

The background of the entire image is a deep space scene featuring a central black hole. The black hole is represented by a solid black circle, surrounded by a bright, multi-colored accretion disk that glows with shades of blue, green, and yellow. The disk has a ring-like structure with some internal details. The background is a dark blue space filled with numerous white and yellow stars of varying sizes. A faint, orange-hued nebula or galaxy is visible in the upper left corner.

LICEO SCIENTIFICO «SEVERI»
SALERNO

SABATO 1 GIUGNO 2024

10.30-12.30

AUDITORIUM

ASTROFISICA E COSMOLOGIA

VINCENZO PAPPALARDO

DOCENTE

MATEMATICA E FISICA

L'ASTROFISICA E LA COSMOLOGIA

RICHIEDONO LA PADRONANZA DI TUTTE LE
DISCIPLINE FISICHE, CHE HANNO COME
FONDAMENTA LA MECCANICA QUANTISTICA
E LA RELATIVITÀ GENERALE.

L'ASTROFISICA STUDIA LE PROPRIETÀ
FISICHE DI STELLE, GALASSIE, MEZZO
INTERSTELLARE E INTERGALATTICO, E DI
EVENTUALI ALTRE FORME DI
MATERIA PRESENTI NELL'UNIVERSO.

LE DISTANZE COSMICHE

Unità astronomica (UA)= distanza Sole-Terra

$$1 \text{ UA} = 149597870700 \approx 150 \text{ milioni di km}$$

Anno luce (al)

E' la distanza percorsa dalla luce in un anno:

$$1 \text{ al} = 9,5 \cdot 10^{15} \text{ m} = 9,5 \cdot 10^{12} \text{ km} = 9500 \text{ miliardi di km}$$

$$1 \text{ parsec(pc)} = 3,26 \text{ al}$$

LE MAGNITUDINI

Magnitudine apparente (m) di un corpo celeste è una misura della sua luminosità rilevabile da un punto di osservazione:

$$m = m_0 - 2,5 \log \left(\frac{E}{E_0} \right) \quad \text{Legge di Pogson}$$

Le costanti m_0 ed E_0 rappresentano, rispettivamente, la magnitudine e la luminosità di una stella di riferimento (Vega).

LE MAGNITUDINI

Magnitudine assoluta (M) è una misura della luminosità intrinseca di un corpo celeste:

$$M = m_0 - 2,5 \log \left(\frac{\Phi}{\Phi_0} \right)$$

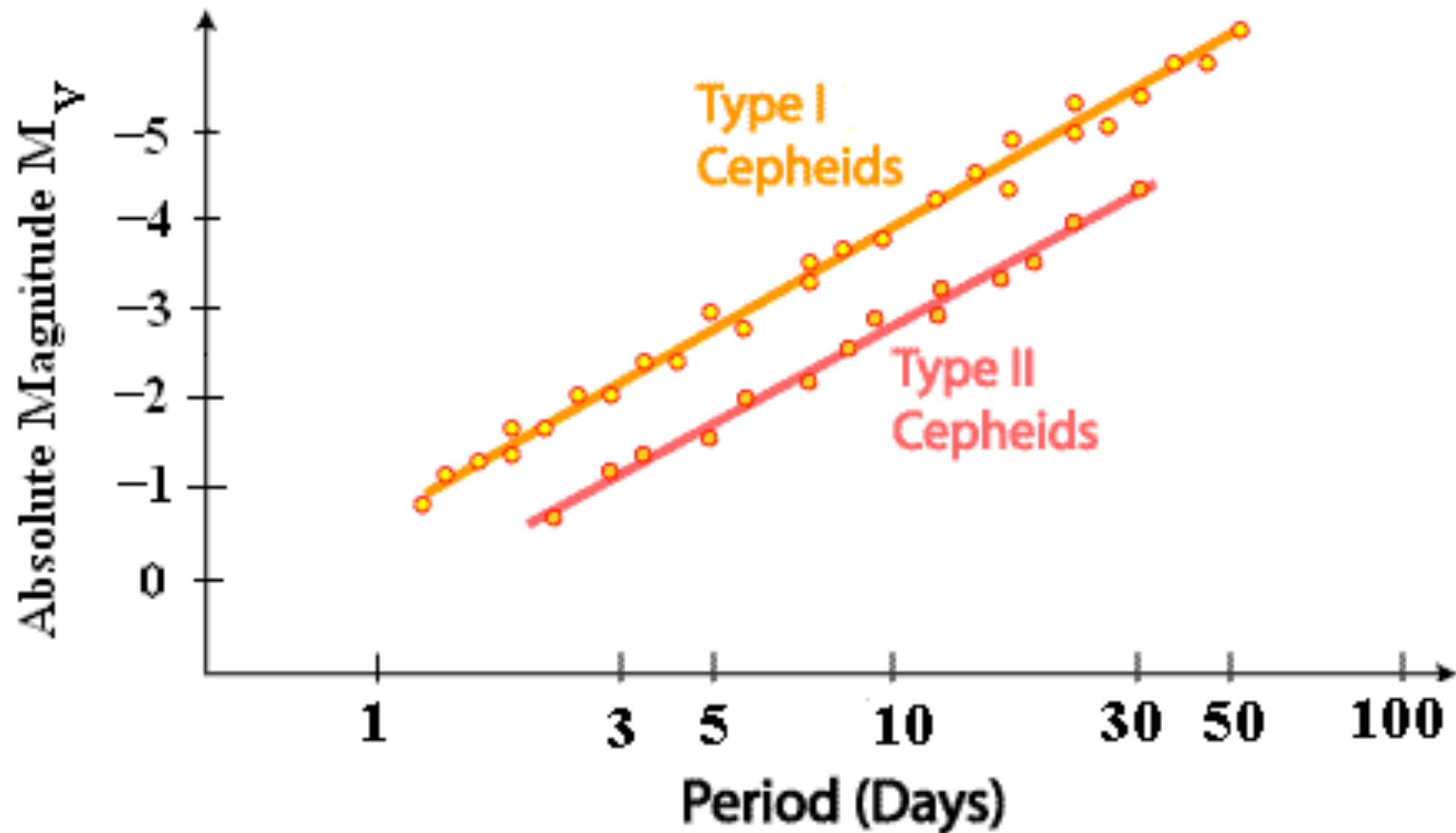
Φ_0 è la potenza totale emessa da una stella che alla distanza di 10 pc abbia m_0 come magnitudine apparente.

LE MAGNITUDINI

Nel 1908, l'astronoma americana *Henrietta Leavitt* (1868-1921), scoprì le cosiddette *Cefeidi*, stelle pulsanti che, con precisa regolarità, alternano massimi e minimi di luminosità con periodi P compresi fra 2 e 50 giorni, secondo l'equazione:

$$M = -2,87 \log P - 1,40$$

Period - Luminosity Relationship



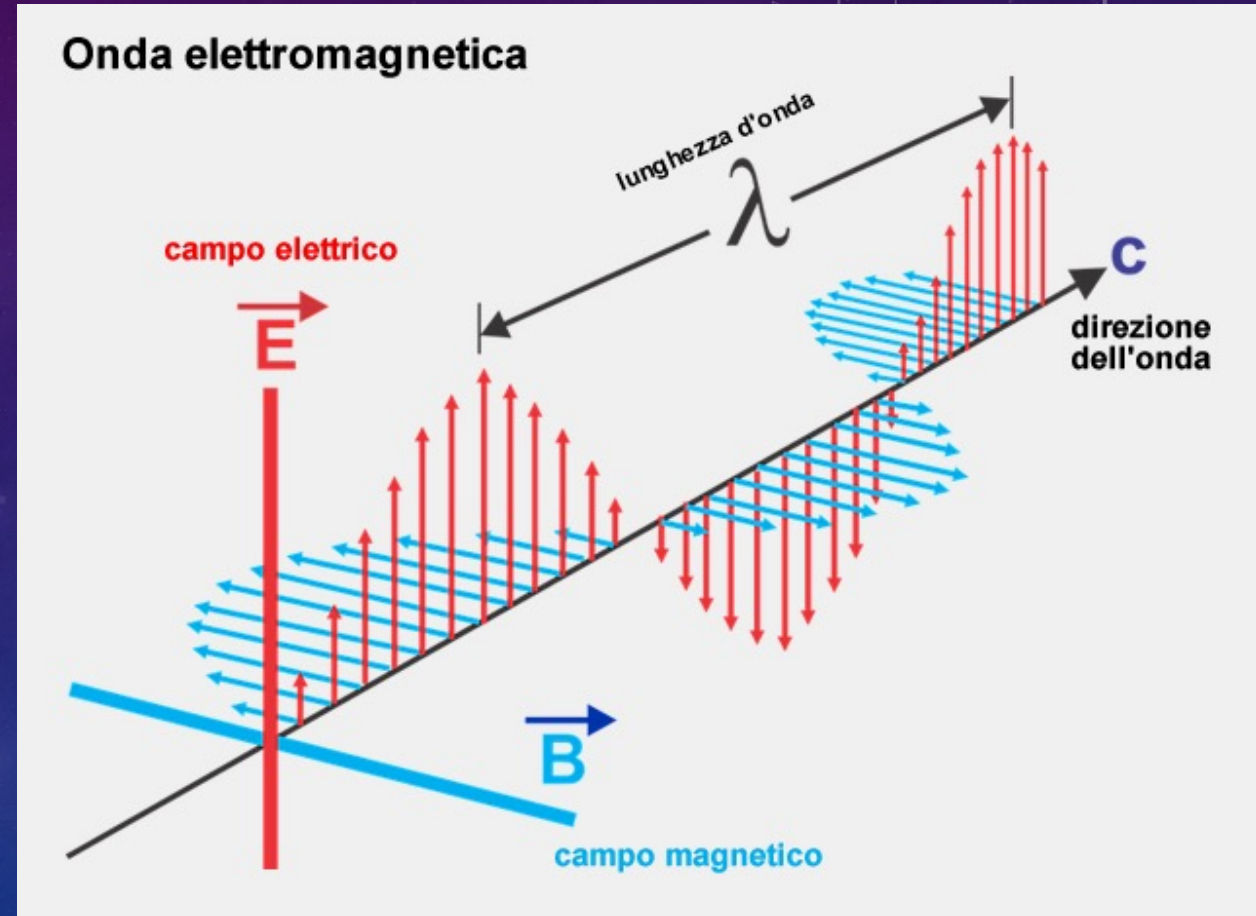
LE MAGNITUDINI

Grazie a questa relazione, le cefeidi sono diventate delle candele standard (indicatori di distanza nell'universo), perché noto il periodo P , si può ricavare la distanza d in parsec, avendo la magnitudine apparente m , dalla relazione:

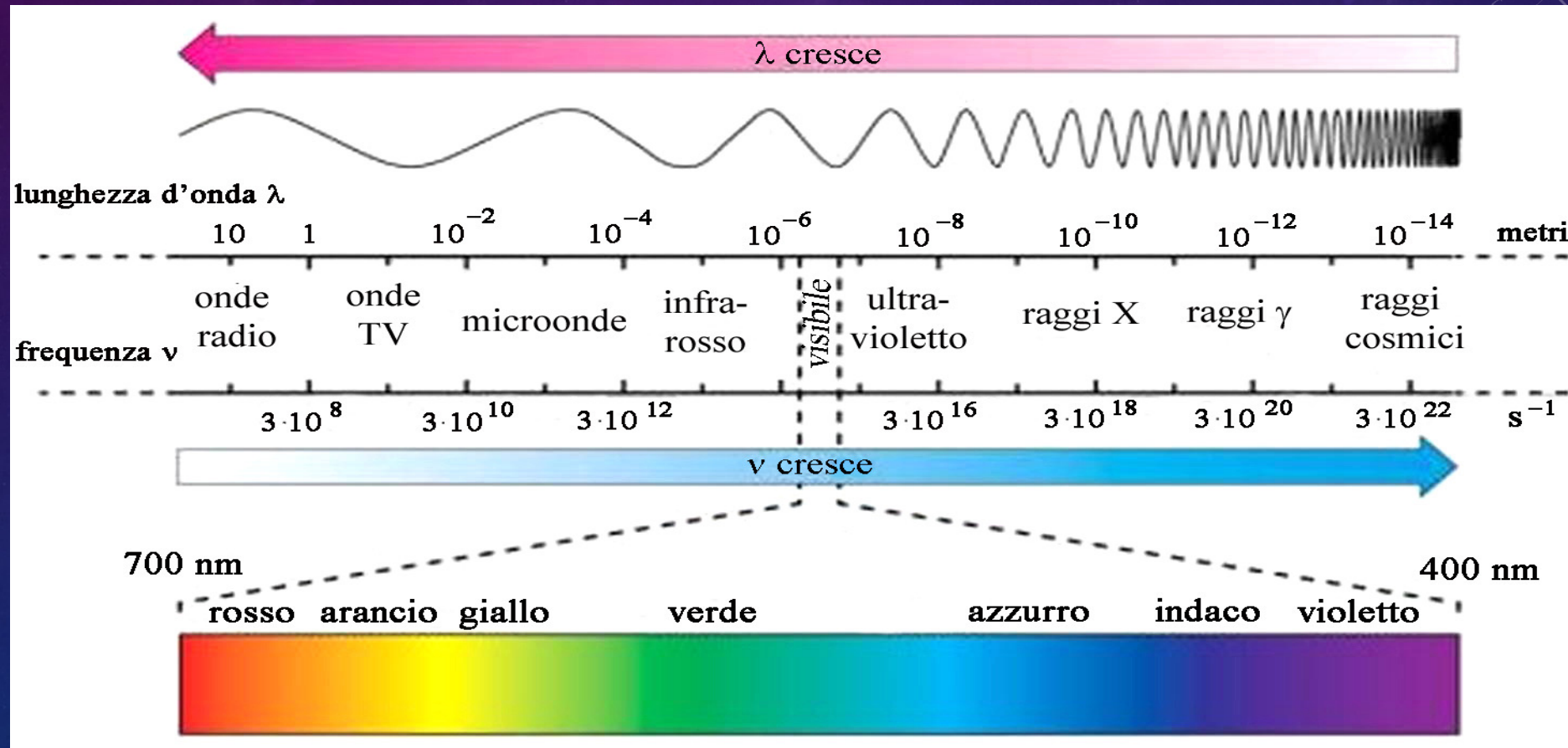
$$M = m - 5 \log d + 5$$

METODI OSSERVATIVI

La luce visibile, i raggi X, le onde radio, i raggi gamma, ecc., sono tutte **onde elettromagnetiche** (vibrazioni del campo elettrico e magnetico) che si propagano nello spazio vuoto alla velocità della luce, trasportando energia.



L'insieme delle onde elettromagnetiche costituisce lo
spettro elettromagnetico



RADIOASTRONOMIA – Studia fenomeni celesti attraverso la misura delle onde radio ($\lambda = 10^4 - 10^{-3} \text{ m}$) emesse da processi fisici come l'attività della fotosfera solare e le nubi di idrogeno interstellare. Data la debolezza di tali segnali astronomici, per poterli studiare occorrono grandi antenne, chiamate **radiotelescopi**.



Il radiotelescopio più grande del
mondo si trova in Cina

ASTRONOMIA INFRAROSSA – La radiazione infrarossa può attraversare regioni piene di polveri, che sono opache alla radiazione visibile. Questo comporta che l'osservazione nell'infrarosso ($\lambda = 10^{-3} - 10^{-6} \text{ m}$) è utilizzata per rivelare oggetti freddi (polveri interstellari), o nascosti in polveri e gas (pianeti extrasolari).

METODI OSSERVATIVI

Stelle fredde, nane brune, protostelle, galassie in formazione, ecc. La radiazione infrarossa proveniente dallo spazio viene, per la maggior parte, assorbita dall'atmosfera terrestre, e, anche per evitare che i telescopi vengano danneggiati dalle sorgenti infrarosse terrestri, è necessario utilizzare satelliti o palloni sonda.

METODI OSSERVATIVI

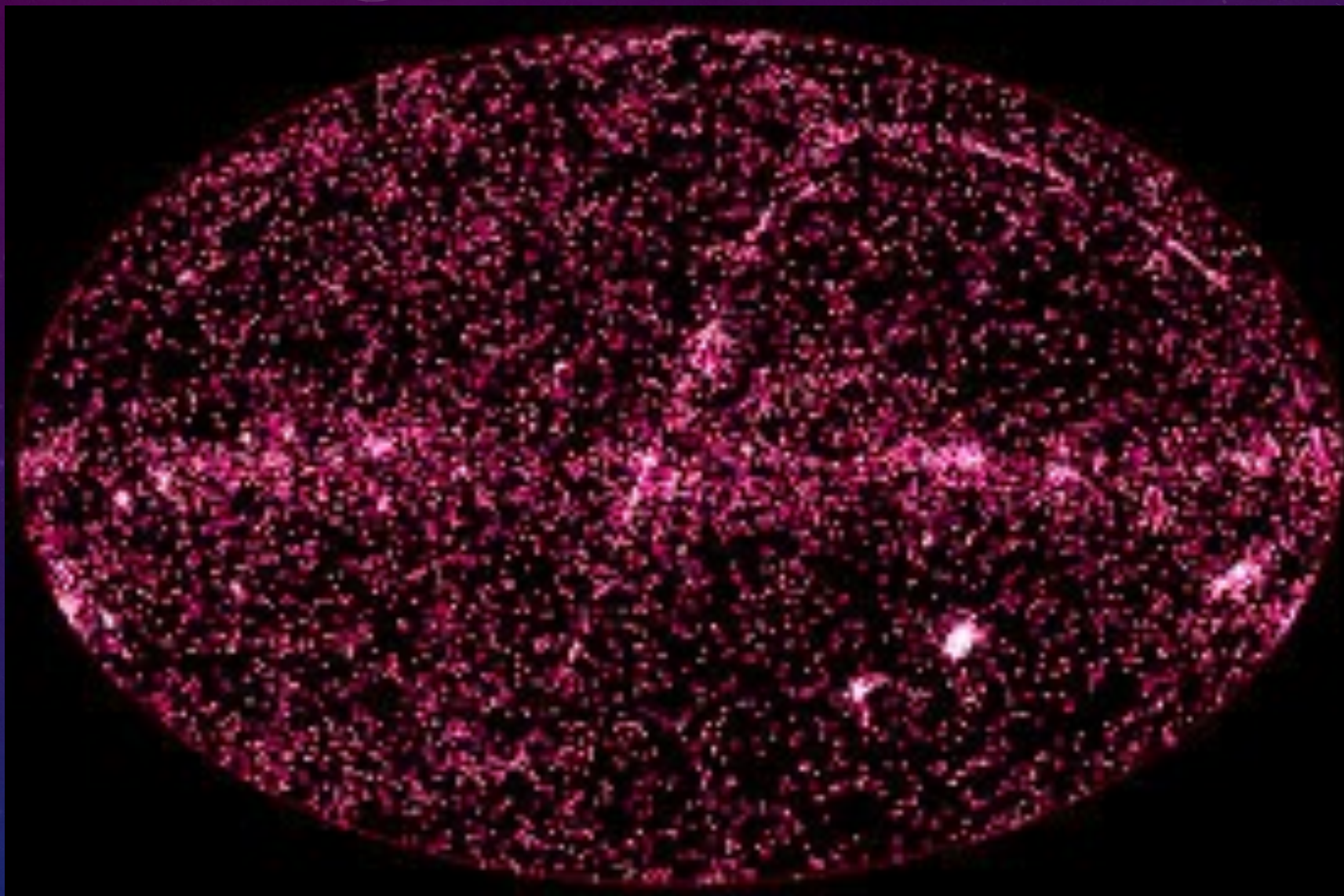
L'Agenzia Spaziale Europea
ha realizzato un grande
osservatorio infrarosso
orbitale chiamato Herschel,
lanciato il 14 maggio 2009.



Immagine della Nebulosa Rosetta,
che mostra la formazione di grandi
stelle.

ASTRONOMIA ULTRAVIOLETTA – La radiazione ultravioletta ($\lambda = 10^{-7} - 10^{-8} \text{ m}$) è emessa, praticamente, da tutti i tipi di corpi celesti, e, in particolare, permette di studiare alcune caratteristiche del Sole, l'evoluzione di galassie giovani e molto calde e la temperatura e composizione del mezzo interstellare.

Anche l'astronomia ultravioletta fa uso di telescopi montati su satelliti. Il satellite IUE (International Ultraviolet Explorer), lanciato nel 1978, ha permesso di osservare la posizione di lontane galassie, quasar, ammassi stellari, supernove, ecc.

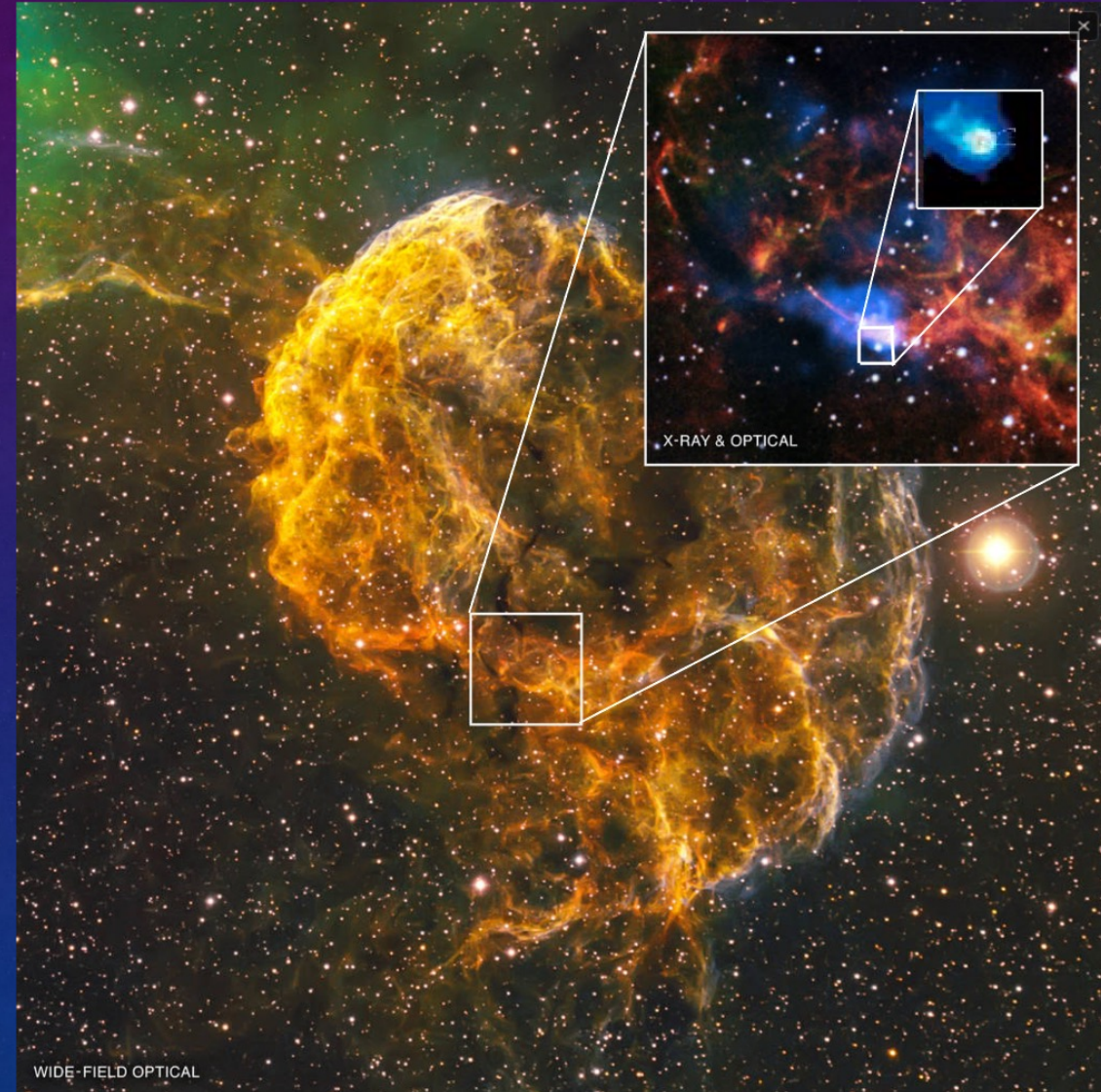


L'universo in ultravioletto

ASTRONOMIA A RAGGI X - La radiazione X ($\lambda = 10^{-8} - 10^{-11} \text{ m}$) permette di studiare corpi molto caldi, come il gas che si trova nello spazio tra le galassie, oppure fenomeni che accadono alla fine della vita stellare (esplosioni di supernove, stelle binarie, stelle a neutroni, buchi neri supermassivi situati al centro di galassie attive).

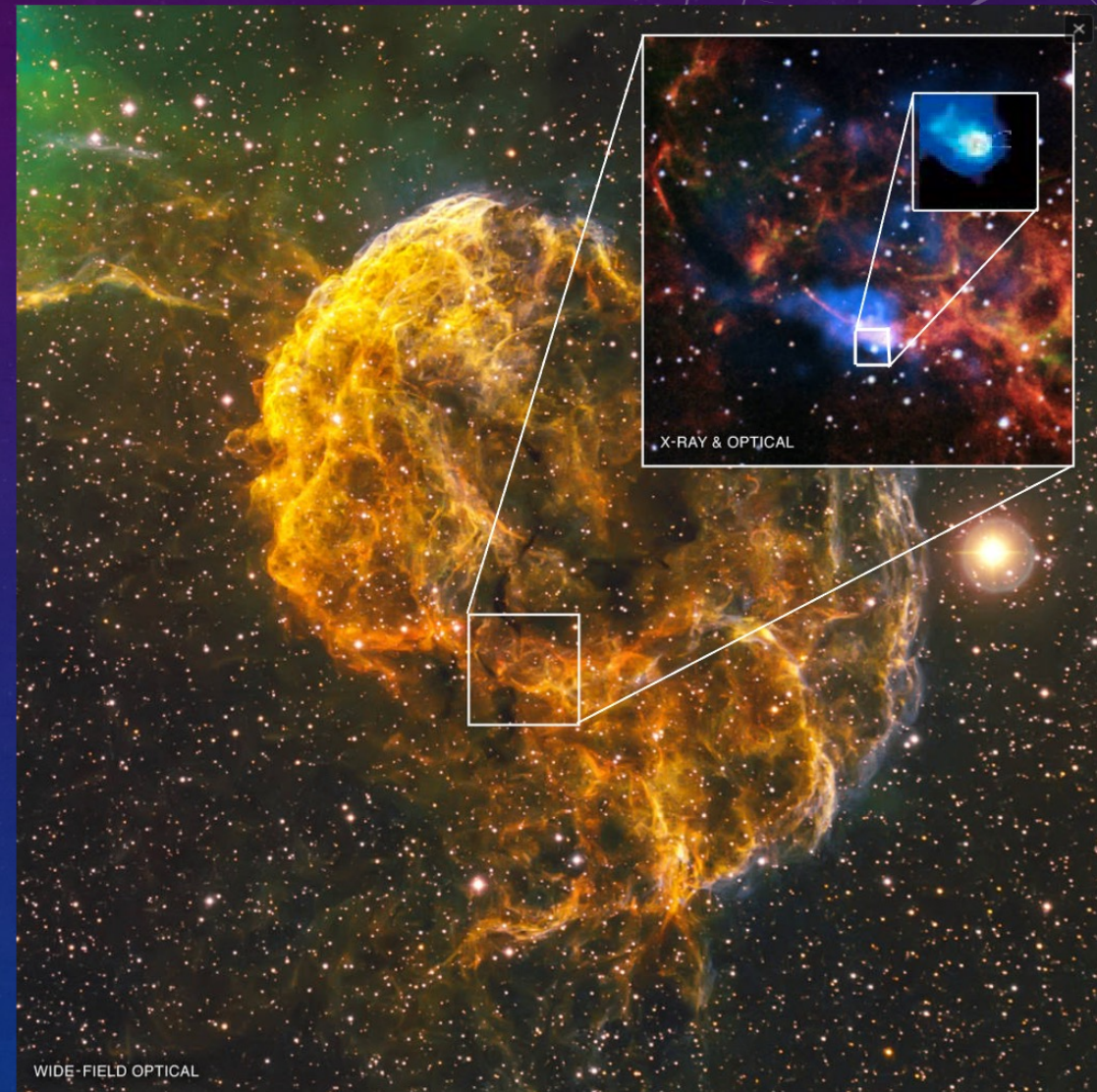
METODI OSSERVATIVI

La figura mostra l'esplosione di una supernova (nebulosa Medusa). L'immagine più grande è stata ottenuta, nel visibile. Nel riquadro, si vede la sovrapposizione di un'immagine ottica con quella a raggi X.



METODI OSSERVATIVI

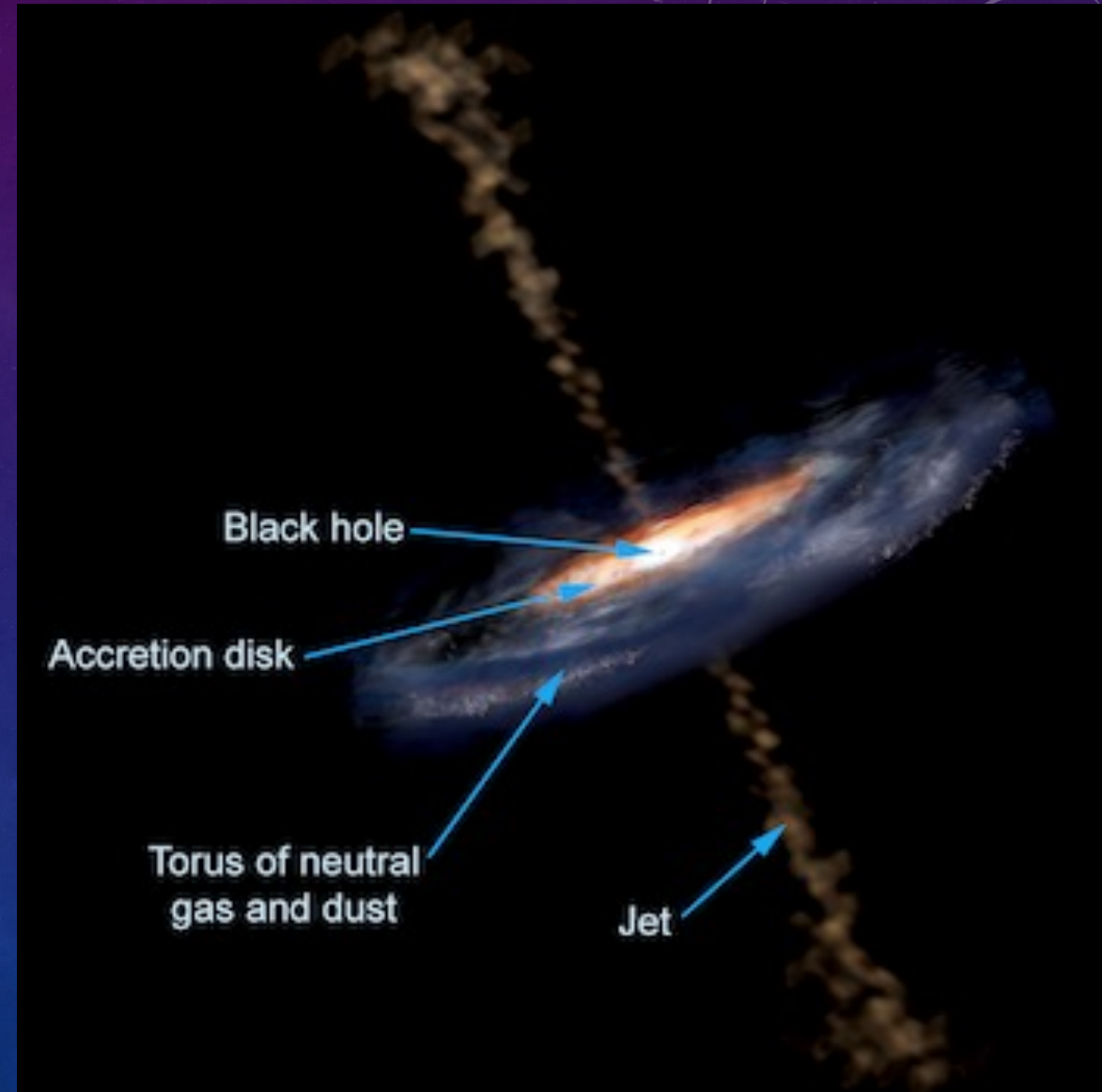
Nel quadrato più piccolo si vedono solo le immagini a raggi X: l'ingrandimento evidenzia la presenza di una pulsar (una particolare stella di neutroni).



ASTRONOMIA GAMMA – I raggi gamma $\lambda < 10^{-12} \text{ m}$ sono le radiazioni più energetiche esistenti nell'universo, e sono prodotte da eventi che liberano quantità di energia inimmaginabili, come la materia che cade in un buco nero, l'esplosione di una supernova o il collasso gravitazionale di una stella rotante e molto massiccia.

METODI OSSERVATIVI

I **gamma ray bursts** (lampi di luce gamma) sono intensi impulsi di fotoni gamma la cui durata va da pochi millisecondi ad alcune decine di minuti, e rappresentano il fenomeno più energetico mai osservato nell'universo.



ASTRONOMIA NEL VISIBILE – L'osservazione nella banda del visibile ($\lambda = 700 - 400 \text{ nm}$) con il telescopio Hubble, ha consentito la conferma di buchi neri al centro di galassie, la misurazione dell'età dell'universo (13,7 miliardi di anni) attraverso l'osservazione delle cefeidi, la nascita di stelle all'interno di nubi di gas, ecc.

Telescopio spaziale Hubble



I Pilastri della creazione, che mostrano stelle nascenti nella Nebulosa dell'Aquila.

ASTRONOMIA MULTIMESSAGGERA – Il 17 agosto del 2017, con l'osservazione di onde gravitazionali prodotte dalla coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni, nasce l'astronomia multimessaggera. Infatti, per la prima volta un'onda gravitazionale è osservata in associazione ad eventi elettromagnetici (lampi di raggi gamma, esplosioni luminose, emissione di radiazione infrarossa, raggi X).

METODI OSSERVATIVI

Questo nuovo metodo osservativo, si basa sull'osservazione e l'interpretazione coordinata di quattro diversi tipi di segnali "messaggeri": raggi cosmici; fotoni; neutrini; onde gravitazionali.



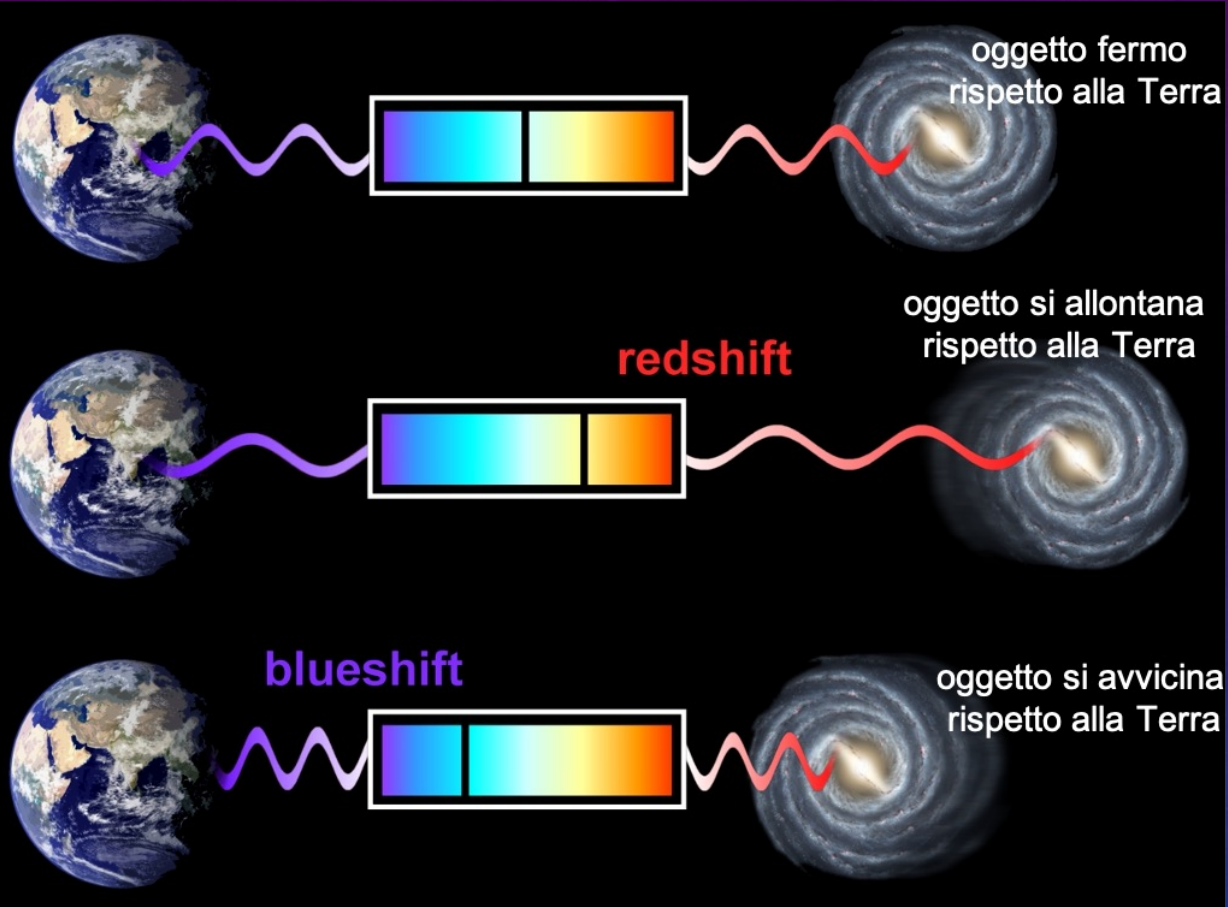
LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), è un osservatorio statunitense per il rilevamento delle onde gravitazionali.

IL REDSHIFT

Lo spostamento verso il rosso (*redshift*) è il fenomeno per cui una radiazione elettromagnetica emessa da un oggetto in allontanamento rispetto alla Terra, ha una lunghezza d'onda maggiore (una frequenza minore) e quindi minore energia dei fotoni, rispetto a quella che aveva all'emissione.

IL REDSHIFT

Nel caso della luce, il colore si sposta verso il rosso, ossia verso l'estremo inferiore, in termini di lunghezza d'onda, dello spettro del visibile.

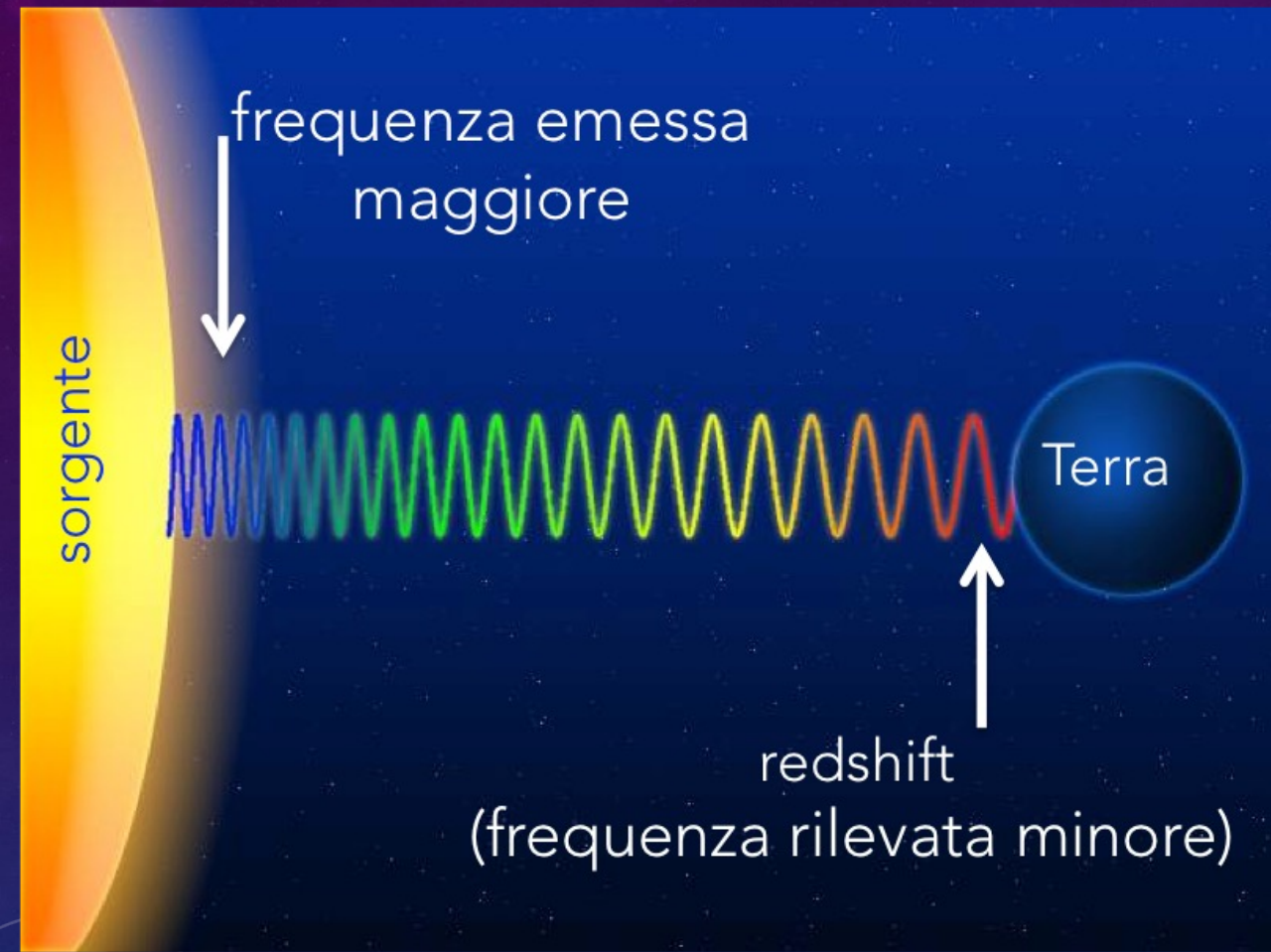


IL REDSHIFT

Redshift cosmologico è dovuto all'espansione dell'universo, mentre il **redshift gravitazionale** è un effetto relativistico che si osserva quando una radiazione elettromagnetica si allontana da un campo gravitazionale, perdendo parte della sua energia.

IL REDSHIFT

La radiazione deve continuare a muoversi alla velocità c , la sua perdita di energia $E=hf$ si manifesta attraverso una diminuzione di frequenza.



IL REDSHIFT

Il *redshift* e il *blueshift* vengono indicati attraverso la seguente grandezza adimensionale:

$$z = \frac{\lambda_{osservata} - \lambda_{emessa}}{\lambda_{emessa}}$$

$$z = \frac{\nu_{emessa} - \nu_{osservata}}{-\nu_{osservata}}$$

$z < 0$ *blueshift*: oggetti che si avvicinano all'osservatore con la luce che aumenta la sua energia.

$z > 0$ *redshift*: oggetti che si allontanano dall'osservatore con la luce che diminuisce la propria energia.

LE STELLE

Una **stella** è uno sferoide luminoso di plasma che genera energia nel proprio nucleo attraverso processi di fusione nucleare; tale energia è irradiata nello spazio sotto forma di radiazione elettromagnetica, flusso di particelle elementari (vento stellare) e neutrini. La loro massa varia tra 0,08 e 150 – 200 masse solari.

LE STELLE

La classificazione stellare è basata sulla temperatura superficiale delle stelle (stimata con la legge di Wien).

Class	Temperatura (Kelvin)	Colore convenzionale	Colore apparente	Massa (masse solari)
O	$\geq 33\,000\text{ K}$	blu	blu	$\geq 16\, M_{\odot}$
B	$10\,000\text{--}33\,000\text{ K}$	azzurro	blu chiaro	$2,1\text{--}16\, M_{\odot}$
A	$7\,500\text{--}10\,000\text{ K}$	bianco	azzurro	$1,4\text{--}2,1\, M_{\odot}$
F	$6\,000\text{--}7\,500\text{ K}$	bianco-giallo	bianco	$1,04\text{--}1,4\, M_{\odot}$
G	$5\,200\text{--}6\,000\text{ K}$	giallo	bianco-giallo	$0,8\text{--}1,04\, M_{\odot}$
K	$3\,700\text{--}5\,200\text{ K}$	arancione	giallo-arancione	$0,45\text{--}0,8\, M_{\odot}$
M	$\leq 3\,700\text{ K}$	rosso	arancio-rosso	$0,08\text{--}0,45\, M_{\odot}$

DIAGRAMMA H-R

Il *diagramma H-R* (*Hertzsprung-Russell*), è uno strumento teorico che mette in relazione la temperatura effettiva e la luminosità delle stelle.

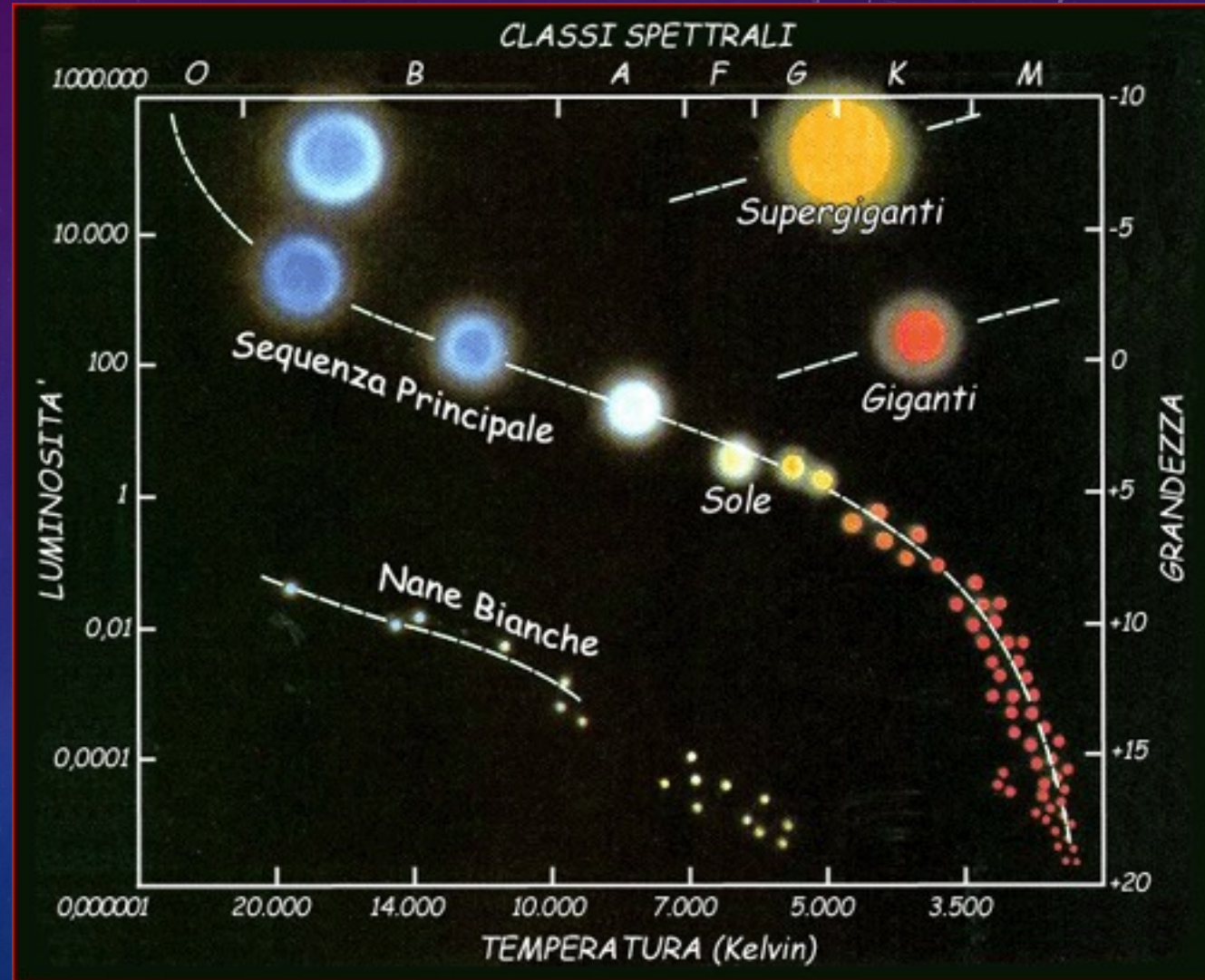


DIAGRAMMA H-R

A seconda della massa, dell'età e della composizione chimica, i processi fisici in atto in una stella sono differenti e le portano a seguire differenti percorsi evolutivi sul diagramma H-R.

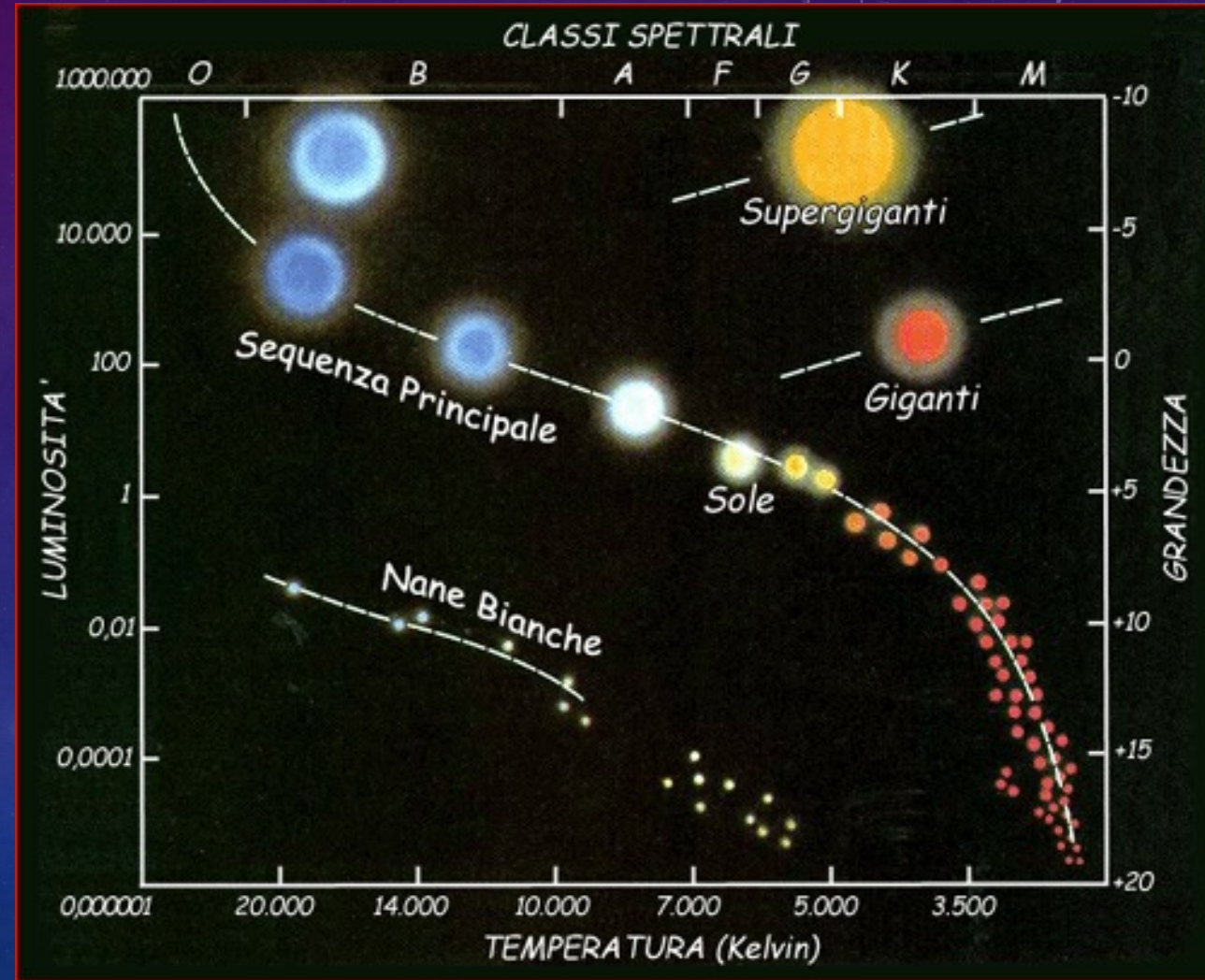


DIAGRAMMA H-R

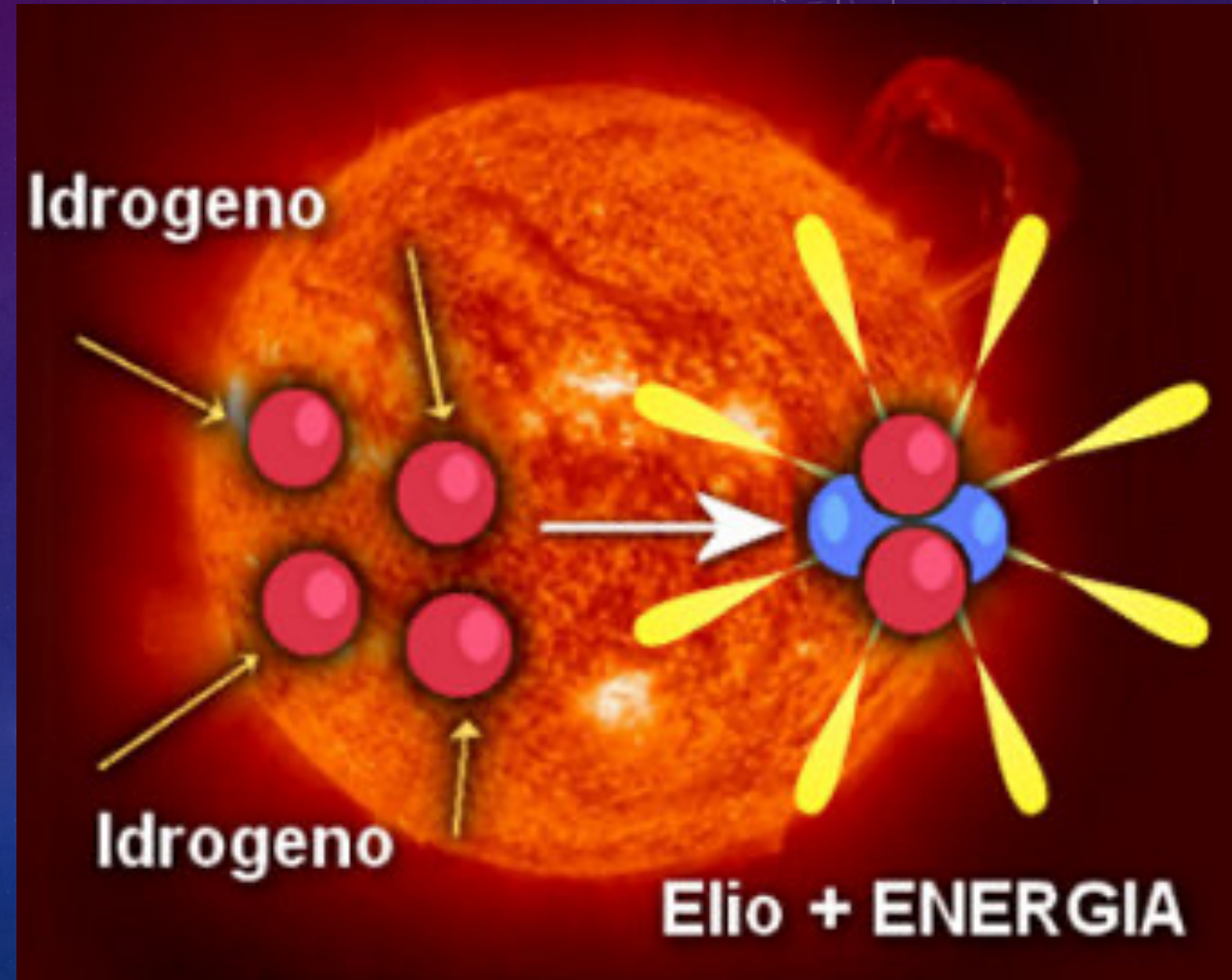
Grazie al diagramma H-R è possibile: confrontare le predizioni teoriche dei modelli di evoluzione stellare con le osservazioni; determinare l'età, la composizione chimica e la distanza di una popolazione stellare; derivare la storia della formazione stellare di un agglomerato di stelle etc.

FUSIONE NUCLEARE

La **fusione nucleare** è il processo di reazione nucleare nel quale i nuclei di due o più atomi vengono avvicinati a tal punto da superare la repulsione elettromagnetica e unirsi tra loro generando il nucleo di un elemento di massa minore, o maggiore, della somma delle masse dei nuclei reagenti, con emissione di energia.

FUSIONE NUCLEARE

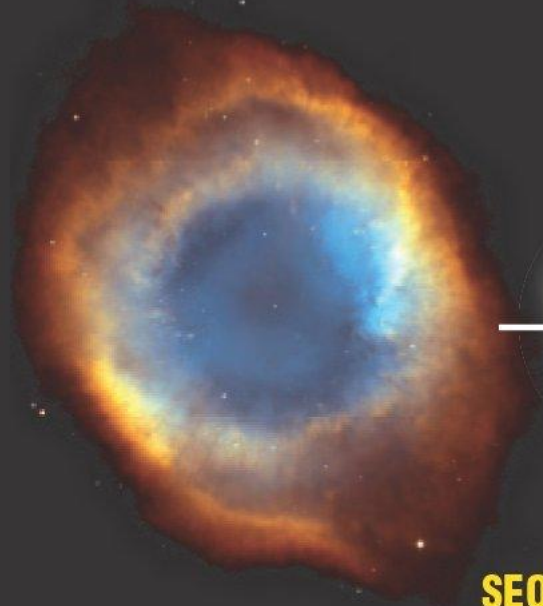
Tra i processi di fusione che avvengono nelle stelle, il più semplice è *il ciclo dell'idrogeno*, che, a partire dall'idrogeno, portano alla sintesi dell'elio.



EVOLUZIONE STELLARE

NEBULOSA STELLARE

Una regione più densa della nebulosa inizia a restringersi, a riscaldarsi e diventa una protostella



SEQUENZA PRINCIPALE

La stella risplende grazie alle reazioni nucleari che producono luce e calore



SUPERGIGANTE

Le stelle più grandi si espandono, si raffreddano e diventano rosse



GIGANTE ROSSA

Le stelle più piccole si espandono e diventano rosse



SUPERNOVA

La supergigante esplode diventando brillantissima



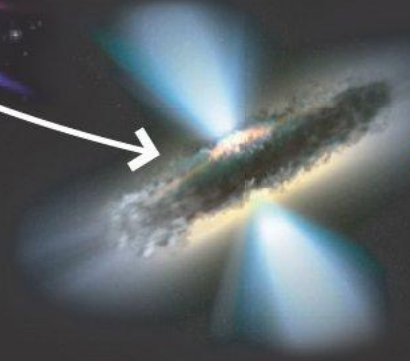
STELLA DI NEUTRONI

Il nucleo della supernova collassa e diventa densissimo



BUCO NERO

Il nucleo collassa completamente e scompare



NEBULOSA PLANETARIA

I gas più esterni si disperdono



Il nucleo esposto forma una **NANA BIANCA**

NANA NERA

La stella smette di bruciare



Una **galassia** è un grande insieme di stelle, sistemi, ammassi ed associazioni stellari, gas e polveri (che formano il mezzo interstellare), legati dalla reciproca forza di gravità.

LE GALASSIE

Le galassie sono state categorizzate sulla base della loro morfologia visuale: **ellittiche**, **spirali**, **forma irregolare**.

LE GALASSIE

Nell'universo osservabile sono presenti probabilmente più di 100 miliardi di galassie.



LE GALASSIE

Nella maggior parte dei casi
le galassie sono disposte
nell'Universo organizzate
secondo precise gerarchie
associative: *ammassi e
superammassi.*

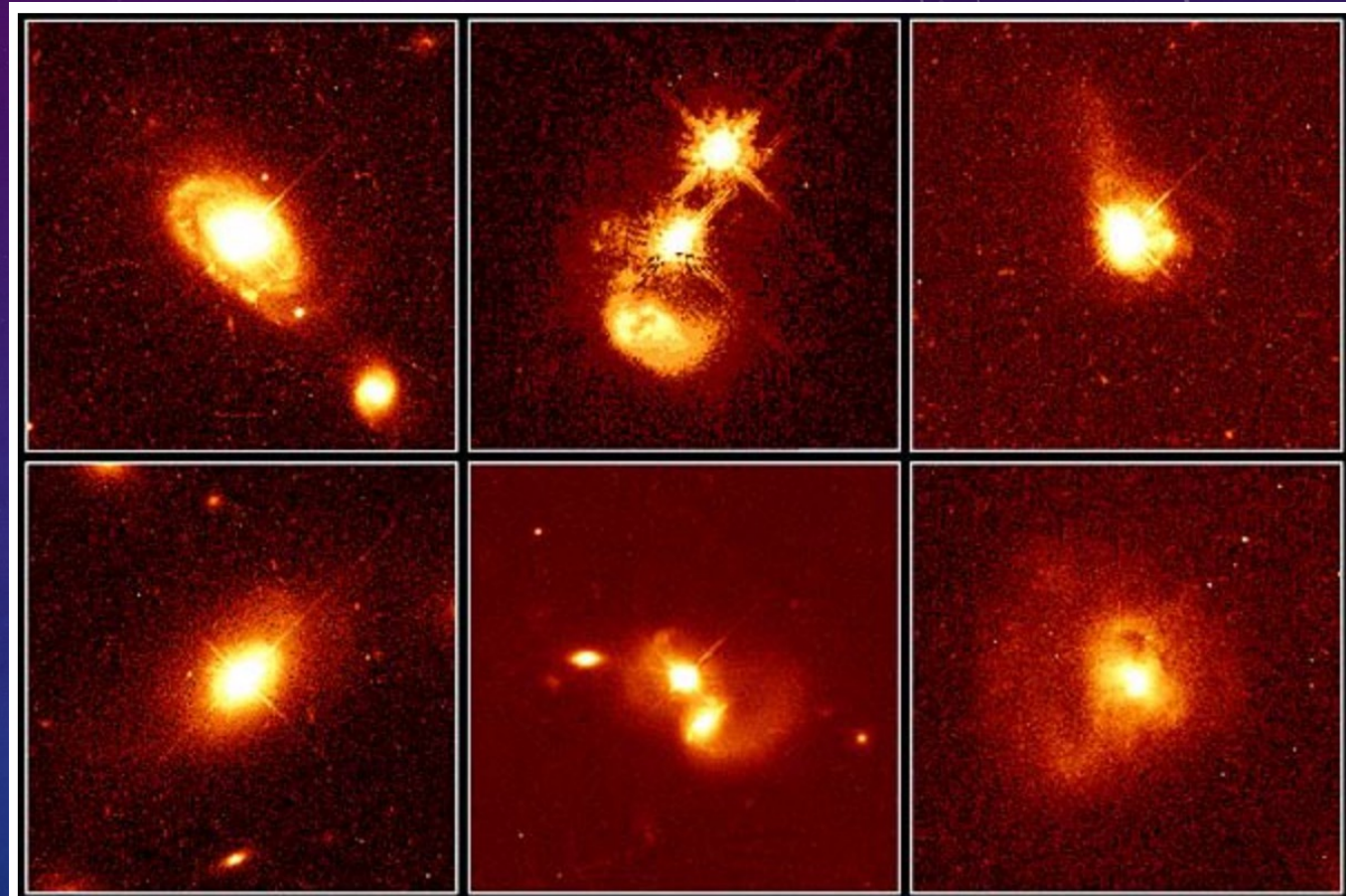


QUASAR

Una *quasar* (*QUASi-stellAR radio source*) è un nucleo galattico attivo estremamente luminoso, che si manifesta come potente sorgente radio. La ragione fisica della grande luminosità dei quasar è che il gas diffuso nel nucleo di una galassia che ospita un quasar sia attirato verso un buco nero supermassiccio.

QUASAR

Le immagini ottenute dal telescopio spaziale Hubble, mostrano le galassie intorno ai quasar e come vengono da esso sconvolte.



PULSAR



Una *pulsar* (sorgente radio pulsante), è una stella di neutroni che ruota molto velocemente.

Il fascio di onde radio emesso è causato dall'azione combinata del campo magnetico e della rotazione.

PULSAR

La massa delle pulsar è comparabile a quella del Sole,
ma è compressa in un raggio di una decina di chilometri,
quindi la loro densità è enorme. Le pulsar si formano
quando una stella esplode come supernova.

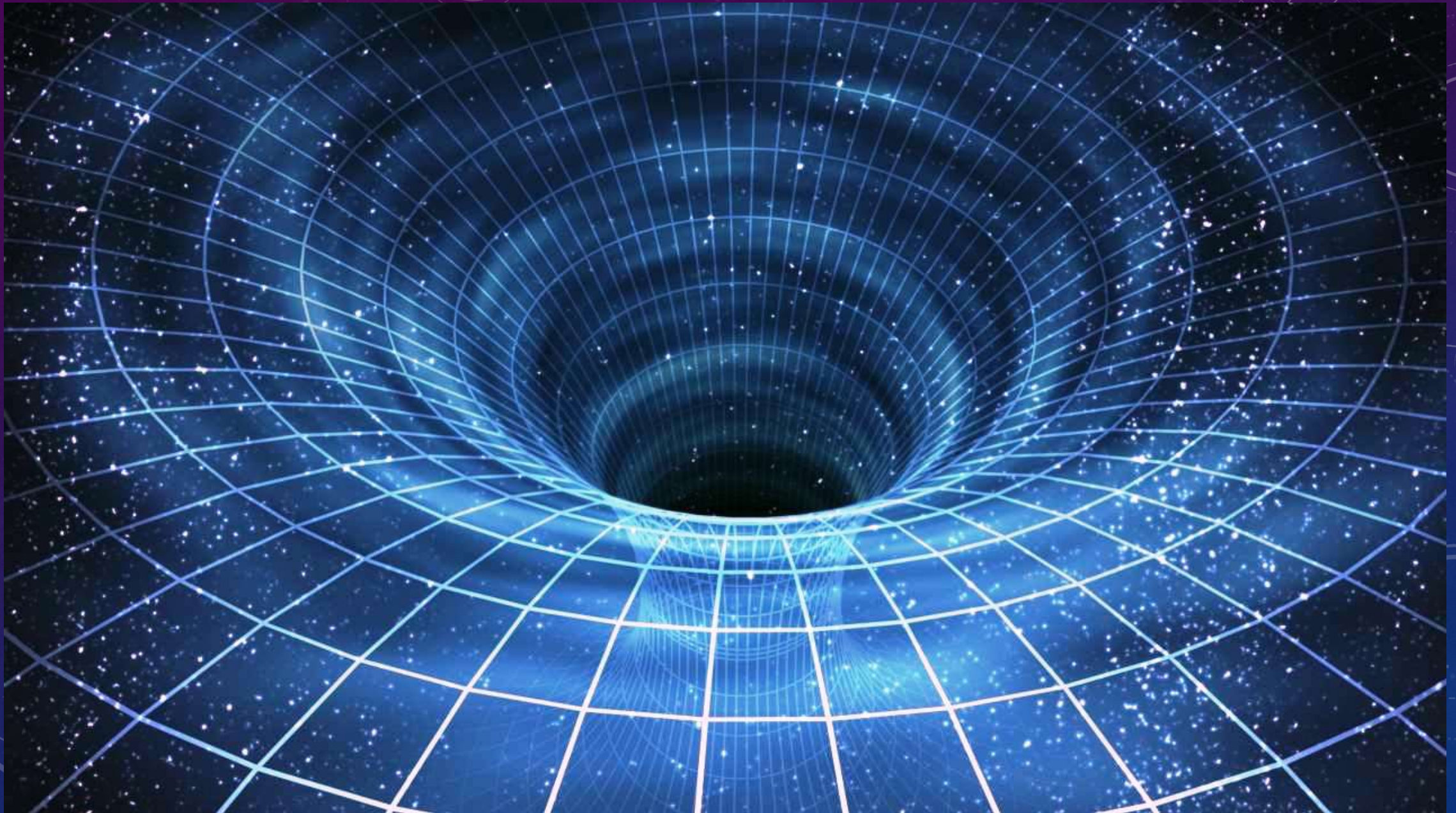
PULSAR

Una **magnetar** (stella magnetica) è una stella di neutroni che possiede un enorme campo magnetico, miliardi di volte quello terrestre, il cui decadimento genera intense ed abbondanti emissioni elettromagnetiche, in particolare raggi X, raggi gamma e (molto raramente) anche radiofrequenze.

BUCO NERO

Un *buco nero* è un corpo celeste con un campo gravitazionale così intenso che né la materia e né la radiazione elettromagnetica possono uscire.

Definizione più precisa (relatività generale): un *buco nero* è una regione dello spaziotempo con una curvatura tale che nulla dal suo interno può uscirne.



BUCO NERO

Il valore di R (*raggio di Schwarzschild*) per il quale un corpo celeste di massa M diventa un buco nero è:

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

BUCO NERO

Affinché una stella diventi un buco nero alla fine della sua vita, è necessario che la massa residua sia superiore a 3,8 masse solari. In queste condizioni nessuna forza è in grado di contrastare il collasso gravitazionale, ed il nucleo collassa fino a raggiungere dimensioni inferiori al raggio di Schwarzschild, creando, così, un buco nero.

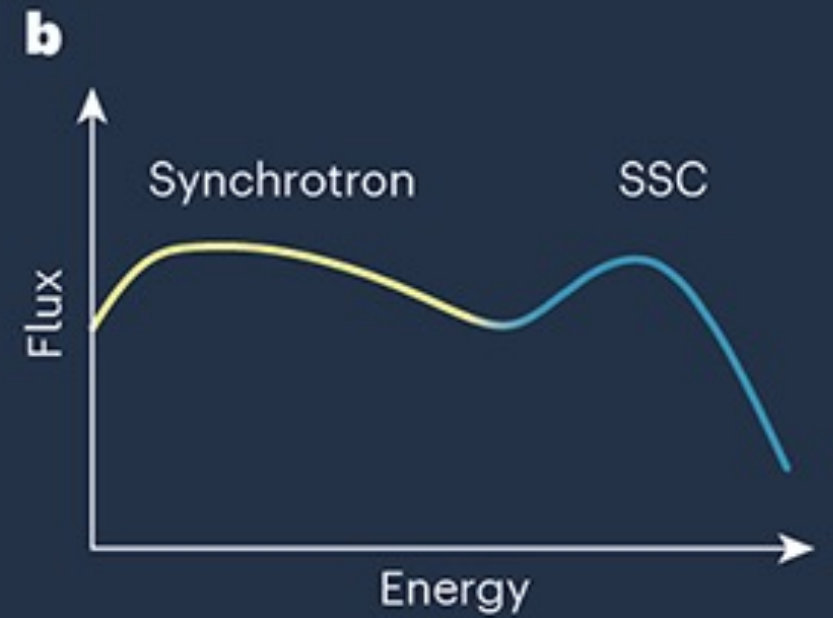
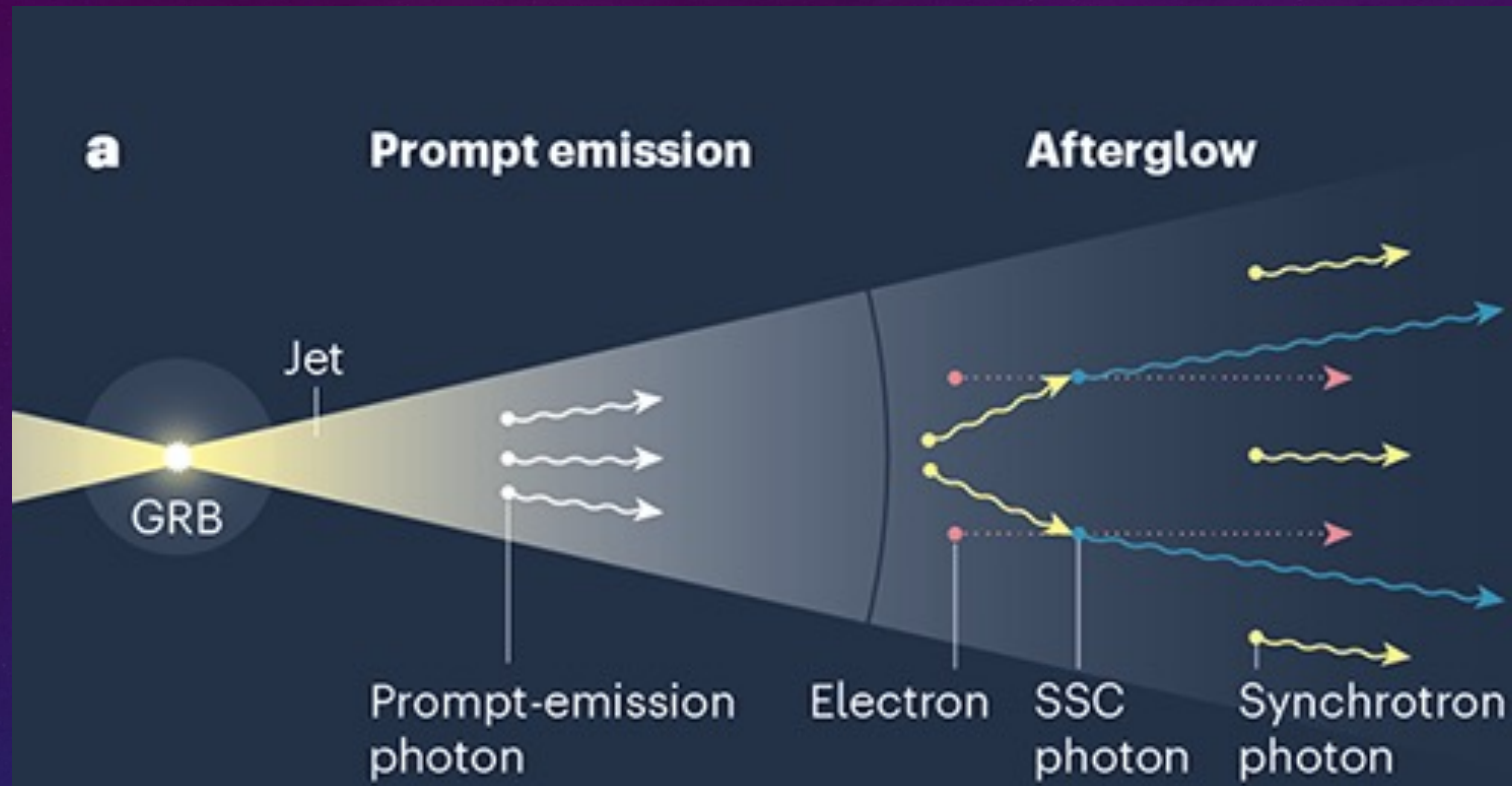
Il 10 aprile del 2019, la rete globale di antenne radio dell'Event Horizon Telescope ha prodotto la prima immagine dettagliata dell'orizzonte degli eventi di un buco nero, quello al centro della galassia M87 a 55 milioni di anni luce dalla Terra.

BUCO NERO



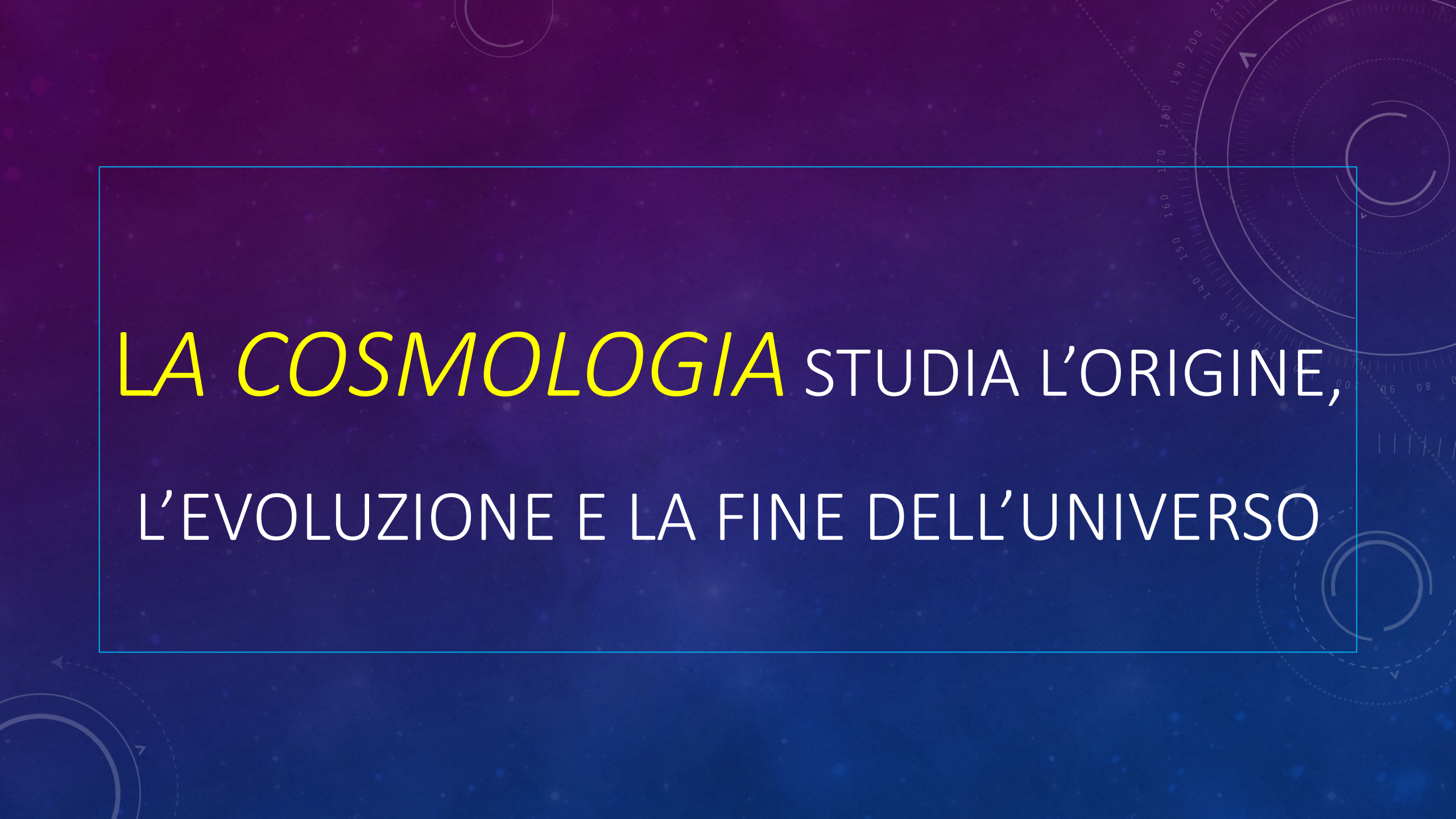
GAMMA RAY BURST

I *gamma ray burst GRB* (lampi gamma) sono lampi di raggi gamma, che durano da pochi millisecondi a diverse decine di minuti. Queste potenti esplosioni costituiscono il fenomeno più energetico finora osservato nell'universo. I lampi gamma possono essere osservati soltanto dallo spazio perché l'atmosfera li blocca.



GAMMA RAY BURST

Queste potenti emissioni di raggi gamma sono generate dall'accrescimento di materia su un buco nero. I lampi di raggi gamma avvengono praticamente al limite dell'universo visibile. L'evento più lontano conosciuto ha un redshift di 8,2 (distanza di 13,03 miliardi di anni luce). È partito circa 500 milioni di anni dopo il big bang.

The background is a deep blue gradient with a starry space pattern. Faint, light blue circular patterns resembling orbits or celestial paths are visible, particularly on the right side. A thin blue rectangular border frames the text area.

LA COSMOLOGIA STUDIA L'ORIGINE,
L'EVOLUZIONE E LA FINE DELL'UNIVERSO

La **cosmologia** è stata una branca tradizionale della filosofia, costituitasi nel Settecento all'interno di quella che veniva già chiamata "filosofia della natura", e aveva come suo oggetto specifico la riflessione sull'universo considerato come un tutto.

COSMOLOGIA COME SCIENZA

Nella seconda metà del Settecento il termine cosmologia viene utilizzato anche fuori dalla filosofia. *Lambert* (1728-1777) pubblicava nel 1761 le *Lettere cosmologiche* nelle quali cercava di mostrare come la teoria gravitazionale newtoniana fosse adeguata per spiegare lo stato attuale del mondo astronomicamente descrivibile.

La teoria cosmologica più nota è "**ipotesi cosmologica di Kant-Laplace**" (metà XVIII sec) che riguarda l'origine e la strutturazione del cosmo procedente da una iniziale nebulosa in rotazione, soggetta unicamente alle forze e alle leggi stabilite dalla meccanica di Newton.

nube di gas
e polveri

nebulosa in
rotazione

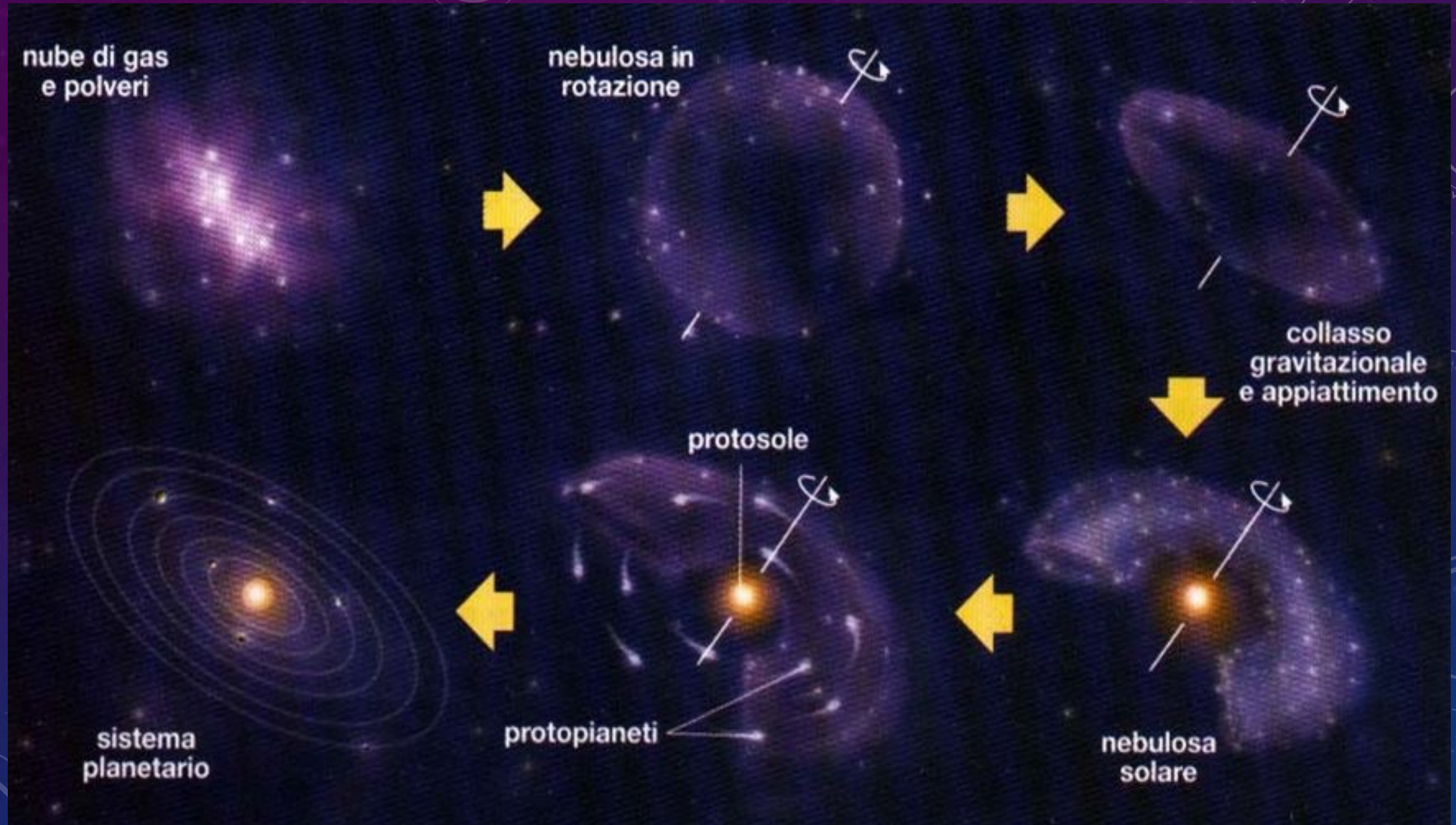
collasso
gravitazionale
e appiattimento

protosole

protopianeti

nebulosa
solare

sistema
planetario



COSMOLOGIA COME SCIENZA

Nel Novecento, sorge una vera e propria cosmologia con pretese scientifiche, poiché trae tutto il suo bagaglio concettuale e teorico dalle due teorie fondamentali della fisica contemporanea, la relatività generale e la fisica quantistica.

COSMOLOGIA COME SCIENZA

Anche in questo caso, come già in passato, l'interesse si è portato sul problema dell'origine dell'universo, ma non tanto in seguito a una curiosità filosofica, bensì perché le equazioni della teoria generale della relatività ammettono soluzioni diverse, a ciascuna delle quali corrisponde un "modello di universo" differente.

Legge di Hubble

Esiste una relazione lineare tra lo spostamento verso il rosso z delle galassie e la loro distanza D:

$$z = \frac{H_0 D}{c}$$

H_0 è la *costante di Hubble*, il cui valore attualmente stimato è $(67,15 \pm 1,2 \text{ km/s/Mpc})$.

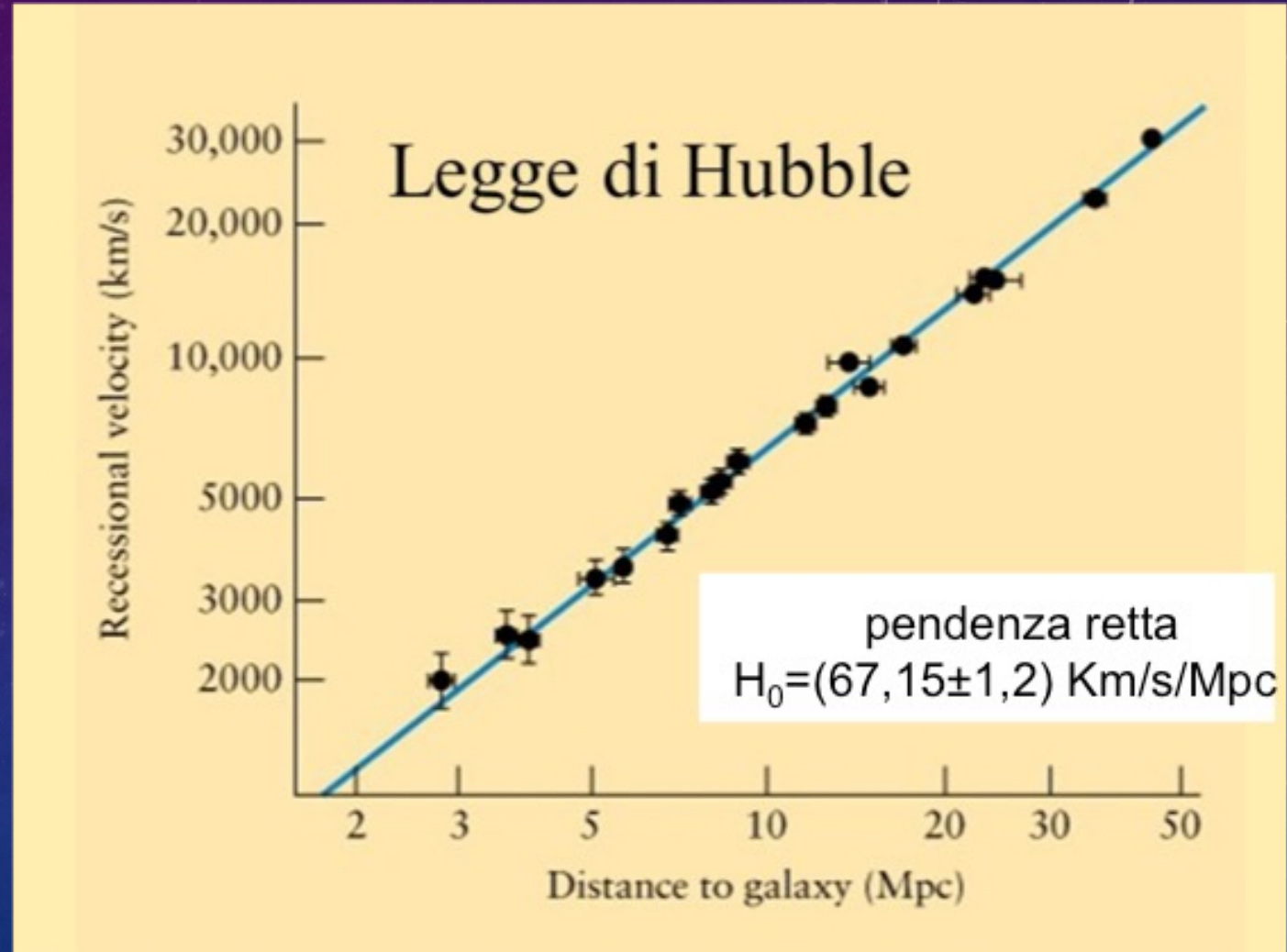
LEGGE DI HUBBLE

Legge di Hubble

La velocità v di recessione di una galassia è direttamente proporzionale alla sua

distanza D :

$$v = H_0 D$$



LEGGE DI HUBBLE

Dal valore di H_0 è possibile ricavare un ordine di grandezza per l'età dell'universo. In tutti i modelli cosmologici che assumono un Big Bang (e una velocità di allontanamento costante nel tempo), infatti, il tempo intercorso fra il Big Bang e l'epoca attuale è dato approssimativamente da:

$$v = \frac{D}{t} \xrightarrow{v=H_0 D} t = \frac{1}{H_0} = (13,7 \pm 0,8) \text{ miliardi di anni}$$

ESPANSIONE COSMICA

La scoperta di Hubble fu una vera e propria rivoluzione scientifica in quanto costrinse gli astronomi ad abbandonare l'idea di un universo stazionario, ossia eterno e immutabile, che aveva dominato la cultura occidentale per millenni, dai modelli cosmologici dei primi filosofi naturali greci fino agli inizi del XX secolo.

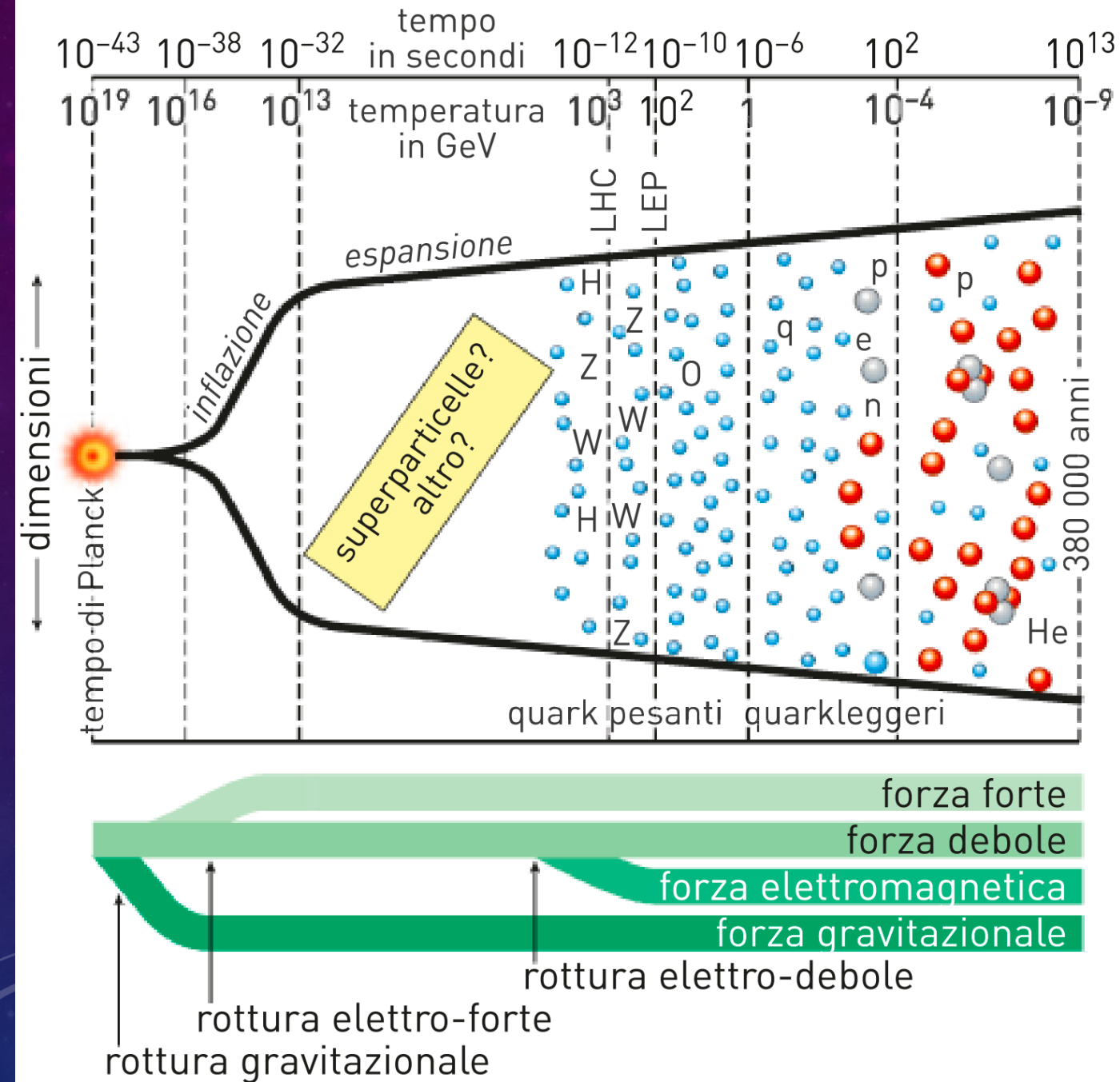
ESPANSIONE COSMICA

La legge di Hubble trovò un'interpretazione naturale all'interno della relatività generale: lo spazio stesso si espande, e le galassie vi vengono trascinate. Anche la luce viene deformata (**redshift**). L'espansione cosmica fornisce il contesto per capire come si arriva all'universo odierno.

Espansione cosmica

L'evoluzione dell'universo è guidata dall'espansione dello spazio. Al dilatarsi dello spazio, come la gomma di un palloncino mentre viene gonfiato, le galassie si allontanano e le onde luminose si allungano (e quindi si spostano verso il rosso).





IL BIG BANG

Il cosmo ha avuto
inizio 13,7 miliardi
di anni fa, con il
big bang.

IL BIG BANG

...e arriviamo a 380000 anni dopo il big bang, quando avvenne un fatto cruciale per il futuro dell'universo, ossia la formazione degli atomi. Questo consentì una sorta di pulizia nell'universo, l'universo divenne trasparente alla radiazione elettromagnetica.

IL BIG BANG

La forza gravitazionale, essendo di molti ordini di grandezza inferiore alle altre forze, fino a questo momento era stata spettatrice degli eventi, ma, adesso, entra in scena e comincia a legare assieme gli atomi.

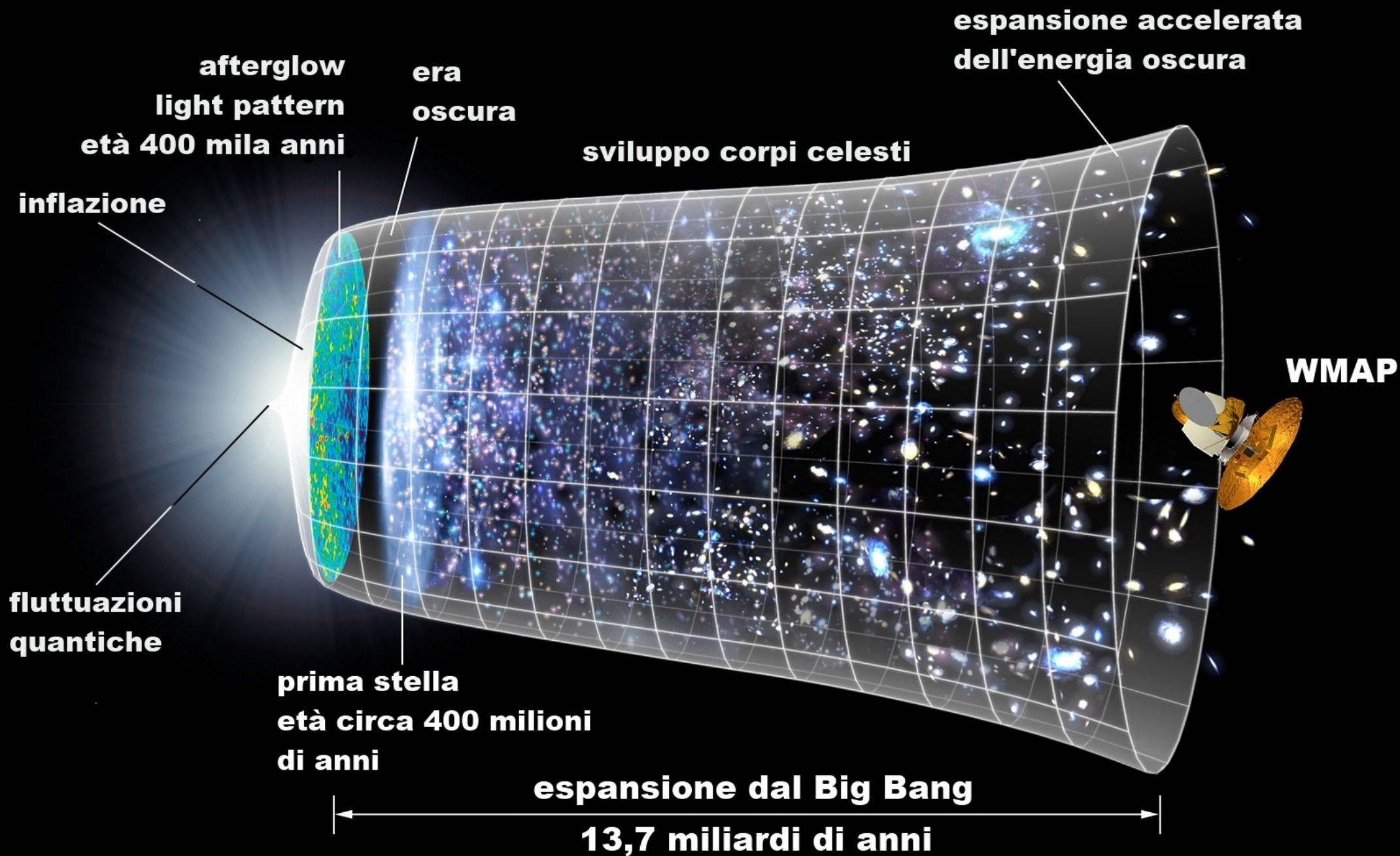
IL BIG BANG

La materia aveva una densità leggermente disomogenea, e la gravità amplificò queste variazioni di densità. Arrivati a 100 milioni di anni, le regioni più dense non solo si espandevano più lentamente, ma cominciarono addirittura a subire un collasso.

IL BIG BANG

Queste prime stelle avevano una massa di centinaia di masse solari. E avevano vite molto brevi prima di esplodere e lasciarsi dietro i primi elementi pesanti.

Nel corso del miliardo di anni successivo la forza di gravità aggregò nelle prime galassie queste nubi da un milione di masse solari.



RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

Nei primi 380000 anni di vita (fase subatomica, nucleare e del plasma atomico), l'universo era opaco alle radiazioni elettromagnetiche, perché le particelle cariche libere deflettevano o assorbivano i fotoni. Pertanto, nessuna radiazione elettromagnetica giungerà a noi portando informazioni di quel periodo di vita dell'universo.

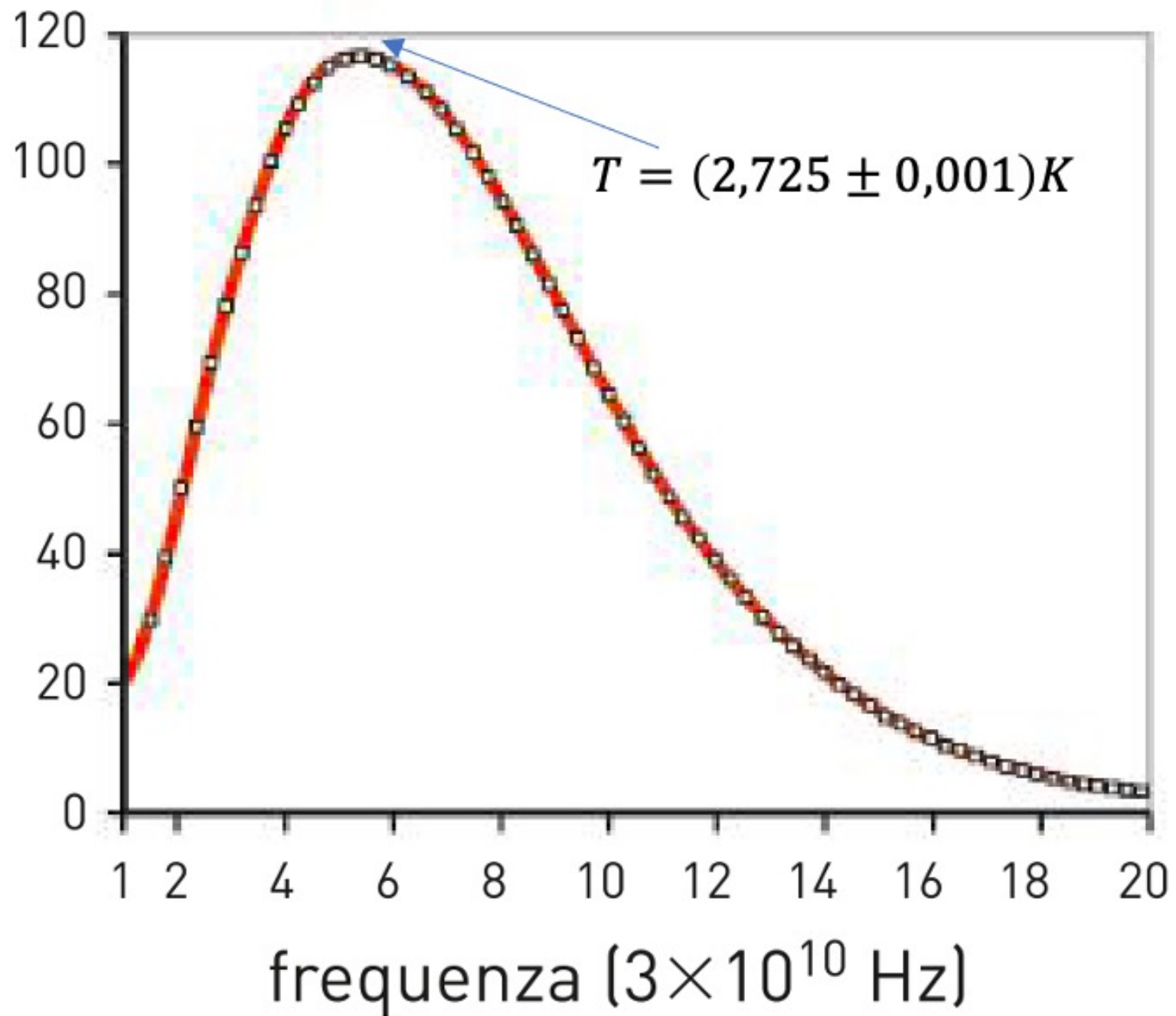
RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

Dopo 380000 anni, con la formazione degli atomi neutri, l'universo divenne trasparente ai fotoni, che, disaccoppiandosi dalla materia, potevano percorrere distanze grandissime prima di essere assorbiti. Ciò significa che i nostri telescopi possono osservare l'universo 380000 anni dopo il big bang.

RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

Quello che vediamo di quell'epoca è la *radiazione cosmica di fondo a microonde* (lunghezza di 1 mm) scoperta nel 1964 (*Penzias e Wilson, premi Nobel*), che rappresenta la radiazione emessa nei processi di formazione atomica avvenuti 380000 anni dopo il big bang.

distribuzione spettrale
($10^{-9} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$)



RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

Questa radiazione ha viaggiato nello spazio cosmico per oltre 13 miliardi di anni, raffreddandosi progressivamente fino ad una temperatura prossima allo zero assoluto, e precisamente $T=2,725 \text{ K}$.

Ma come mai questa radiazione emessa a 3000 K con una lunghezza d'onda di 3×10^{-7} m, oggi *si* è trasformata in microonde con una temperatura di 3 K?

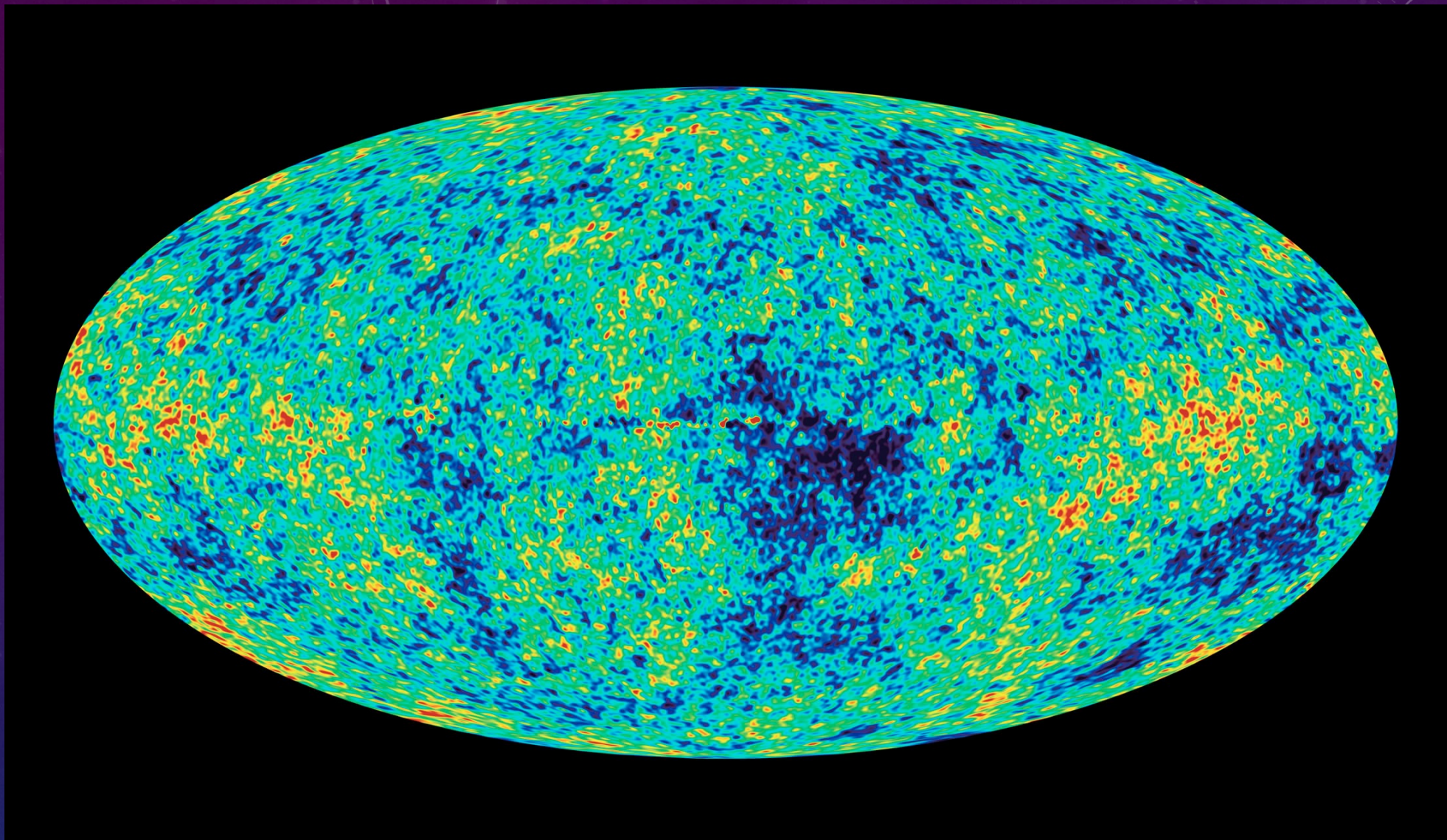
RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

L'universo si è espanso
(dilatazione dello
spaziotempo) e, con esso, le
onde elettromagnetiche si
sono progressivamente
allungate fino a raggiungere
la lunghezza d'onda attuale.



RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

Lo studio di questa radiazione, oltre a permettere di ottenere informazioni sull'universo all'età di 380000 anni, il periodo in cui si formarono gli atomi, consente di ottenere importanti prove a sostegno della teoria del big bang e della ricostruzione delle prime fasi di vita dell'universo.



Mappa della CMBR ottenuta grazie al satellite WMAP della NASA, lanciato nel 2001.

RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

I colori sulla mappa indicano temperature leggermente diverse della radiazione, con variazioni dell'ordine delle decine di μK . Quando la radiazione fu emessa, le regioni in blu erano leggermente più fredde e dense della media, per cui, partendo dagli impercettibili addensamenti di materia più freddi si sono formate, per effetto dell'attrazione gravitazionale, le prime galassie.

RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

L'isotropia della radiazione di fondo, verificata in maniera accurata da WMAP, ha portato un forte sostegno al principio cosmologico secondo cui l'universo è omogeneo e isotropo su larga scala.

PRIMA DEL BIG BANG

La relatività generale e la meccanica quantistica, sono i due pilastri della fisica moderna, ma incompatibili tra loro. Solo con una teoria unificata, la *gravità quantistica*, saremo in grado di svelare i primissimi istanti dell'universo (*era di Planck*, prima di 10^{-43} secondi), quando stava prendendo forma lo spaziotempo stesso.

PRIMA DEL BIG BANG

A **Nessuna epoca precedente**
Materia, energia, spazio e tempo
iniziano violentemente con il big bang.

B **Nascita quantistica**
Spazio e tempo ordinari si sviluppano
da uno stato primordiale descritto da
una teoria quantistica della gravità.

10^{-43} secondi
L'era di Planck:
primo intervallo
di tempo dotato
di significato;
lo spazio e il tempo
prendono forma.

C **Multiverso**
Il nostro e altri universi nascono
da uno spazio eterno.

D **Universo ciclico**
Il big bang è l'ultimo passaggio di un
ciclo eterno di espansione, collasso
e nuova espansione.

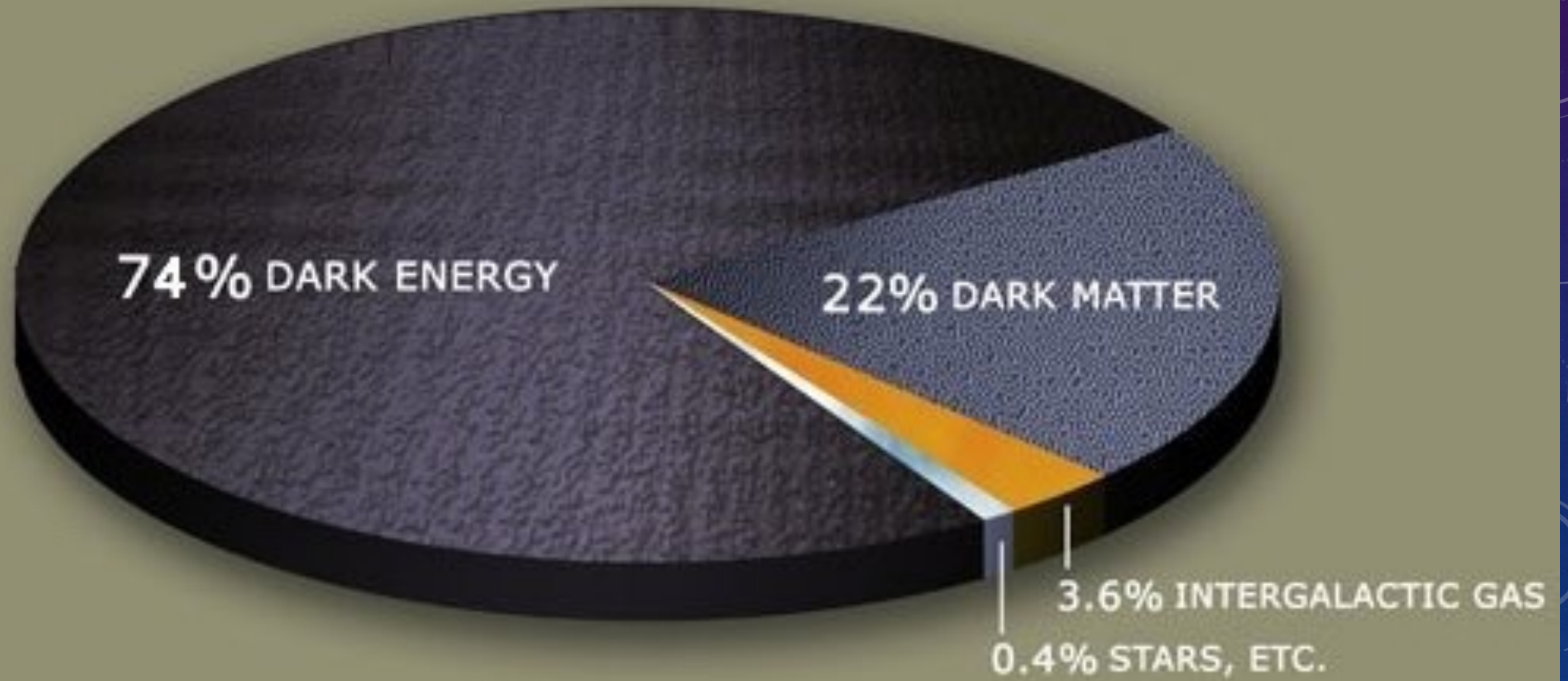
(dal ciclo precedente)

I possibili quattro
scenari prima del
big bang.

ENERGIA OSCURA

L'universo è costituito di *materia* (universo osservabile) per il 5%, *materia oscura* per il 20%,
energia oscura per il 70%.

L'energia oscura è un'ipotetica forma di energia che si trova in tutto lo spazio e risulta essere antigravitazionale.



ENERGIA OSCURA

L'introduzione dell'energia oscura si è resa necessaria per spiegare le osservazioni di un universo in accelerazione (confermata negli anni 90).

La natura dell'energia oscura è ancora «oscura»: risulta essere omogenea, poco densa interagire, fondamentalmente, solo con la gravità.

MATERIA OSCURA

Il termine ***materia oscura*** indica quella componente di materia che si manifesta attraverso i suoi effetti gravitazionali, ma non è direttamente osservabile, in quanto non emette alcuna radiazione elettromagnetica.

MATERIA OSCURA

La materia oscura ha senso solo all'interno della cosmologia basata sul big bang: spiegare la formazione delle galassie e gli ammassi di galassie in un tempo così breve come quello osservato; e come, le galassie, si mantengano integre anche se la materia visibile non può sviluppare abbastanza gravità per tale scopo.

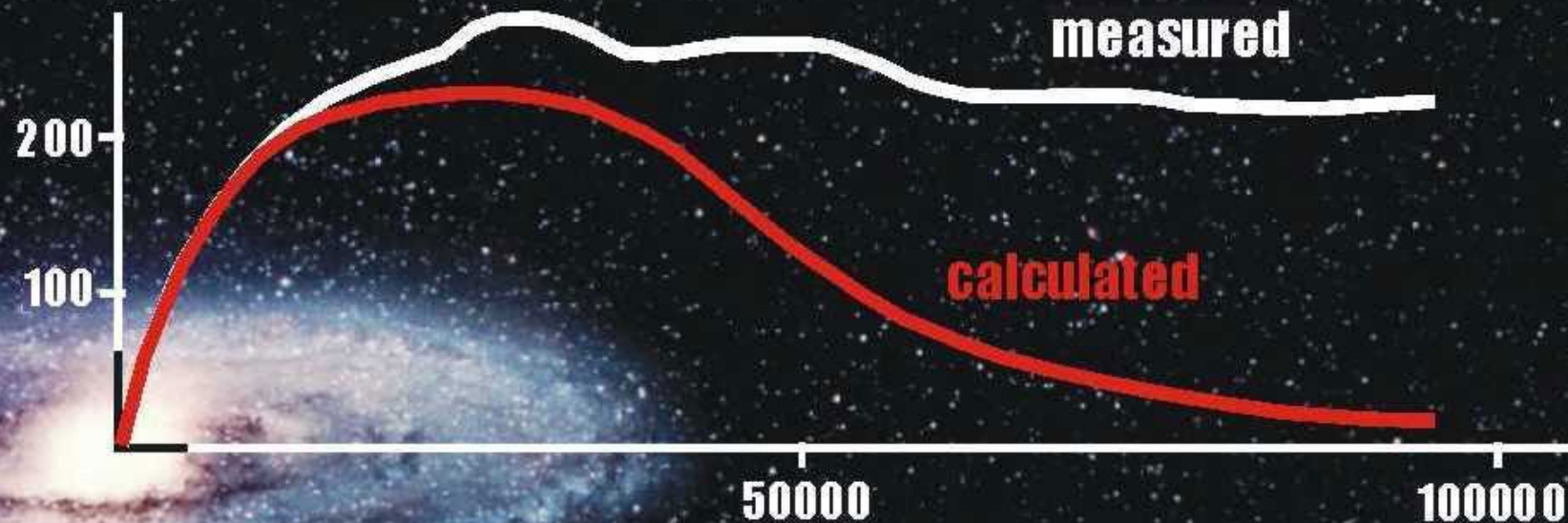
MATERIA OSCURA

La massa oscura è divisa in **barionica** e **non barionica**: la materia oscura barionica è quella composta da materia del tutto simile a quella che costituisce le stelle, i pianeti, la polvere interstellare, ecc., che però non emette radiazioni.

MATERIA OSCURA

La materia oscura non barionica (il 90%) è composta da:
particelle supersimmetriche, neutralini, neutrini
massicci, assioni, soggetti solo alla forza gravitazionale e
all'interazione nucleare debole (WIMP - Weakly
Interacting Massive Particles), particelle di grande massa
debolmente interagenti con la materia barionica.

rotational velocity
(km/s)



measured

calculated

50000

100000

distance from center (light years)

EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

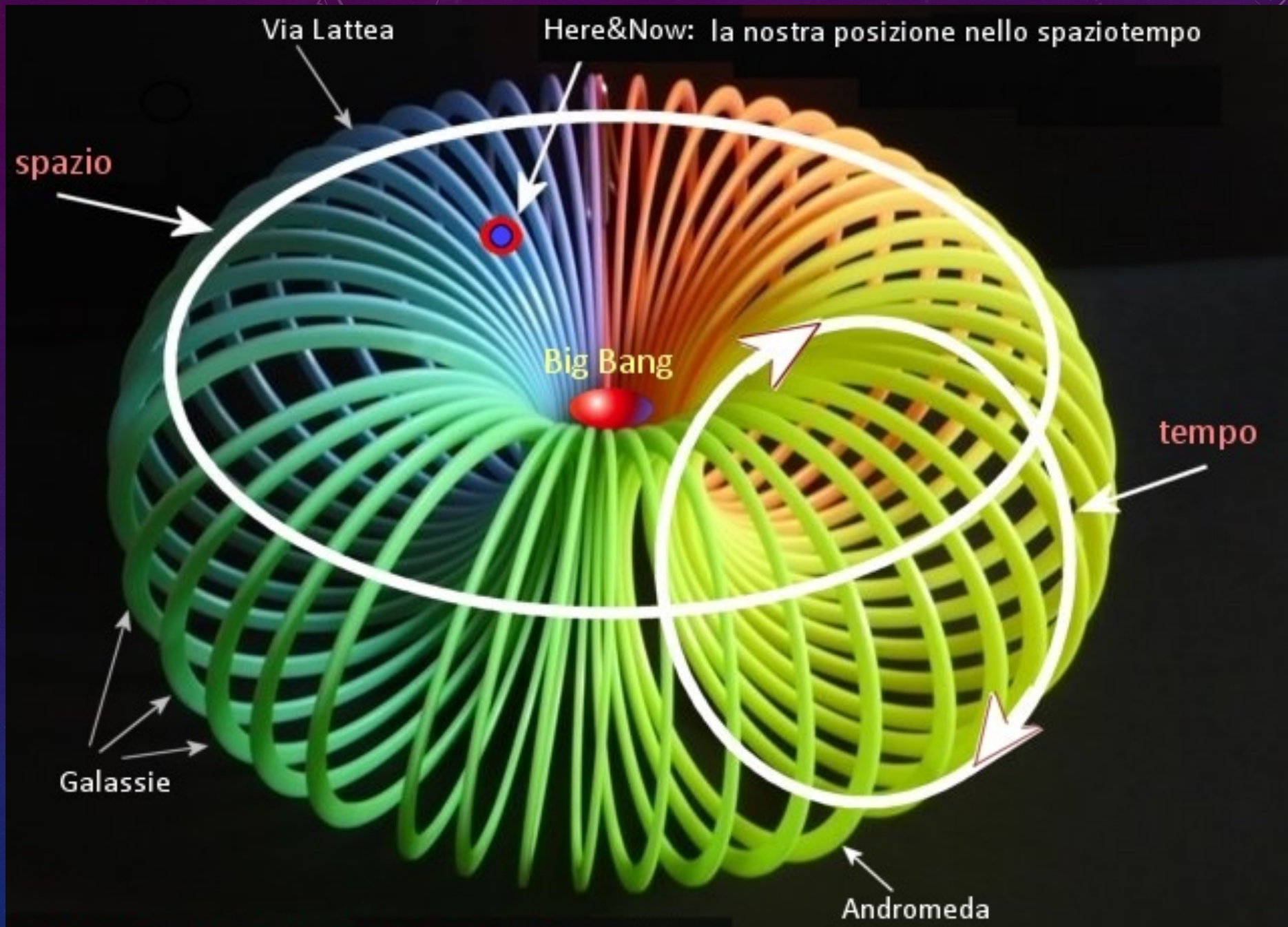
Prima che Einstein avanzasse la sua teoria della relatività generale, l'universo era concepito come un'isola di materia fluttuante in uno spazio infinito. E lo spazio era solo un ente di ragione, ossia il non-essere considerato come possibilità di pervenire ad essere, se mai una qualche materia giungesse un giorno ad occuparlo.

EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

Con la relatività generale i costituenti del cosmo, **materia più energia**, danno **forma all'universo**, per cui con le equazioni di campo Einstein getta le basi dello studio della natura dell'universo, divenendo così il principale fondatore della cosmologia moderna.

EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

Nel 1917 Einstein pubblica una nuova idea sull'universo nell'articolo *Considerazioni cosmologiche sulla teoria della relatività generale*: lo spazio non ha bordi perché la gravità (massa-energia) lo fa incurvare su sé stesso. *In questo modo l'universo è chiuso e finito, ossia privo di contorni.*



EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

Questa concezione del cosmo di Einstein, comportava un universo in espansione o in contrazione. Einstein, credendo in un universo statico, per impedire alla materia di implodere, introdusse nelle sue equazioni, una forza repulsiva (attraverso la costante cosmologica λ), tale da controbilanciare la gravità.

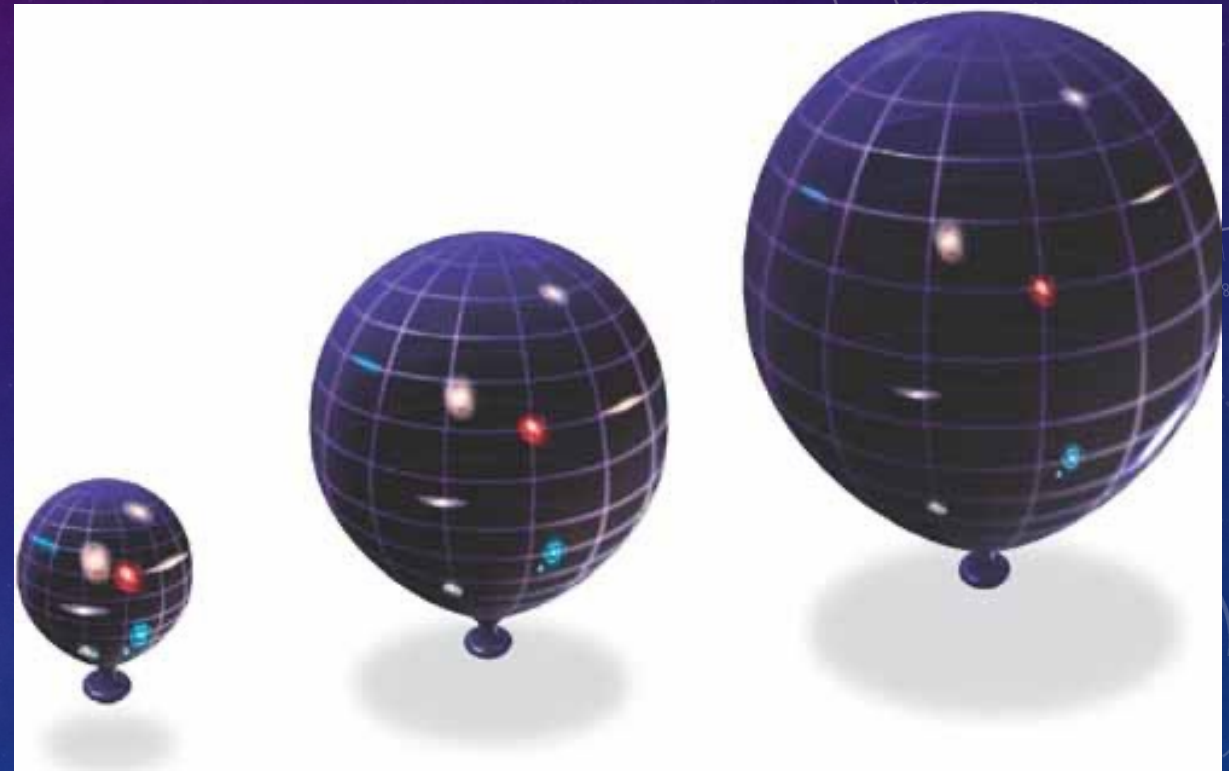
EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

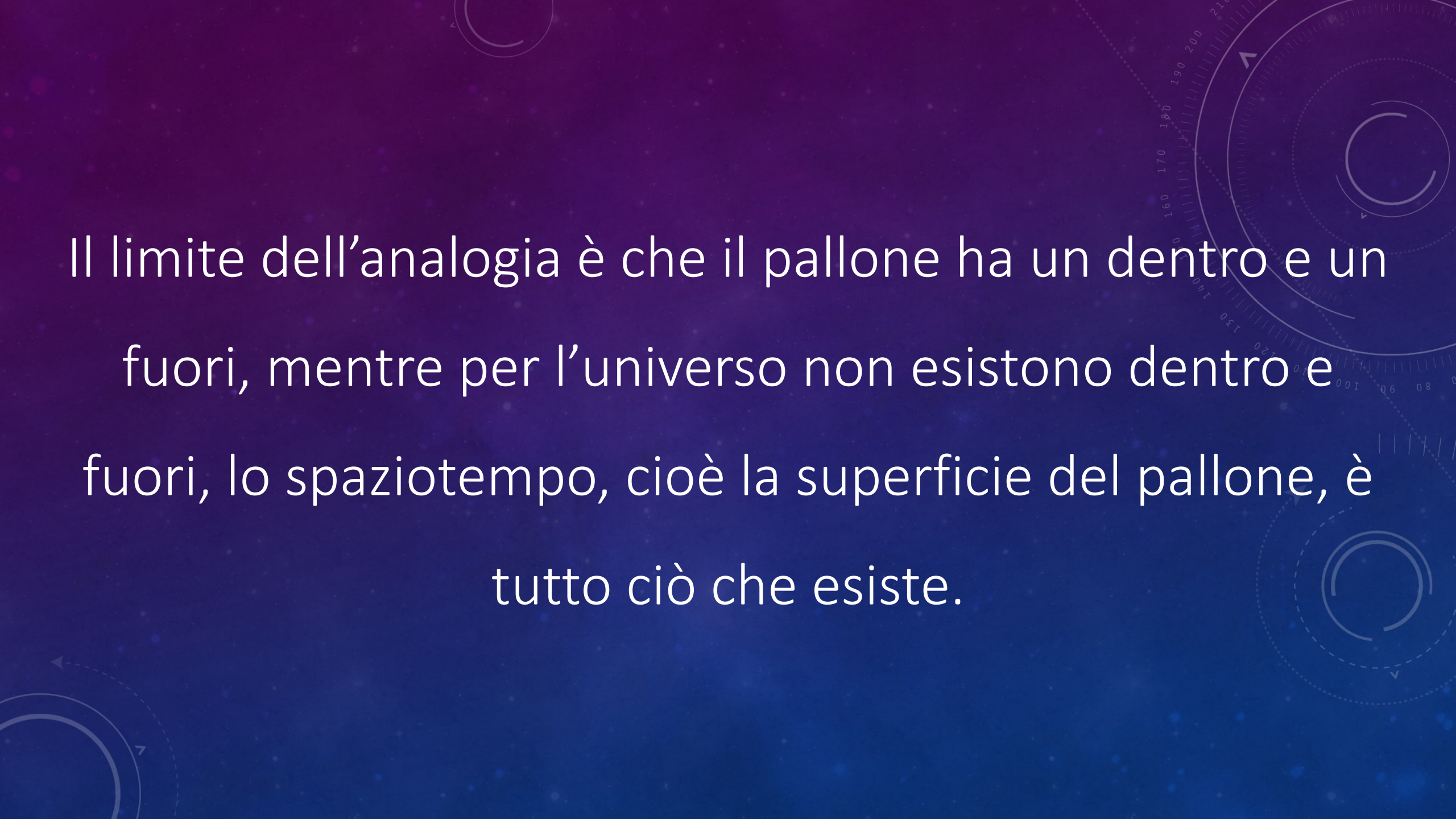
Nel 1929 l'astronomo Hubble scoprì che in realtà l'universo si stava espandendo, come previsto nei modelli di universo elaborati da *Friedmann* e *Lemaitre*, a partire dalle equazioni originali di campo. Einstein, venuto a conoscenza della scoperta, avrebbe definito la sua costante cosmologica il suo “*più grosso sbaglio*”.

Come possiamo raffigurarci l'espansione dell'universo alla luce della relatività generale, con le sue implicazioni relative all'interazione della curvatura spaziotempo ed il contenuto di massa ed energia?

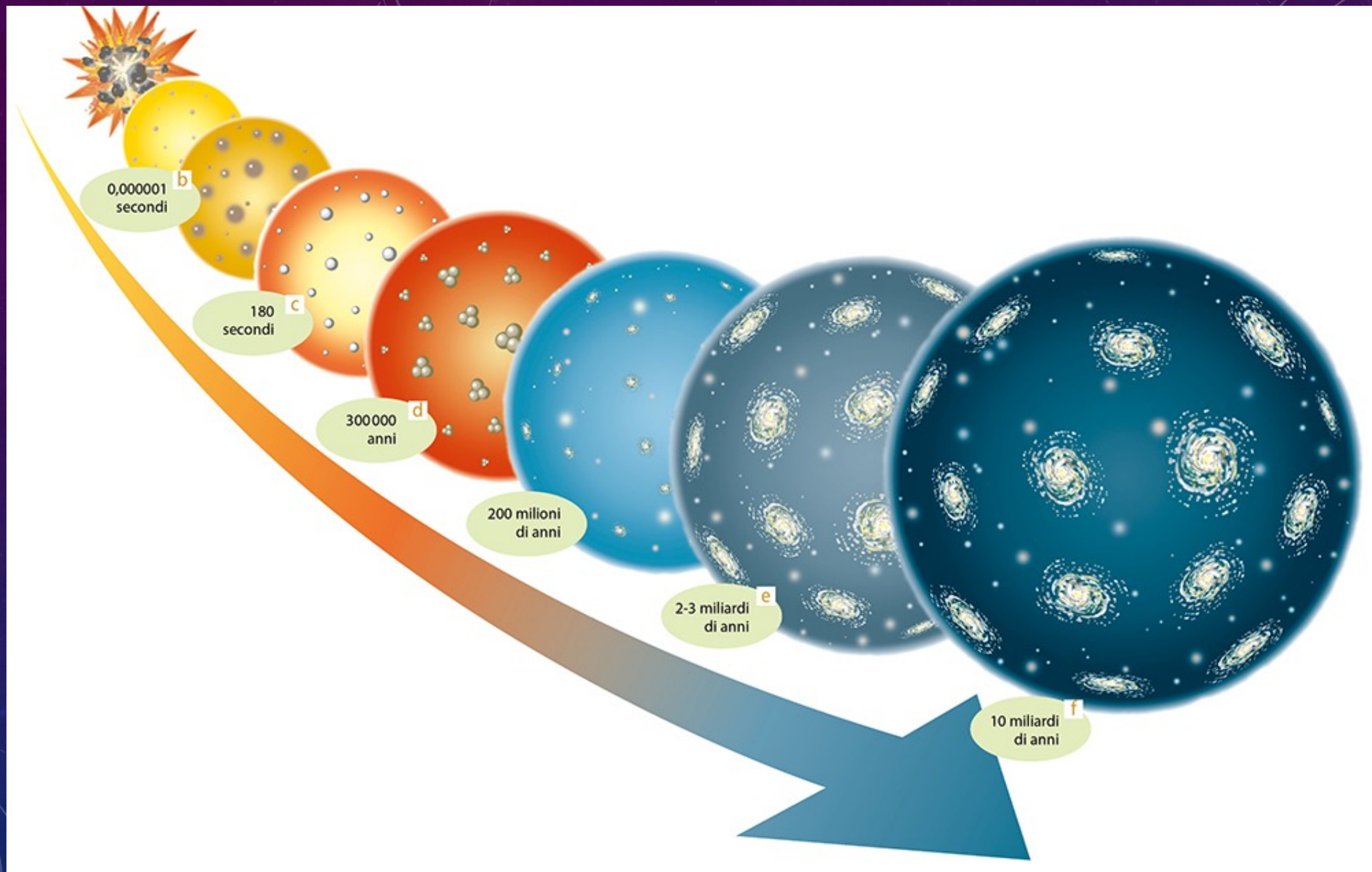
EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

Immaginiamo di gonfiare un palloncino sul quale abbiamo disegnato dei punti (le galassie). Una volta gonfiato (spaziotempo che si espande), qualunque punto scegliamo sul palloncino, tutti gli altri punti si sono allontanati da esso.



The background is a dark blue gradient with faint, light blue geometric patterns. On the right side, there is a large, semi-circular scale with numerical markings from 0 to 210 in increments of 10. Several concentric circles and arcs are scattered across the image, some with arrows indicating a clockwise direction. The text is centered and written in a clean, white, sans-serif font.

Il limite dell'analogia è che il pallone ha un dentro e un fuori, mentre per l'universo non esistono dentro e fuori, lo spaziotempo, cioè la superficie del pallone, è tutto ciò che esiste.



Quale forma potrebbe avere lo spaziotempo (la superficie del pallone)? Le equazioni di campo di Einstein ci forniscono le modalità dell'espansione dello spaziotempo, specificando in dettaglio in che modo sia controllata dalla materia e dall'energia esistenti nello spaziotempo stesso.

EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

La materia (5%), la materia oscura (25%) e l'energia oscura (70%), hanno un impatto differente sulla storia dell'espansione dell'universo.

EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

Il parametro fondamentale che determina la geometria e il destino dell'universo, che contiene solo materia, è il rapporto tra la sua densità media e quella critica:

$$\Omega_0 = \frac{\rho_{univ}}{\rho_{crit}}$$

$$\rho_{crit} = 0,085 \times 10^{-25} \text{ kg/m}^3$$

EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

Sono possibili tre geometrie, e quindi tre scenari per l'universo.

$$\rho_{univ} < \rho_{crit} \rightarrow \Omega_0 < 1$$

Spazio tridimensionale con *geometria iperbolica*:
espansione dell'universo continuerà per sempre,
rallentando all'infinito, a causa dell'effetto gravitazionale
della materia.

EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

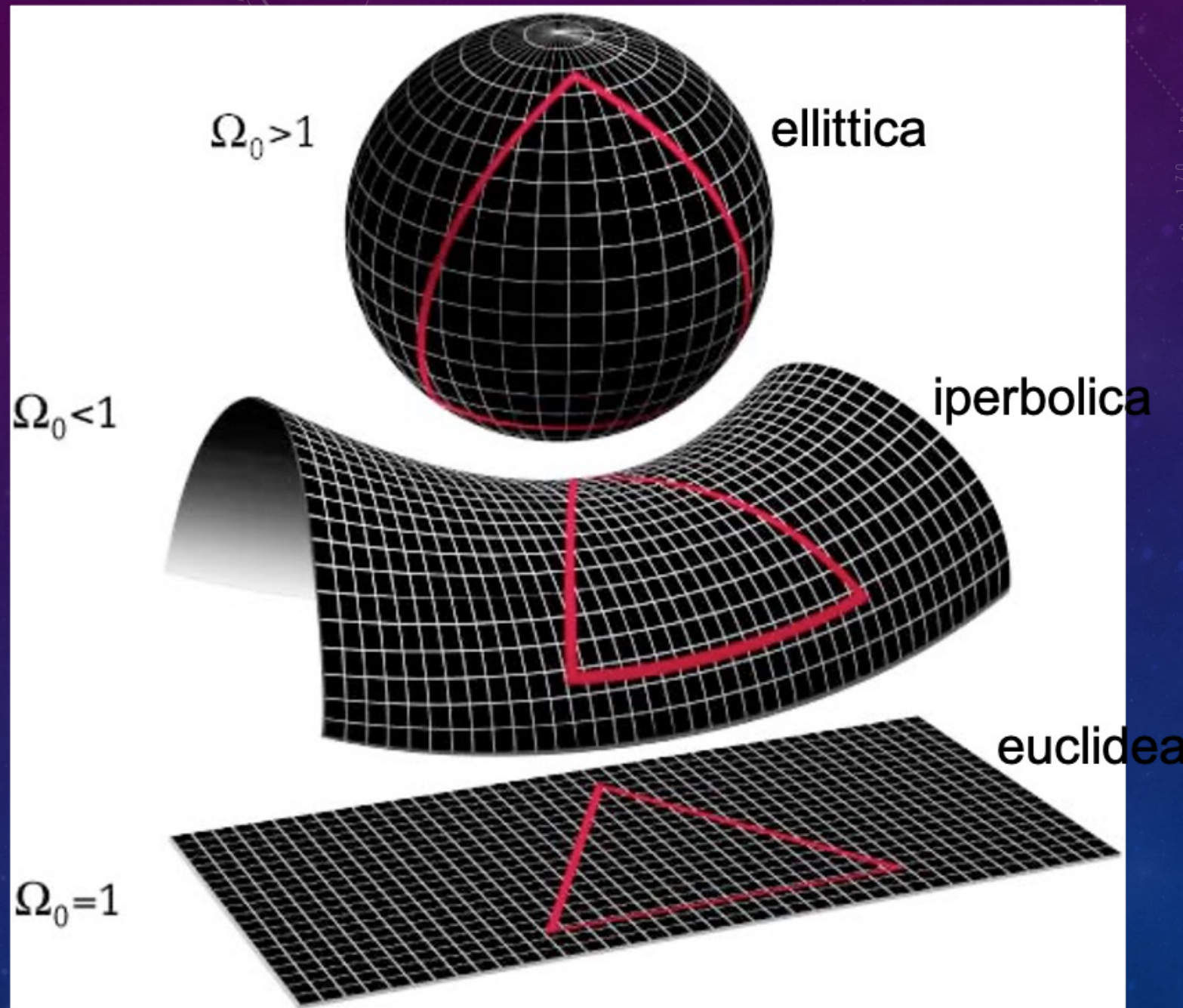
$$\rho_{univ} > \rho_{crit} \rightarrow \Omega_0 > 1$$

Spazio tridimensionale con **geometria ellittica**:
l'attrazione gravitazionale della materia comporterà una decelerazione dell'espansione fino a fermarla. L'universo imploderà (***big crunch***).

EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

$$\rho_{univ} = \rho_{crit} \rightarrow \Omega_0 = 1$$

Spazio tridimensionale con **geometria euclidea**:
l'espansione continua all'infinito.



EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

La presenza dell'energia oscura, cambia lo scenario per il futuro dell'universo: se rappresenta la densità d'energia del vuoto il cui valore rimane costante nel tempo,

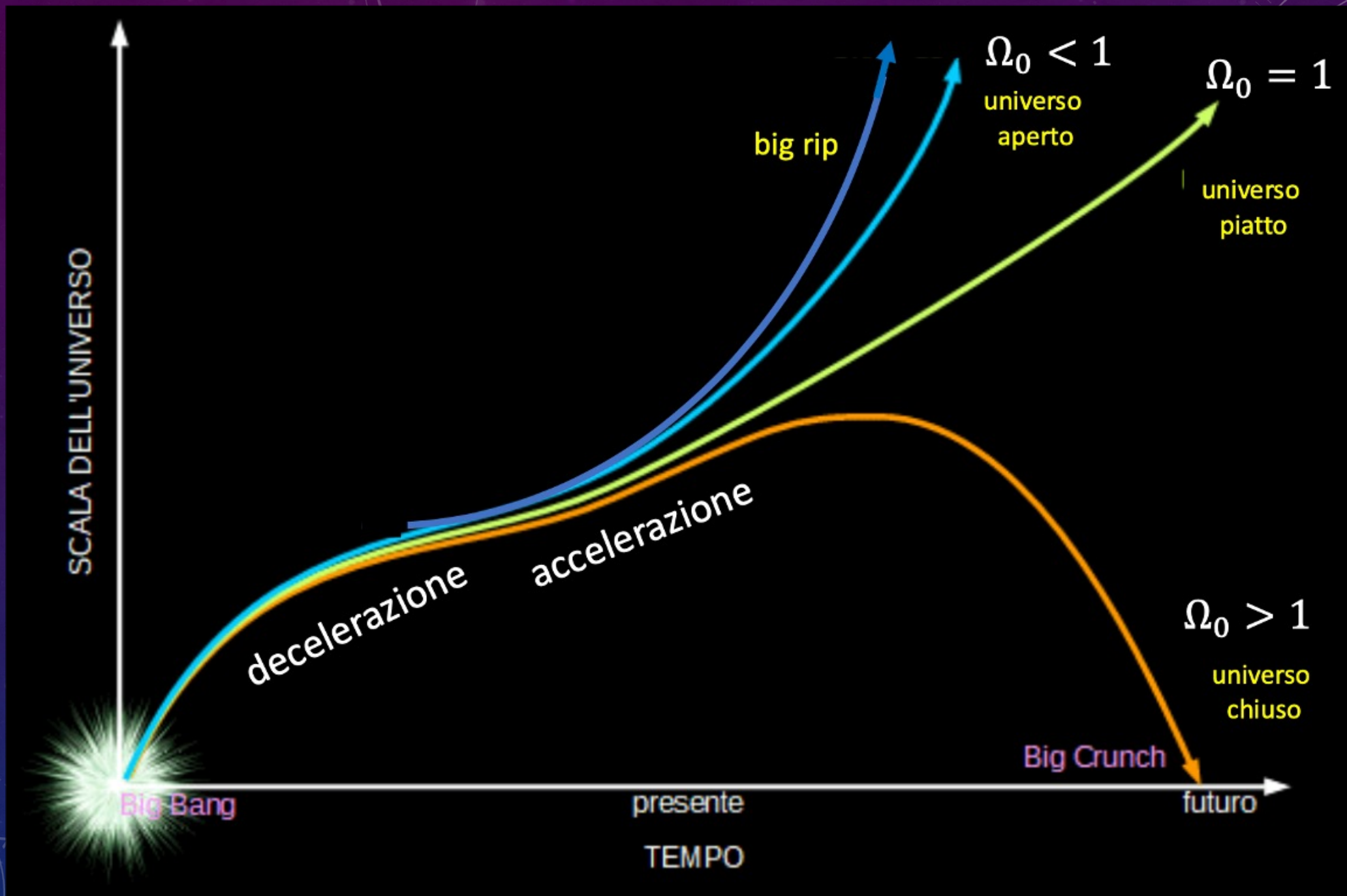
l'universo *continuerà ad accelerare la propria espansione*, fino a diventare un vuoto freddo e immobile, privo anche delle strutture più semplici.

EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

Oppure, l'energia oscura potrebbe subire un decadimento, riducendo la propria influenza fino a lasciare il sopravvento alla materia, oppure potrebbe rafforzarsi e infine distruggere violentemente ogni oggetto nell'universo (*big rip*: grande strappo).

EVOLUZIONE E DESTINO DELL'UNIVERSO

Le più recenti misure sembrano indicare che la curvatura spaziale è pressoché nulla (geometria piana euclidea), ma, l'universo attuale sta accelerando la sua fase di espansione, a testimoniare il fatto che l'universo non è dominato dalla materia, bensì dall'energia oscura.



Vincenzo Pappalardo

*Corso di astrofisica e
cosmologia per il liceo*



Grazie per l'attenzione