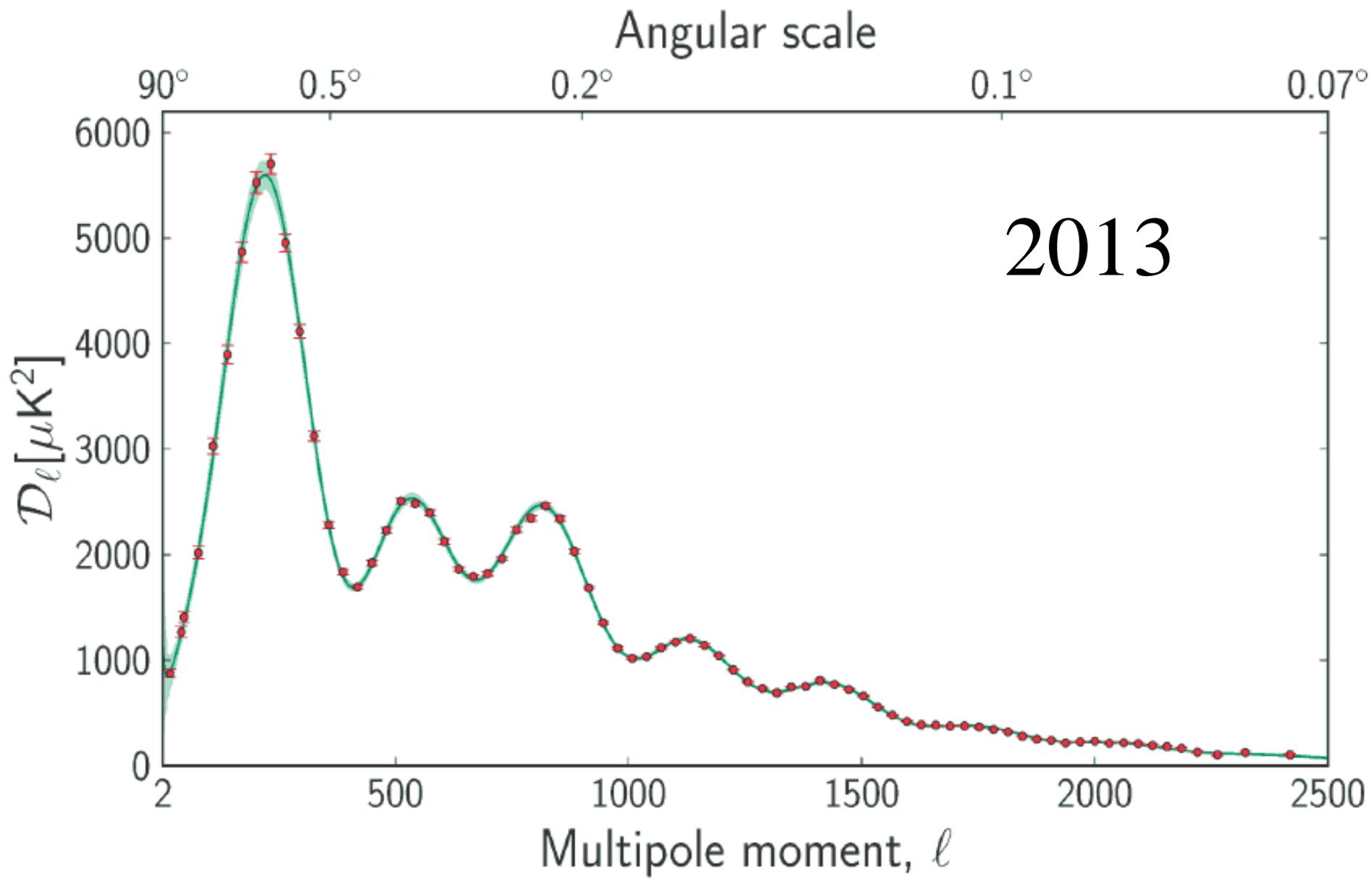
0.5°

0.2°

0.1°

0.07°





Angular scale

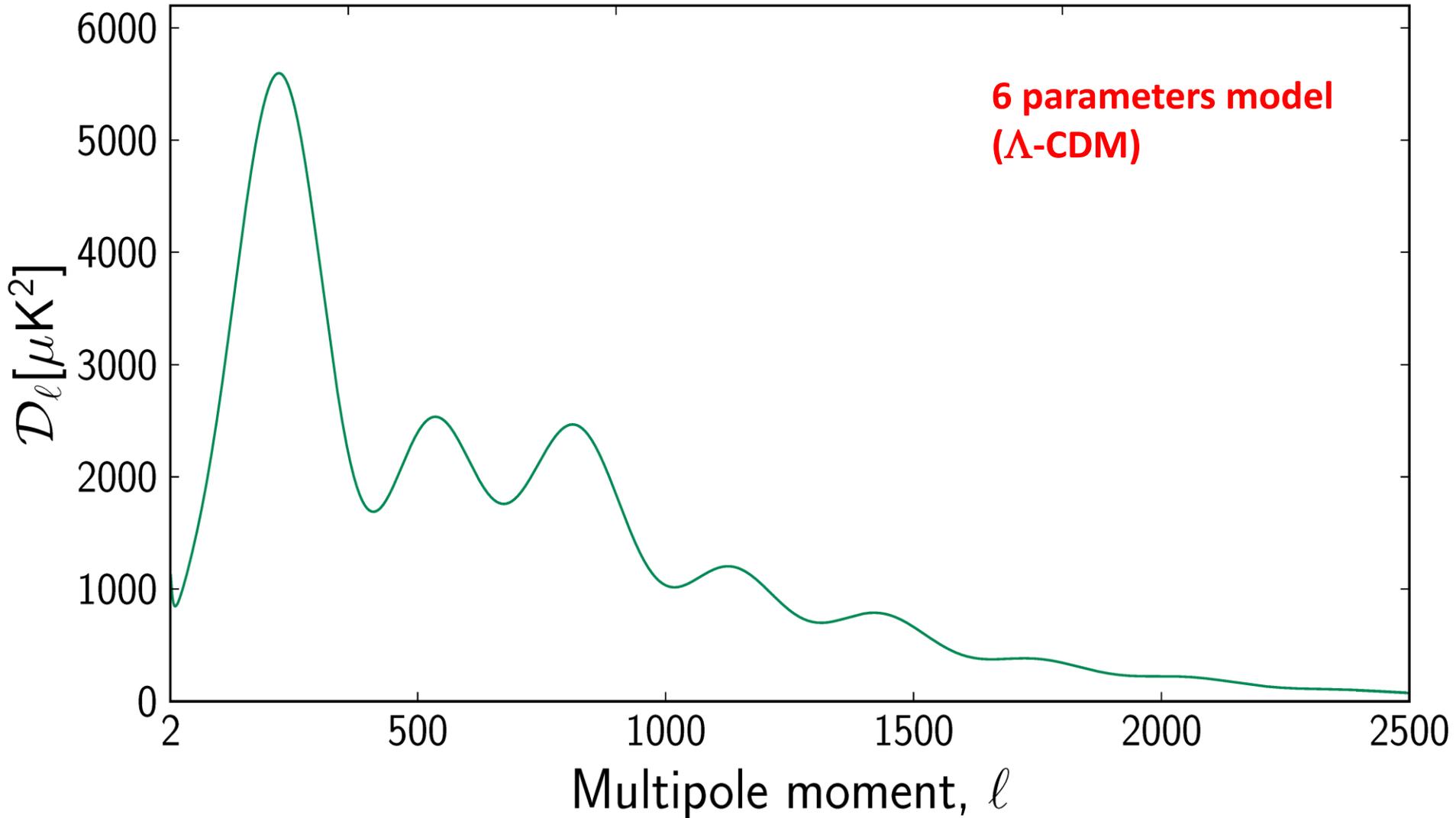
90°

0.5°

0.2°

0.1°

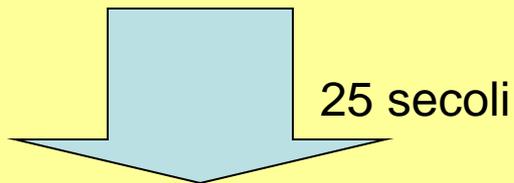
0.07°



Di che cosa è fatto l' Universo ?

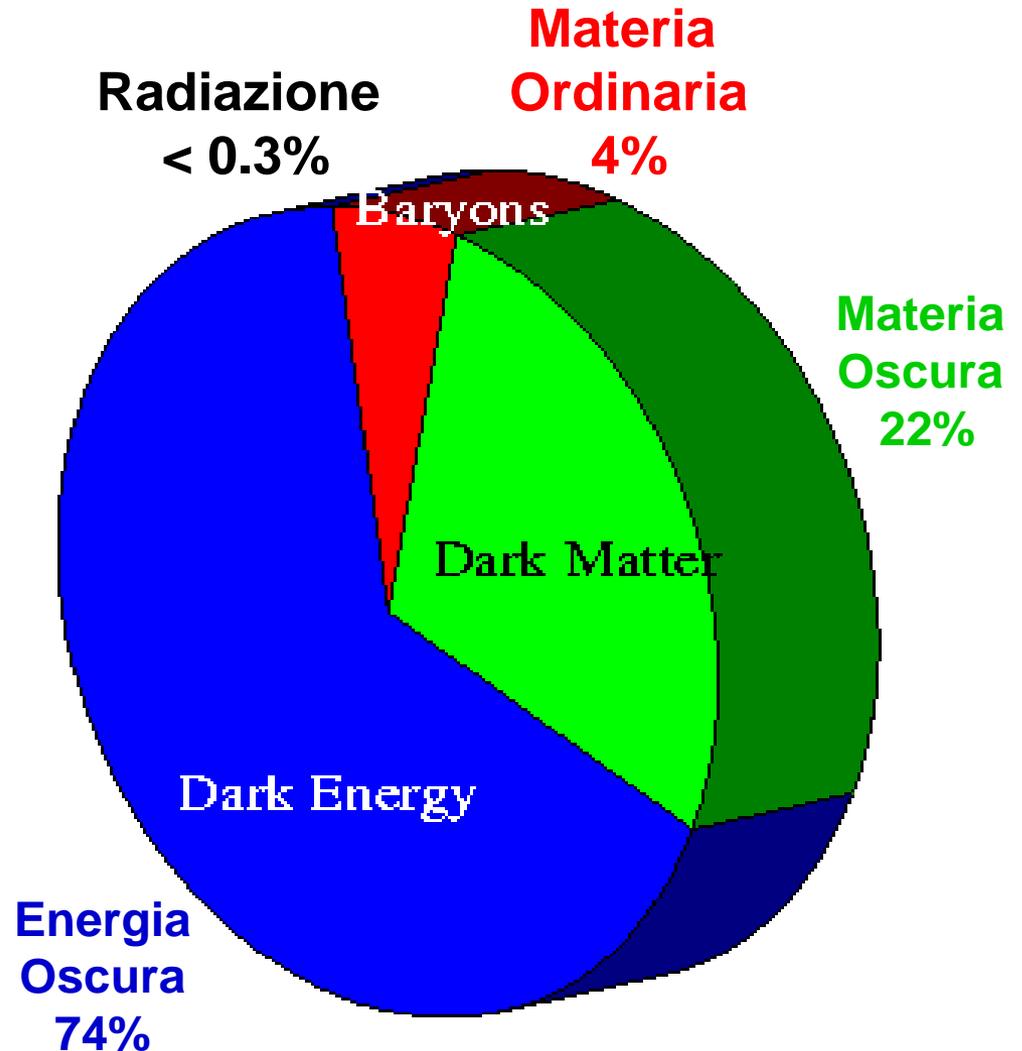
- Per i PreSocratici:

- terra,
- acqua,
- aria,
- fuoco



- Oggi, per lo scienziato medio:

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



Dai dati di Planck

Cercando la luce più antica

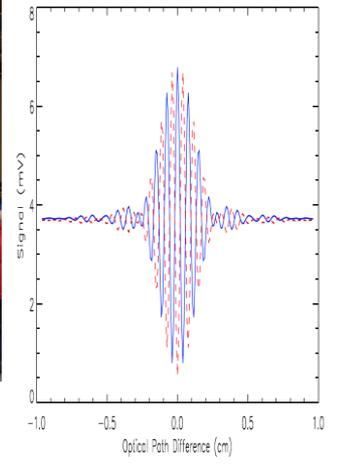
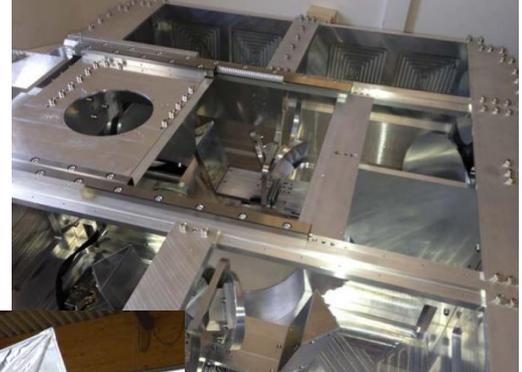
- Ma la radiazione cosmica di fondo, proveniendo da così lontano e con una origine così remota nel tempo, è un mezzo straordinario di indagine, sia della cosmologia che della fisica fondamentale, in molti modi.
- Sono state ottenute *immagini dettagliate del CMB e quindi dell'universo primordiale*.
- Vedere come era fatto ci permette di capire molte cose su
 - Curvatura dell'universo (esperimento BOOMERanG, 2000)
 - Densità di massa-energia (barioni, materia oscura, energia oscura) e formazione delle strutture: esperimenti WMAP, Planck ...)
 -  Struttura degli ammassi di galassie, osservati in controluce contro lo sfondo brillante del fondo di microonde (SPT + ... , obiettivo di OLIMPO, 2018)
 - L'origine delle prime strutture, l'ipotetico processo di inflazione cosmica (esperimenti di polarizzazione, SO, S4, LiteBIRD ... 2028 ?)



OLIMPO



- The OLIMPO experiment is a first attempt at spectroscopic measurements of CMB anisotropy.
- A large (2.6m aperture) balloon-borne telescope with a 4-bands photometric array and a plug-in room temperature spectrometer (150, 250, 350, 460 GHz).
- Similar resolution as SPT in the high frequency bands
- <http://planck.roma1.infn.it/olimpo>



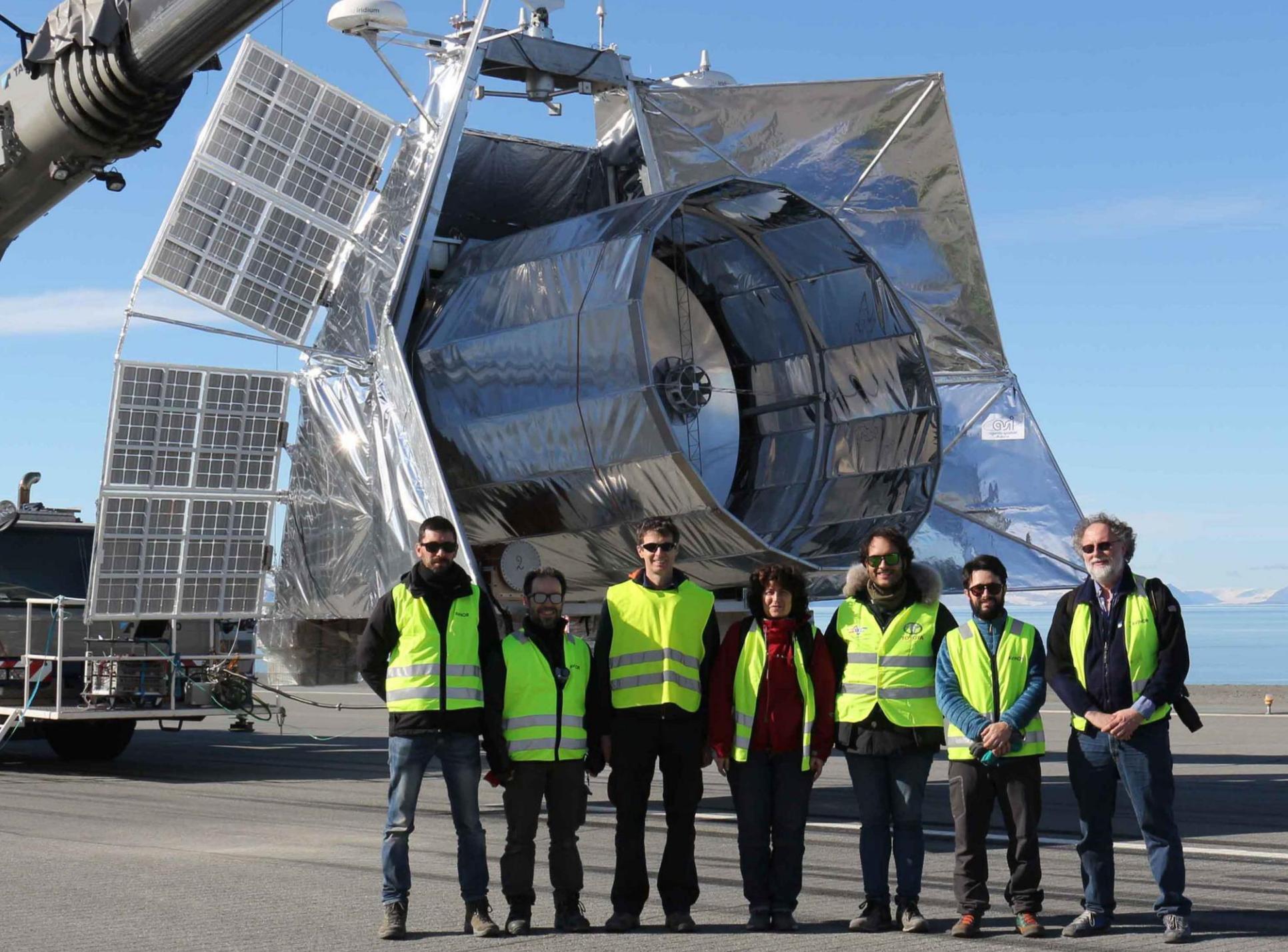
Main scientific targets:

- SZ effect in clusters → unbiased estimates of cluster parameters
- Spectrum of CMB anisotropy → anisotropic spectral distortions





- OLIMPO launched at 07:09 GMT, 14/Jul/2018, Longyearbyen (Svalbard)
- Great performance of Kinetic Inductance Detector Arrays, Telescope and Spectrometer.
- First Validation of KIDs in space conditions
- TM/TC problems (only LOS TM/TC contact) -> successful technical flight





OLIMPO 2018 flight

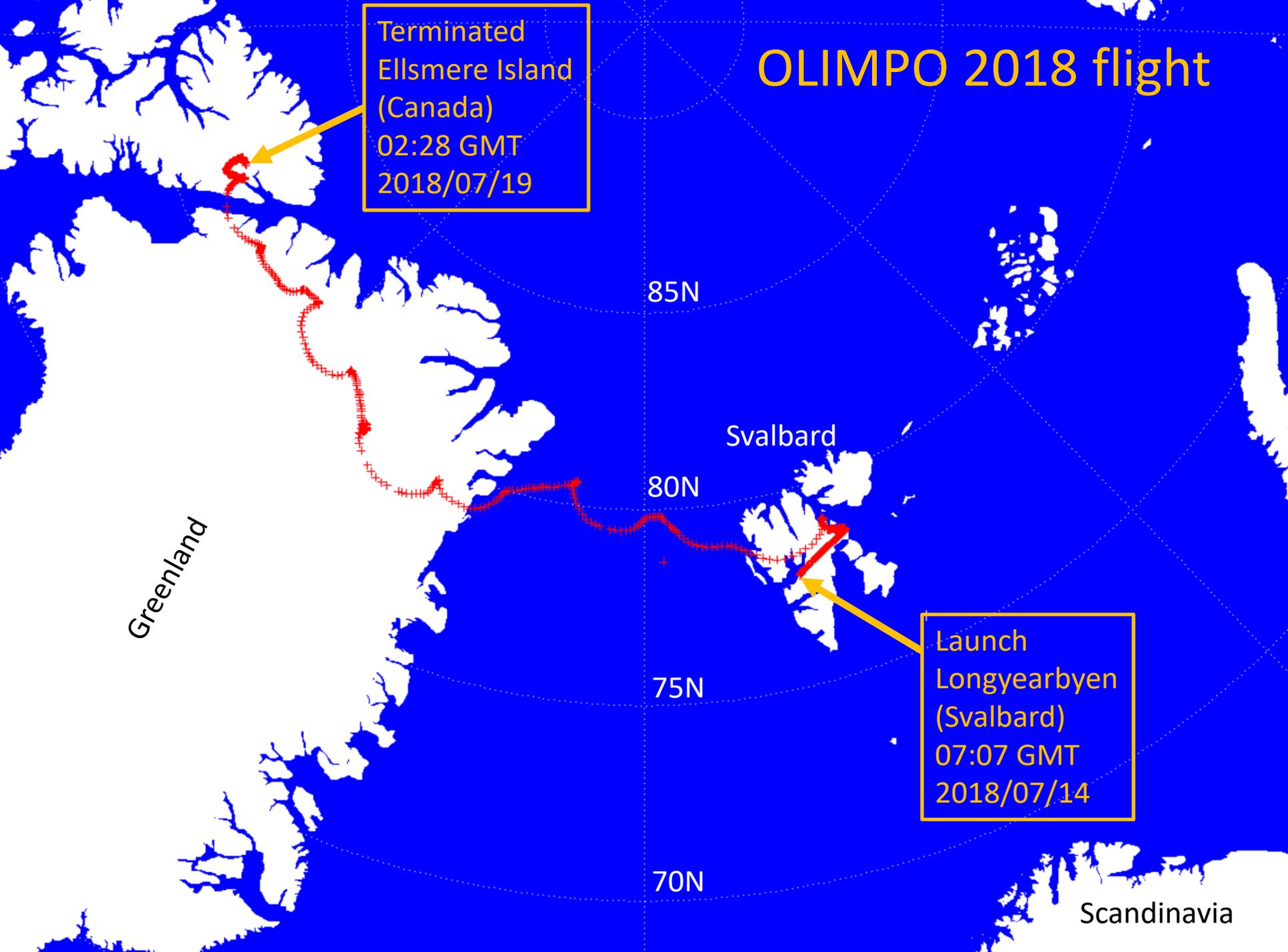
Terminated
Ellsmere Island
(Canada)
02:28 GMT
2018/07/19

Launch
Longyearbyen
(Svalbard)
07:07 GMT
2018/07/14

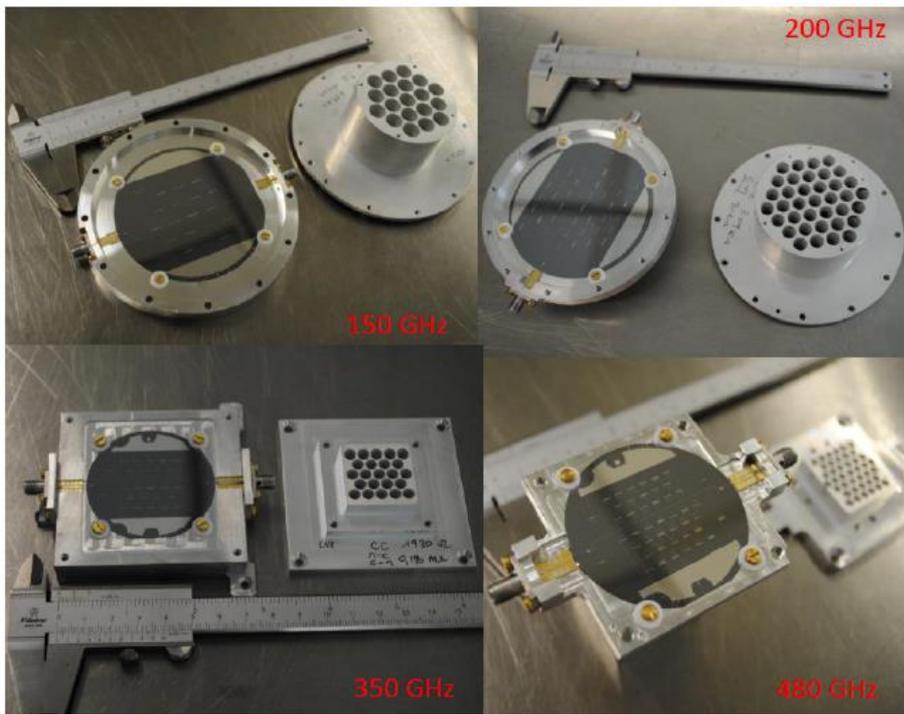
Greenland

Svalbard

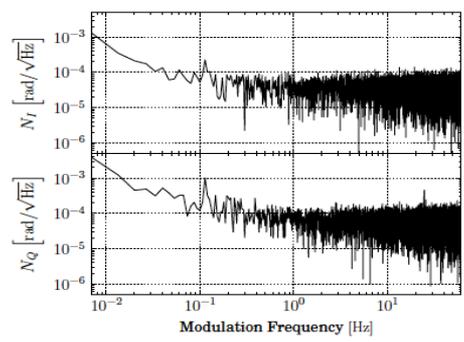
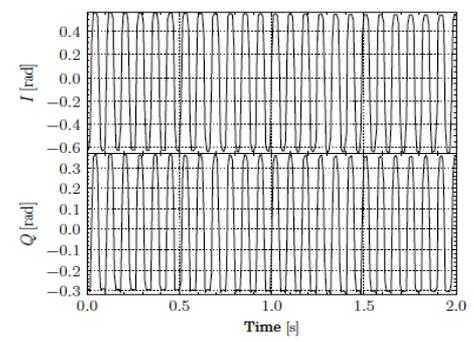
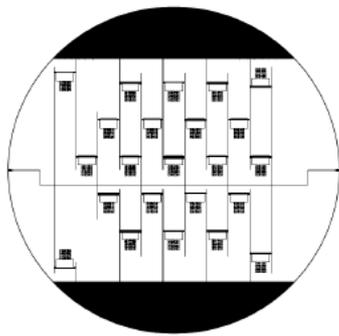
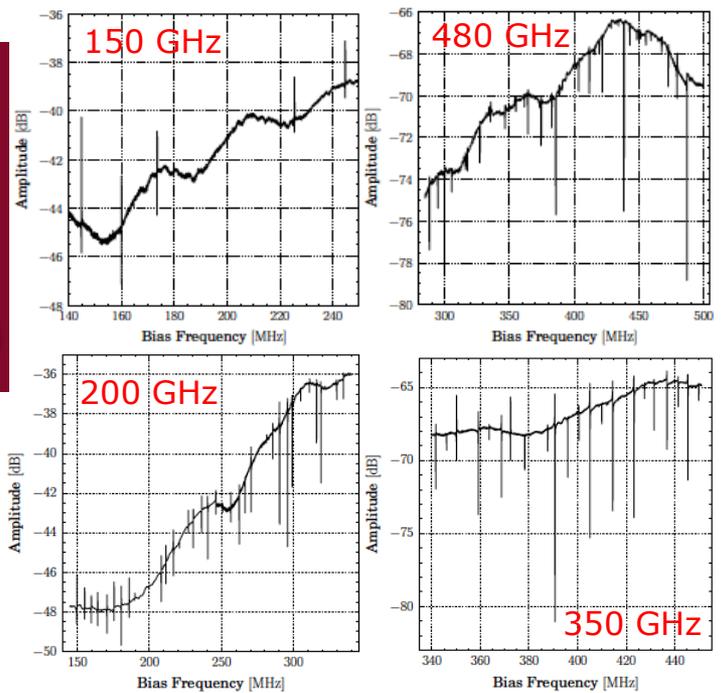
Scandinavia



OLIMPO: Kinetic Inductance Detectors



CNIRIFN
Istituto di Fotonica e Nanotecnologie



Channel	NET_{RJ} [mK/\sqrt{Hz}]
150 GHz	0.180
200 GHz	0.145
350 GHz	0.288
480 GHz	0.433

typical NET

See Masi et al. 2019 arXiv:1902.08993 (JCAP)

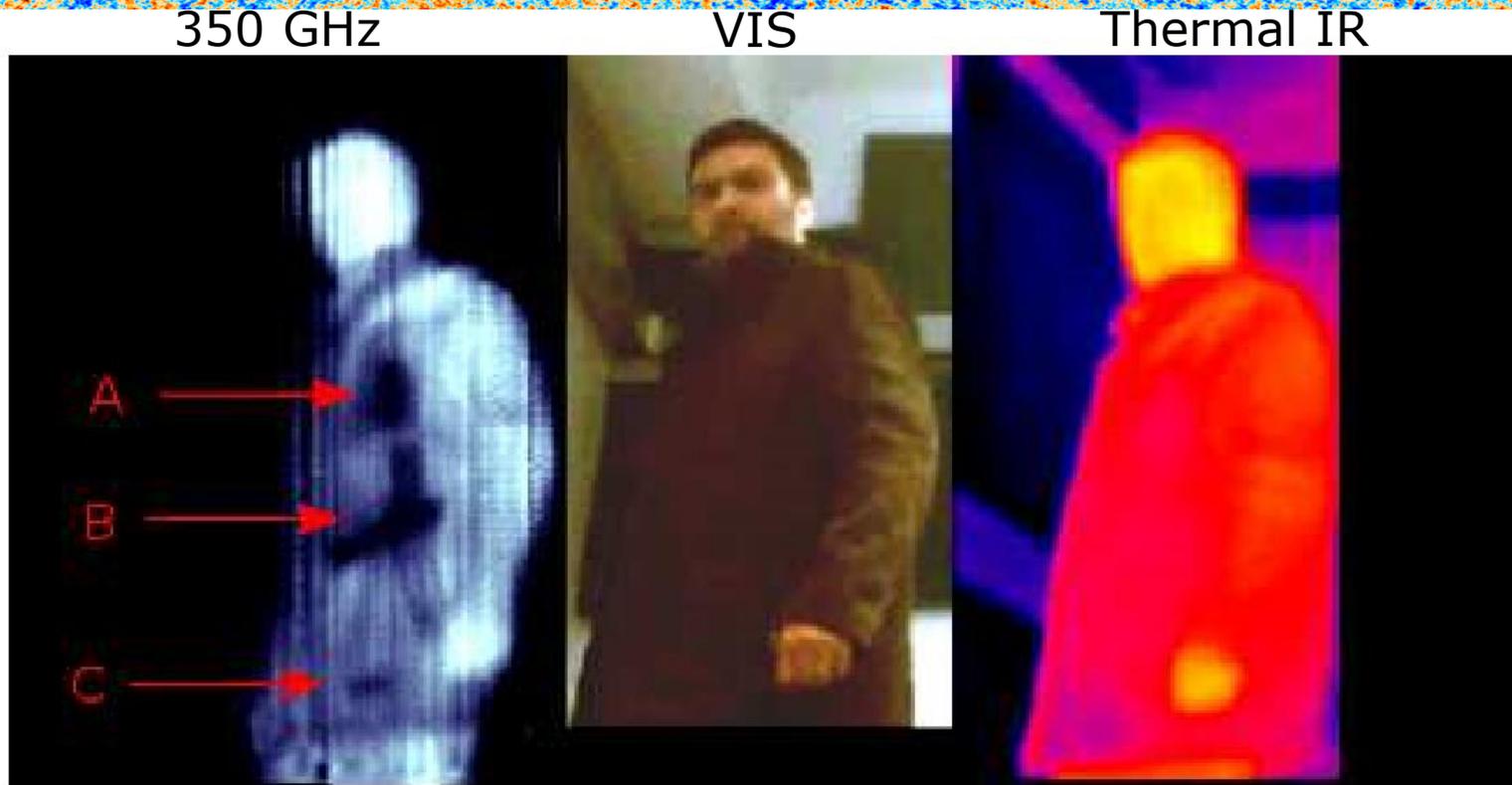
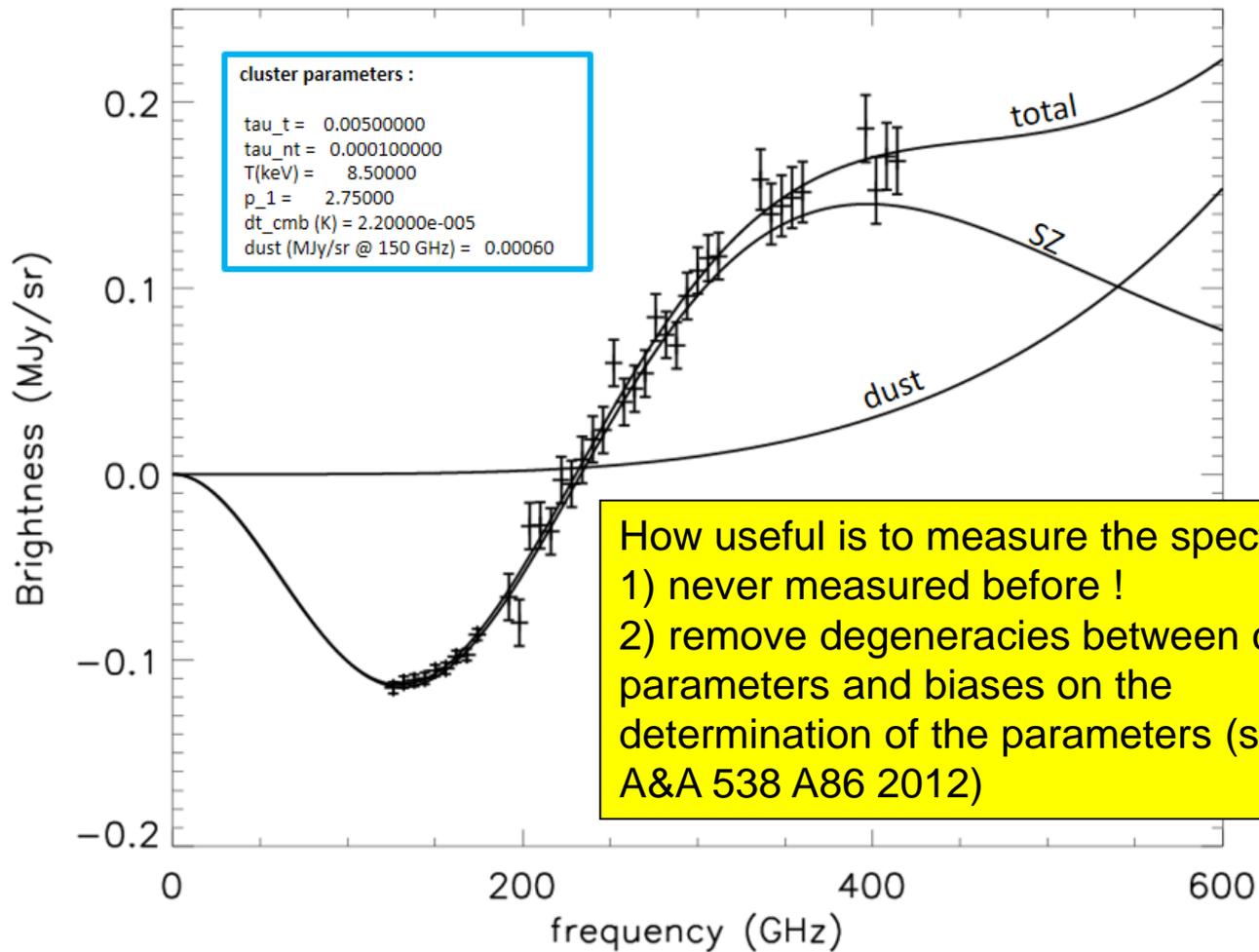


FIG. 9. A snap shot from a 2 FPS video in which the 350 GHz frames (left) were displayed simultaneously with frames from a standard web-cam (center) and a thermal NIR camera (right). Objects such as (A) a wallet, (B) an air pistol, and (C) some loose change, are hidden by the high opacity of the coat at higher frequencies but become apparent at 350 GHz.

Expected results from science flight



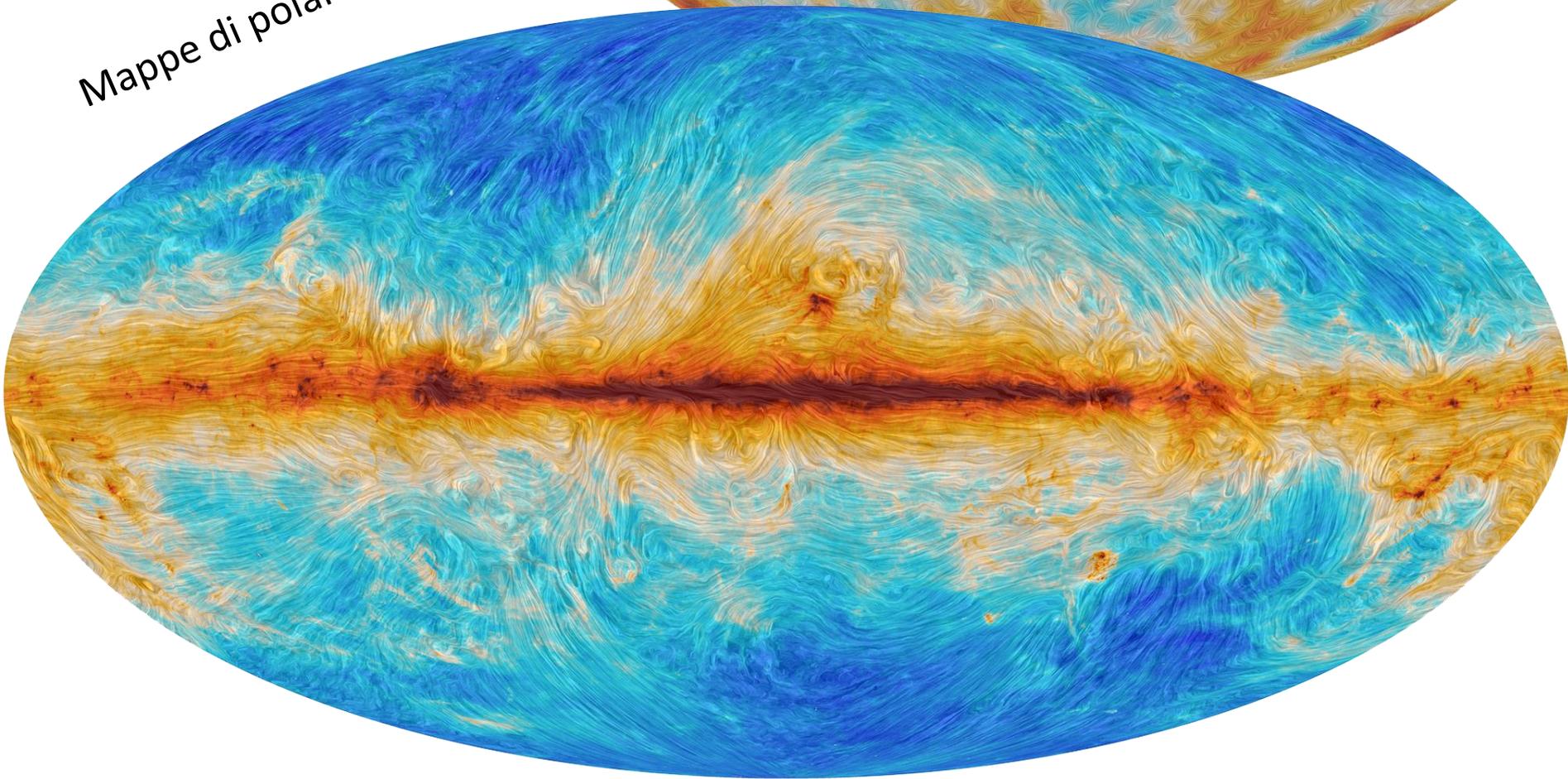
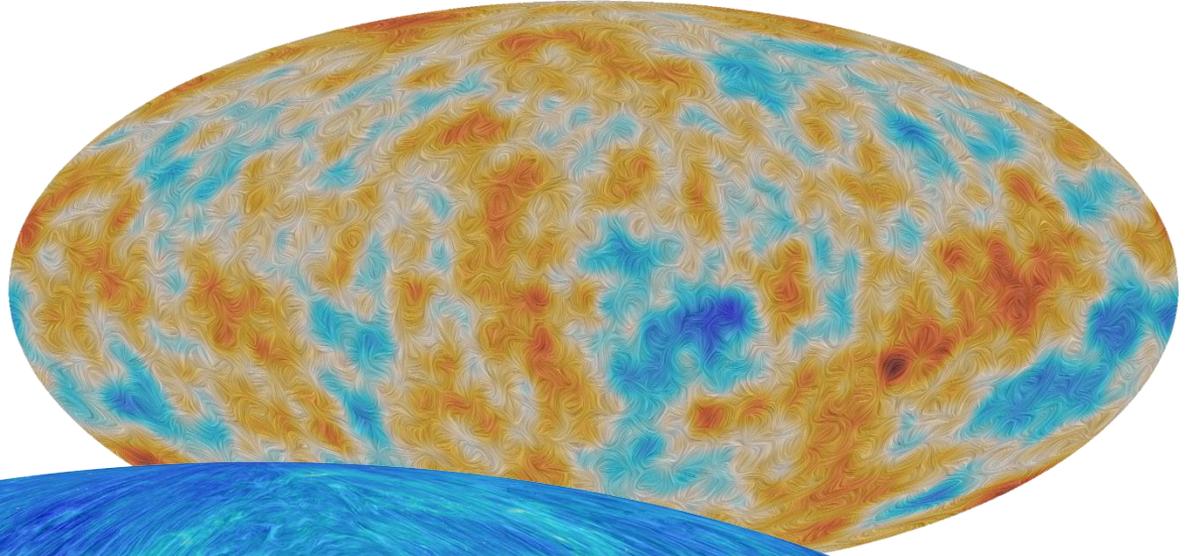
After this first successful technical flight,
the OLIMPO team has applied for an Antarctic science flight

Cercando la luce più antica

- Ma la radiazione cosmica di fondo, proveniendo da così lontano e con una origine così remota nel tempo, è un mezzo straordinario di indagine, sia della cosmologia che della fisica fondamentale, in molti modi.
 - Sono state ottenute *immagini dettagliate del CMB e quindi dell'universo primordiale*.
 - Vedere come era fatto ci permette di capire molte cose su
 - Curvatura dell'universo (esperimento BOOMERanG, 2000)
 - Densità di massa-energia (barioni, materia oscura, energia oscura) e formazione delle strutture: esperimenti WMAP, Planck ...)
 - Struttura degli ammassi di galassie, osservati in controluce contro lo sfondo brillante del fondo di microonde (SPT + ... , obiettivo di OLIMPO, 2018)
-  L'origine delle prime strutture, l'ipotetico processo di inflazione cosmica (esperimenti di polarizzazione, QUBIC, LSPE, SO, S4, LiteBIRD ... 2028 ?)



Mappe di polarizzazione

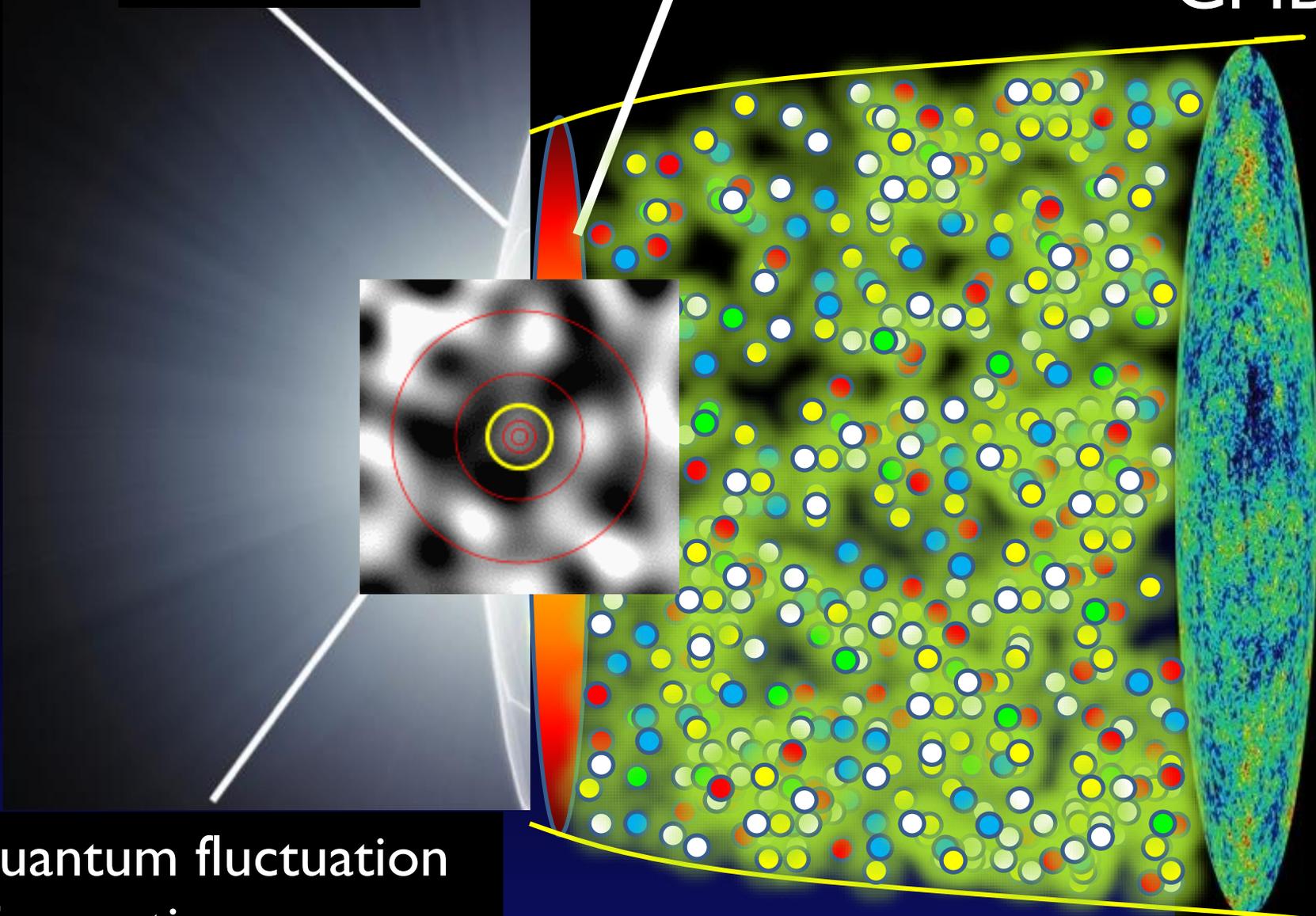


Inflation

Hot Big Bang

CMB

LiteBIRD



Quantum fluctuation
of spacetime

$\sim 10^{-36}$ sec

~ 400 thousand years

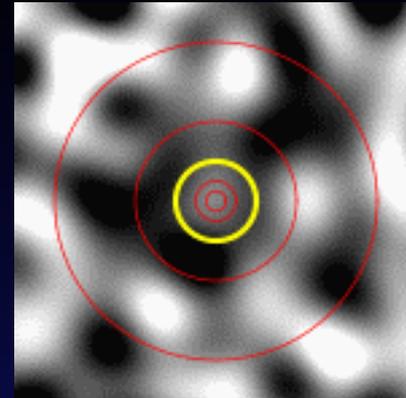
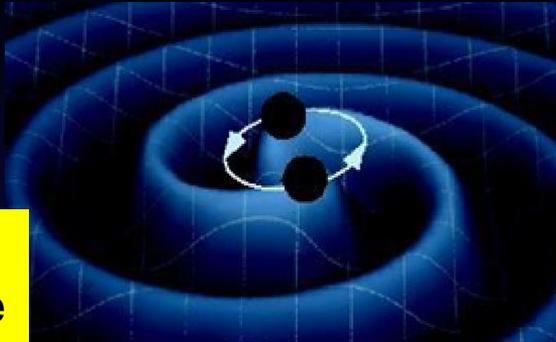
Big leap from LIGO/VIRGO to LiteBIRD

within
Einstein's theory
of general relativity

beyond Einstein



The 2017
Nobel Prize
in Physics



LIGO/VIRGO: gravitational waves with classical origin
LiteBIRD: gravitational waves with quantum origin

Conclusioni

- Il funzionamento dell'universo e delle sue strutture dipende dalle particelle elementari che sono presenti. C'è una connessione profonda, di tipo fisico, tra ciò che accade a livello macroscopico e ciò che accade a livello microscopico.
- 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 rappresentano sfide formidabili per i fisici di oggi e di domani !