

In quale Universo ci troviamo ?

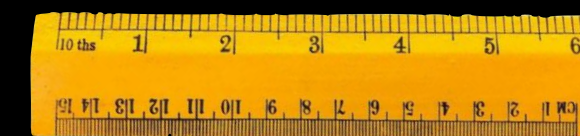
Misurare le distanze permette di vincolare le proprietà dell'Universo

1) la distanza dei diametri angolari: **DATA** una dimensione fisica D 'angolo sotteso da essa dipende dalle proprietà (geometria) dell'Universo

$$d_a = \frac{D}{\theta} = \begin{cases} a \cdot \sin(r) & \text{Curvatura } k=1 \\ a \cdot r & \text{Curvatura } k=0 \\ a \cdot \sinh(r) & \text{Curvatura } k=-1 \end{cases}$$

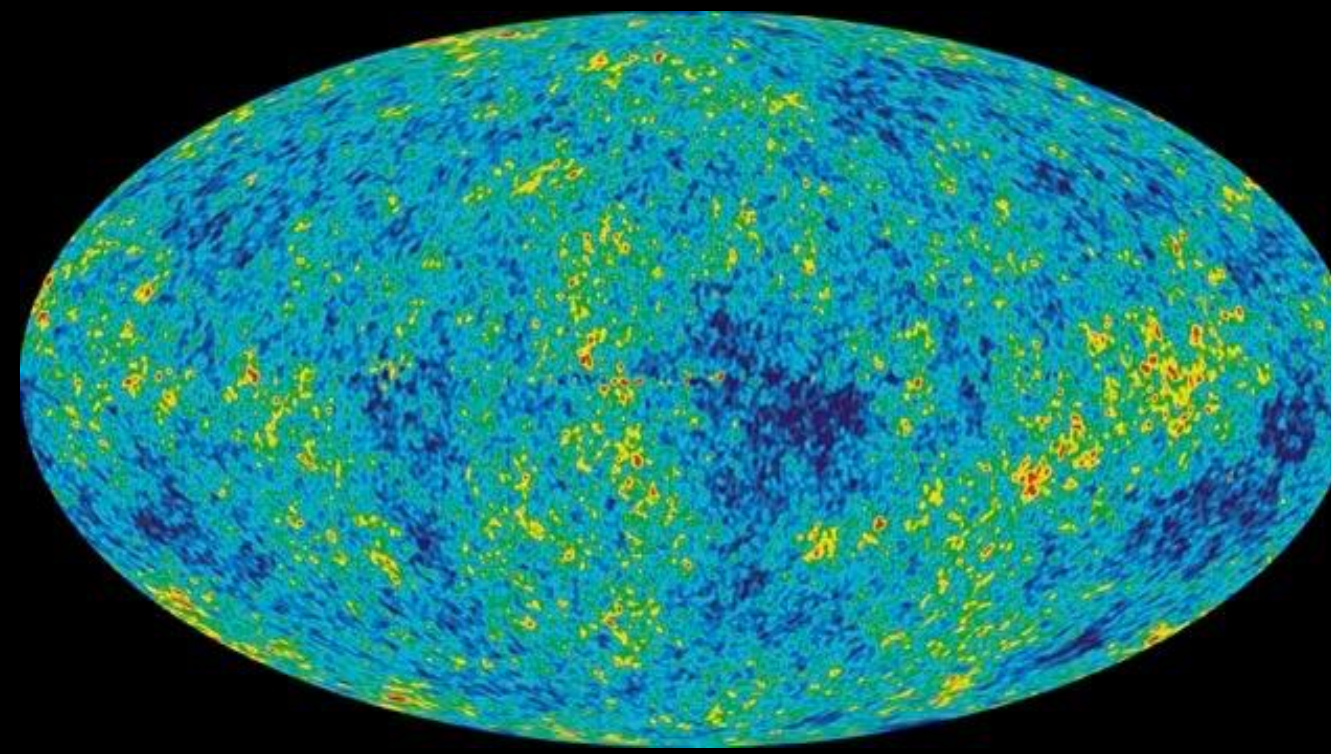
Una misura di θ si traduce quindi in una misura della distanza d_a e quindi delle proprietà dell'Universo

Ho bisogno di un "REGOLO" per il quale sia **nota** una dimensione fisica D



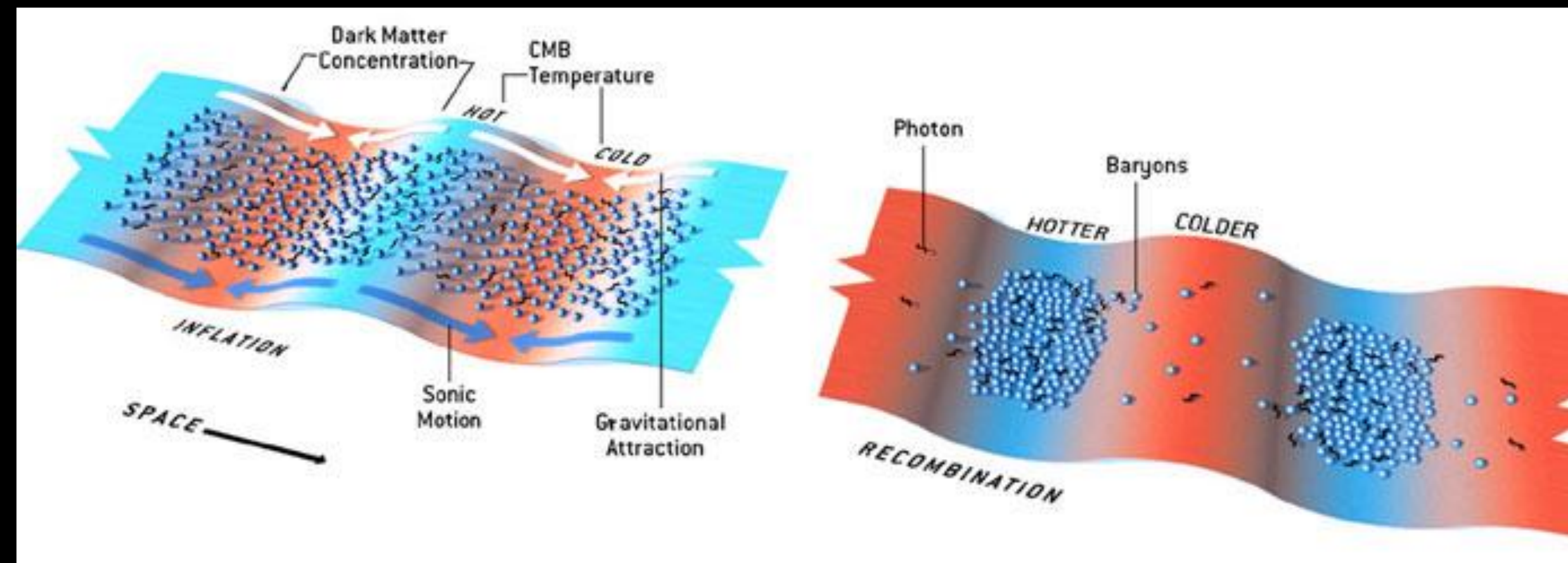
La relazione tra le due quantità D (nota) e θ (osservata) permette di ottenere d_a e quindi geometria dell'Universo

History of the Universe

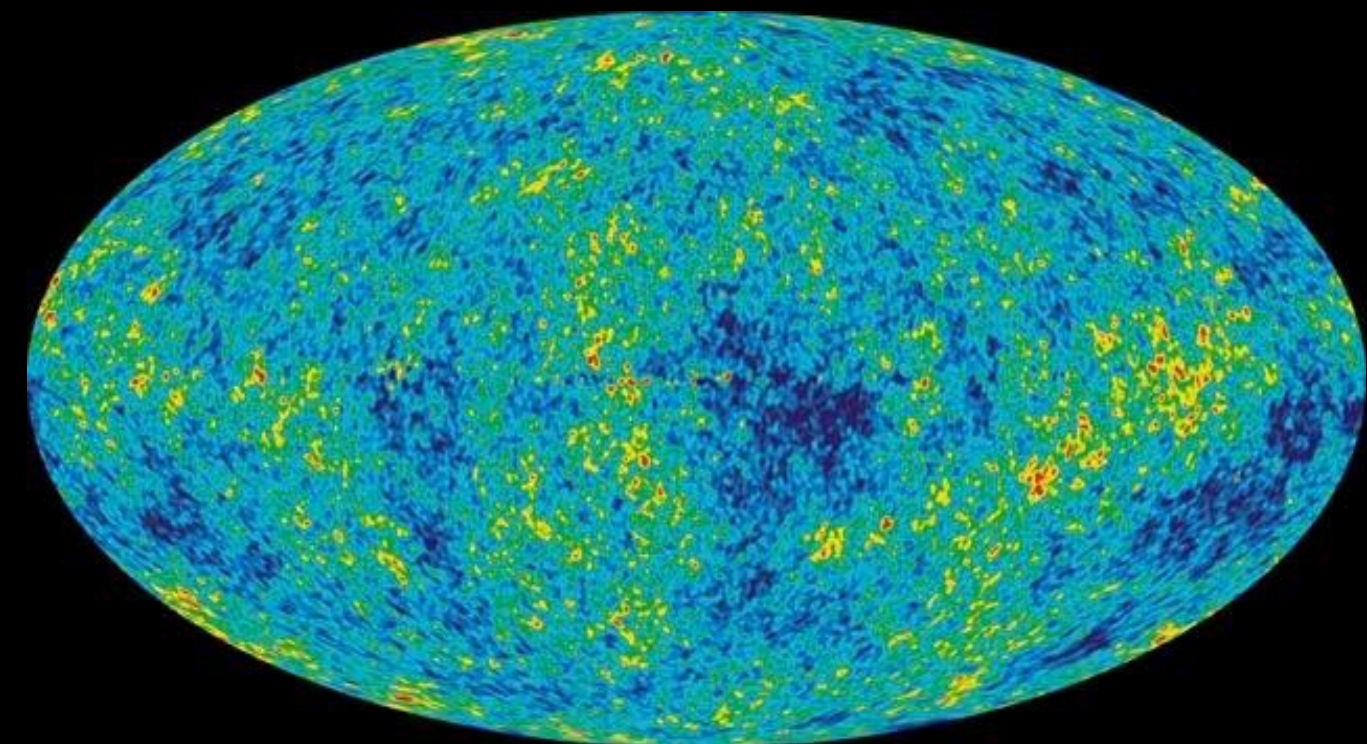
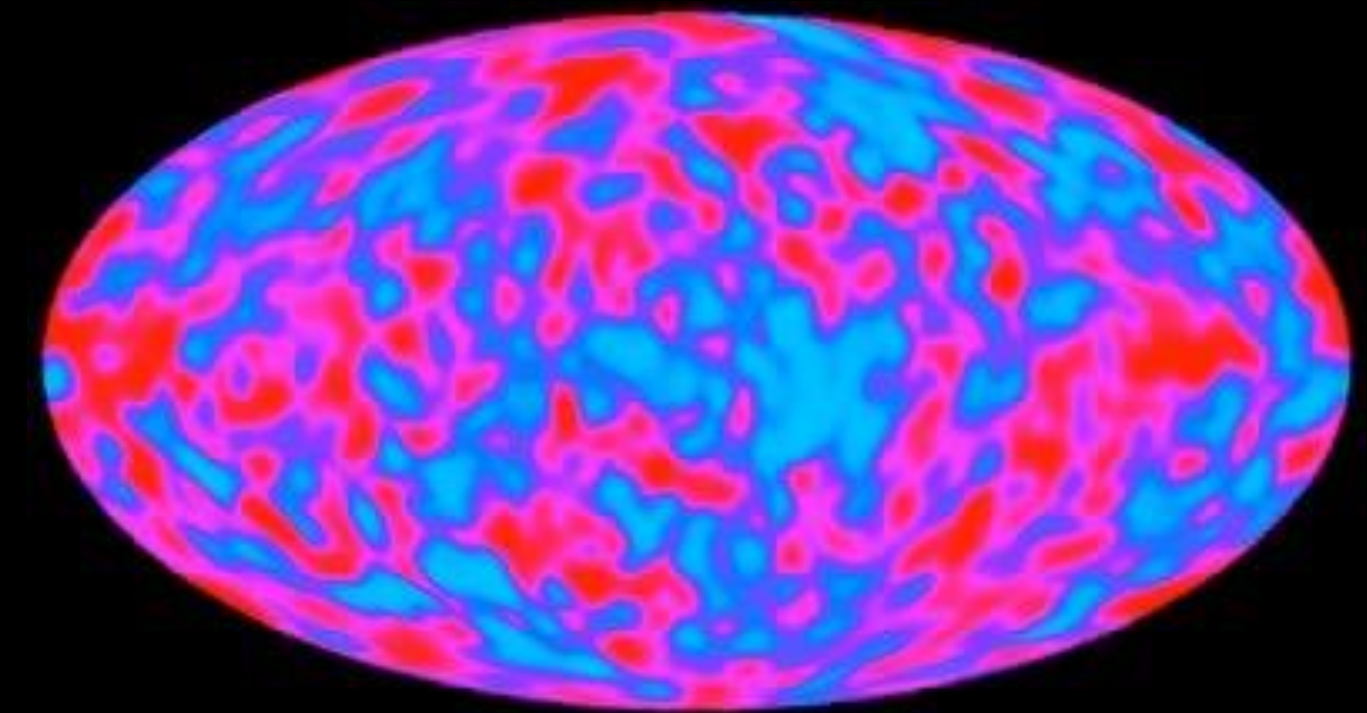
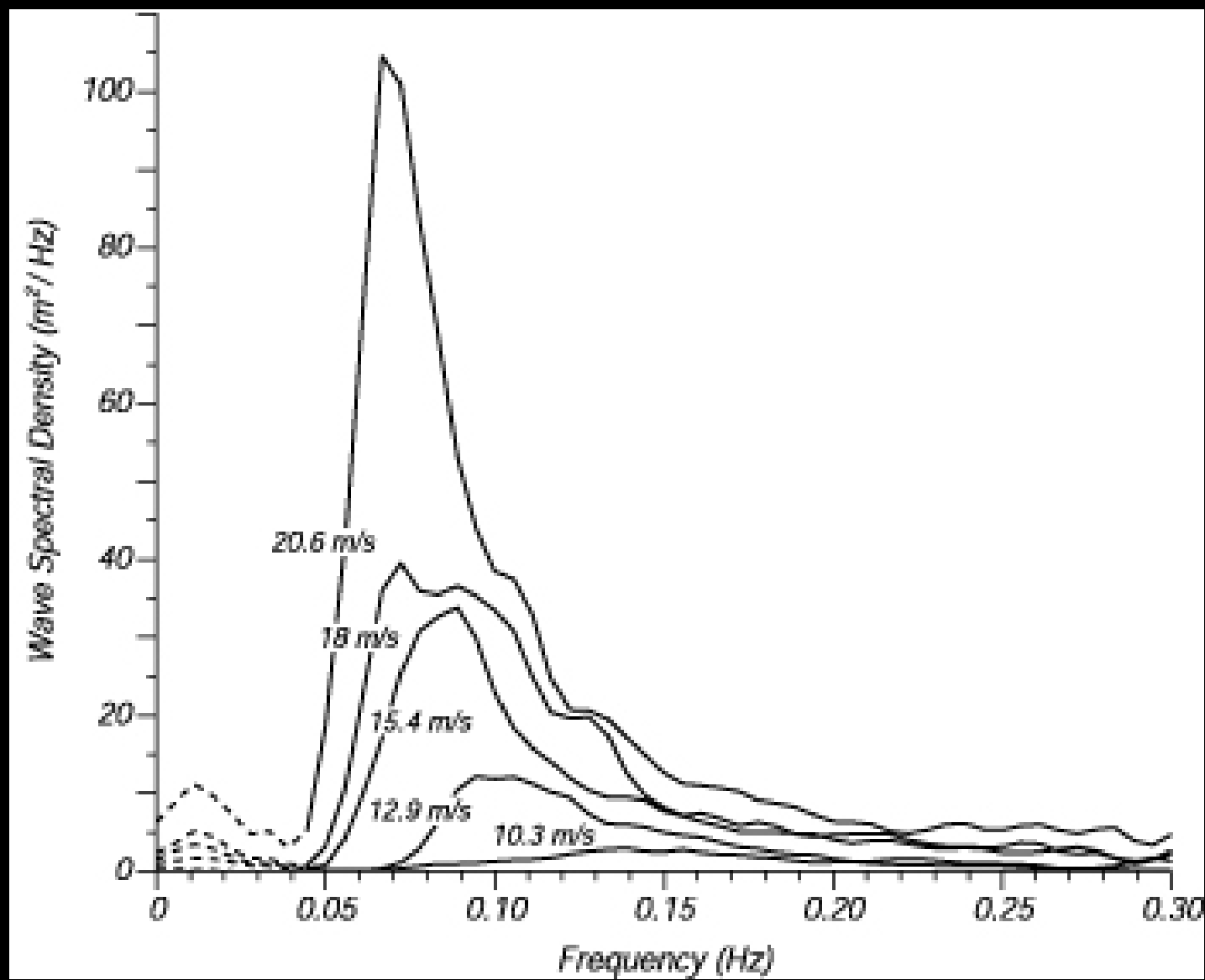
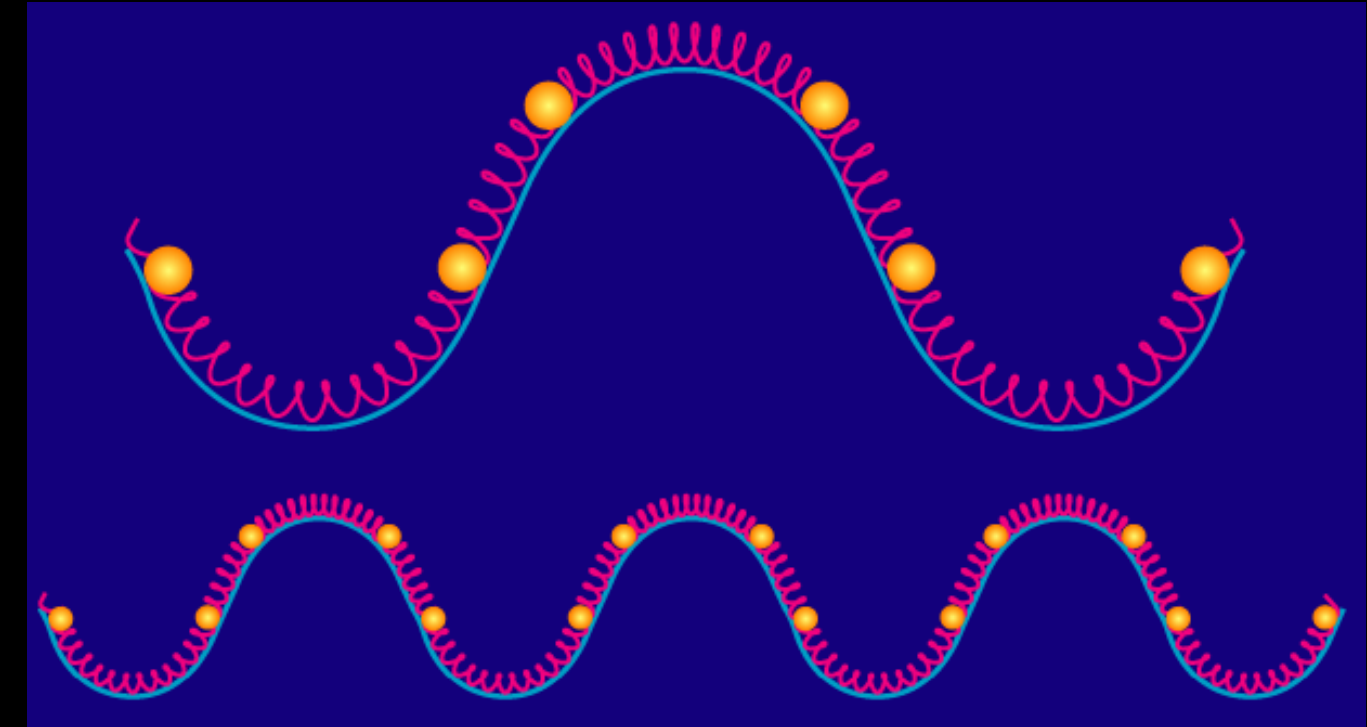


Nel 1992 vengono scoperte dal satellite COBE fluttuazioni del fondo cosmico (Nobel 2006 a Smoot e Mather).

Corrispondono a piccolissime disomogeneità (1/100000) della materia da cui hanno avuto origine le galassie e le strutture cosmiche.

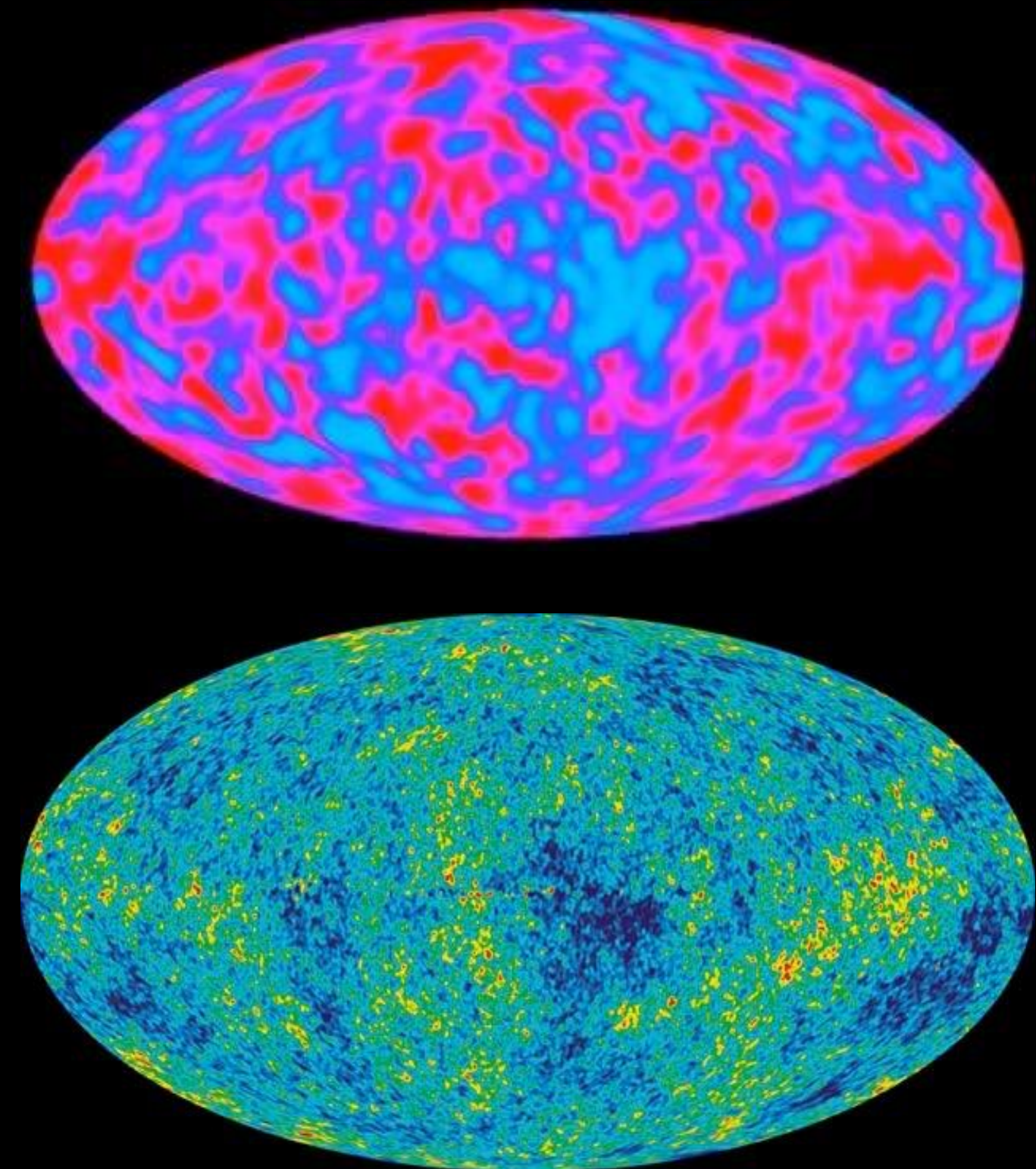
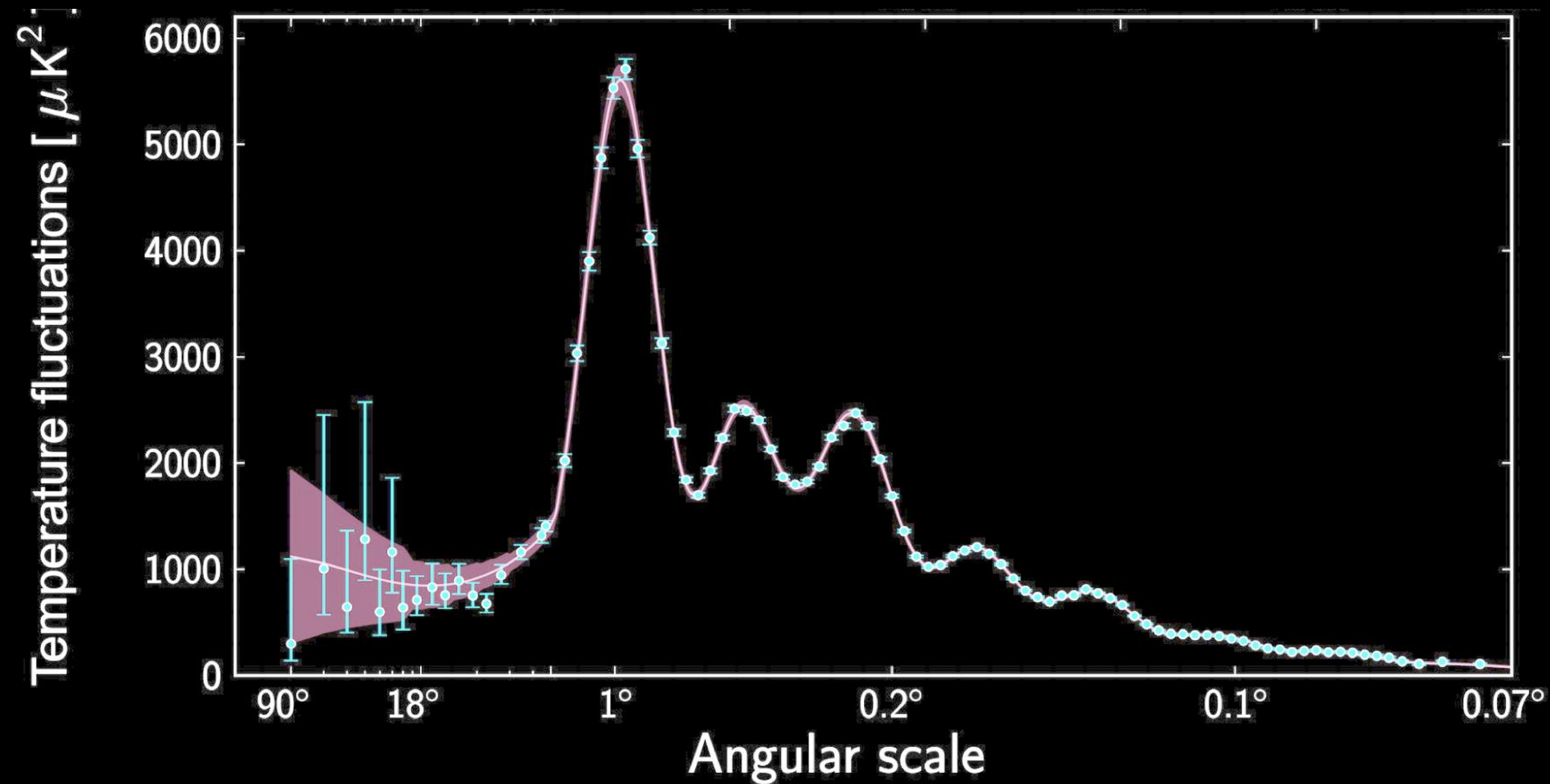
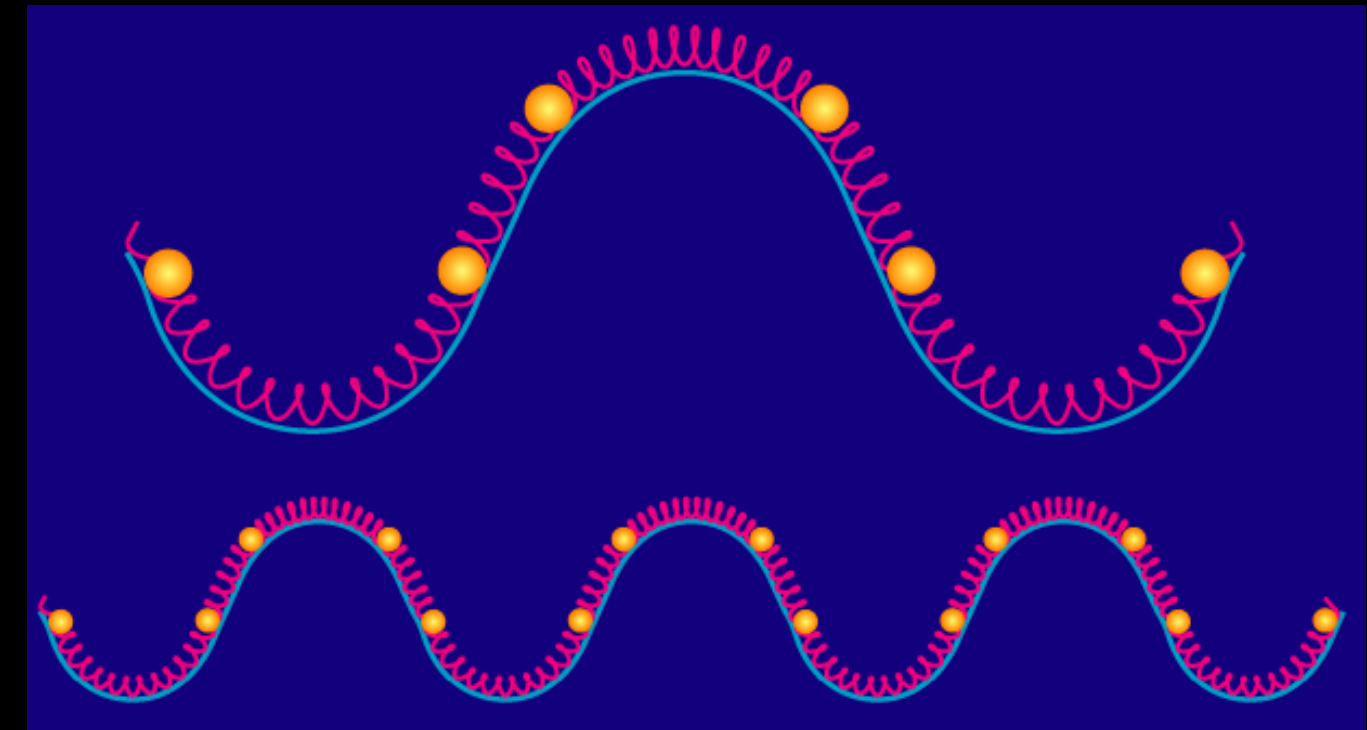
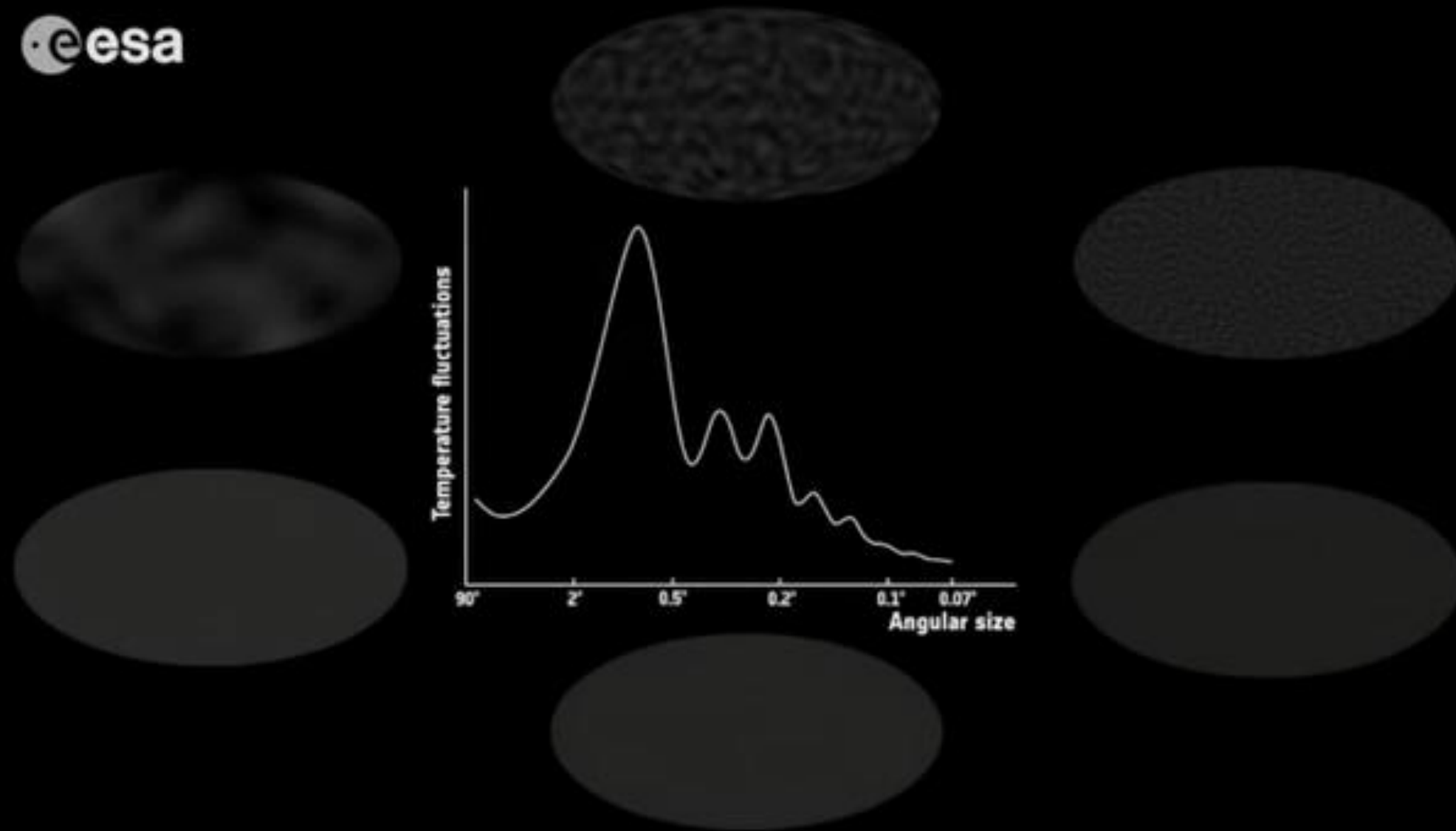


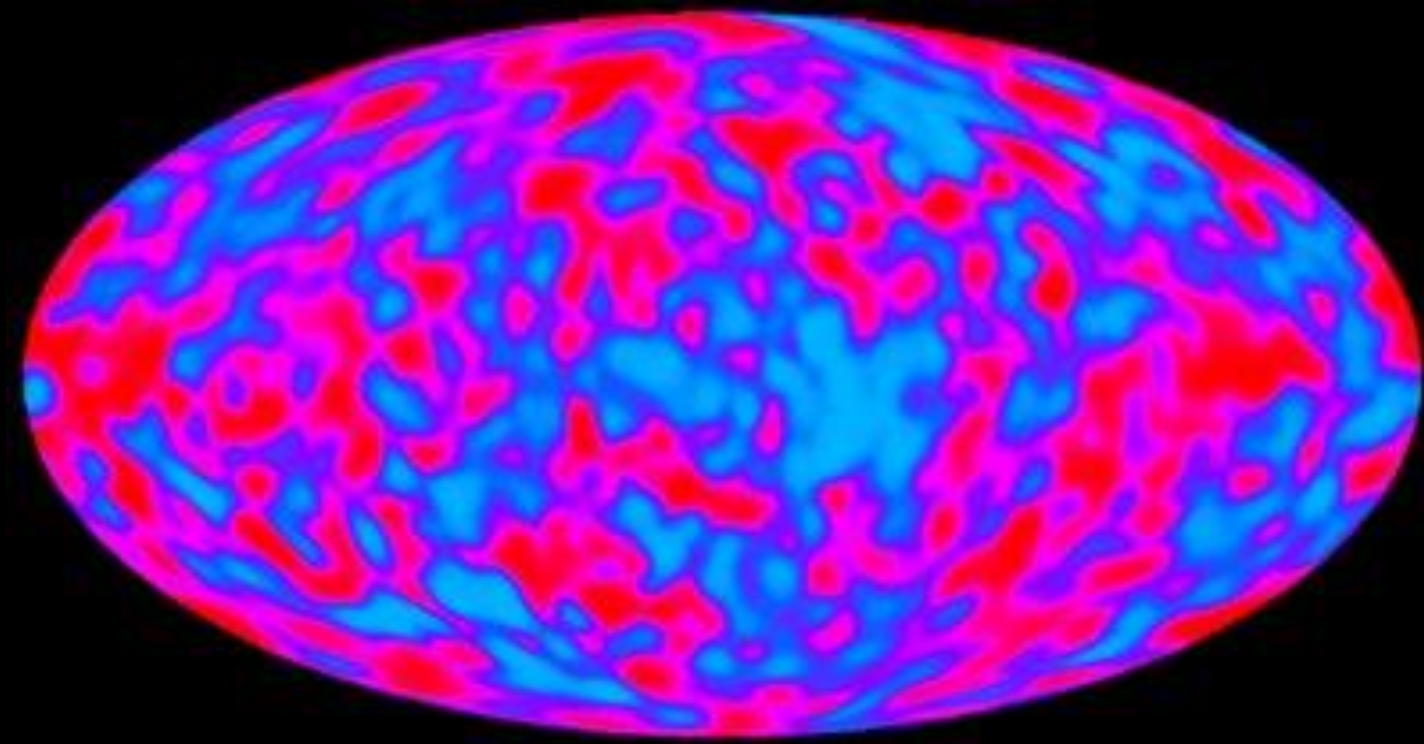
Fluttuazioni su scala differenti: lo spettro di potenza



Fluttuazioni su scala differenti: lo spettro di potenza

esa





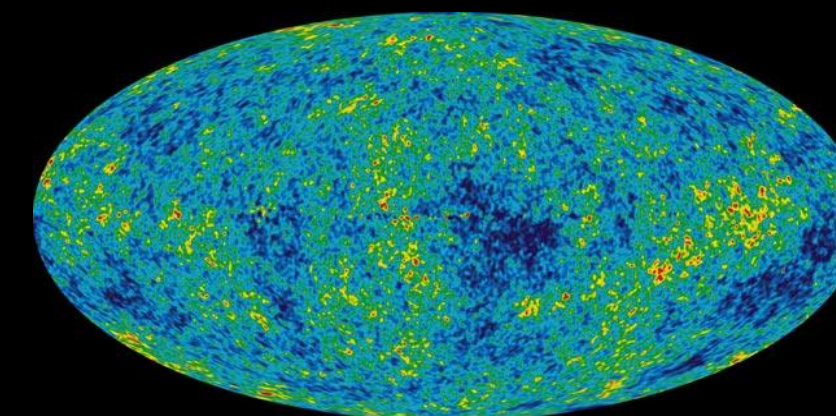
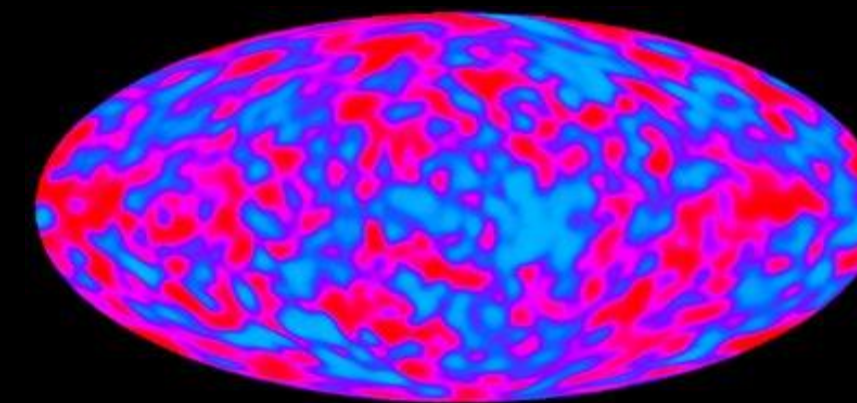
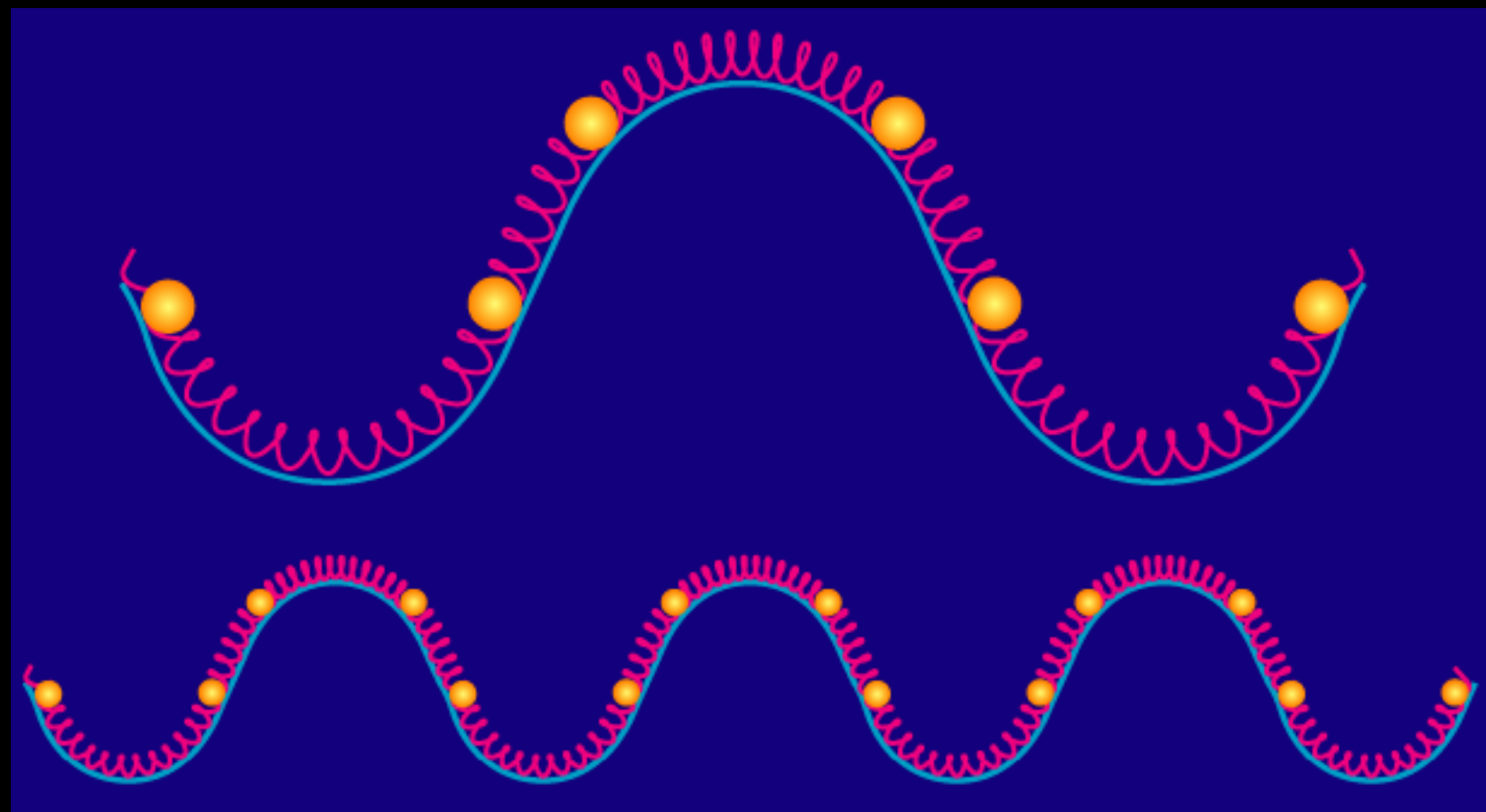
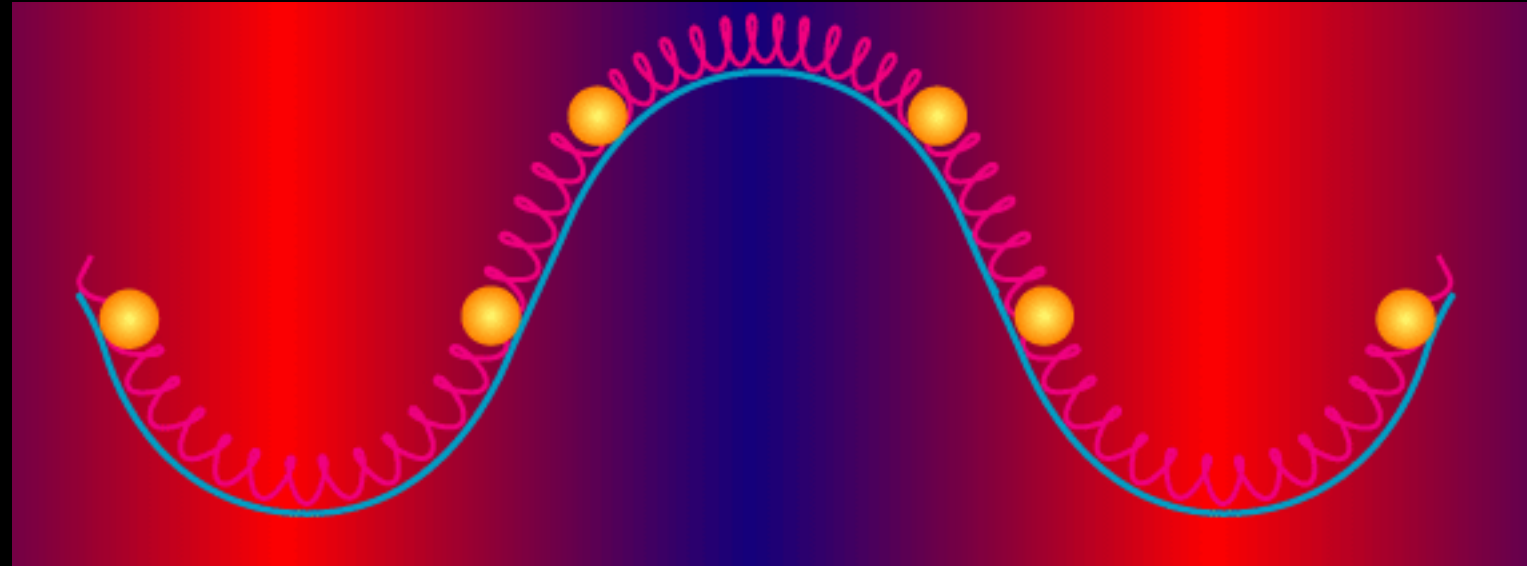
Zone sovradense (rosse) e sottodense (blu) di varia grandezza danno fluttuazioni su diversa scala angolare

la scala corrispondente a

$$r_s = c_s \cdot t$$

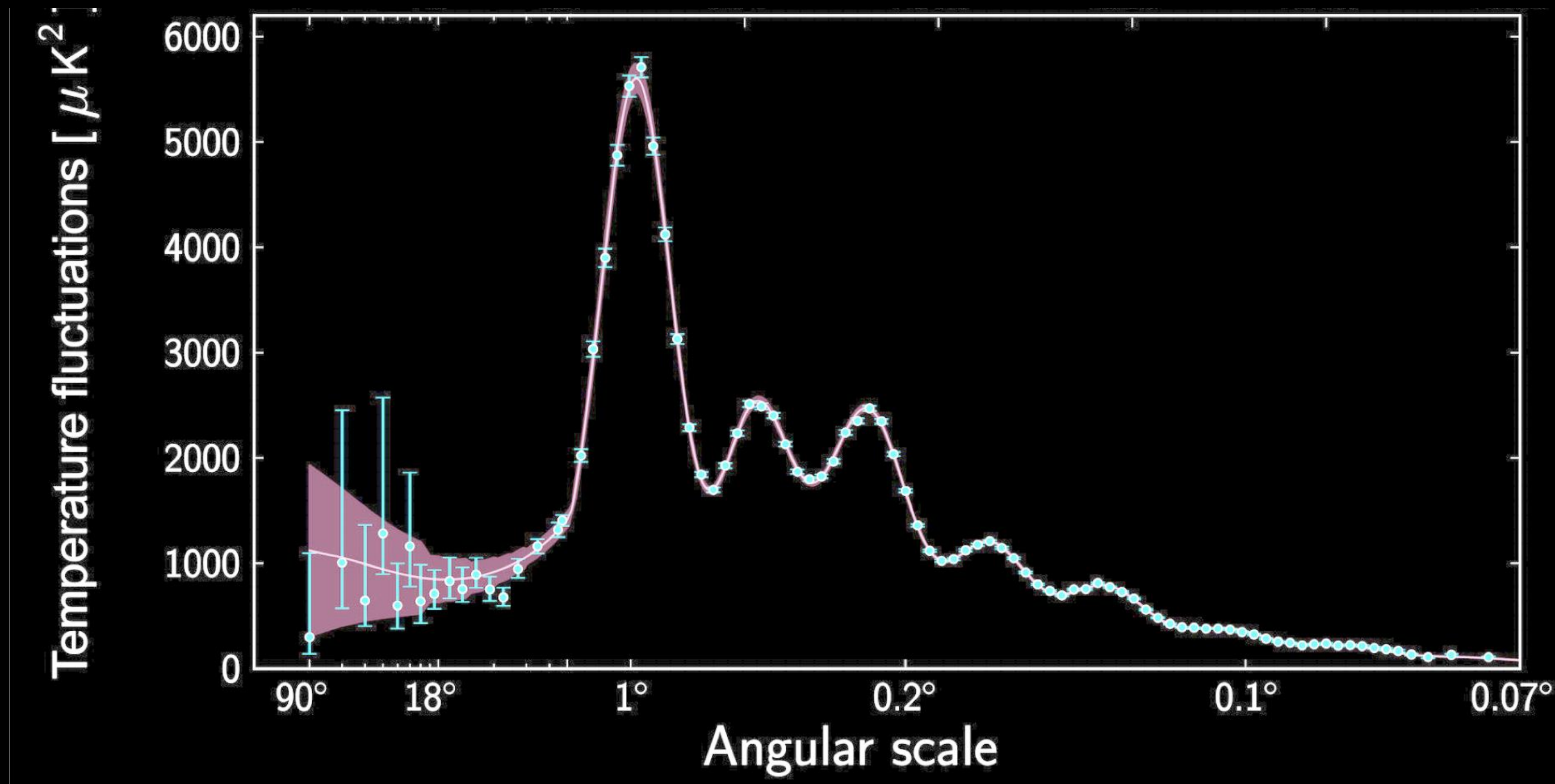
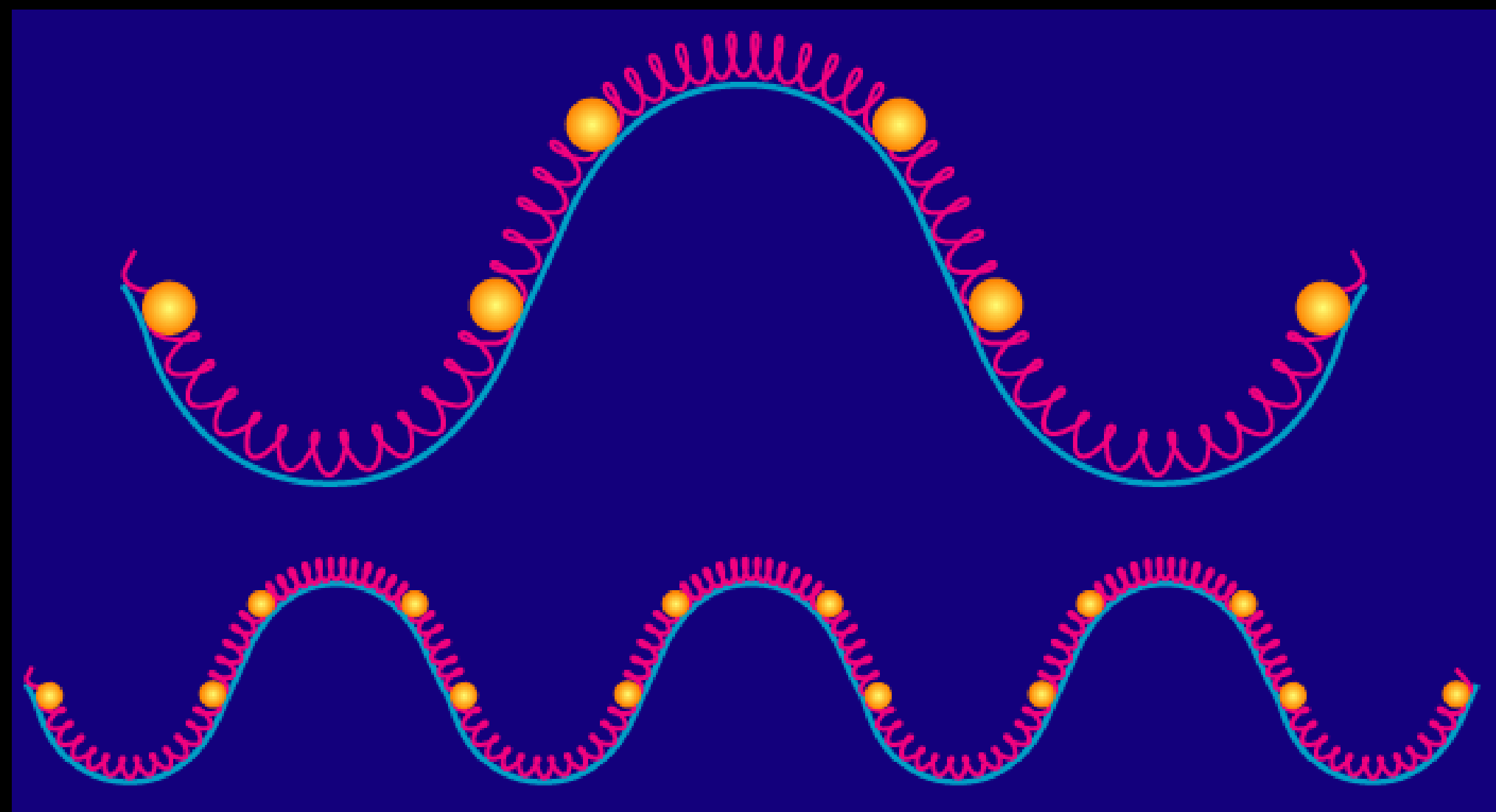
(velocità del suono · età dell'Universo) corrisponde alla massima compressione del plasma.

R_s può essere calcolata e rappresenta un regolo standard $D = r_s$



I picchi acustici sono dovuti alla compressione/rarefazione del plasma che cade nelle buche di potenziale dovute all'effetto della pressione

Il primo picco è legato alla massima compressione: scala corrispondente alla distanza percorsa tra $t = 0$ e la ricombinazione:
 Il fluido barioni/fotoni ha avuto il tempo di comprimersi 1 sola volta



Dimensione orizzonte: la posso calcolare. È nota

$$r_s = \frac{1}{(1+z_{rec})} \int_{z_{rec}}^{\infty} \frac{c_s}{H_0} \frac{H(z)^{-1}}{H_0} dz$$

Distanza: dipende dalla geometria dell'Universo

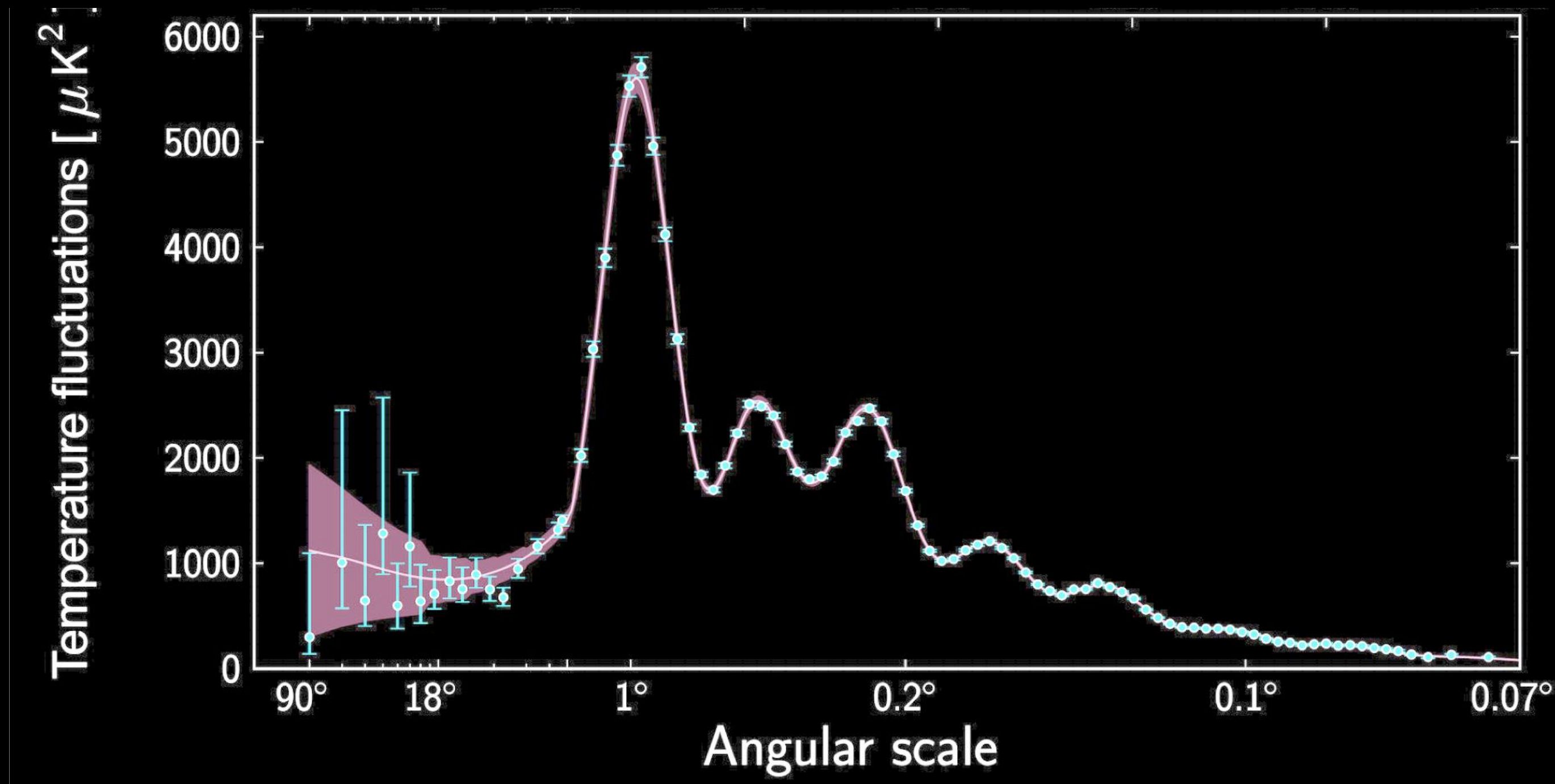
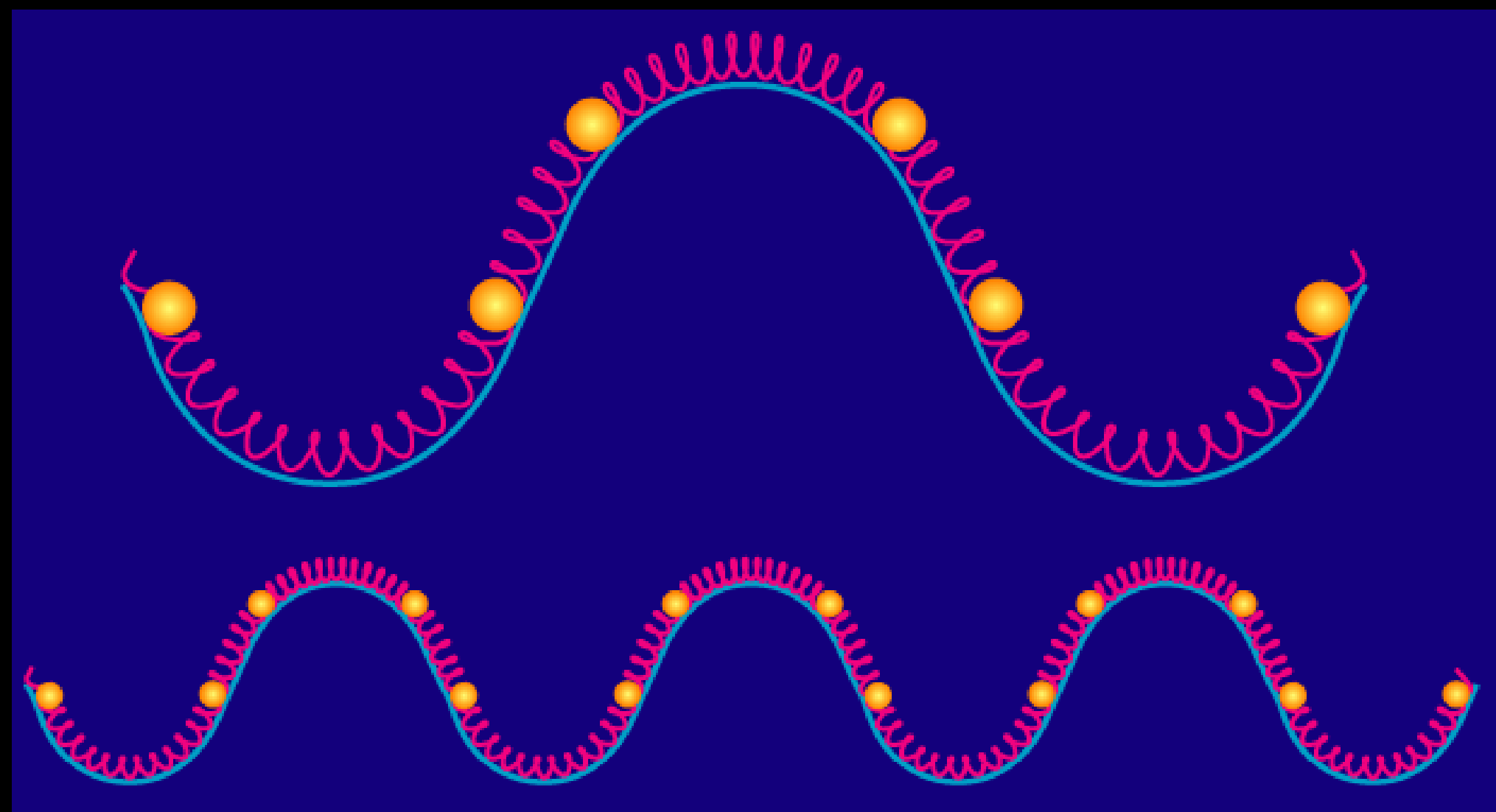
$$d_a = \frac{D}{\theta} = \begin{cases} a \cdot \sin(r) & k=1 \\ a \cdot r & k=0 \\ a \cdot \sinh(r) & k=-1 \end{cases}$$

Angolo a cui vedo sotteso
 Il primo picco: dipende dalla
 geometria dell'Universo

$$\theta_{peak} = \frac{r_s}{d_a}$$

I picchi acustici sono dovuti alla compressione/rarefazione del plasma che cade nelle buche di potenziale dovute all'effetto della pressione

Il primo picco è legato alla massima compressione: scala corrispondente alla distanza percorsa tra $t = 0$ e la ricombinazione: Il fluido barioni/fotoni ha avuto il tempo di comprimersi 1 sola volta



Dimensione orizzonte: la posso calcolare. E' nota

$$r_s = \frac{1}{(1+z_{rec})} \int_{z_{rec}}^{\infty} \frac{c_s}{H_0} \frac{H(z)^{-1}}{H_0} dz$$

Distanza: dipende dalla geometria dell'Universo

$$d_a = \frac{D}{\theta} = \begin{cases} a \cdot \sin(r) & k=1 \\ a \cdot r & k=0 \\ a \cdot \sinh(r) & k=-1 \end{cases}$$

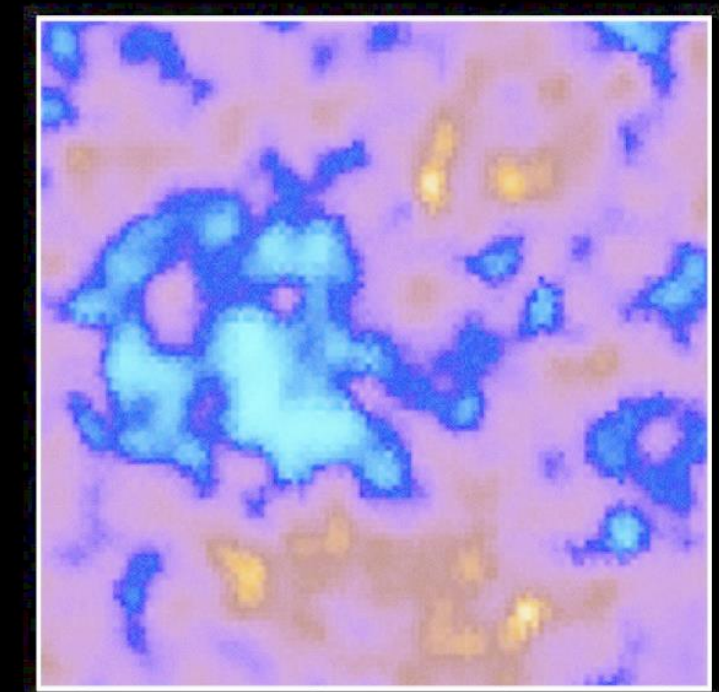
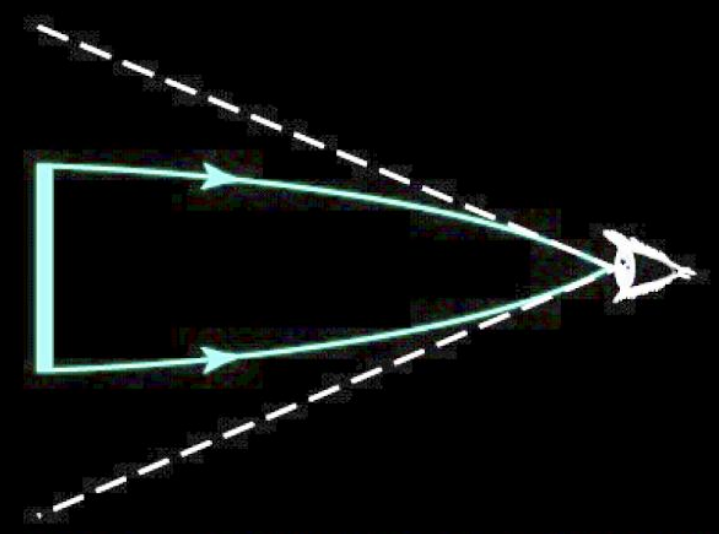
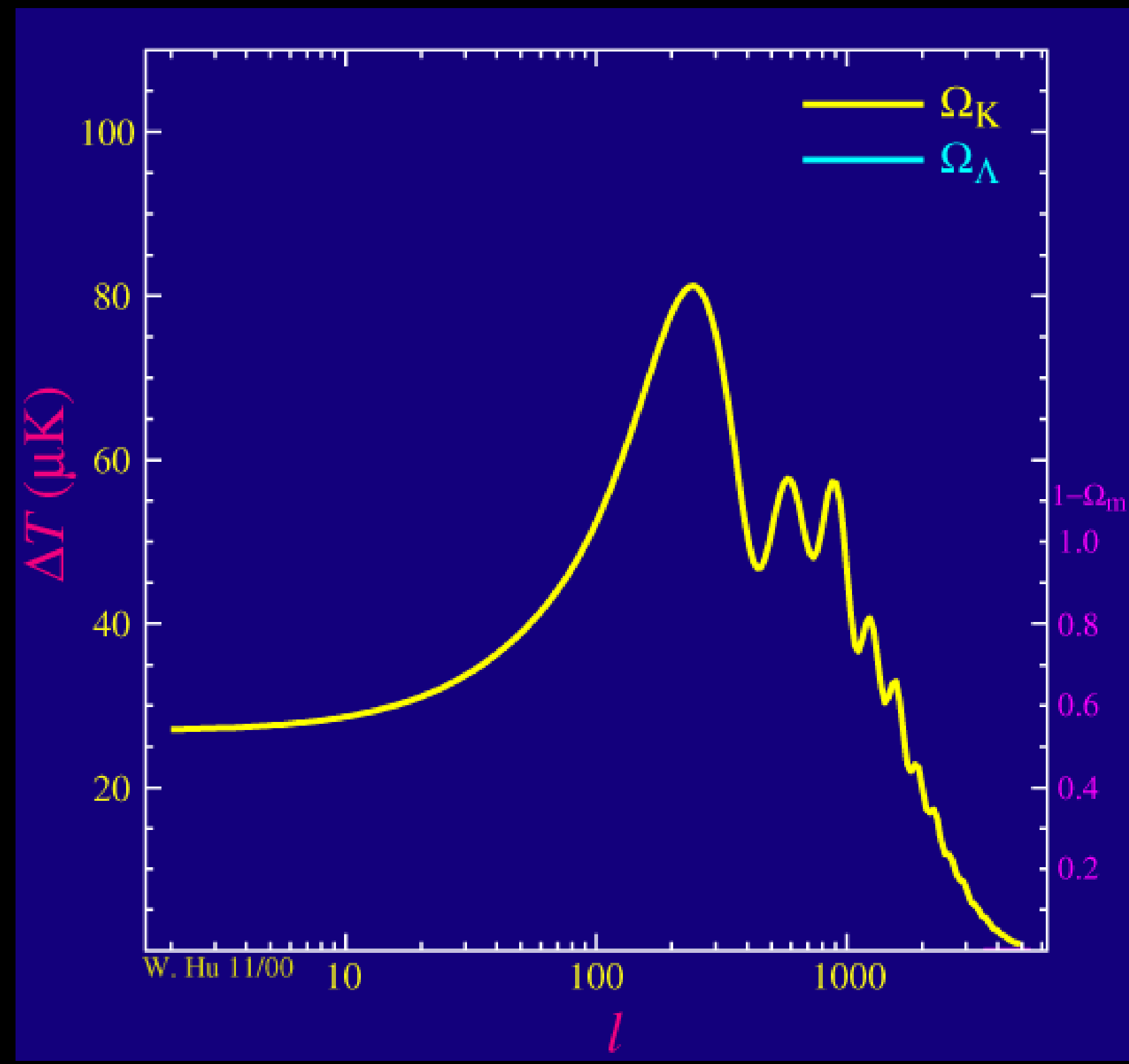
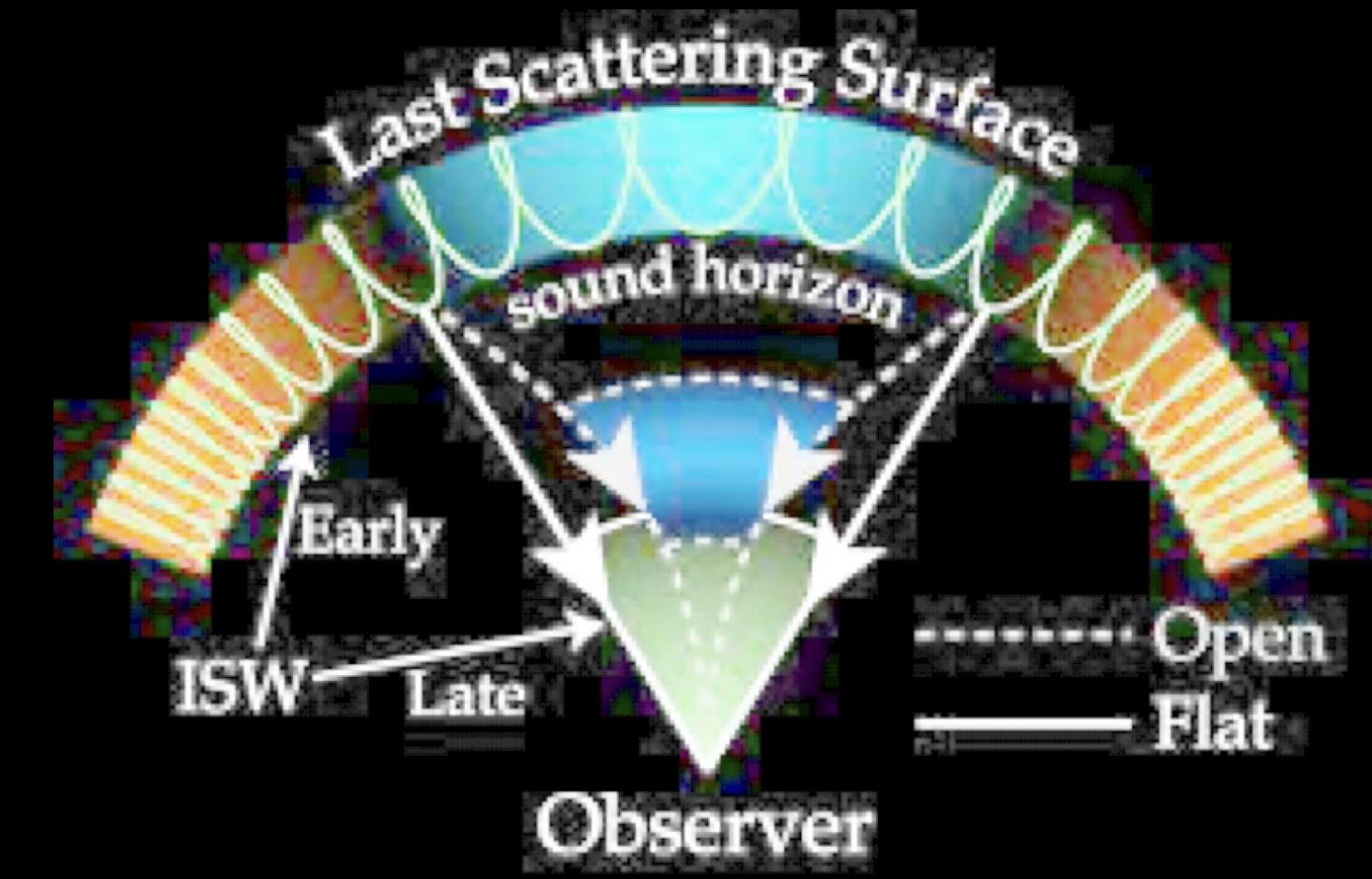
Per $k = 0$ si ottiene

$$\theta_{peak} \approx 1^\circ$$

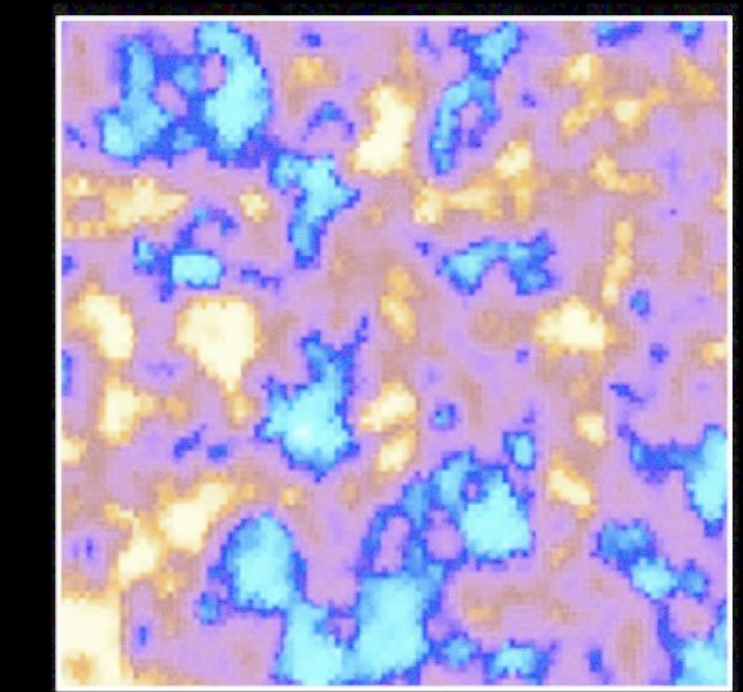
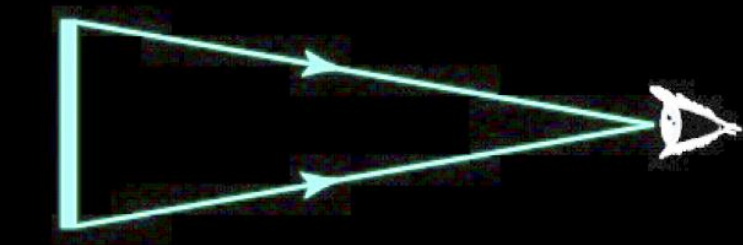
$$\theta_{peak} = \frac{r_s}{d_a}$$

l'orizzonte acustico e' un regolo standard

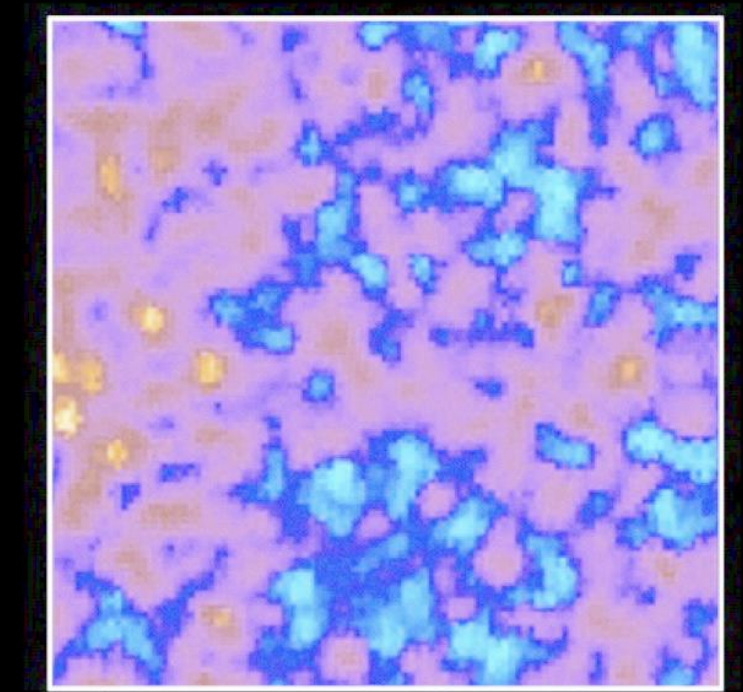
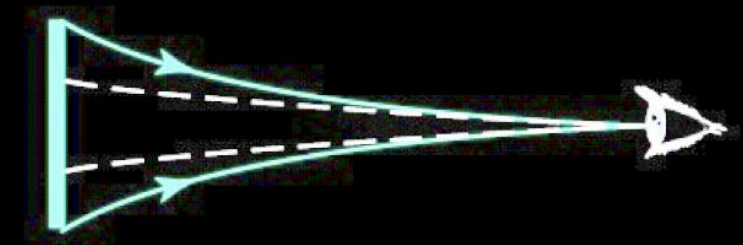
- $\theta_{peak} = 1^\circ$ Universo piatto
- $\theta_{peak} < 1^\circ$ Universo aperto
- $\theta_{peak} > 1^\circ$ Universo Chiuso



a If universe is closed, "hot spots" appear larger than actual size

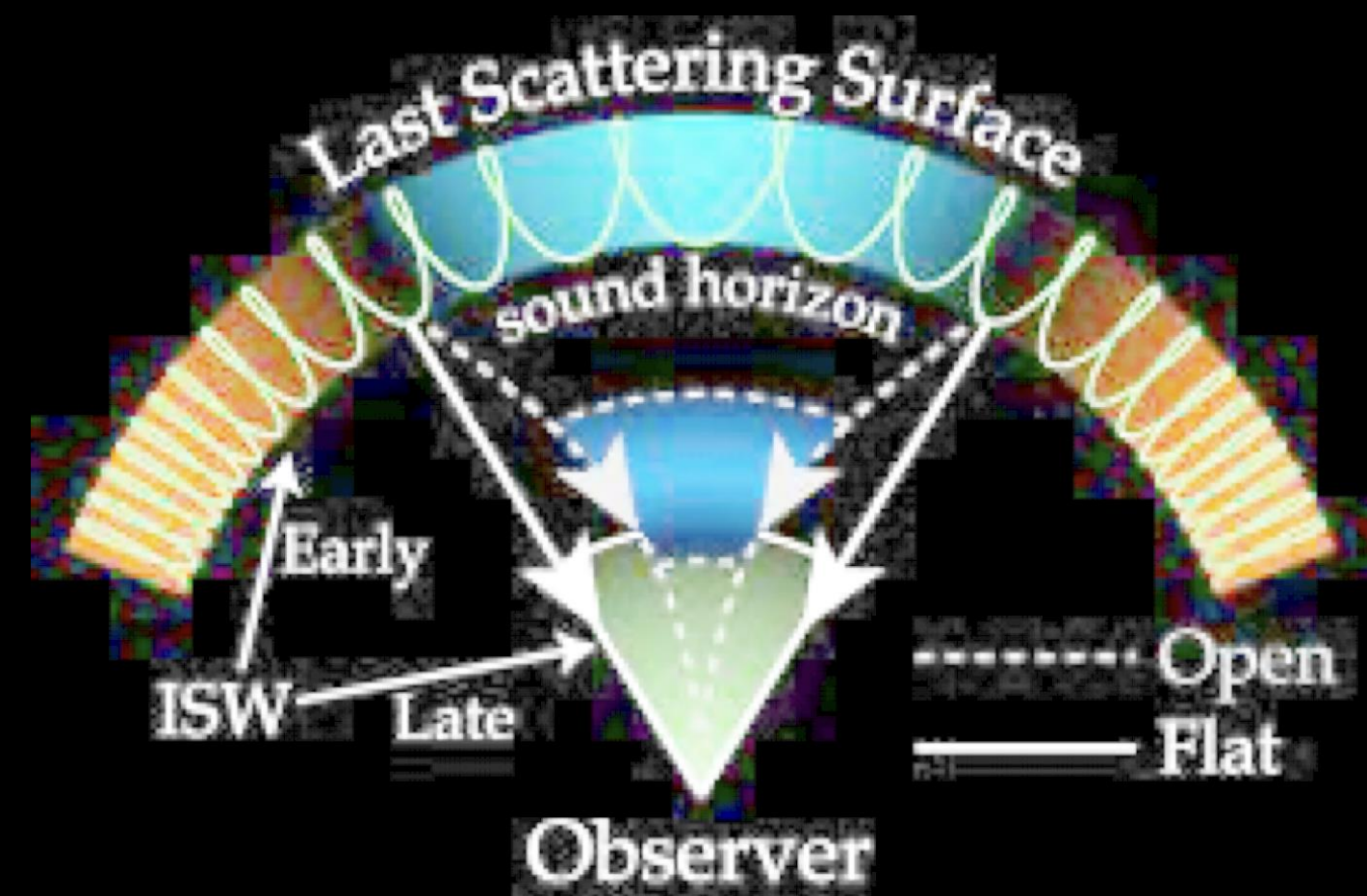
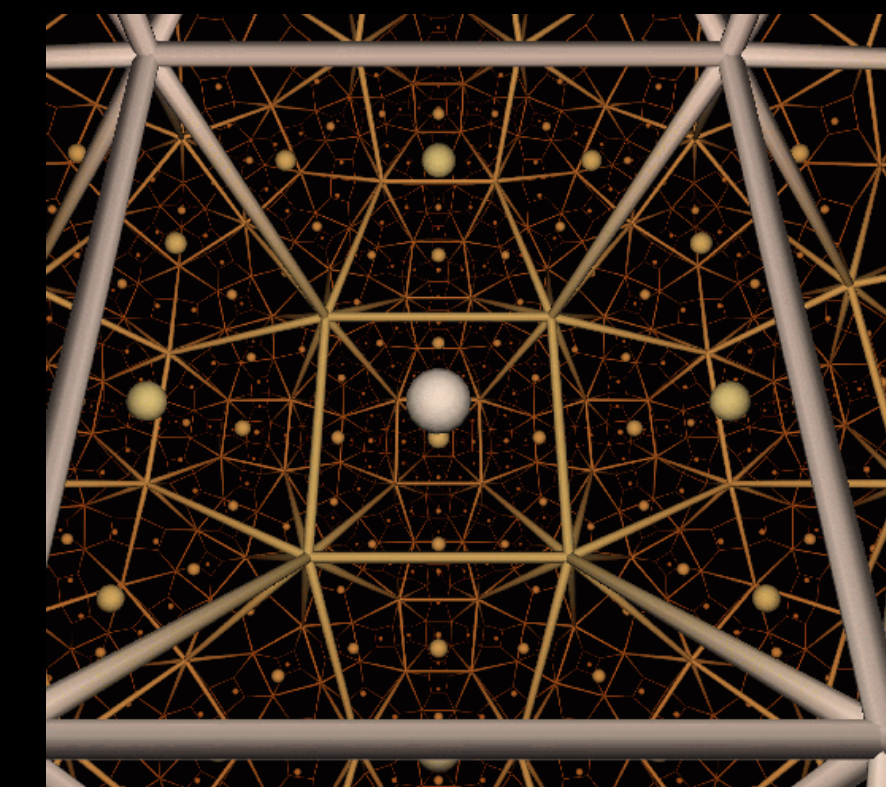
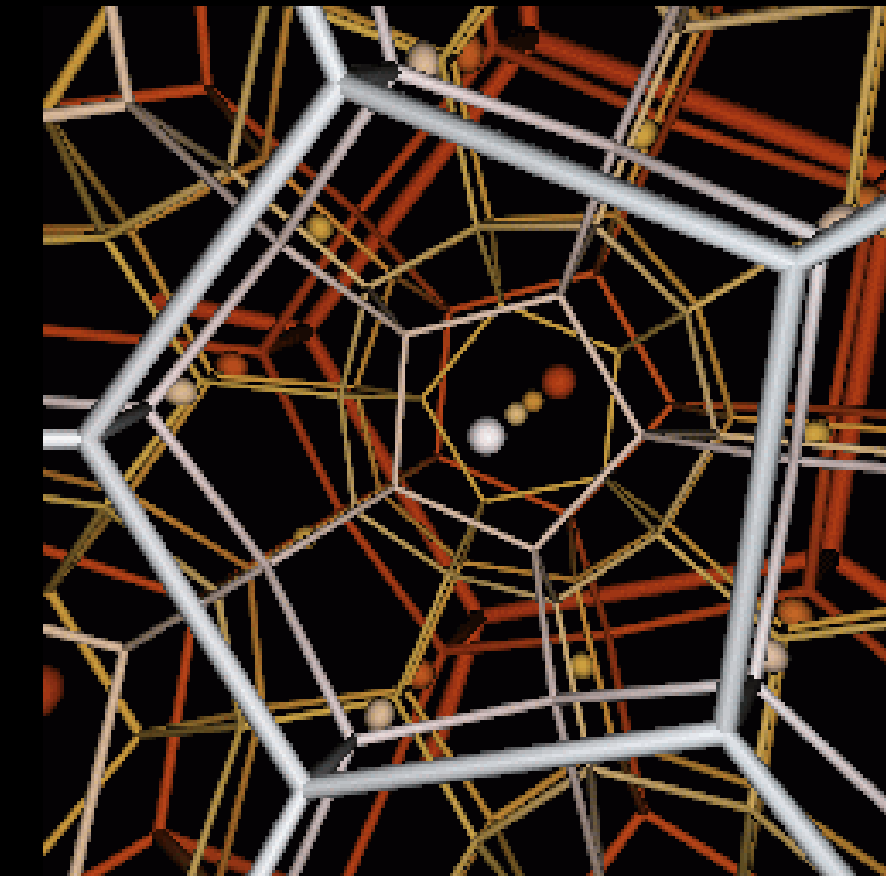
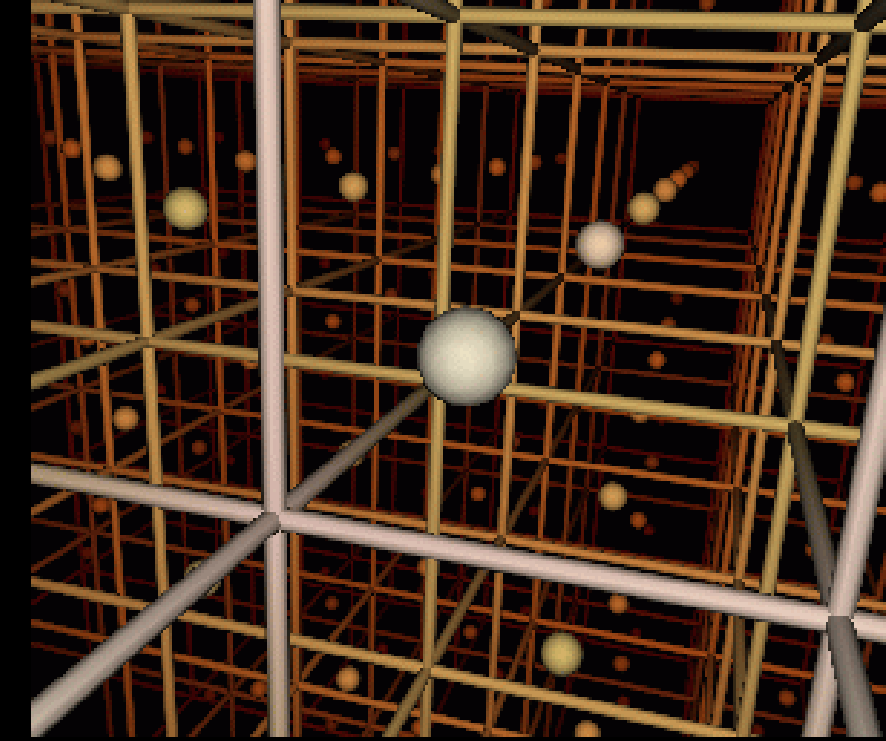


b If universe is flat, "hot spots" appear actual size



c If universe is open, "hot spots" appear smaller than actual size

Attraverso la misura dell'angolo sotteso dalle fluttuazioni del fondo cosmico possiamo misurare la geometria dell'Universo



IL parametro di curvatura e'

$$K \approx 0$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(a) = \frac{8\pi G \rho_0}{3} \frac{1}{a^3} - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$1 - \Omega_K = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

IL parametro di curvatura e'

$$K \approx 0$$

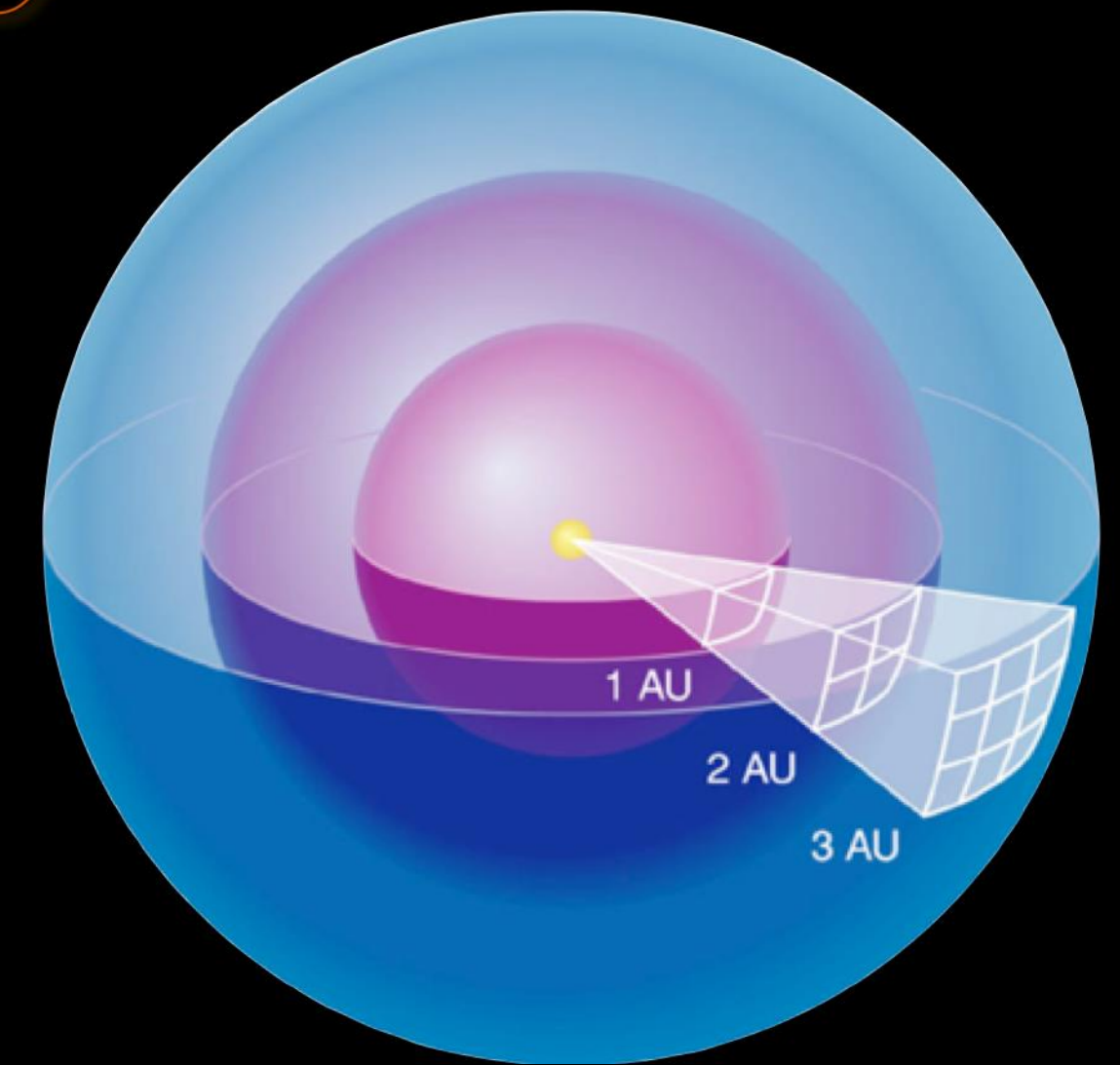
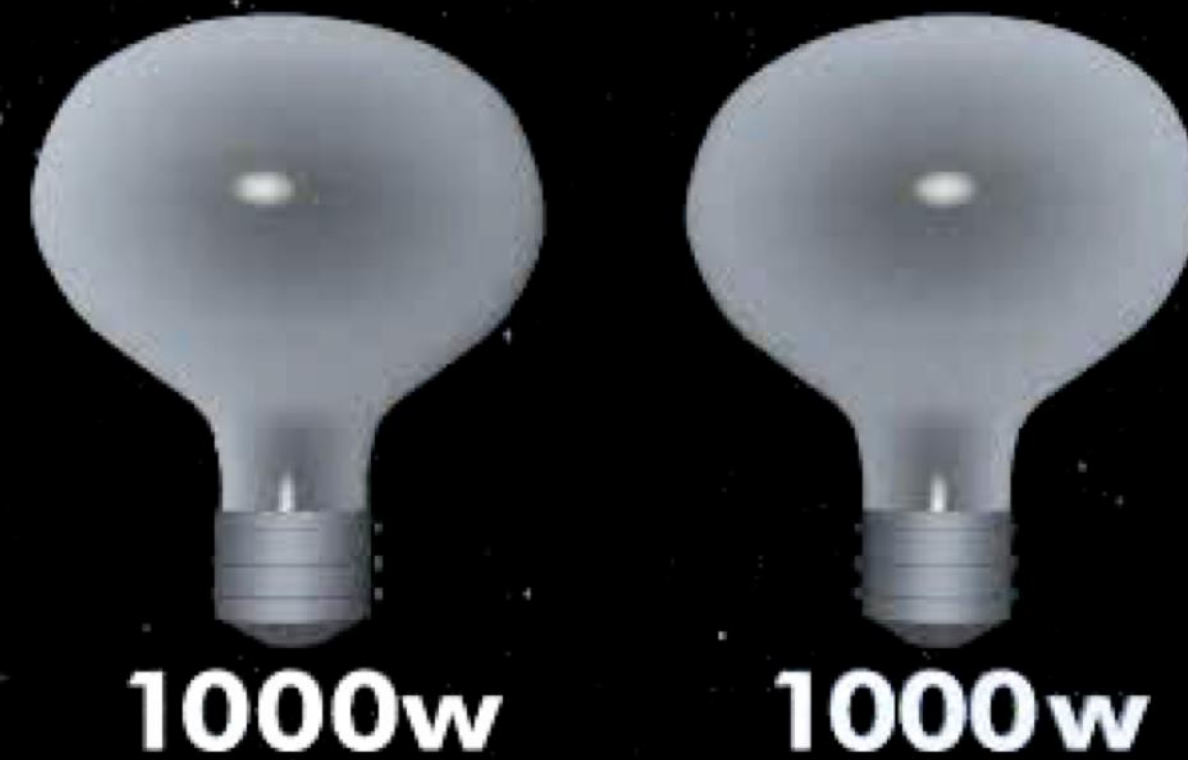
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(a) = \frac{8\pi G \rho_0}{3} \frac{1}{a^3} - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$1 - \Omega_K = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

Misurare le distanze permette di vincolare le proprietà dell'Universo

2) la distanza di luminosità: **DATA** una luminosità intrinseca **L** il flusso osservato dipende dalla distanza dell'Universo

$$F = \frac{L}{4\pi d_L^2} \rightarrow d_L = \sqrt{\frac{4\pi F}{L}}$$



Una misura di Flusso si traduce quindi in una misura della distanza d_L e quindi delle proprietà dell'Universo

Ho bisogno di una "CANDELA STANDARD" per la quale sia **nota** la luminosità **L**

La relazione tra le due quantità **L** (nota) e **F** (osservata) permette di ottenere d_L e quindi sulla espansione dell'Universo

Misurare le distanze permette di vincolare le proprietà dell'Universo

1) **la distanza dei diametri angolari:** DATA una dimensione fisica D 'angolo sotteso da essa dipende dalle proprietà dell'Universo

$$d_a = \frac{D}{\theta} \quad \text{Una misura di } \theta \text{ si traduce quindi in una misura della distanza } d_a \text{ e quindi delle proprietà dell'Universo}$$

Ho bisogno di un "REGOLO" per il quale sia **nota** una dimensione fisica D



La relazione tra le due quantità' D (nota) e θ (osservata) permette di ottenere d_a e quindi geometria dell'Universo

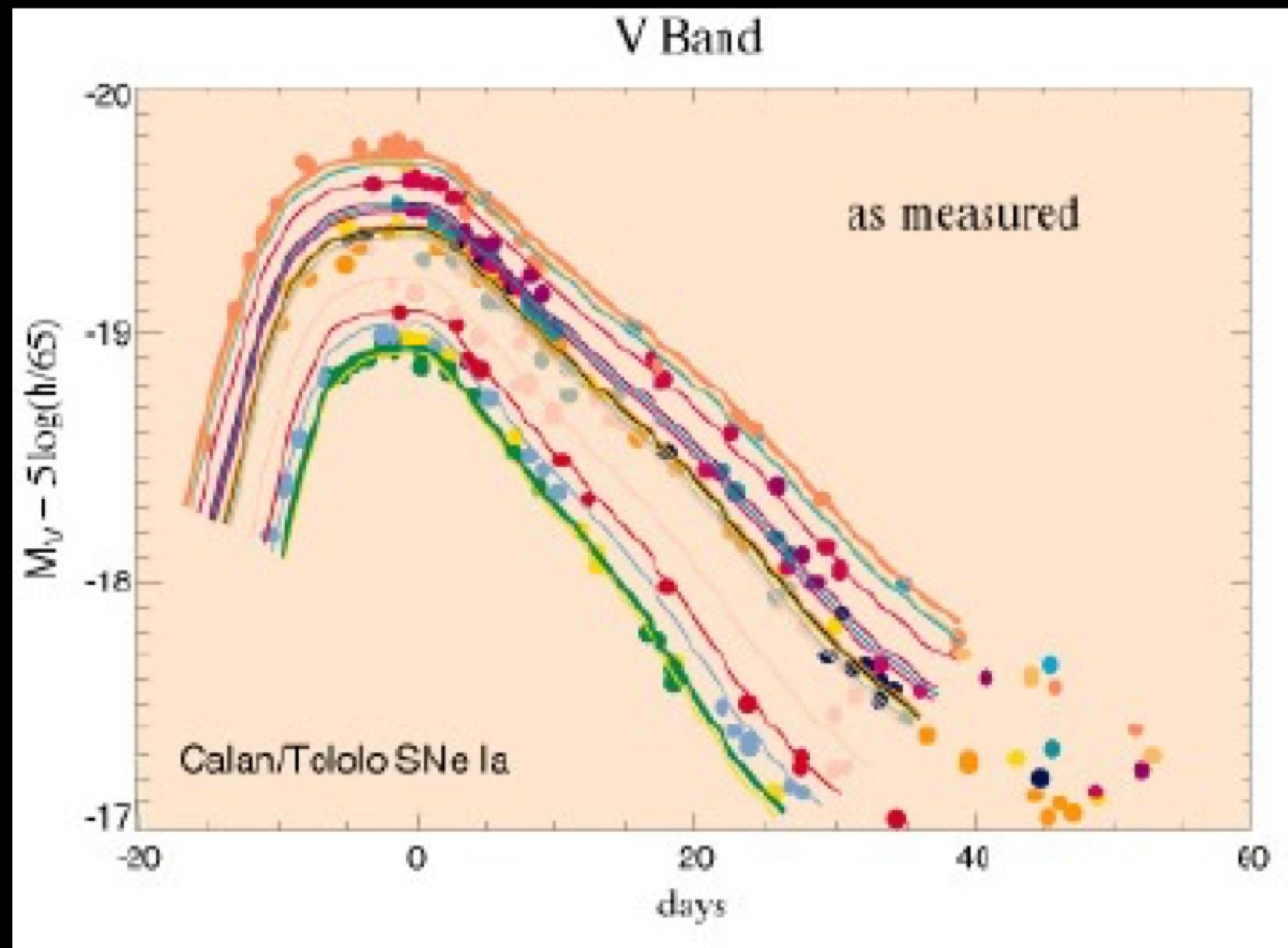
2) **la distanza di luminosità:** DATA una luminosità' intrinseca L il flusso osservato dipende dalla distanza dell'Universo

$$F = \frac{L}{4\pi d_L^2} \rightarrow d_L = \sqrt{\frac{4\pi F}{L}} \quad \text{Una misura di Flusso si traduce quindi in una misura della distanza } d_a$$

Ho bisogno di una "CANDELA STANDARD" per la quale sia **nota** la luminosità' L



La relazione tra le due quantità' L (nota) e F (osservata) permette di ottenere d_L e quindi sulla espansione dell'Universo



Il declino della luminosità' dopo 15 giorni e' legato alla magnitudine assoluta (luminosità' intrinseca).

$$M_B \approx 0.8(\Delta m_{15} - 1.1) - 19.5$$

Magnitudine assoluta

Differenza di magnitudine Apparente dopo 15 giorni

Osservazione delle curve di luce permette di derivare la Luminosity' intrinseca

Due programmi di ricerca: *Supernovae Cosmology Project* e *High-z Supernovae Search* per la ricerca di SN1A a $z > 0.5$ usando la risoluzione spaziale del telescopio Hubble hanno permesso di effettuare test cosmologici

Le SN1A sono il 30-40 % piu' deboli di come dovrebbero apparire rispetto alla valore aspettato nel caso $\Lambda=0$

La loro debolezza apparente indica che l'espanso dell'Universo e' stata piu' veloce di quanto aspettato per redshift $z \lesssim 1$

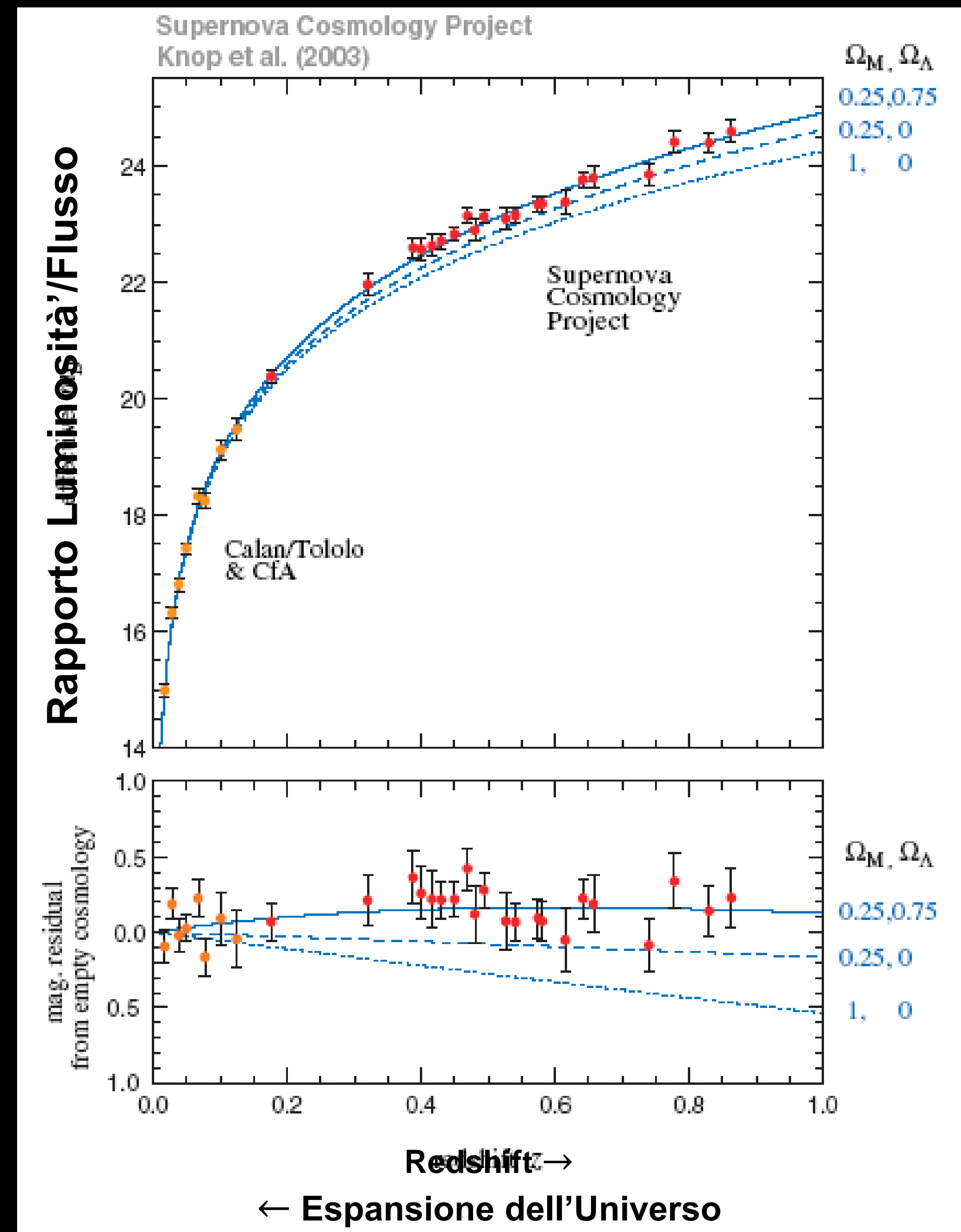
Una espansione accelerate in tempi recent ($z \lesssim 1$) spiegherebbe L'osservazione.

Come abbiamo visto, l'unico modo di avere una espansione accelerata consiste nel considerare una costante cosmologica non nulla

$$\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$$



Premio Nobel
Perlmutter, Schmidt, Riess 2011



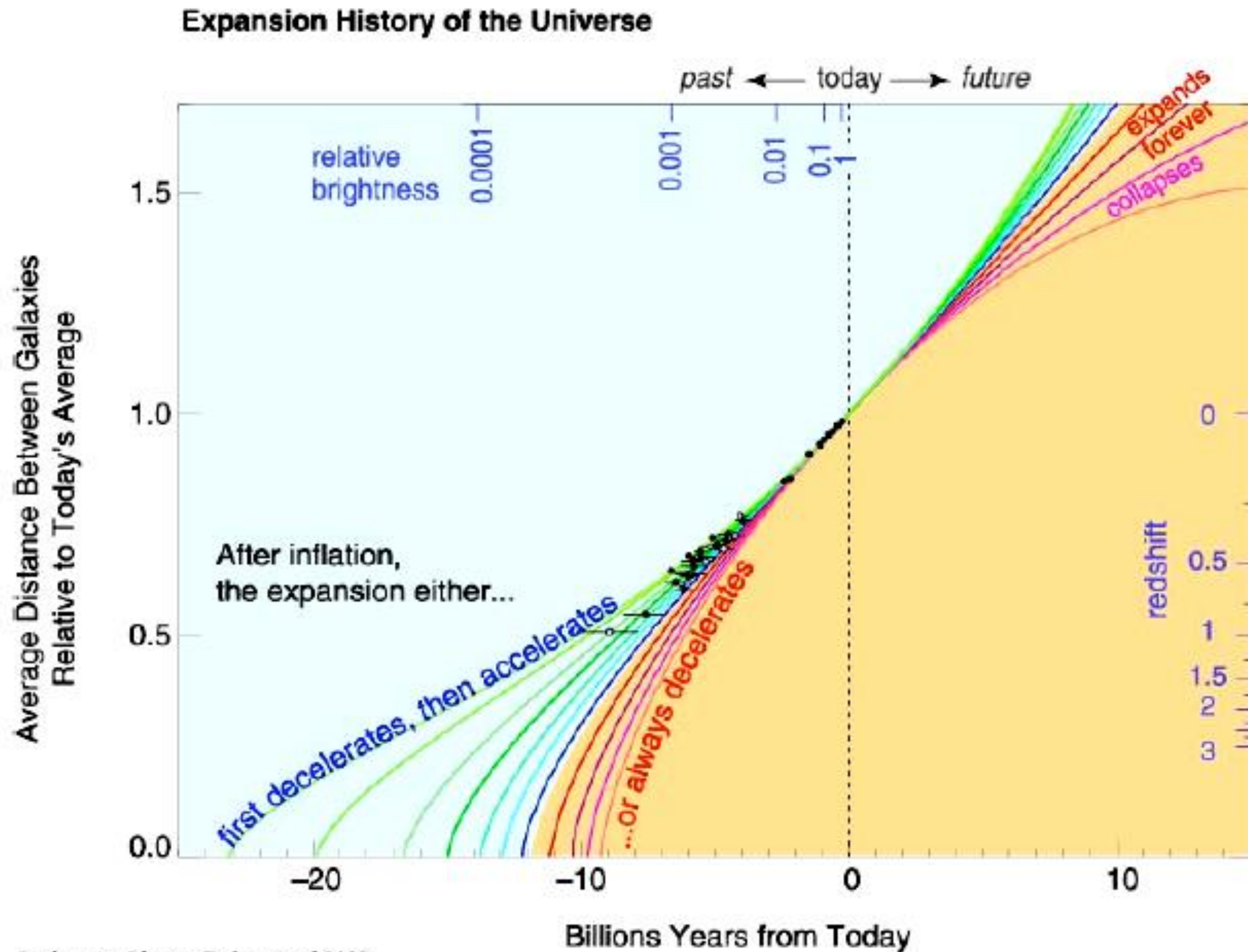
IL parametro di curvatura e'

$$\Omega_K \approx 0$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(a) = \frac{8\pi G \rho_0}{3} \frac{1}{a^3} - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$1 - \Omega_K = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

Vincoli da Candele Standard: SNIa



IL parametro di curvatura e'

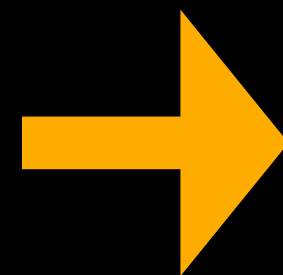
$$\Omega_K \approx 0$$

La costante cosmologica (Dark Energy)

$$\Omega_\Lambda \approx 0.7$$

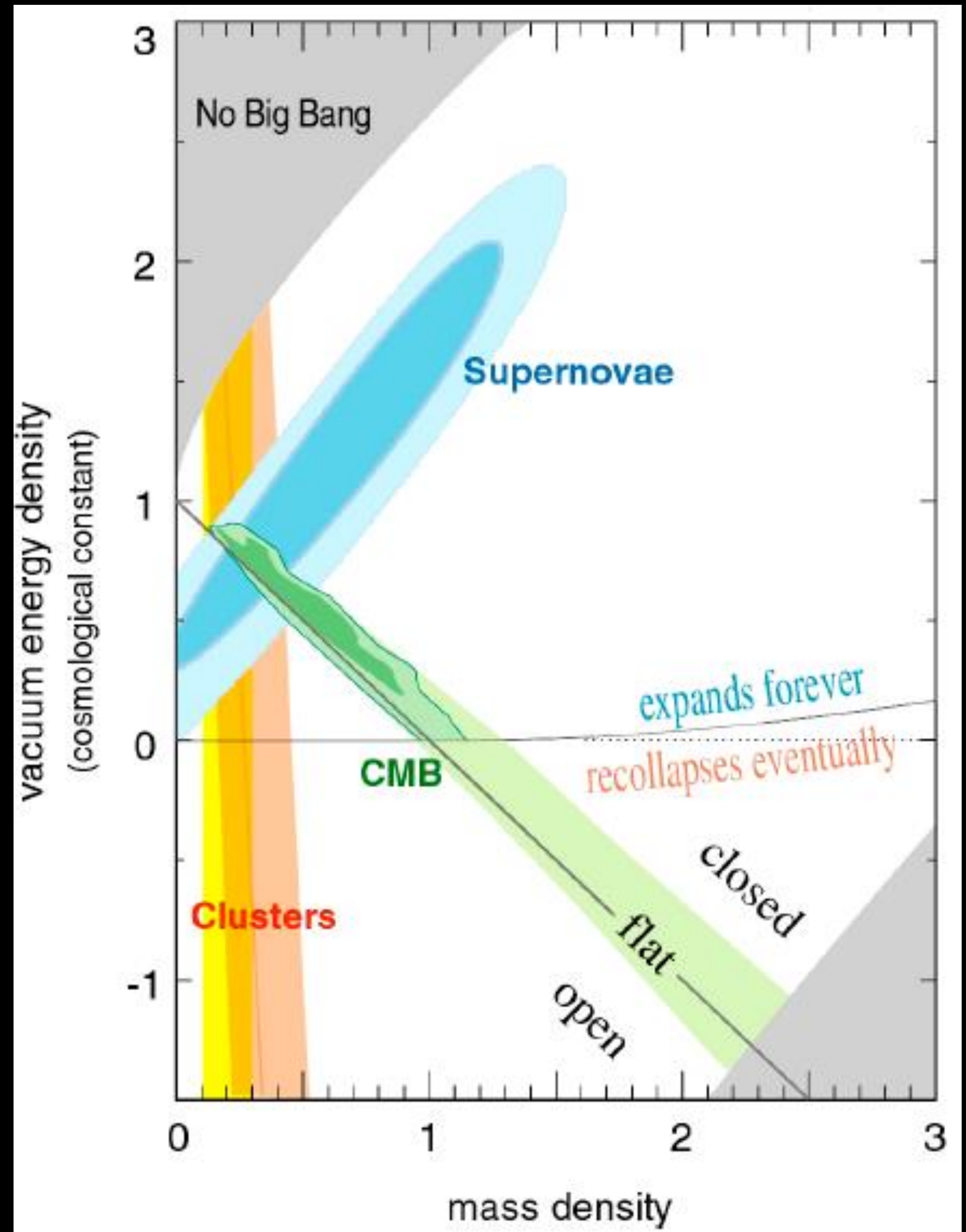
$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2(a) = \frac{8\pi G \rho_0}{3} \frac{1}{a^3} - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$1 - \cancel{\Omega_K} = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$



$$\Omega_m \approx 0.3$$

Concordance Cosmology



Universo con curvatura nulla $\Omega_k = 0$

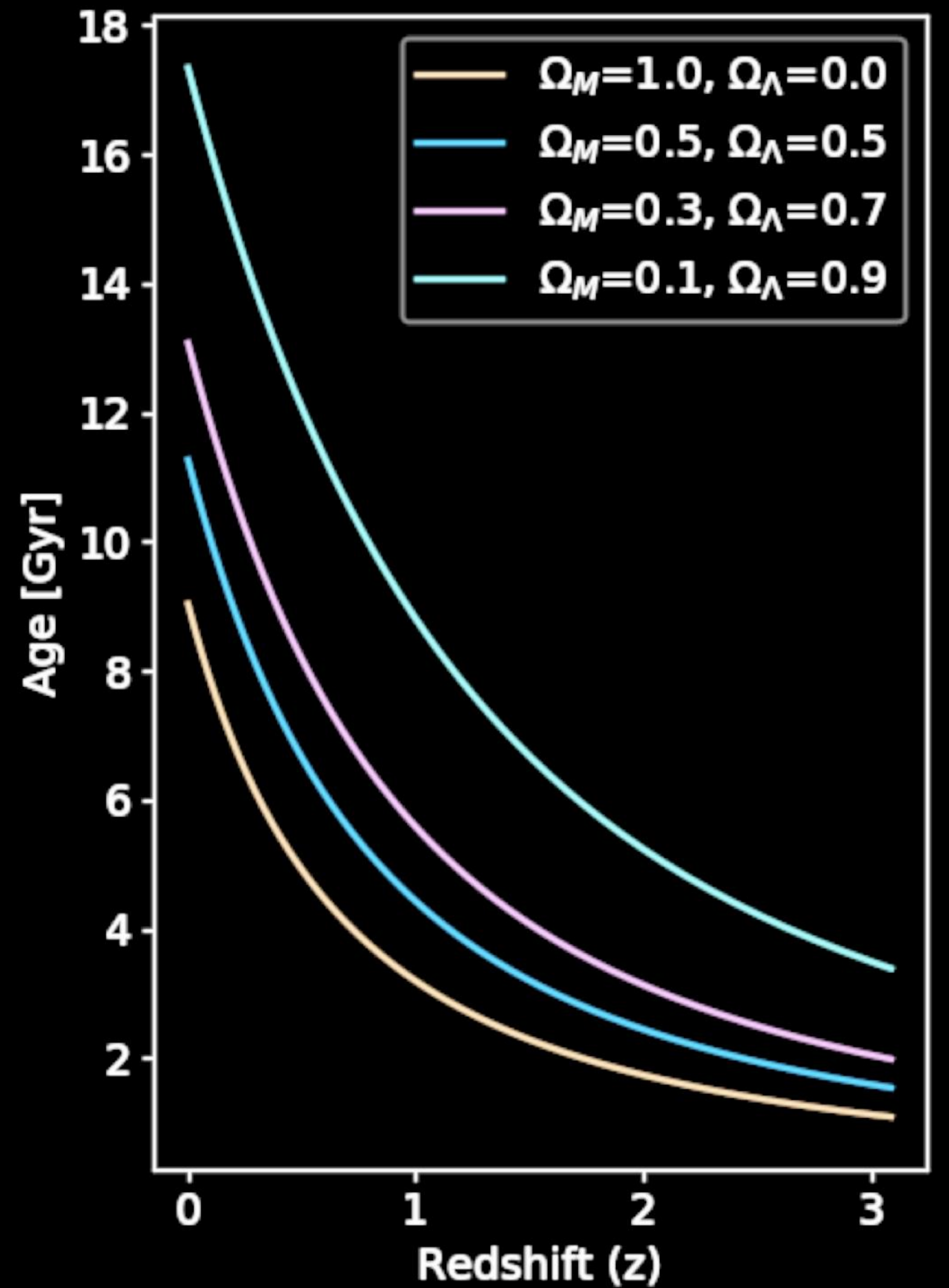
$$1 = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

$$\Omega_\Lambda \approx 0.7$$

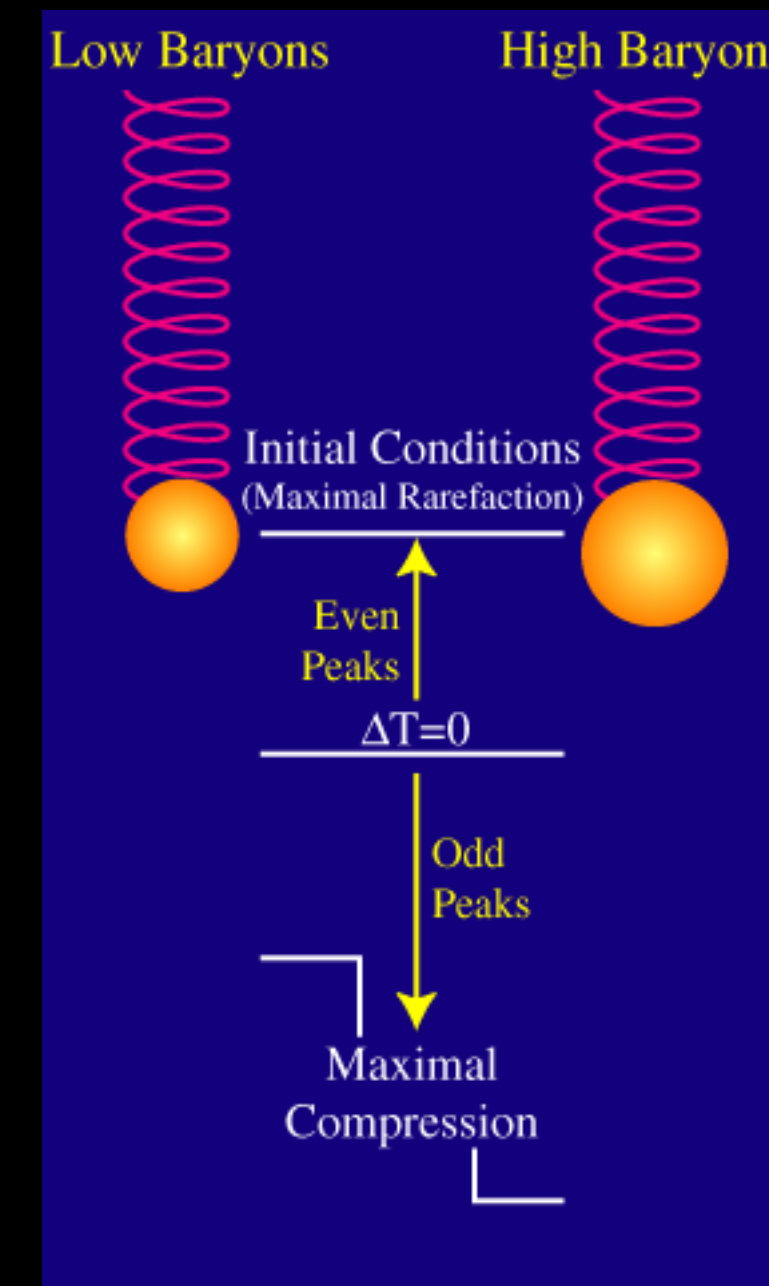
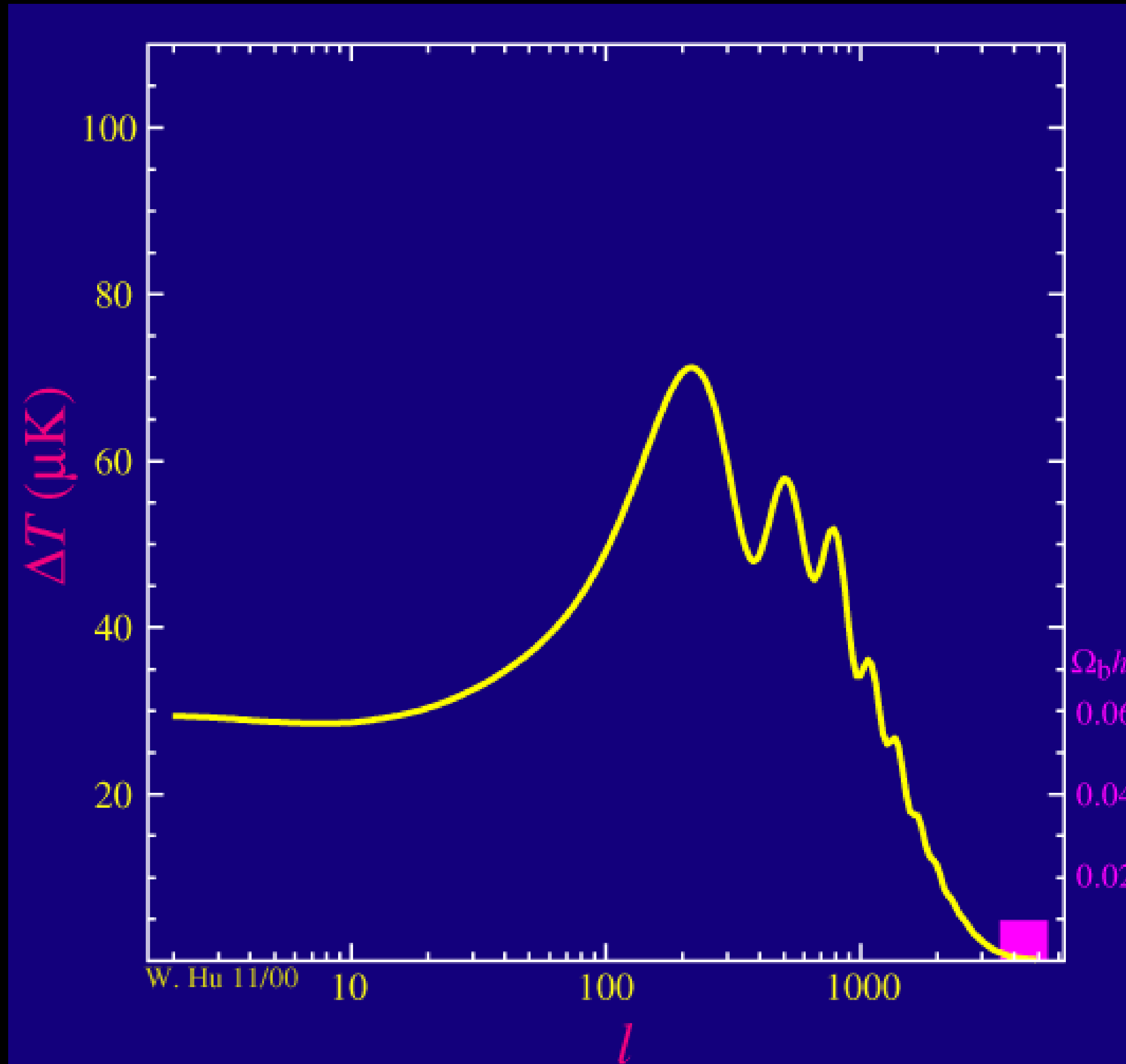
$$\Omega_m \approx 0.3$$



Nel caso della Concordance Cosmology l'eta' dell'Universo e'
 $t \approx 13.8$ Gyr

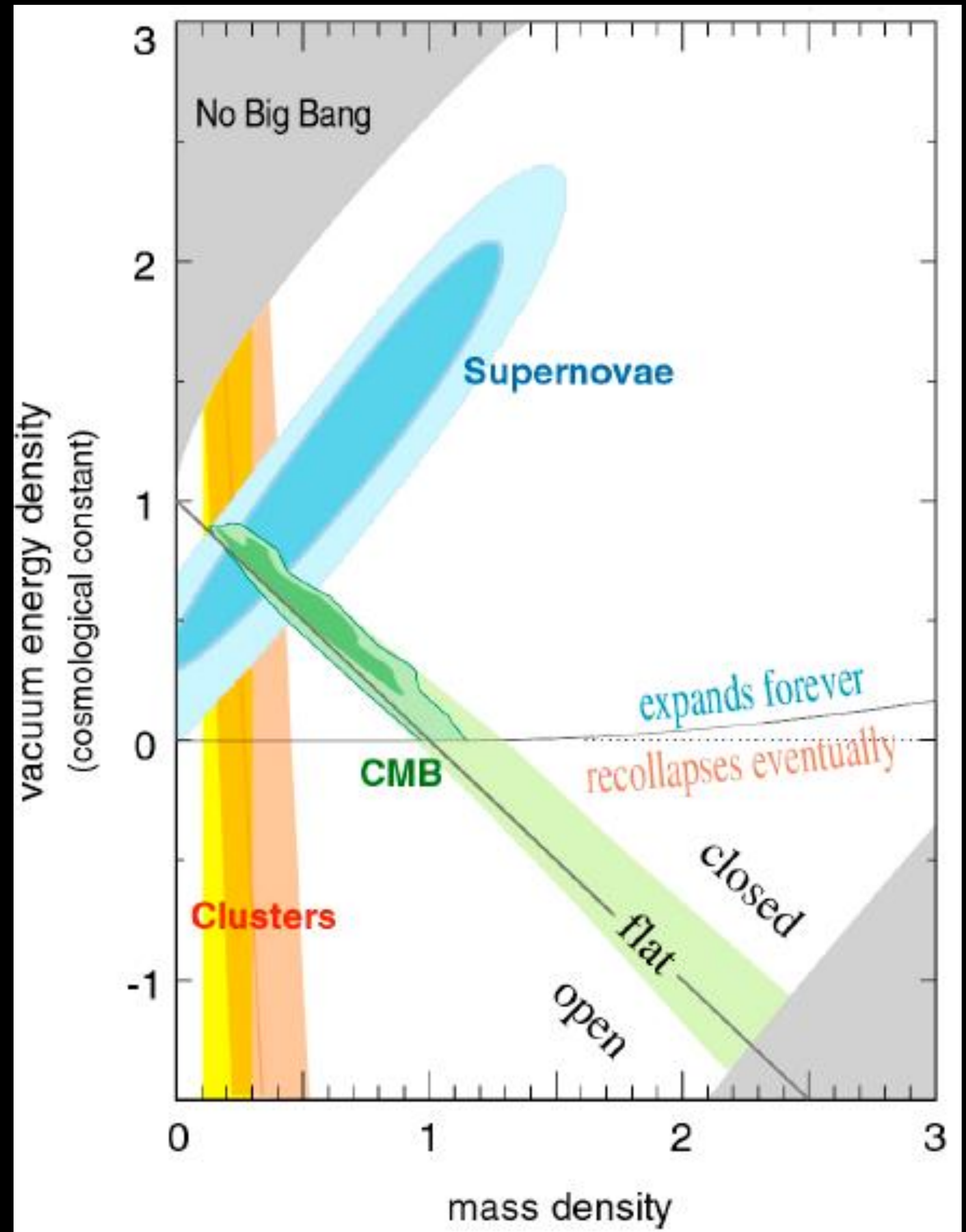


Aumentando la densità di barioni aumenta la differenza tra zone con compressione e quelle con rarefazione e quindi tra picchi pari e dispari
 E' possibile misurare densità barioni



$$\Omega_b \approx 0.04$$

Concordance Cosmology



Universo con curvatura nulla $\Omega_k = 0$

$$1 = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

$$\Omega_\Lambda \approx 0.7$$

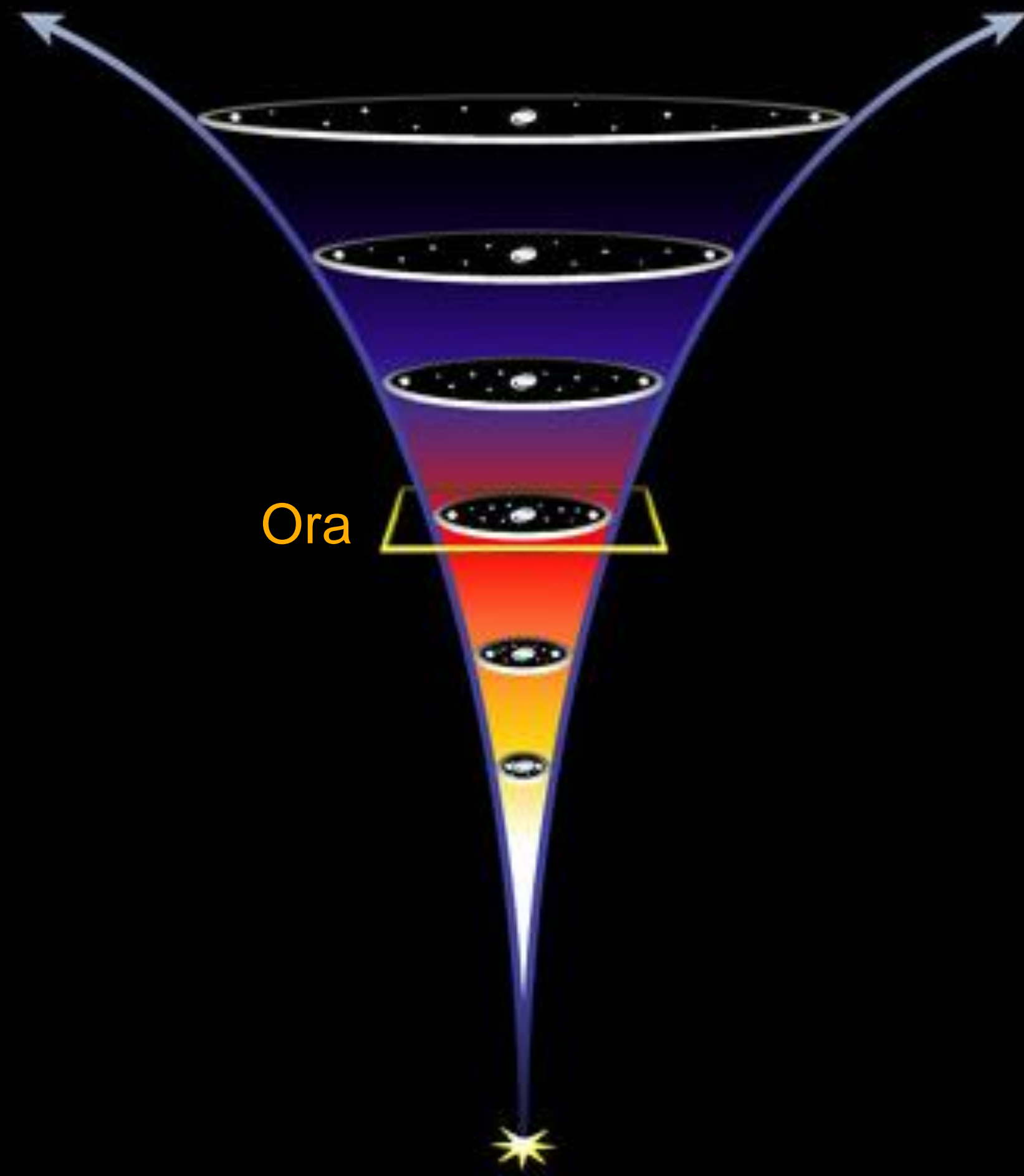
$$\Omega_m \approx 0.3$$

$$\Omega_b \approx 0.04$$

$$\Omega_{DM} \approx 0.26$$



Accelerating Universe



Allo stato attuale, la nostra migliore spiegazione è energia associata al vuoto

Dark Energy

Esiste anche in assenza di materia. Ha densità costante
→ espansione accelerata (esponenziale)

***Implicazioni e problemi concettuali legati
allo scenario delineato dalla Concordance Cosmology***

***Implicazioni e problemi concettuali legati
allo scenario delineato dalla Concordance Cosmology***

Il problema della costante cosmologica

Il problema della costante cosmologica

$\Omega_\Lambda = 0.7$ corrisponde ad una densità' di energia $\rho_\Lambda = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \Omega_\Lambda = 2 \cdot 10^{-10} \text{ergcm}^{-3}$

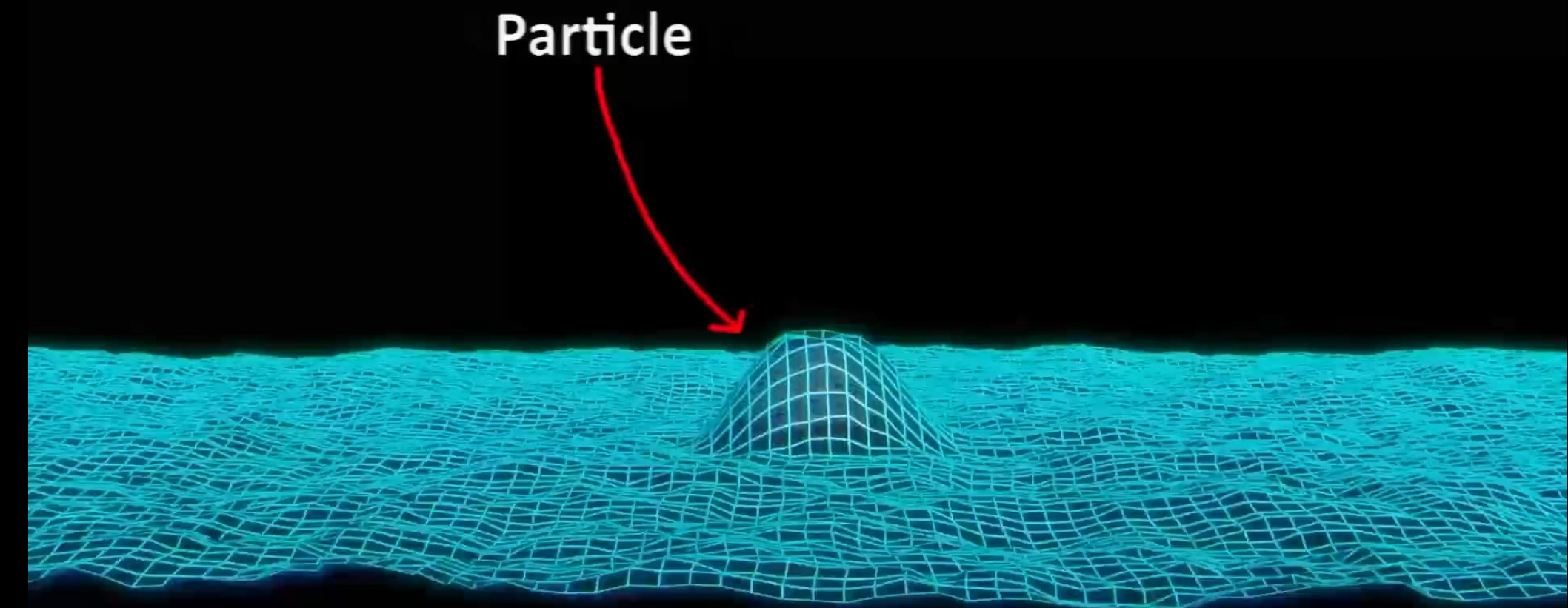
$$G_{\mu,\nu} = 8\pi T_{\mu,\nu} + \Lambda g_{\mu,\nu}$$

Termine di sorgente in assenza di altre sorgenti di massa energia.
Energia del vuoto

Nella moderna fisica quantistica le particelle sono stati di eccitazioni di campi quantistici, che esistono in ogni punto dello spazio

Il **vuoto** corrisponde allo stato di **minima energia**

Fluttuazioni di energia di questo stato sono previste dal principio di Heisemberg



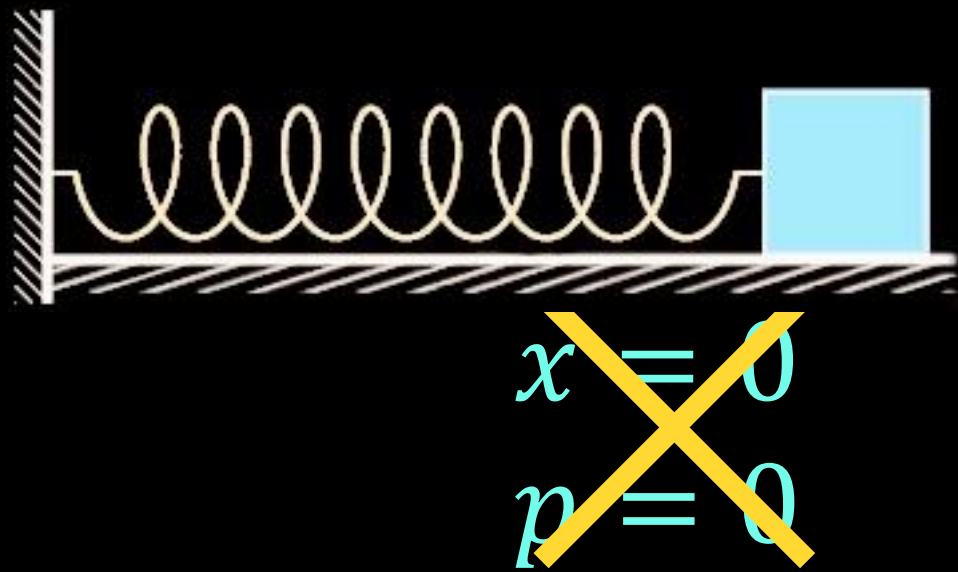
George Seurat, *Un dimanche après-midi à l'île de la Grande Jatte*

Nella moderna fisica quantistica le particelle sono stati di eccitazioni di campi quantistici, che esistono in ogni punto dello spazio

Il vuoto corrisponde allo stato di minima energia

Fluttuazioni di energia di questo stato sono previste dal principio di Heisemberg

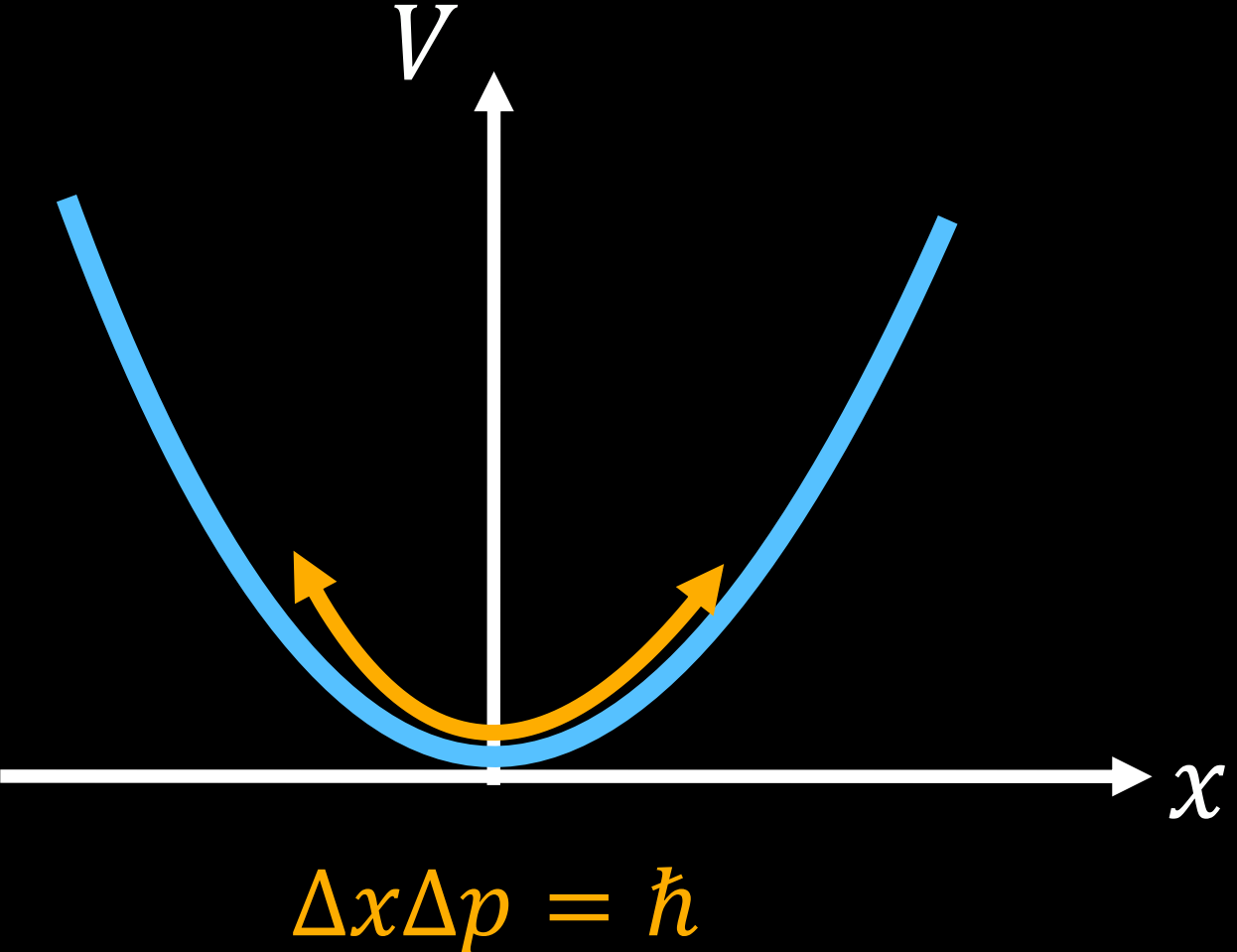
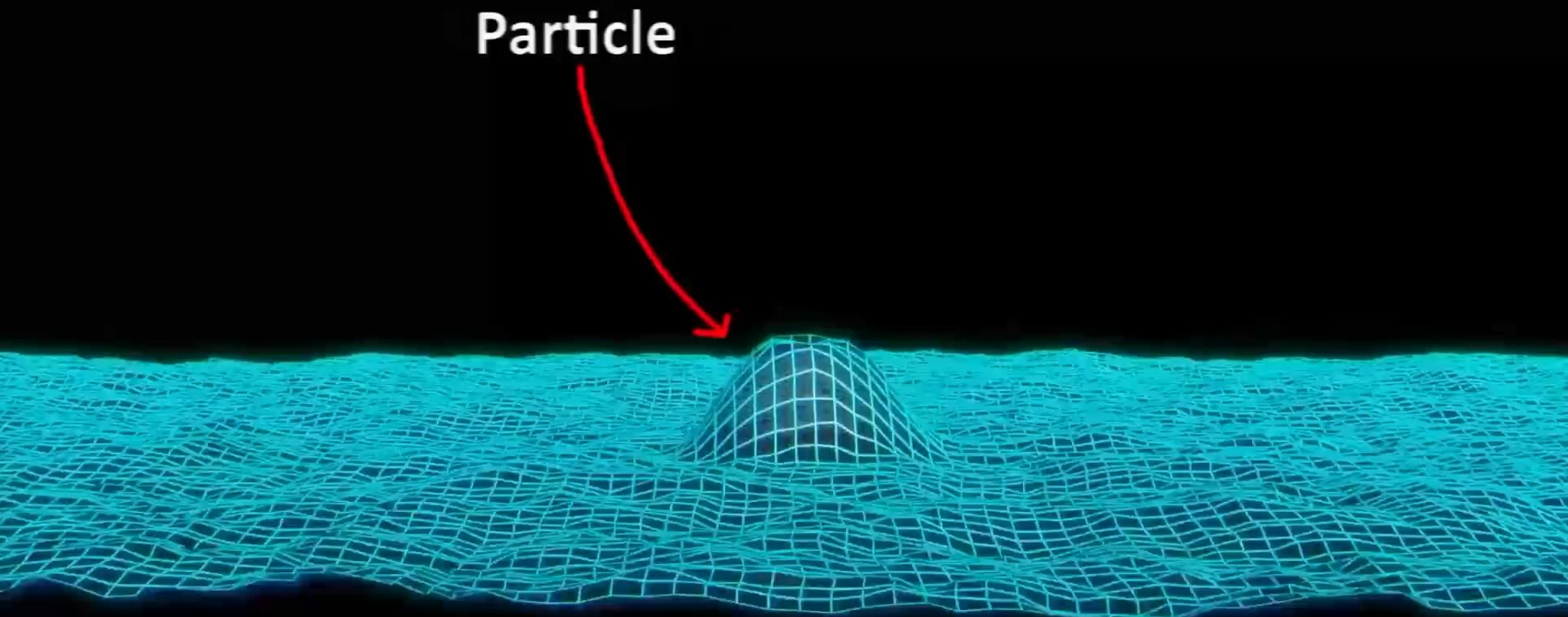
Es. Oscillator Armonico. Ovviamente lo stato di minima energia e' quello in cui La massa si trova nella posizione $x = 0$ con velocità' nulla $p = 0$



$$\Delta x \Delta p = \hbar$$

In meccanica quantistica non posso definire posizione e velocità' allo stesso tempo: fluttuazioni quantistiche

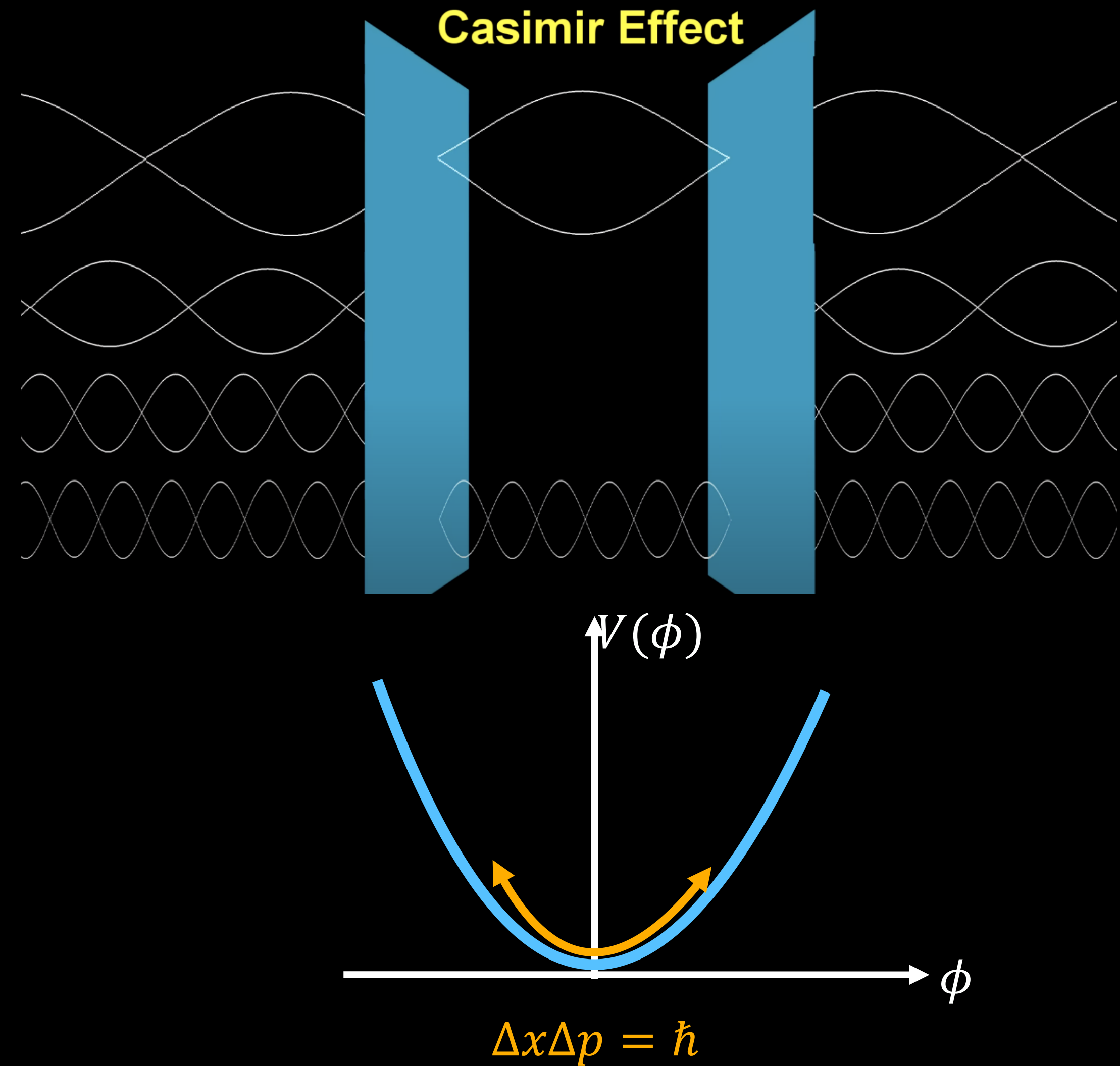
$$E_{oscillatore} = \frac{1}{2} \hbar \omega$$



Un campo quantistico si puo' decomporre in un numero infinito di oscillatori quantistici ognuno associato ad un numero d'onda $k = (k_x, k_y, k_z)$ e ad una frequenza $\omega(k) = c|k|$

"The career of a young theoretical physicist consists of treating the harmonic oscillator in ever-increasing levels of abstraction."

Sidney Coleman



Per calcolare la energia del vuoto occorre sommare le energie associate a ciascun modo di oscillazione di ciascun campo

$$E_{oscillatore} = \frac{1}{2} \hbar \omega$$

$$E_{tot} = \sum_{k_x, k_y, k_z} \frac{1}{2} \hbar \omega \propto \sum_{k_x, k_y, k_z} \frac{1}{2} \hbar |k| \sim k_{max}^4 \sim E_{max}^4$$

Questo valore tende ad infinito !!
Troncando la somma alla massima scala di energia associata ai campi oggi noti ho una densità di energia del vuoto 10^{55} volte più grande di quella corrispondente alla Dark Energy

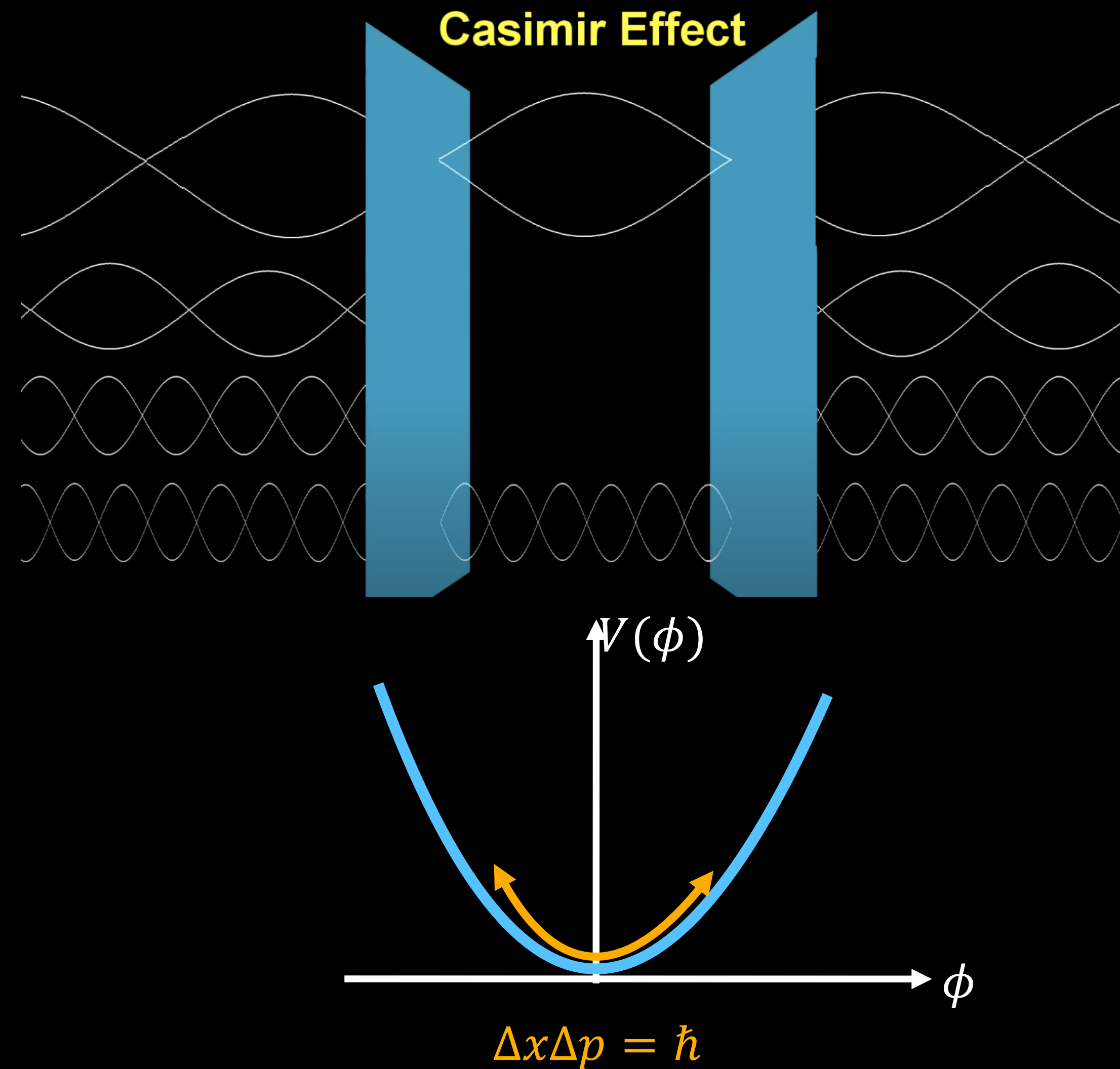
Il nodo del problema sta nel fatto che in qualsiasi altra applicazione che non coinvolge la gravita' il punto zero dell'energia NON IMPORTA. Quello che importa e' la DIFFERENZA di energia tra due stati (Questo vale anche per effetto Casimir)

Quando pero' si considera' la gravita', nelle equazioni di Einstein entrano tutte le forme di energia, e quindi il valore assoluto del valore di aspettazione sul vuoto

Non esiste pero' al momento una teoria quantistica della gravita'

$$E_{oscillatore} = \frac{1}{2} \hbar \omega$$

$$E_{tot} = \sum_{k_x, k_y, k_z} \frac{1}{2} \hbar \omega \propto \sum_{k_x, k_y, k_z} \frac{1}{2} \hbar |k| \sim k_{max}^4 \sim E_{max}^4$$



Questo valore tende ad infinito !!
Troncando la somma alla massima scala di energia associata ai campi oggi not ho una densita' di energia del vuoto 10^{55} volte piu' grande di quella corrispondente alla Dark Energy

Infiniti in energia del vuoto in Quantum Field Theories

Dirac: the zero point vacuum energy turns out to be infinite

Pauli: just because something is infinite it doesn't have to be 0

“Arguably the greatest mystery of humanity today is the prospect that 75% of the universe is made up of a substance known as dark energy about which we have almost no knowledge at all.”

L. Calder, O. Lahav, Physics World 23 (2010) 32-37

“Dark energy remains a mystery. [We are] frustrated by the lack of theoretical candidates for [it].”

J.A. Tyson, Nature 464, (2010) 172

Alcune visioni del problema in letteratura

Perhaps it is for want of other crises to worry about that interest is increasingly centered on one veritable crisis: theoretical expectations for the cosmological constant exceed observational limits by some 120 orders of magnitude. Weinmberg 1989

[I]t is a problem because observations indicate a vacuum energy that is more than 50 orders of magnitude smaller than we think it should be, given the particles and interactions that we find in experiments. Burgess 2013

...

We must demand more of cosmology than just piling on components or constants to a model to reproduce observations. Otherwise, we would still happily be adding epicycles to the Ptolemaic model of planetary motion. Cosmological models, along with their constants and components, must be grounded in laws of nature that we understand. The magnitude of the cosmological constant cannot currently be explained by any physics we know. Until it is, it is a mystery. Recalling the warning of astrophysicist Tommy Gold (personal communication), “for every complicated physical phenomenon there is a simple, wrong explanation”, it would be a mistake to be satisfied with the cosmological constant just because it is a simple explanation. Rocky Kolb

Assunzioni alla base del problema

- (1) valore assoluto dell'energia del vuoto ?
- (2) Inserire il valore calcolato in quantum theory come energia del vuoto nelle equazioni di Einstein: si assume il trattamento campi quantistici in spazio di Minkowski e geometria come background
- (3) “Does quantum energy gravitate” ?

what grounds do we have for taking the vacuum energy in quantum field theory to be anything more than an inconvenient feature of quantization that we rid ourselves of when calculating? Koberinski 2020

There is no great mystery, in an accelerated expansion of the universe. This is a phenomenon which is clearly predicted and simply described by well-understood current physical theory. It is well understood in the context of general relativity, which naturally includes a cosmological constant. . . the common theoretical objections against this interpretation of the acceleration are either weak, or ill-founded.

... It is not due to a vacuum energy or a mysterious substance: it is a long distance repulsive force due to the intrinsic dynamics of geometry Bianchi and Rovelli 2010

Alcune visioni del problema in letteratura

Perhaps it is for want of other crises to worry about that interest is increasingly centered on one veritable crisis: theoretical expectations for the cosmological constant exceed observational limits by some 120 orders of magnitude. Weinmberg 1989

[I]t is a problem because observations indicate a vacuum energy that is more than 50 orders of magnitude smaller than we think it should be, given the particles and interactions that we find in experiments. Burgess 2013

...

We must demand more of cosmology than just piling on components or constants to a model to reproduce observations. Otherwise, we would still happily be adding epicycles to the Ptolemaic model of planetary motion. Cos- mological models, along with their constants and components, must be grounded in laws of nature that we understand. The magnitude of the cosmological constant cannot currently be explained by any physics we know. Until it is, it is a mystery. Recalling the warning of astrophysicist Tommy Gold (personal communication), “for every complicated physical phenomenon there is a simple, wrong explanation”, it would be a mistake to be satisfied with the cosmological constant just because it is a simple explanation. Rocky Kolb

Assunzioni alla base del problema

- (1) valore assoluto dell'energia del vuoto ?
- (2) Inserire il valore calcolato in quantum theory come energia del vuoto nelle equazioni di Einstein: si assume il trattamento campi quantistici in spazio di Minkowski e geometria come background
- (3) “Does quantum energy gravitate” ?

[1] S. Weinberg: *The cosmological constant problem. Rev. Mod. Phys.* 61, 1 (1989).

[2] C. Rovelli, *Quantum Gravity* (Cambridge University Press, Cambridge, 2004).

[3] B. S. DeWitt and G. Esposito: *An introduction to quantum gravity, Int. J. Geom Methods Mod. Phys.* 5101, (2008); G. Esposito, *An introduction to quantum gravity, arXiv:1108.3269 [hep-th]*.

[4] E Bianchi, C Rovelli: *"Is dark energy really a mystery?", Nature*, 466(2010) 321

[5] T. Padmanabhan : *Why does gravity ignore the vacuum energy? Int. J. Mod. Phys. D*, 15, 2029 (2006).

Alcune soluzioni

Non vi e' problema Il contributo della en. Del vuoto e' stimato attraverso trattamento della meccanica quantistica valido in un background fisso. Il problema della en. Del vuoto esiste ma non c'entra con Λ

Principio Antropico: multiverso

Quintessenza: campo quantistico \rightarrow dynamical Dark Energy

Dark Energy da principio oleografico

Alcune soluzioni

Non vi e' problema Il contributo della en. Del vuoto e' stimato attraverso trattamento della meccanica quantistica valido in un background fisso. Il problema della en. Del vuoto esiste ma non c'entra con Λ

Principio Antropico: multiverso

Quintessenza: campo quantistico \rightarrow dynamical Dark Energy

Dark Energy da principio oleografico

Infinites in QFT

Dirac: the zero point vacuum energy turns out to be infinite

Pauli: just because something is infinite it doesn't have to be 0

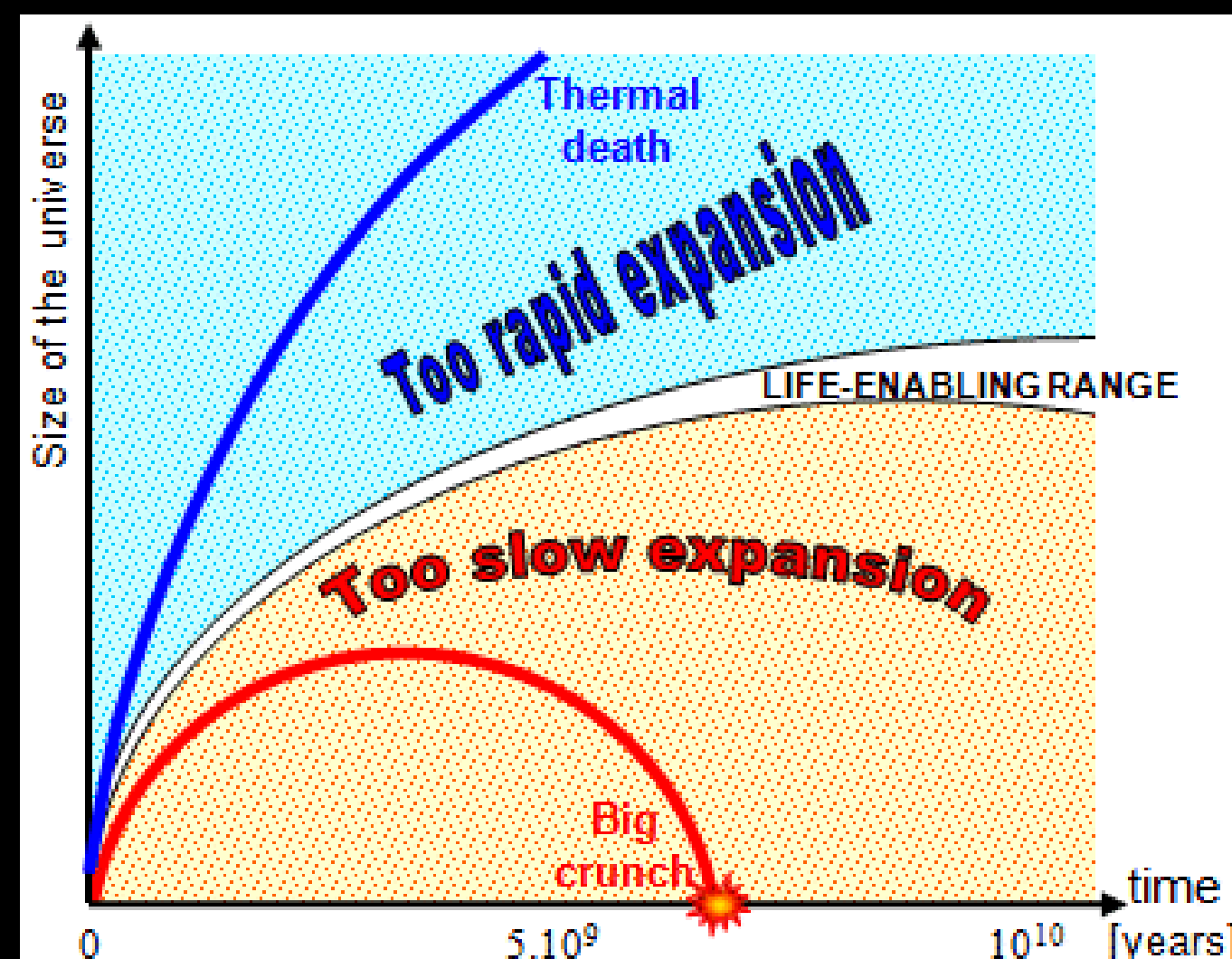
Alcune soluzioni

Non vi e' problema Il contributo della en. Del vuoto e' stimato attraverso trattamento della meccanica quantistica valido in un background fisso. Il problema della en. Del vuoto esiste ma non c'entra con Λ

Principio Antropico: multiverso

Quintessenza: campo quantistico \rightarrow dynamical Dark Energy

Dark Energy da principio oleografico



Principio Antropico come enunciato da Brandon Carter (1974)

1. We must be prepared to take account of the fact that our location in the Universe is necessarily privileged to the extent of being compatible with our existence as observers.
2. The Universe (and hence the fundamental parameters on which it depends) must be as to admit the creation of observers within it at some stage.

In ogni regione del multiverso lo stato di vuoto e' diverso. Noi siamo in una delle rarissime regioni in cui e' tale da permettere lo sviluppo di osservatori

Weinberg, S. (1987). "Anthropic Bound on the Cosmological Constant." *Physical Review Letters*, 59(22), 2607–2610

Considero' un ipotetico insieme di Universi con differenti valori di Λ e calcolo' la probabilita' di osservare un particolare valore DATA la condizione che le galassie debbano formarsi. Il calcolo mostro che il valore piu' probabile di Λ con questa condizione E' vicino al valore osservato

Alcune soluzioni

Non vi e' problema Il contributo della en. Del vuoto e' stimato attraverso trattamento della meccanica quantistica valido in un background fisso. Il problema della en. Del vuoto esiste ma non c'entra con Λ

Principio Antropico: multiverso

Quintessenza: campo quantistico \rightarrow dynamical Dark Energy

Dark Energy da principio oleografico

Presupposto: Multiverso



Dettaglio di una parete del tempio di Haccappya-gudi. VII secolo

Vishnu giace nelle acque dell'Oceano delle Cause
Esala infiniti Universi, che fluttuano nell'Oceano delle Cause
per migliaia di anni
Vishnu-Reviver entra in ciascuno di questi e genere Brahma
che da' forma alle cose in ciascun Universo
Vedi, e.g. [Bhagavata Purana](#)

Alcune soluzioni

Non vi e' problema Il contributo della en. Del vuoto e' stimato attraverso trattamento della meccanica quantistica valido in un background fisso. Il problema della en. Del vuoto esiste ma non c'entra con Λ

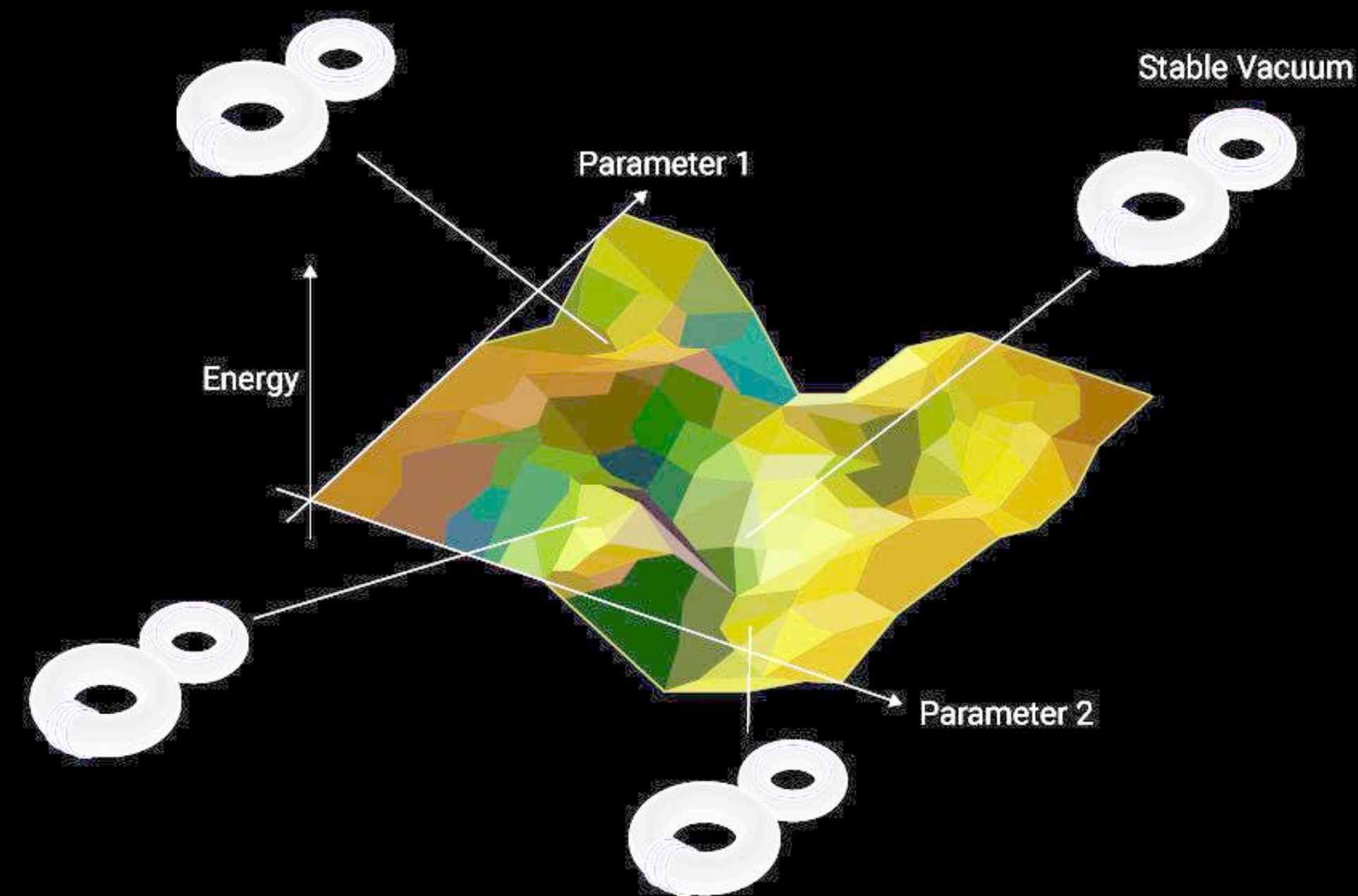
Principio Antropico: multiverso

Quintessenza: campo quantistico \rightarrow dynamical Dark Energy

Dark Energy da principio oleografico

Nelle teorie di stringhe il panorama delle possibili configurazioni dello stato di vuoto e' enorme. Possibili diverse "sacche" di Universo all'interno di una varieta' multidimensionale di possibilita'

Ogni minimo corrisponde ad un diverso tipo di en. Vuoto



Ma: predizione naturale: Dark Energy NEGATIVA in teoria di stringhe (Vada & Steinhardt 2023)

Alcune soluzioni

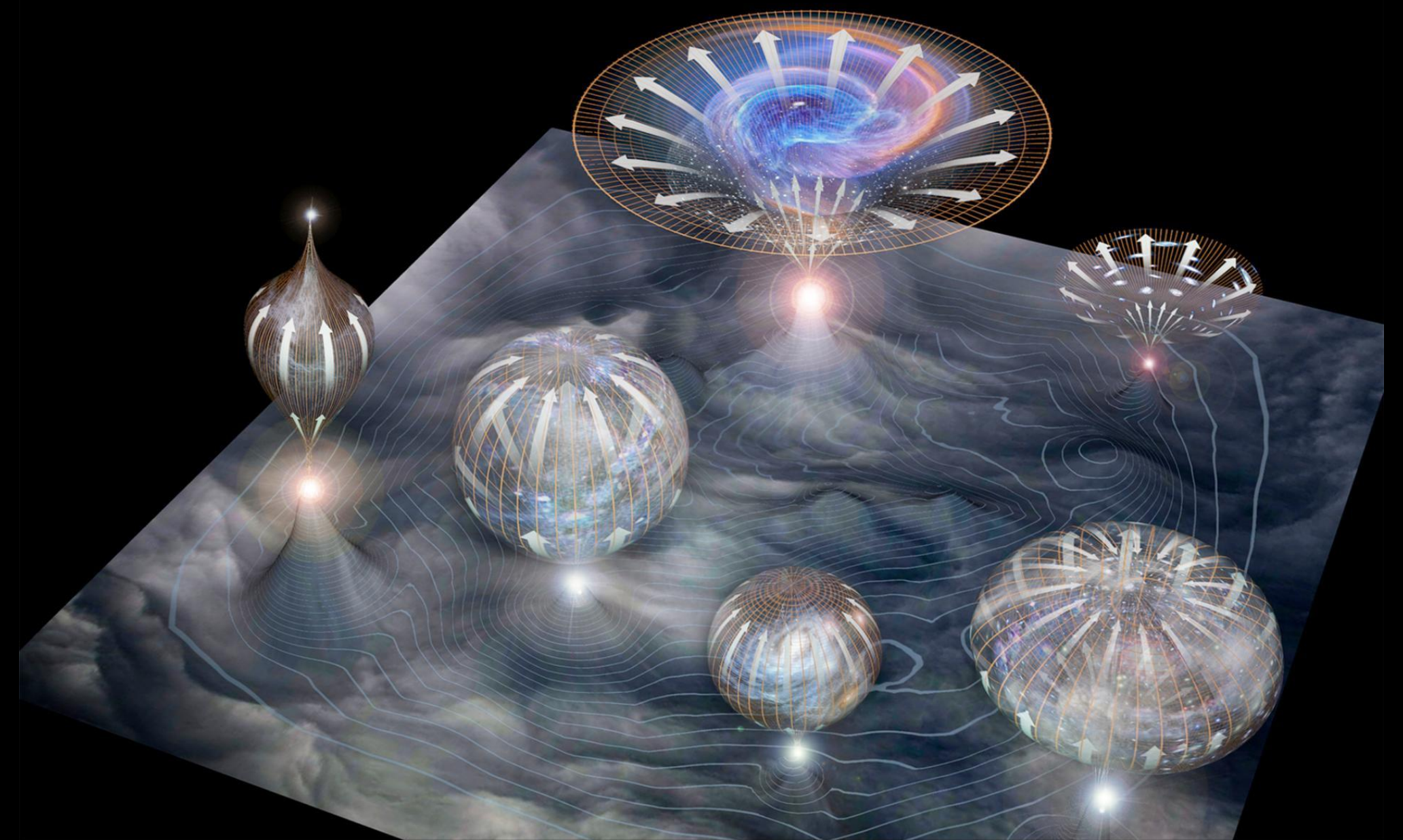
Non vi e' problema Il contributo della en. Del vuoto e' stimato attraverso trattamento della meccanica quantistica valido in un background fisso. Il problema della en. Del vuoto esiste ma non c'entra con Λ

Principio Antropico: multiverso

Quintessenza: campo quantistico \rightarrow dynamical Dark Energy

Dark Energy da principio oleografico

In scenari di inflazione e' naturale la creazione di diverse bolle di Universo



Alcune soluzioni

Non vi e' problema Il contributo della en. Del vuoto e' stimato attraverso trattamento della meccanica quantistica valido in un background fisso. Il problema della en. Del vuoto esiste ma non c'entra con Λ

Principio Antropico: multiverso

Quintessenza: campo quantistico \rightarrow dynamical Dark Energy

Dark Energy da principio oleografico

Martin Rees (Astronomer Royal of Great Britain ed ex-presidente della Royal Society) disse che e' abbastanza sicuro del multiverso da scommetterci la vita del suo cane

Andrei Linde (Stanford University) disse che e' abbastanza sicura che scommetterebbe la sua stessa vita

Steven Weinberg (Premio Nobel per la Fisica nel 1979) disse "I have just enough confidence about th multiverse to bet the lives of both Andrea Linde and Martin Rees's dog"

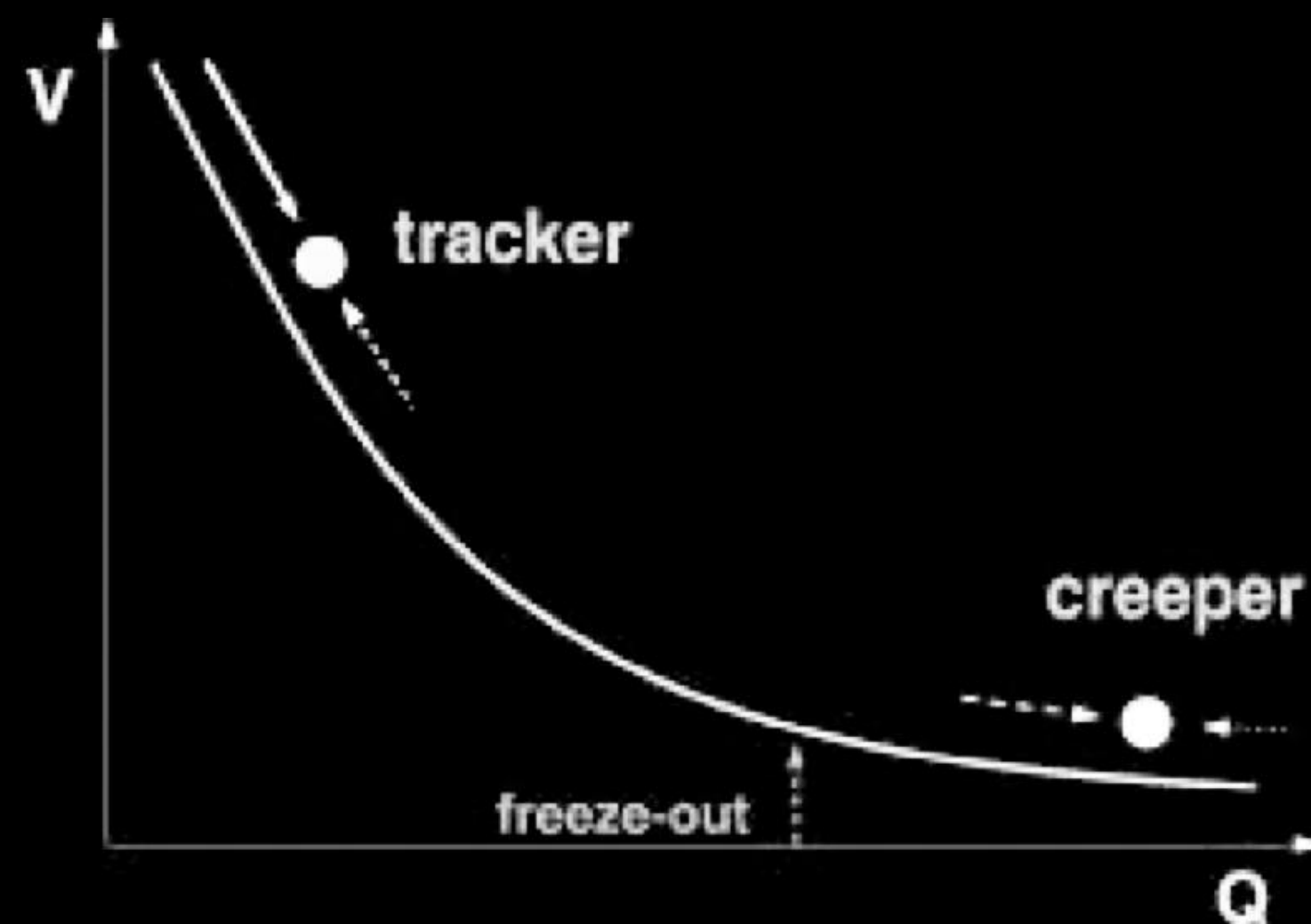
Alcune soluzioni

Non vi e' problema Il contributo della en. Del vuoto e' stimato attraverso trattamento della meccanica quantistica valido in un background fisso. Il problema della en. Del vuoto esiste ma non c'entra con Λ

Principio Antropico: multiverso

Quintessenza: campo quantistico \rightarrow dynamical Dark Energy

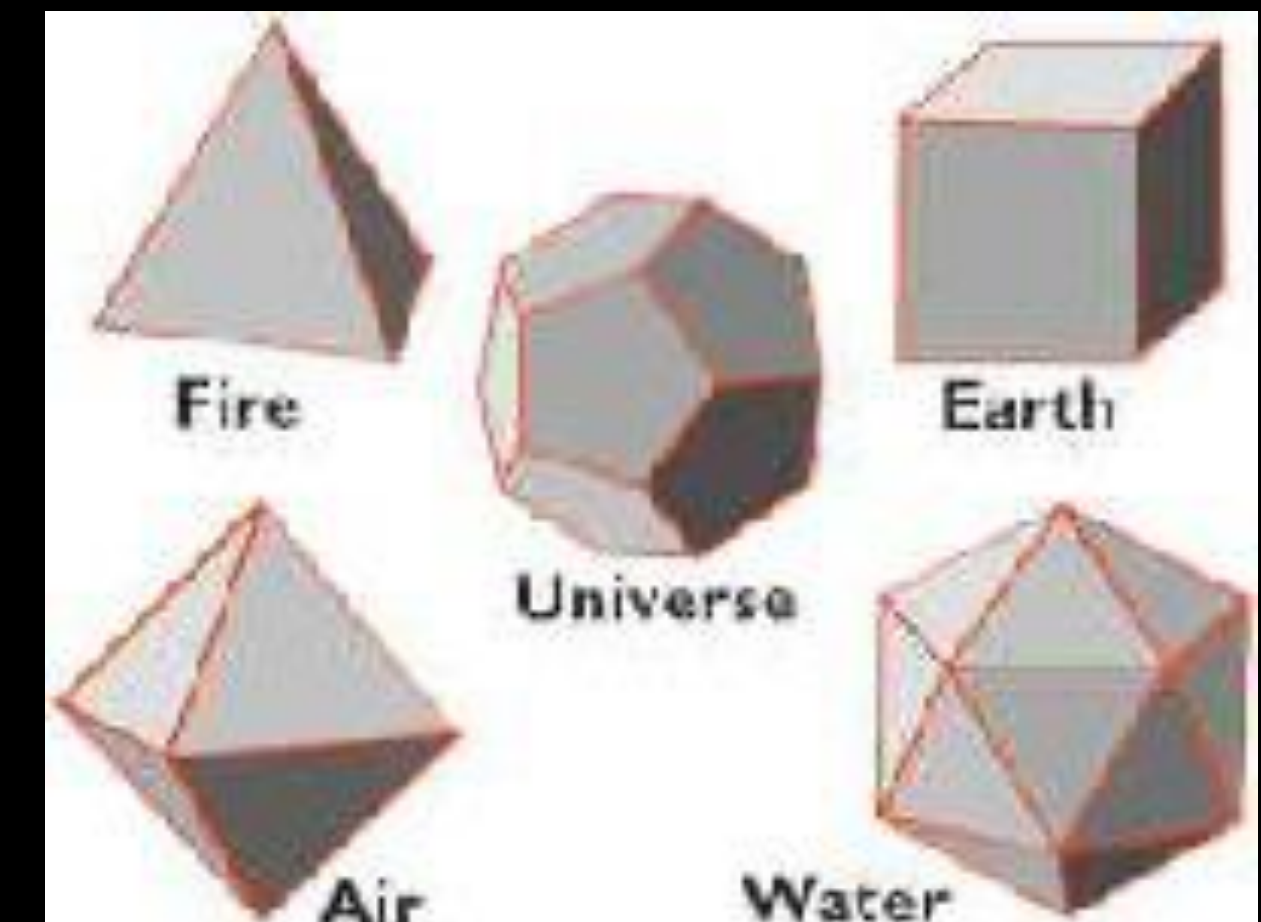
Dark Energy da principio oleografico



Campo quantistico che evolve scendendo lentamente verso il minimo del potenziale



S. Dali, Ultima Cena 1955



Alcune soluzioni

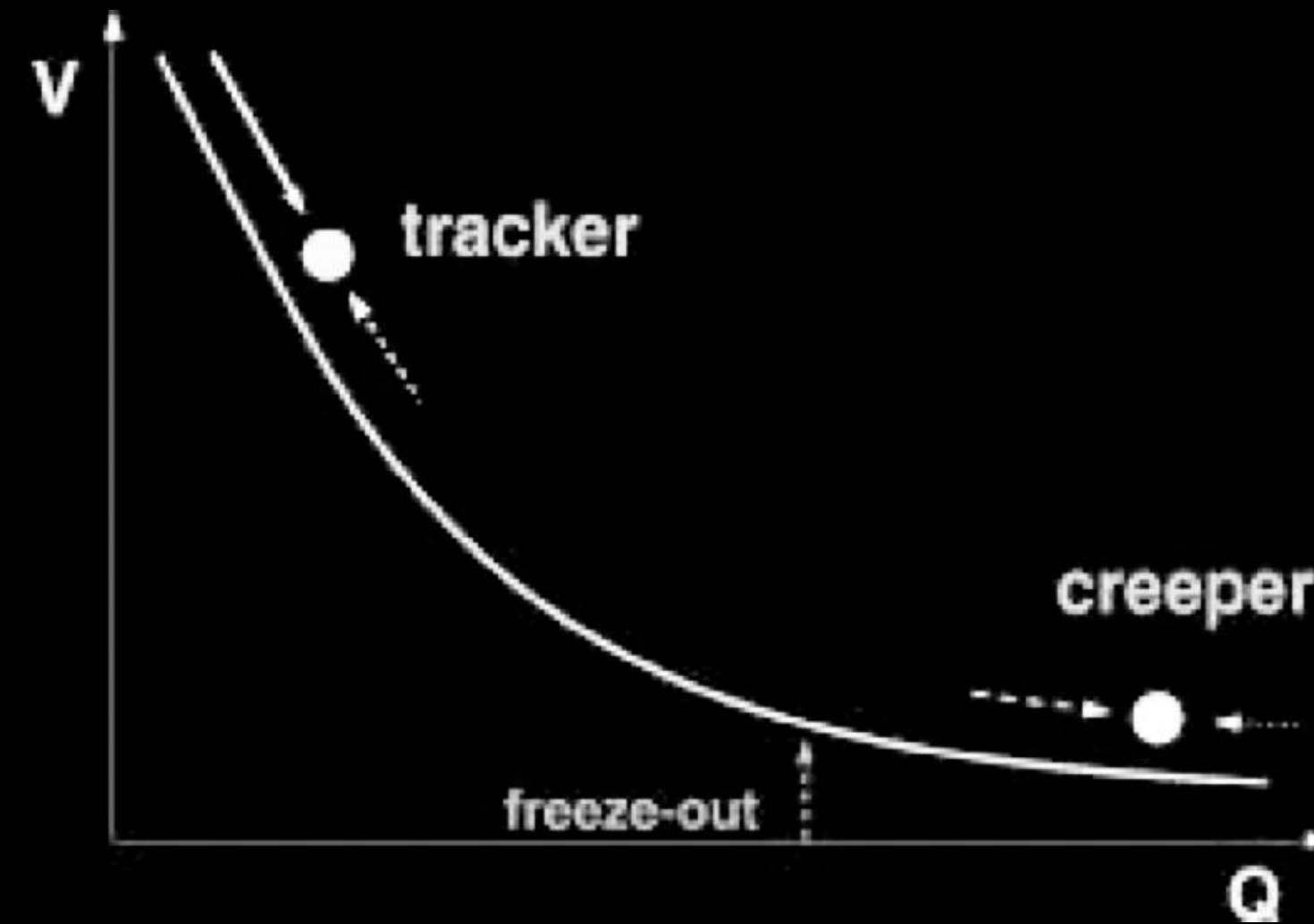
Non vi e' problema Il contributo della en. Del vuoto e' stimato attraverso trattamento della meccanica quantistica valido in un background fisso. Il problema della en. Del vuoto esiste ma non c'entra con Λ

Principio Antropico: multiverso

Quintessenza: campo quantistico \rightarrow dynamical Dark Energy

Dark Energy da principio oleografico

Campo quantistico che evolve scendendo lentamente verso il minimo del potenziale



L'energia del campo quantistico cambia nel tempo, evolvendo verso il minimo

$$\frac{P}{\rho} = w = \frac{(1/2)\dot{\phi}^2 - V(\phi)}{(1/2)\dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$

Tende a $w = -1$ (come costante cosmologica) per $\dot{\phi} \ll V(\phi)$

Conseguenza: $w = P/\rho$ cambia nel tempo, quindi l'espansione accelerata non lo e' sempre nello stesso modo

Alcune soluzioni

Non vi e' problema Il contributo della en. Del vuoto e' stimato attraverso trattamento della meccanica quantistica valido in un background fisso. Il problema della en. Del vuoto esiste ma non c'entra con Λ

Principio Antropico: multiverso

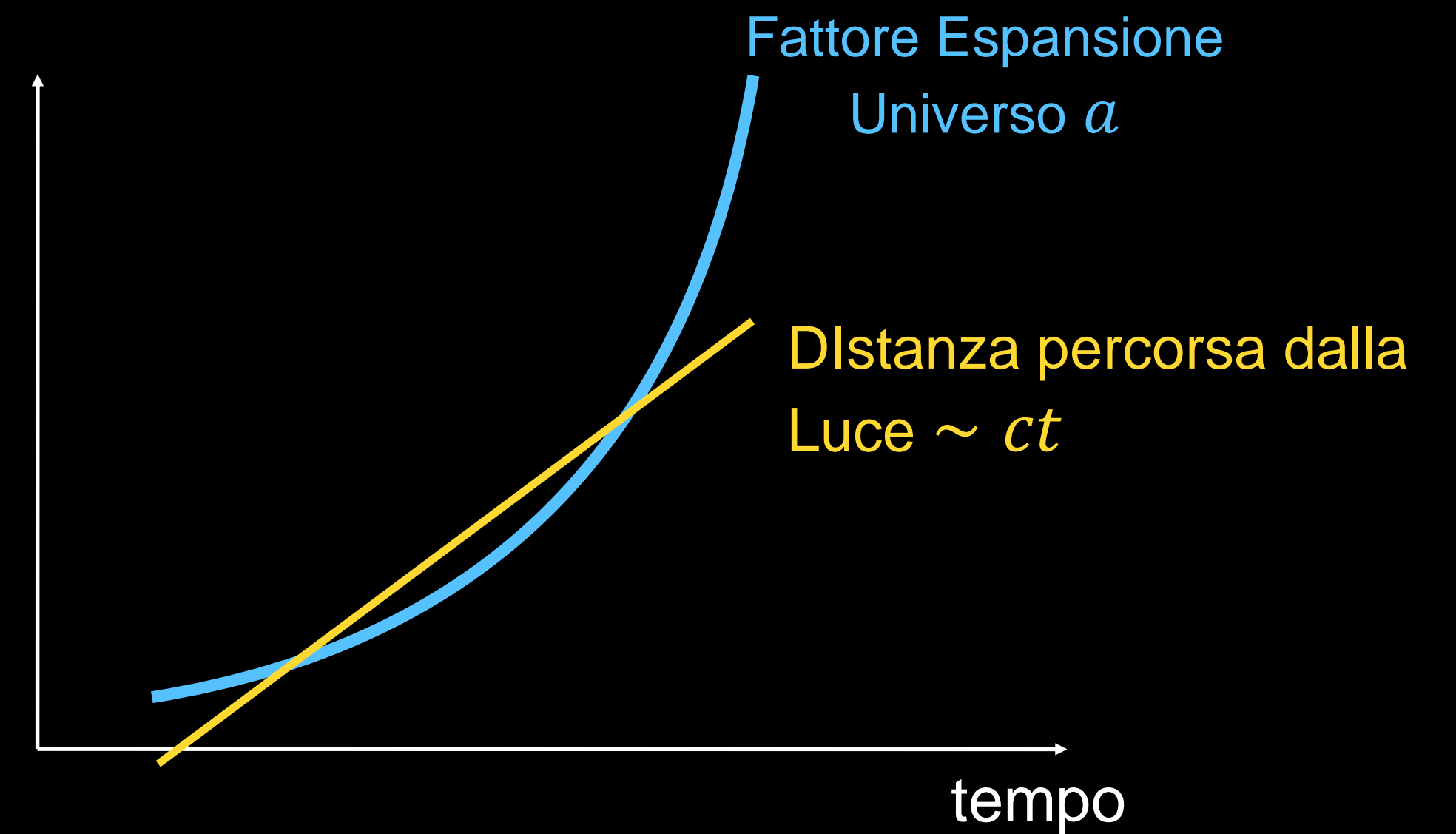
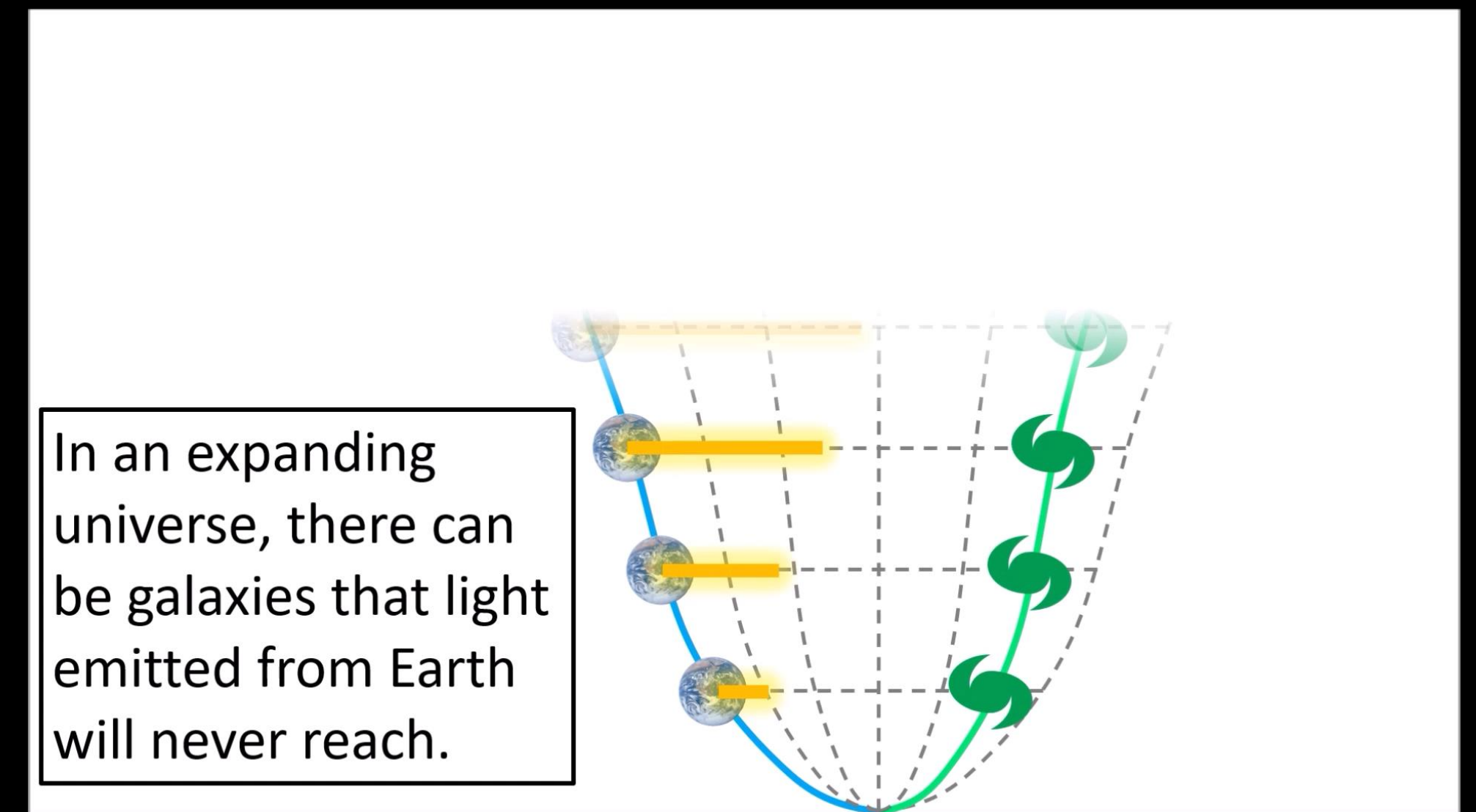
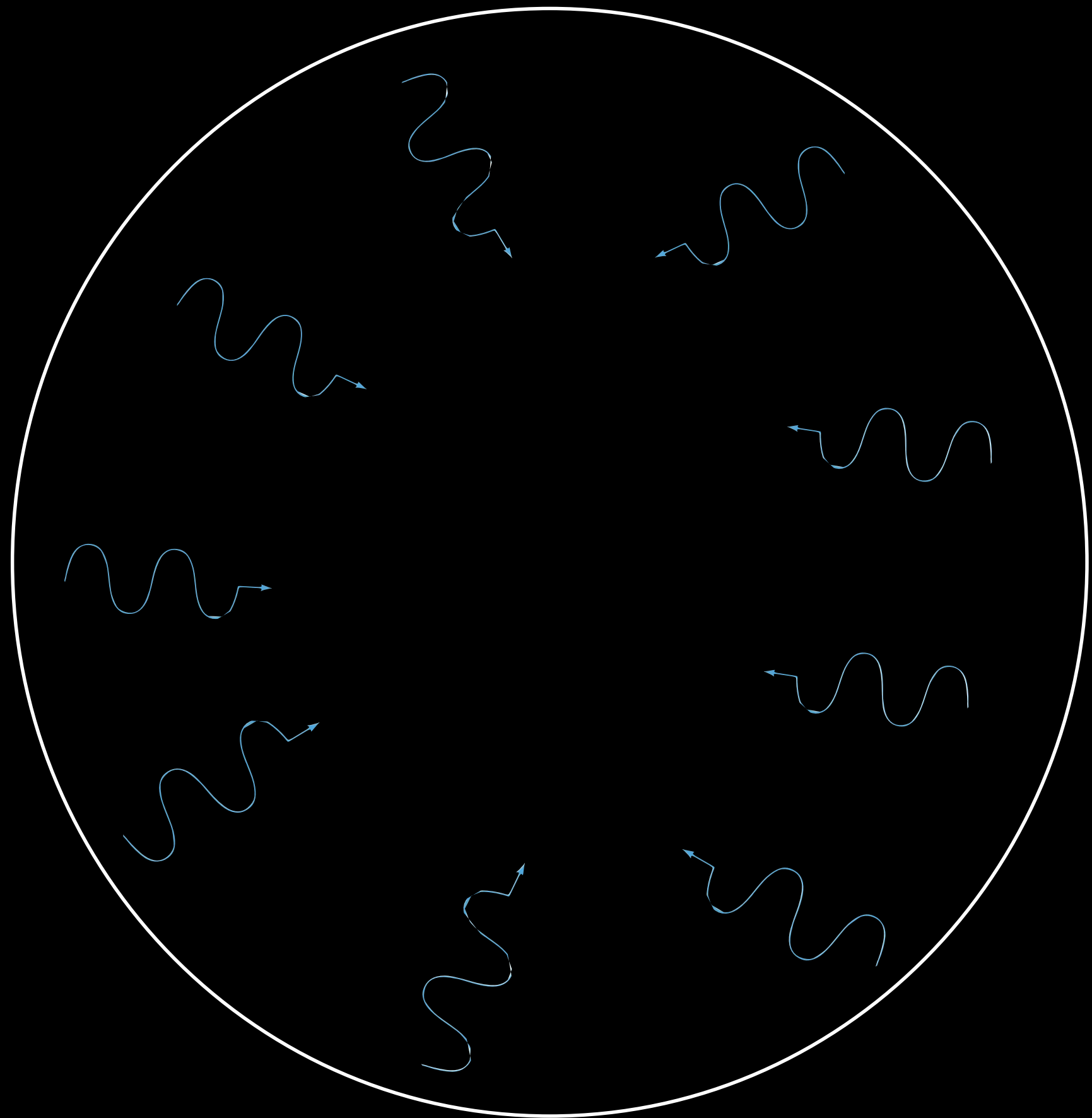
Quintessenza: campo quantistico \rightarrow dynamical Dark Energy

Dark Energy da principio oleografico

In un Universo dominato da Λ Esiste un orizzonte degli eventi

Massima distanza che un raggio di luce emesso a t in $r = 0$ puo' percorrere nel futuro. In un Universo in espansione ci possono essere regioni che non saranno mai raggiunte da un fotone emesso dalla Terra. c e' la velocity' limite per la luce, ma per la crescita del fattore di scala $a(t)$ non ci sono limiti.

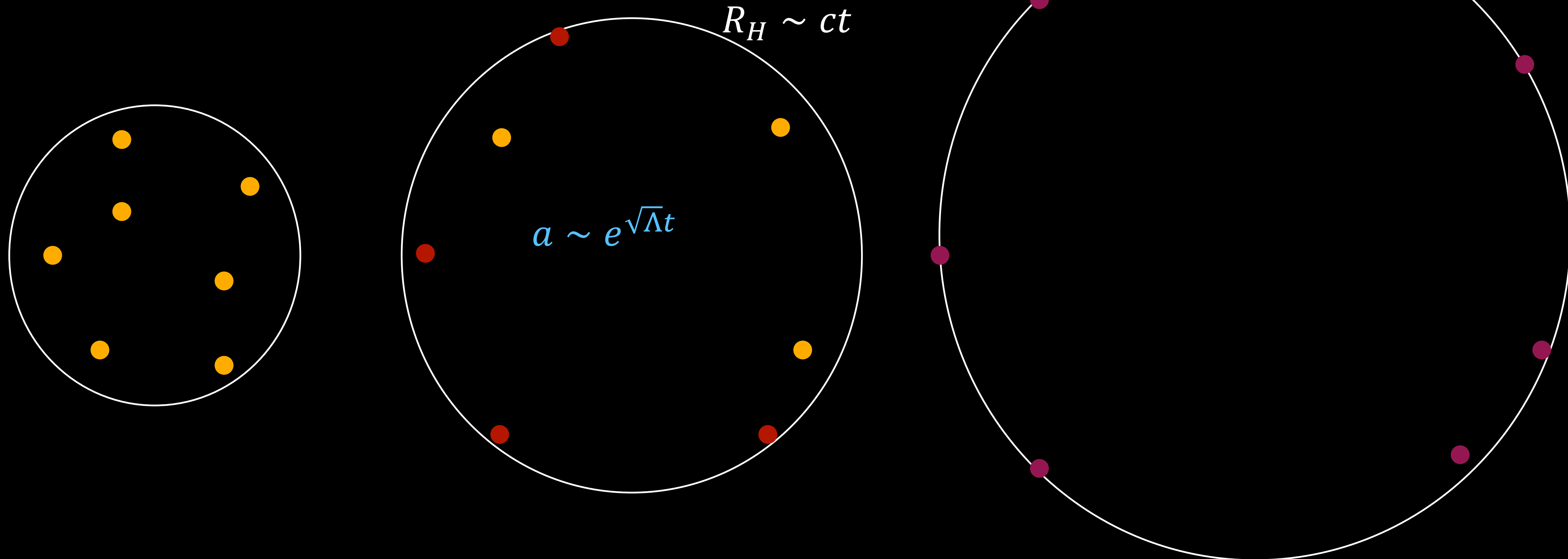
Similmente all'orizzonte dei buchi neri, non potremo mai avere accesso ad eventi al di la dell'orizzonte



In un Universo dominato da Λ Esiste un orizzonte degli eventi

Massima distanza che un raggio di luce emesso a t in $r = 0$ puo' percorrere nel futuro. In un Universo in espansione ci possono essere regioni che non saranno mai raggiunte da un fotone emesso dalla Terra. c e' la velocity' limite per la luce, ma per la crescita del fattore di scala $a(t)$ non ci sono limiti.

Similmente all'orizzonte dei buchi neri, non potremo mai avere accesso ad eventi al di la dell'orizzonte



Gravita' vs. Meccanica Quantistica: La scala di Planck

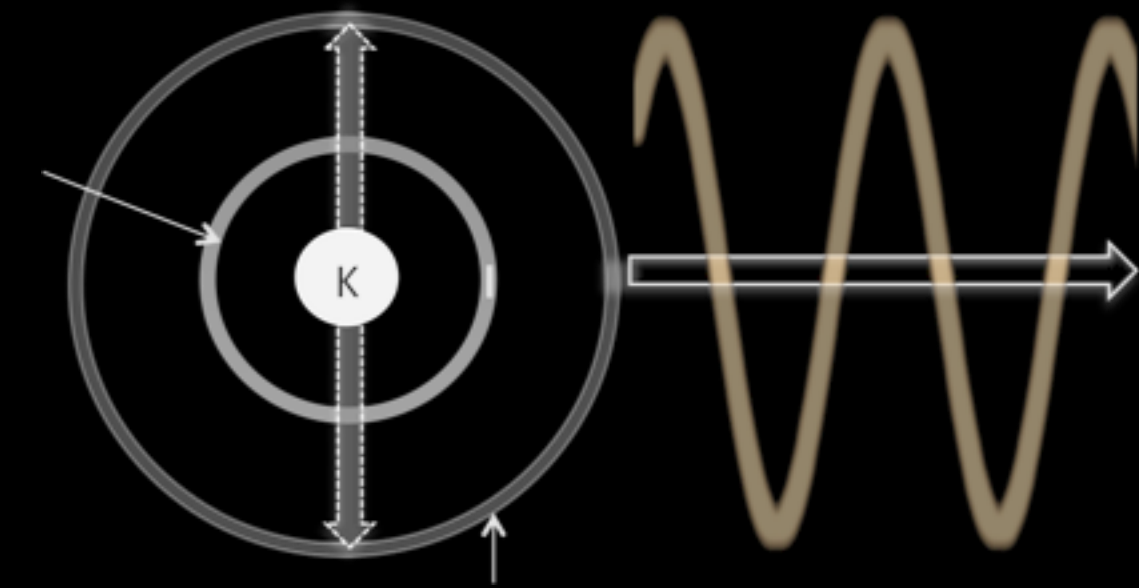
Spazio-tempo: si basa sulla nozione di distanza tra punti arbitrari

Questa diventa problematica e mal definita su scale di lunghezza molto piccole a causa dell'effetto congiunto di gravita' gravita' e meccanica quantistica.

Per sondare regioni di dimensione Δx via via piu' piccole occorre usare lunghezze d'onda via via piu' piccole $\lambda \sim \Delta x$

Per un fotone fotone energia $E = h\nu$ e' legata alla frequenza e quindi alla lunghezza d'onda λ . $E \propto h/\lambda \rightarrow E \sim h/\Delta x$

(per questo si usano acceleratori di particelle !)



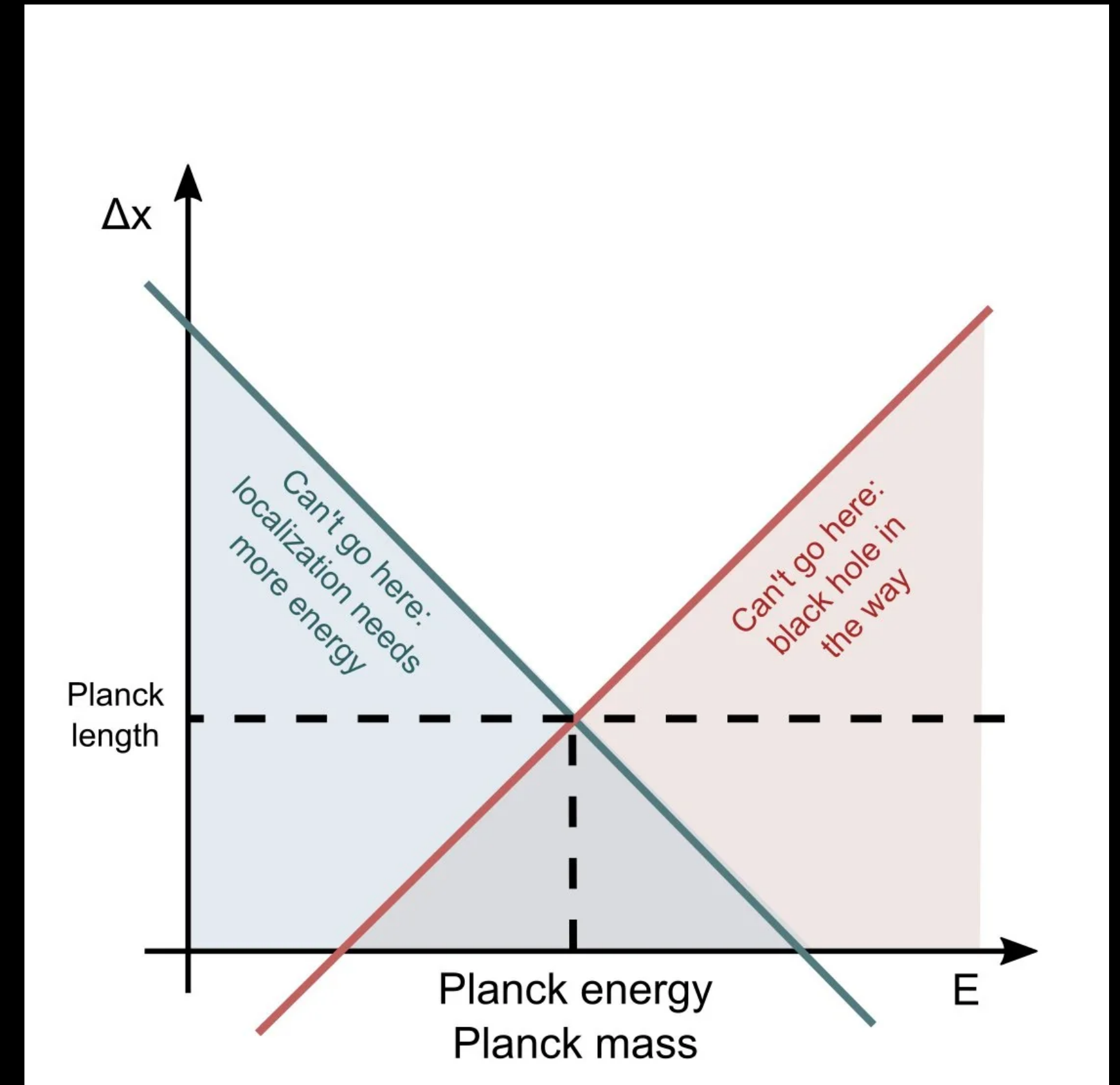
Gravita' vs. Meccanica Quantistica: La scala di Planck

Spazio-tempo: si basa sulla nozione di distanza tra punti arbitrari

Questa diventa problematica e mal definita su scale di lunghezza molto piccole a causa dell'effetto congiunto di gravita' gravita' e meccanica quantistica.

$$E \sim h/\Delta x$$

Per Δx sufficientemente piccola l'energia che devo concentrare in tale regione e' talmente grande che si forma un buco nero.



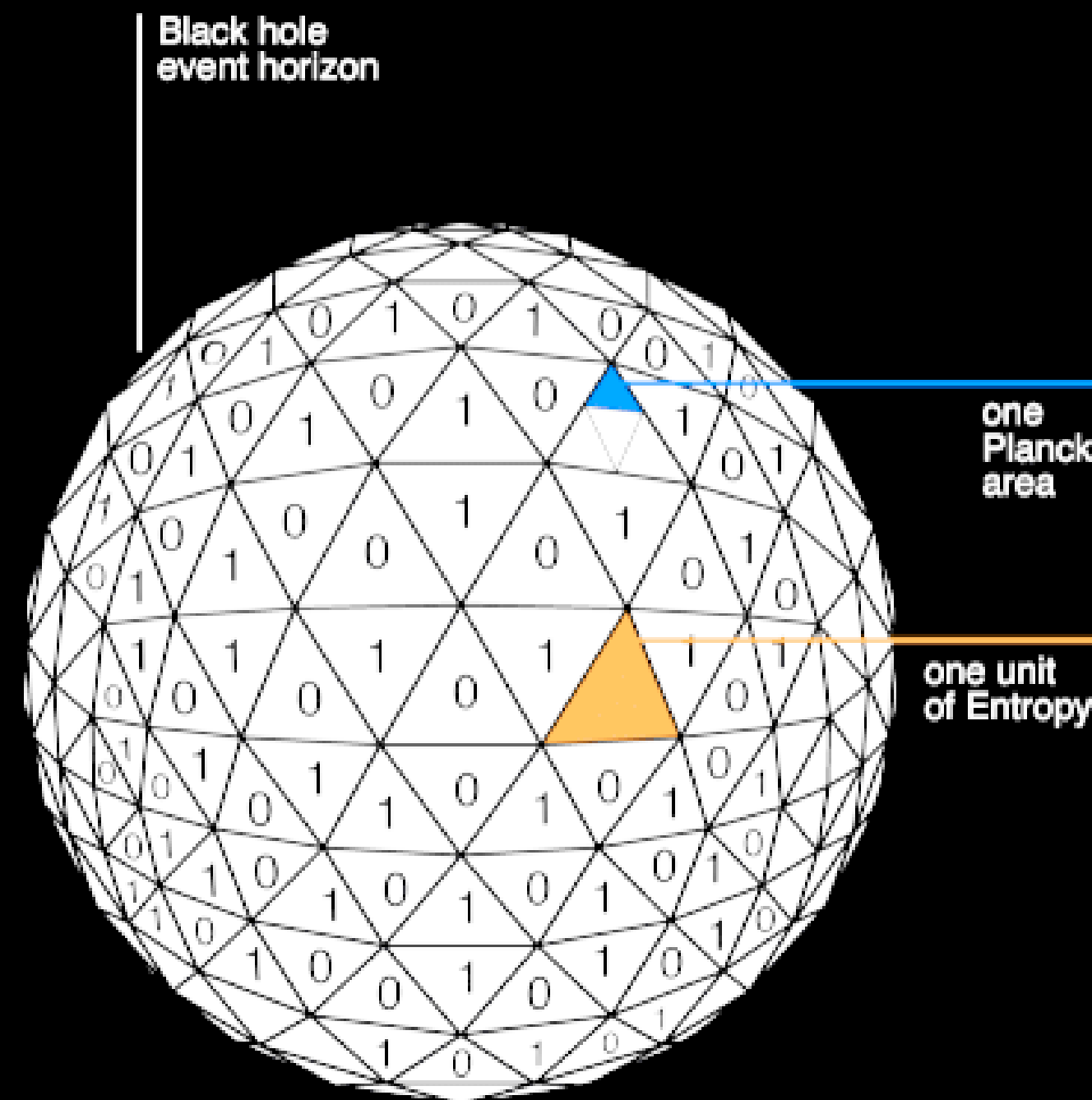
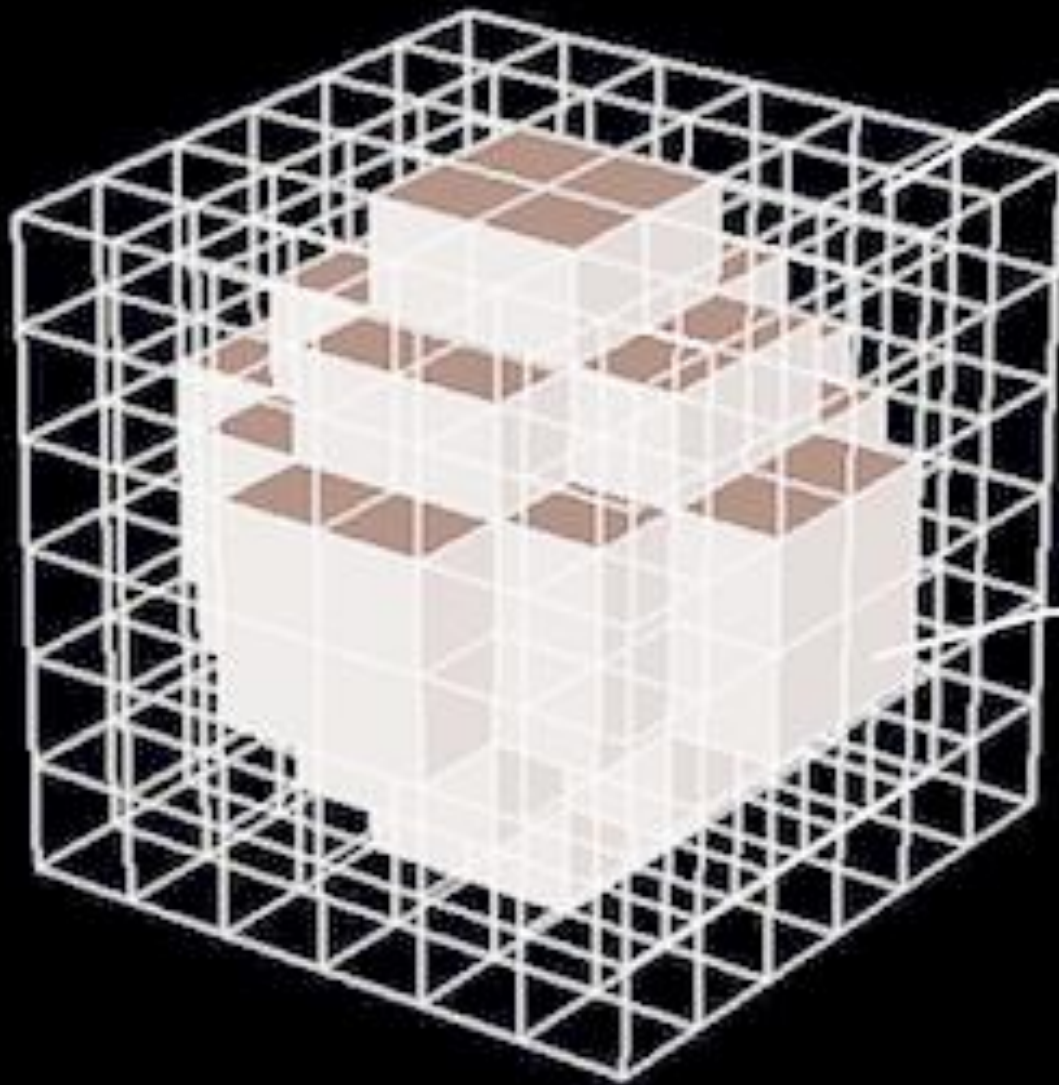
Scala di Planck

Questo definisce una dimensione minima $\lambda_p = \sqrt{hG/2\pi c^3} \approx 10^{-33} cm$

Ed una energia che - convertita in massa attraverso $E = Mc^2$ - corrisponde ad una massa $M_p = \sqrt{\frac{ch}{2\pi G}} = 22\mu g$

Principio Olografico

Non solo vi e' una partizione in regioni di dimensione l_p , ma sembra che tale partizione si riferisca alla informazione sulla sua superficie della regione considerata!



$$S \leq \frac{kA}{4\pi l_p^2}$$

Entropia Black Hole: informazione su tutto cio' che e' caduto nel BH (entropia come "informazione nascosta").

Puo' essere al massimo uguale alla la superficie del BH misurata in pixel della dimensione della lunghezza di Planck (limite di Beckenstein)

Poiche' il contenuto di un volume di spazio puo' essere compattato a formare un BH, **la massima informazione per descrivere una regione di spazio e' quella contenuta sulla superficie di tale volume.**

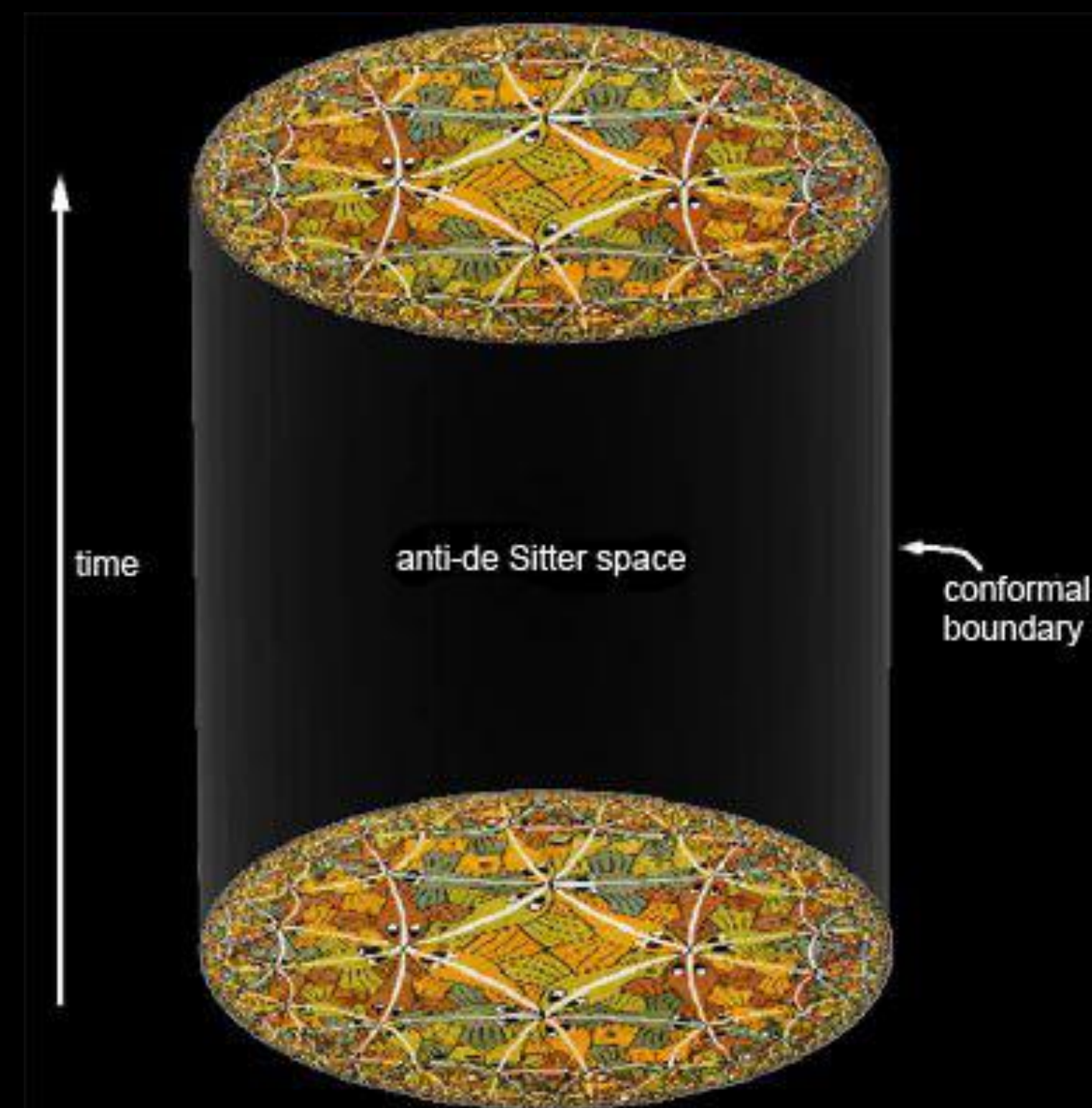
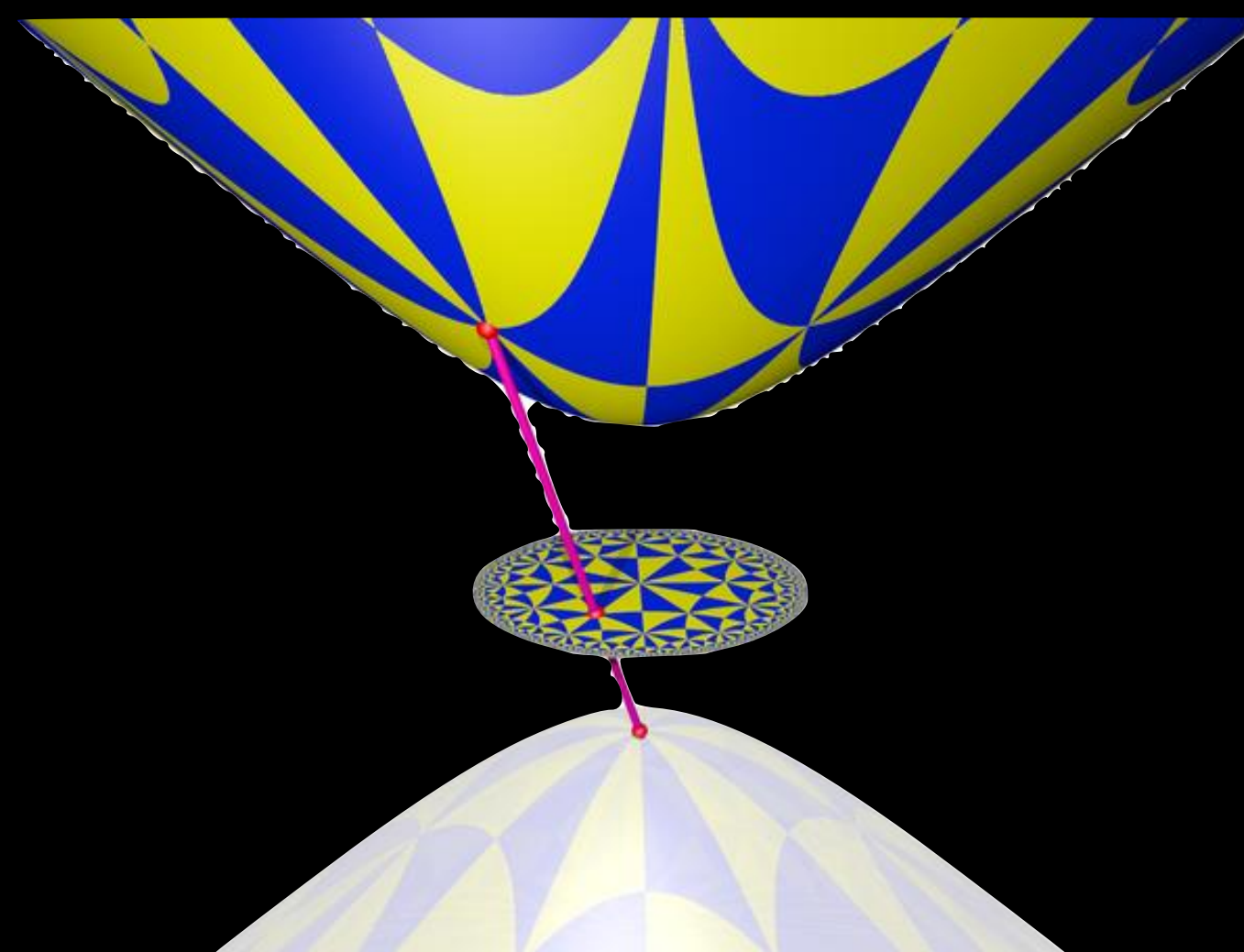
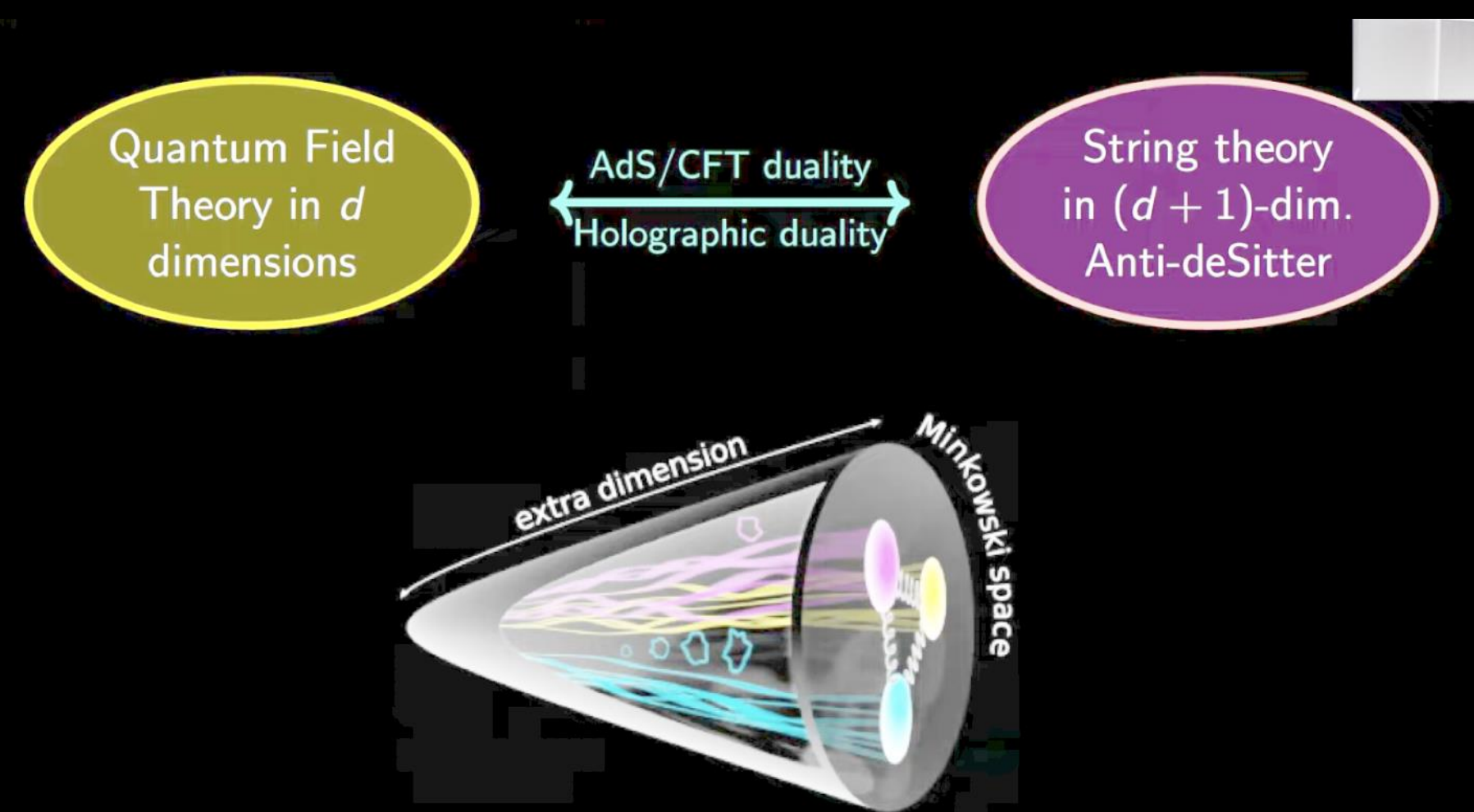
L'informazione massima che descrive una regione in un certo volume e' codificata sulla superficie di tale volume

Principio Olografico

Estensione ad intero universo corroborata da:

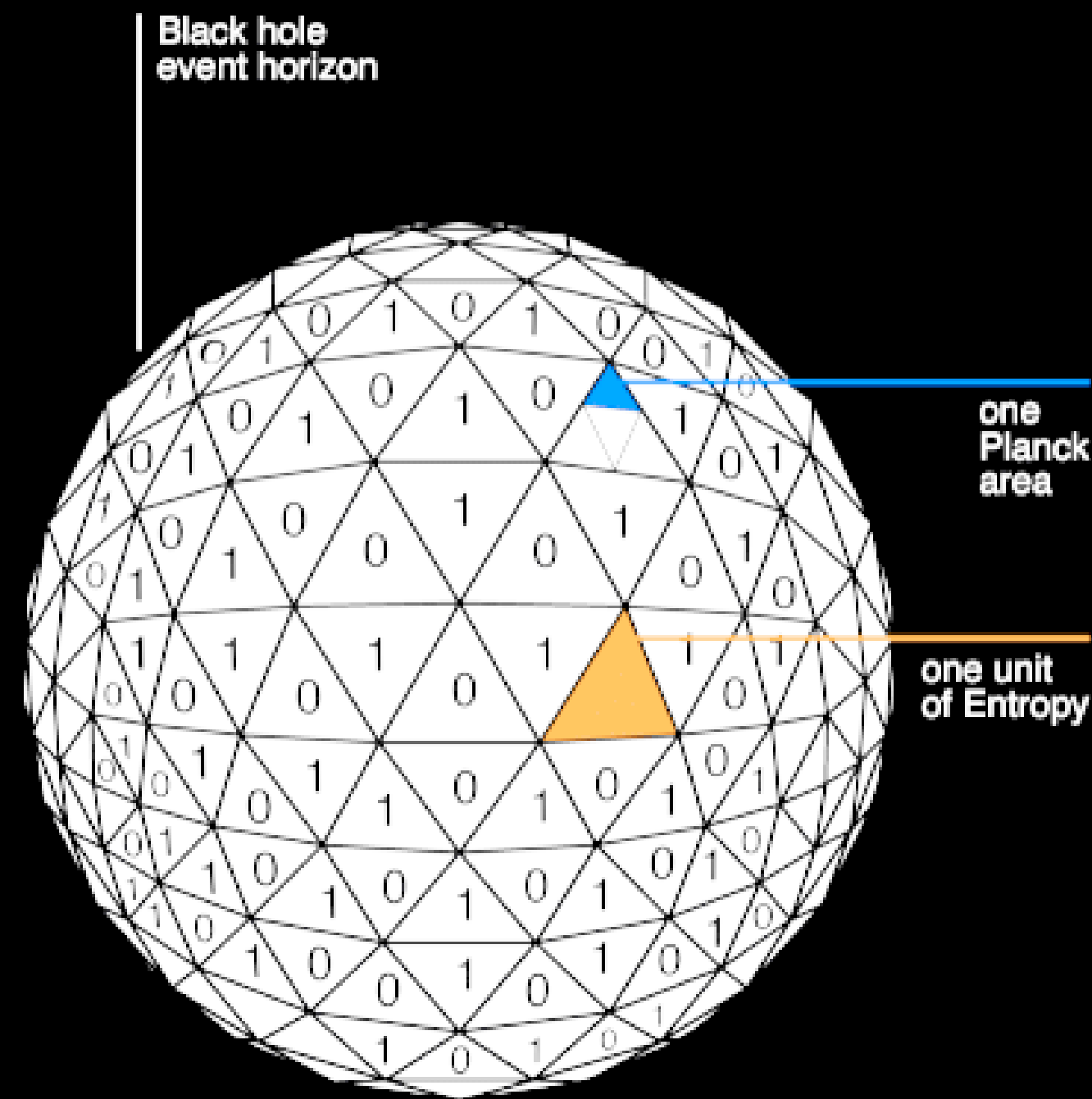
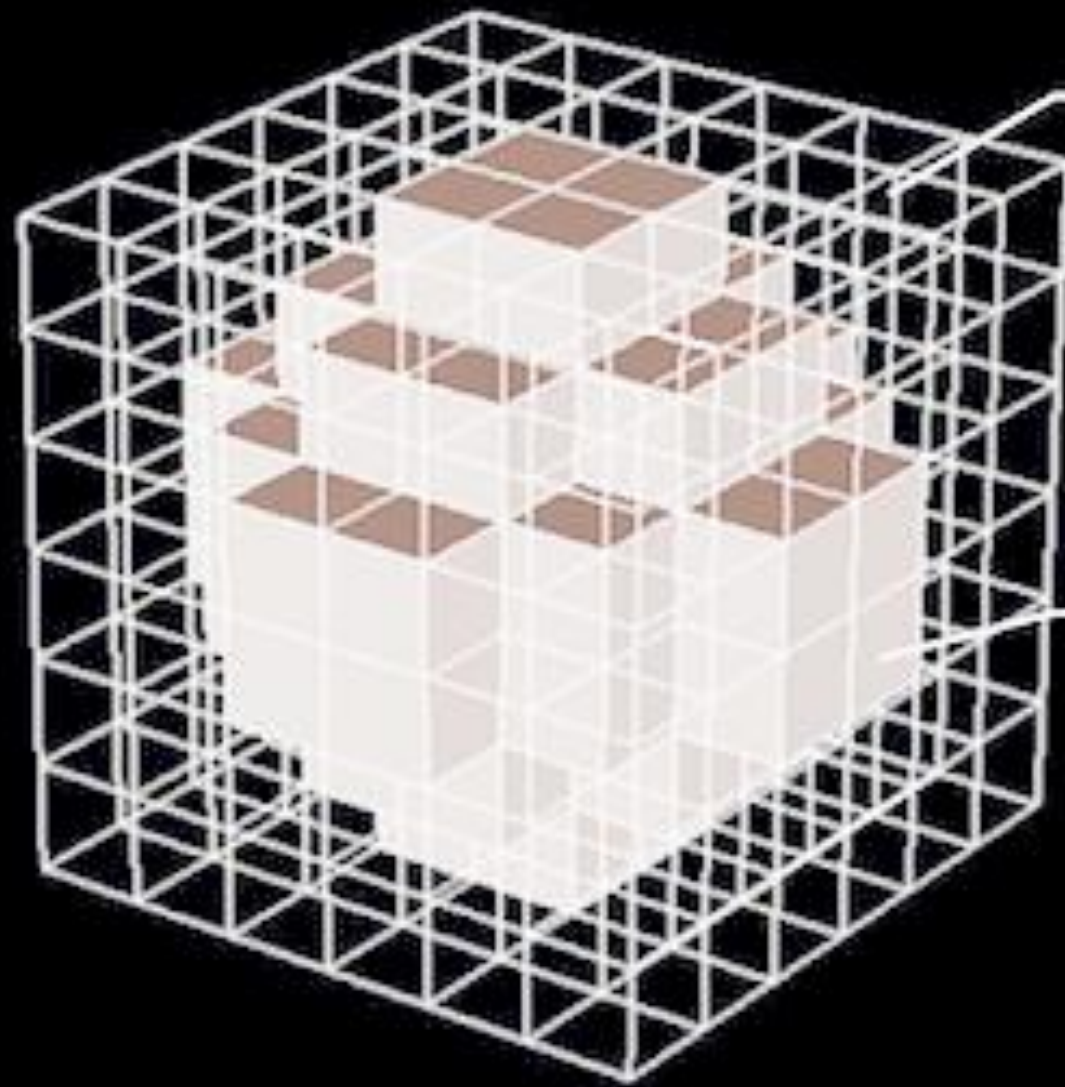
Maldacena 1998 ha mostrato che la gravita' all'interno del volume puo' essere descritta come emergente dal comportamento di campi quantistici sulla superficie **SE** lo spazio nel volume e' **Anti-de Sitter** (*Paper piu' citato nella storia della fisica teorica*)....

Codificato nelle interazioni e nelle configurazioni dei campi quantistici sulla superficie c'e' il comportamento dell'intero volume dell'Universo



Principio Olografico

Non solo vi e' una partizione in regioni di dimension l_p ... ma sulla sua superficie !



$$S \leq \frac{kA}{4\pi l_p^2} = S_A$$

Cohen, Kaplan, Nelson 1999

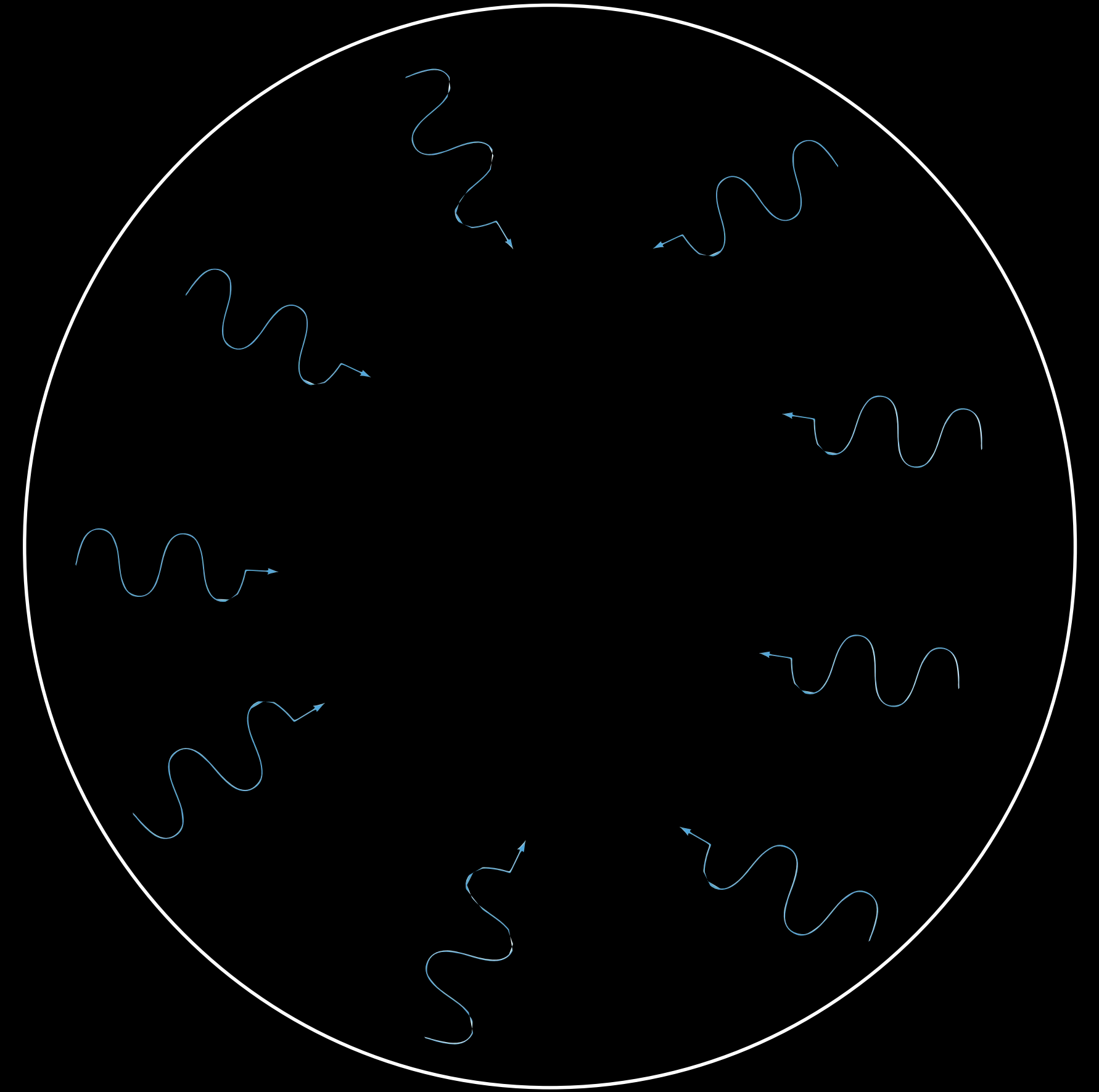
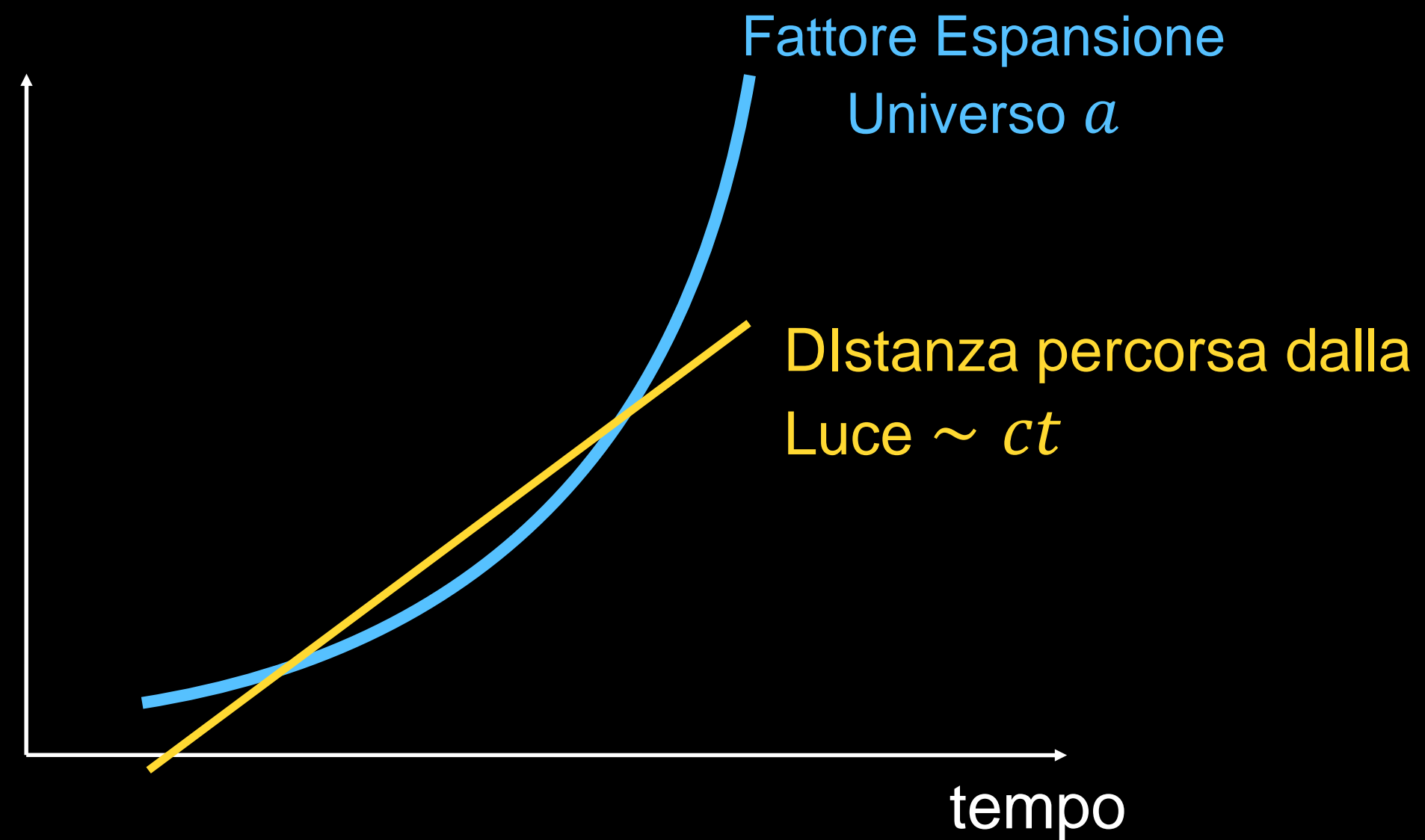
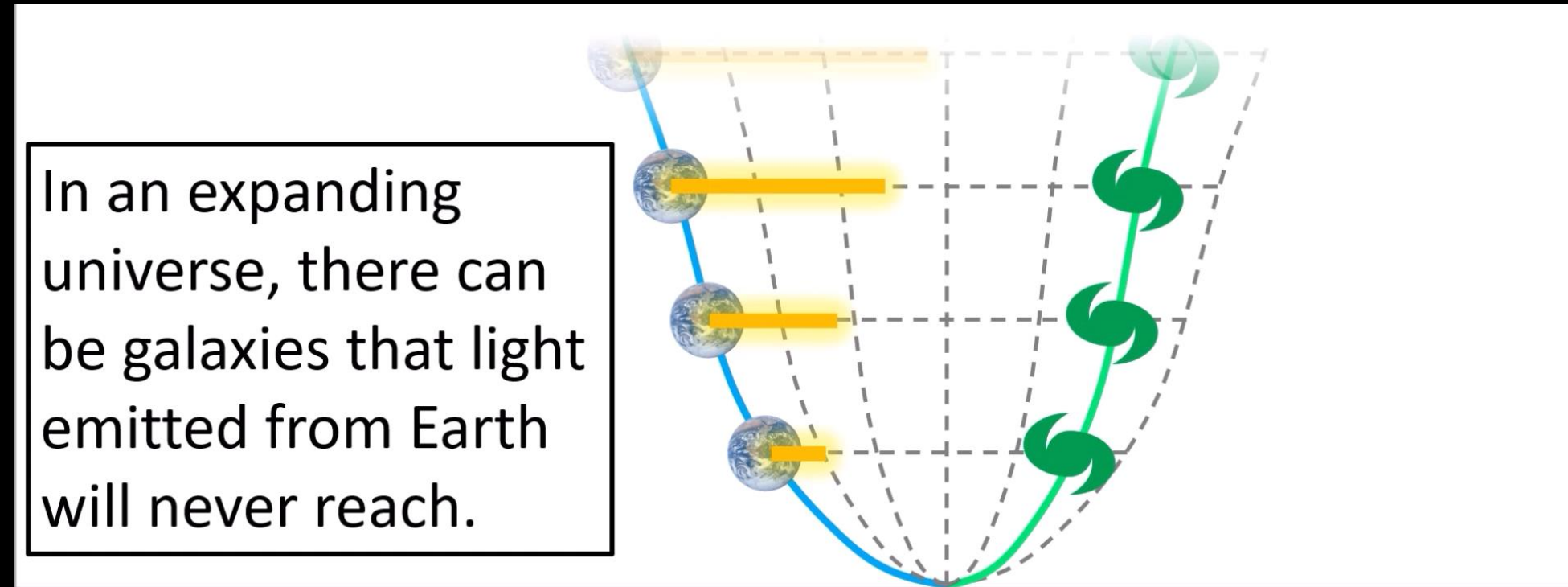
Se si estende il limite all'entropia derivato nel caso di BH all'intero Universo si ha

$$\rho_\Lambda \leq \frac{S_A}{L^4} \sim \frac{M_p^2 L^2}{L^4} \sim \frac{M_p^2}{L^2}$$

Assumendo come "boundary" l'orizzonte degli eventi ($L =$ raggio orizzonte) si ottiene la densità' di energia ρ_Λ simile a quella osservata !

In un Universo dominato da Λ Esiste un orizzonte degli eventi

Massima distanza che un raggio di luce emesso a t in $r = 0$ puo' percorrere nel futuro. In un Universo in espansione ci possono essere regioni che non saranno mai raggiunte da un fotone emesso dalla Terra. c e' la velocity' limite per la luce, ma per la crescita del fattore di scala $a(t)$ non ci sono limiti.



In un Universo dominato da Λ Esiste un orizzonte degli eventi

In futuro

L'Universo si espande indefinitamente

Orizzonte delle particelle

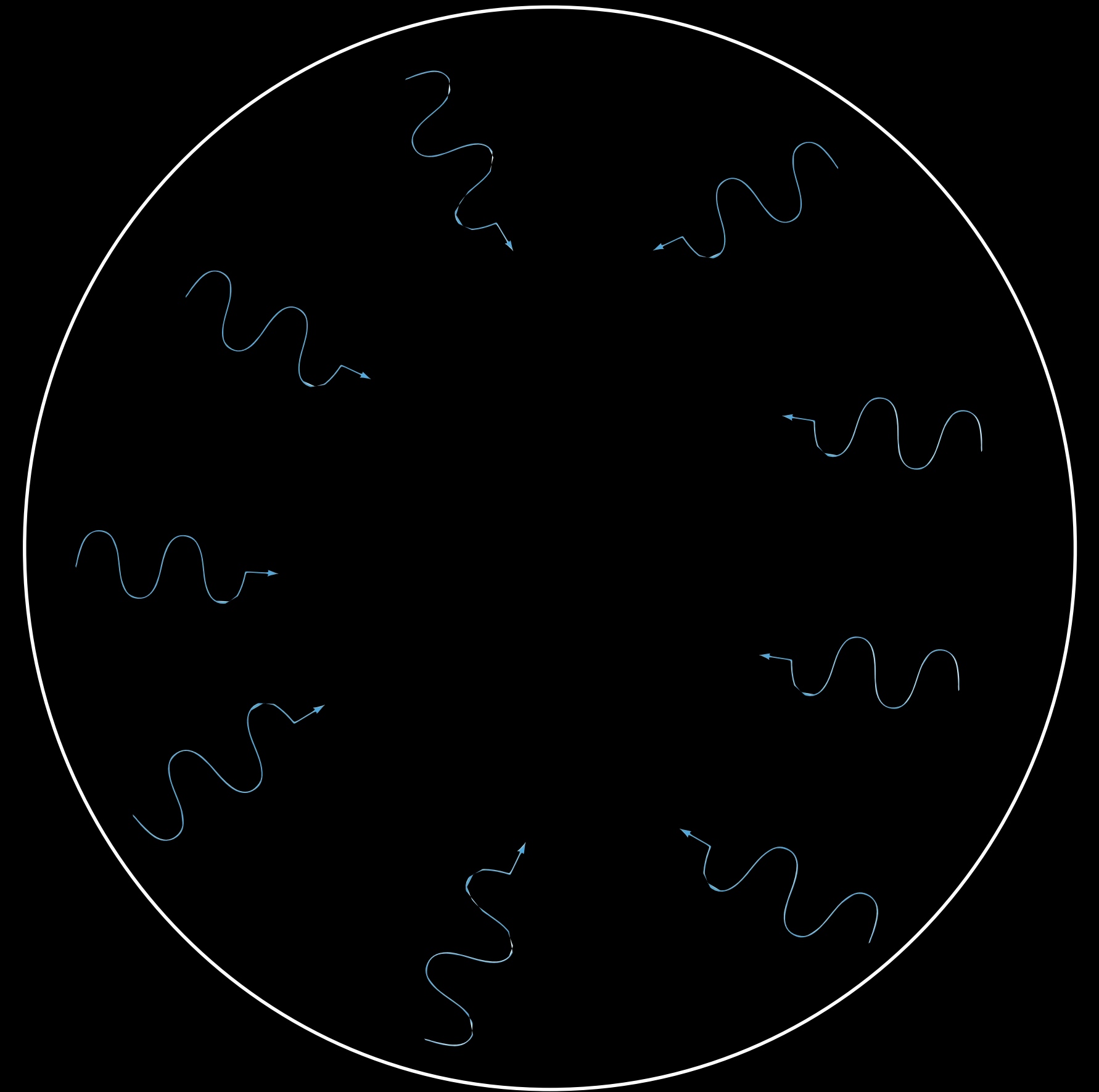
Il vuoto quantistico ha una temperatura

Tempo infinito

Lo spazio ci appare finito

Fluttuazioni termiche

- $T = H/2\pi$ ed entropia $S = 3\pi/G\Lambda$ associate all'orizzonte
- Fluttuazioni quantistiche sull'orizzonte: analogo al caso dei BH



In un Universo dominato da Λ Esiste un orizzonte degli eventi

In futuro

L'Universo si espande indefinitamente

Tempo infinito

Orizzonte delle particelle

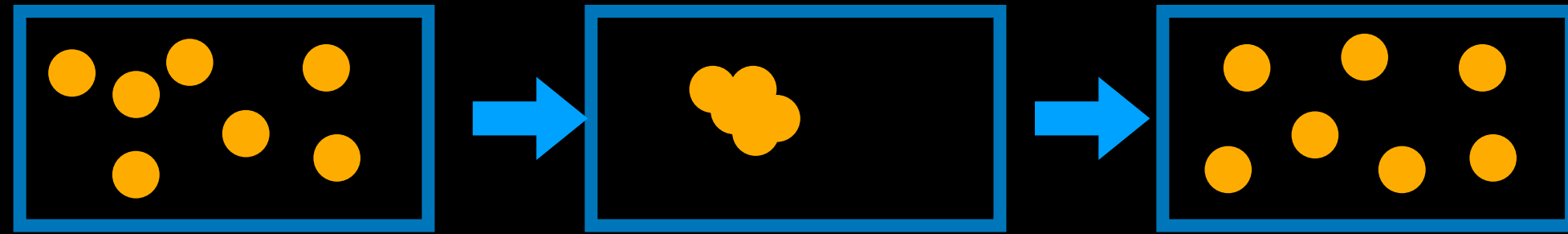
Lo spazio ci appare finito

Il vuoto quantistico ha una temperatura

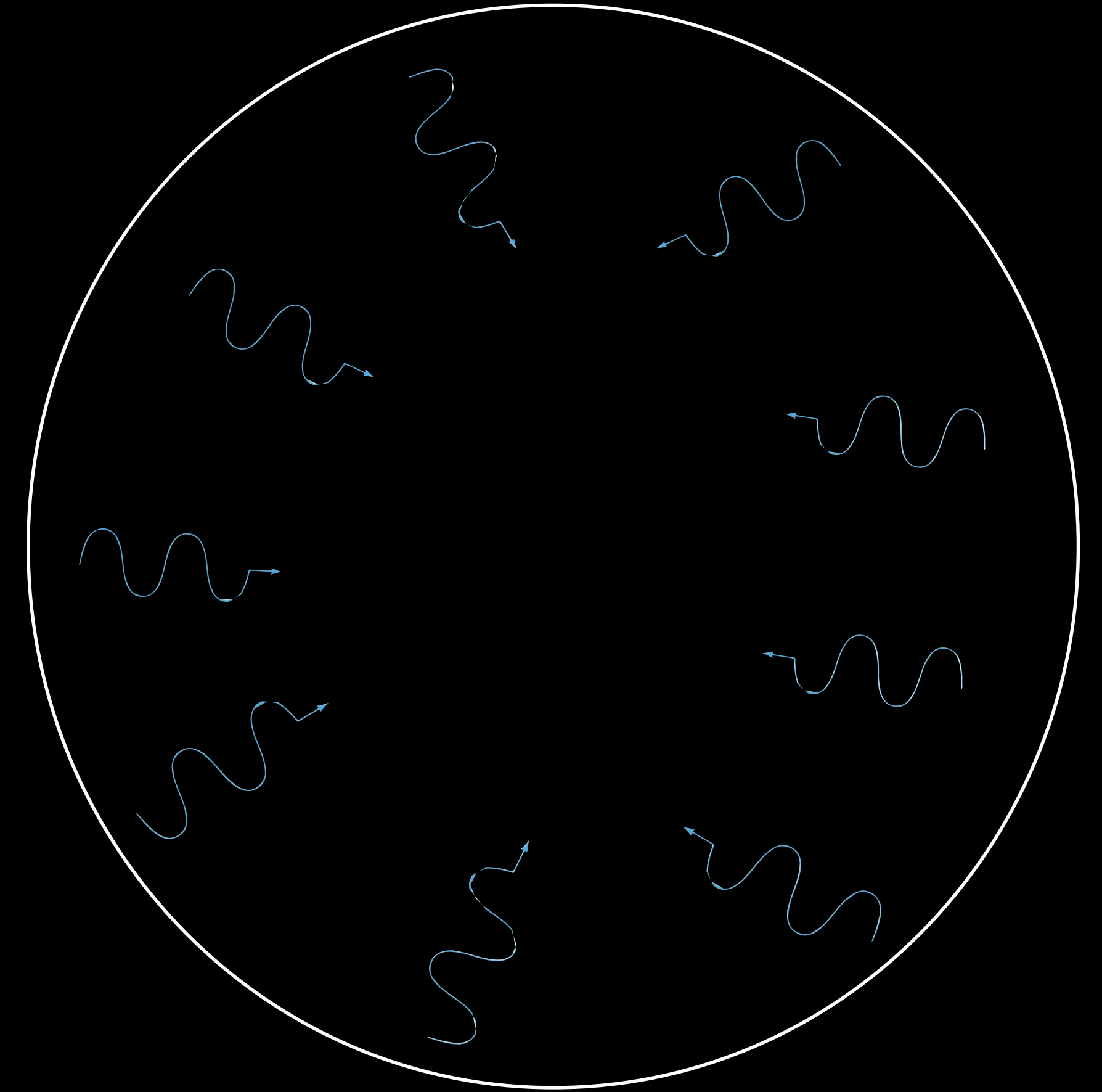
Fluttuazioni termiche

L'Universo si comporta come un volume finito riempito di gas

Un sistema del genere e' soggetto a fluttuazioni statistiche di entropia (Boltzmann fluctuations)



Occasional fluttuazioni verso configurazioni bassa entropia



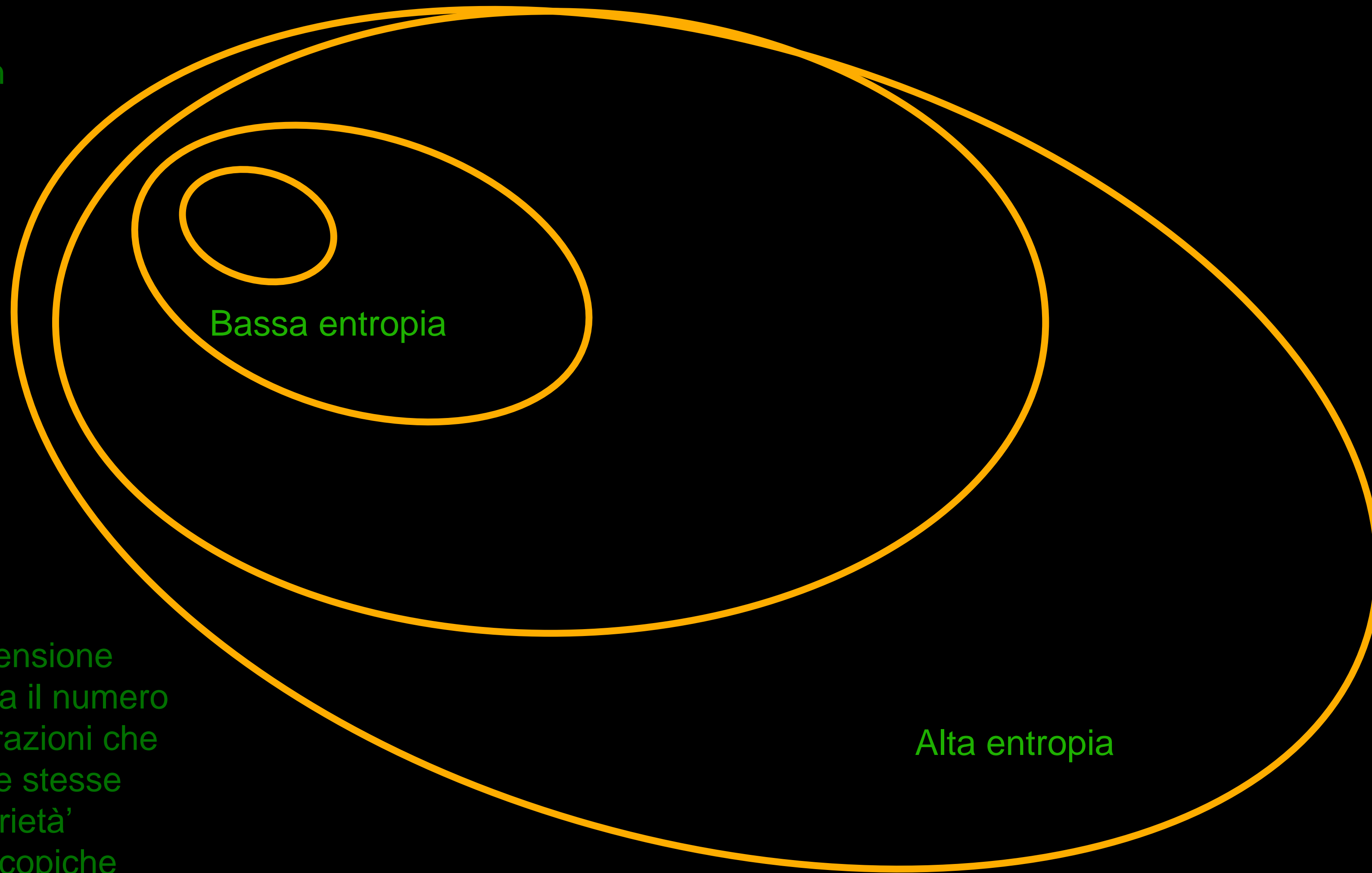
L'entropia quantifica il numero di configurazioni
Che hanno lo stesso aspetto macroscopico

$$S = k \log W$$



L. Boltzmann

Tutte le possibili
configurazioni di un
sistema



Bassa entropia

Alta entropia

La dimensione
rappresenta il numero
di configurazioni che
hanno le stesse
proprietà
macroscopiche

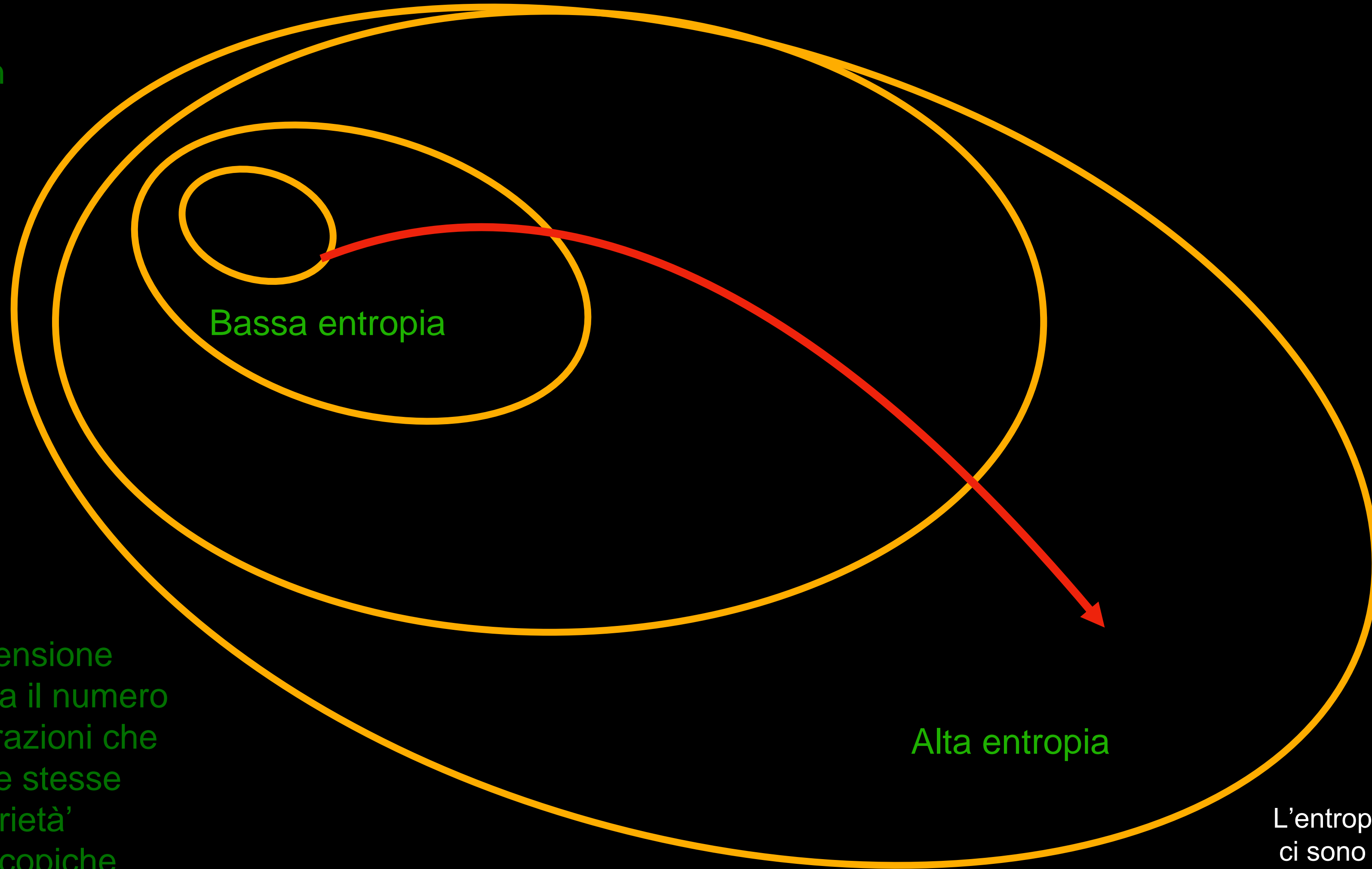
L'entropia quantifica il numero di configurazioni
Che hanno lo stesso aspetto macroscopico

$$S = k \log W$$



L. Boltzmann

Tutte le possibili
configurazioni di un
sistema



Bassa entropia

Alta entropia

La dimensione
rappresenta il numero
di configurazioni che
hanno le stesse
proprietà
macroscopiche

L'entropia aumenta semplicemente perche'
ci sono molto piu' modi (configurazioni) ad
alta entropia che a bassa entropia

Freccia del Tempo

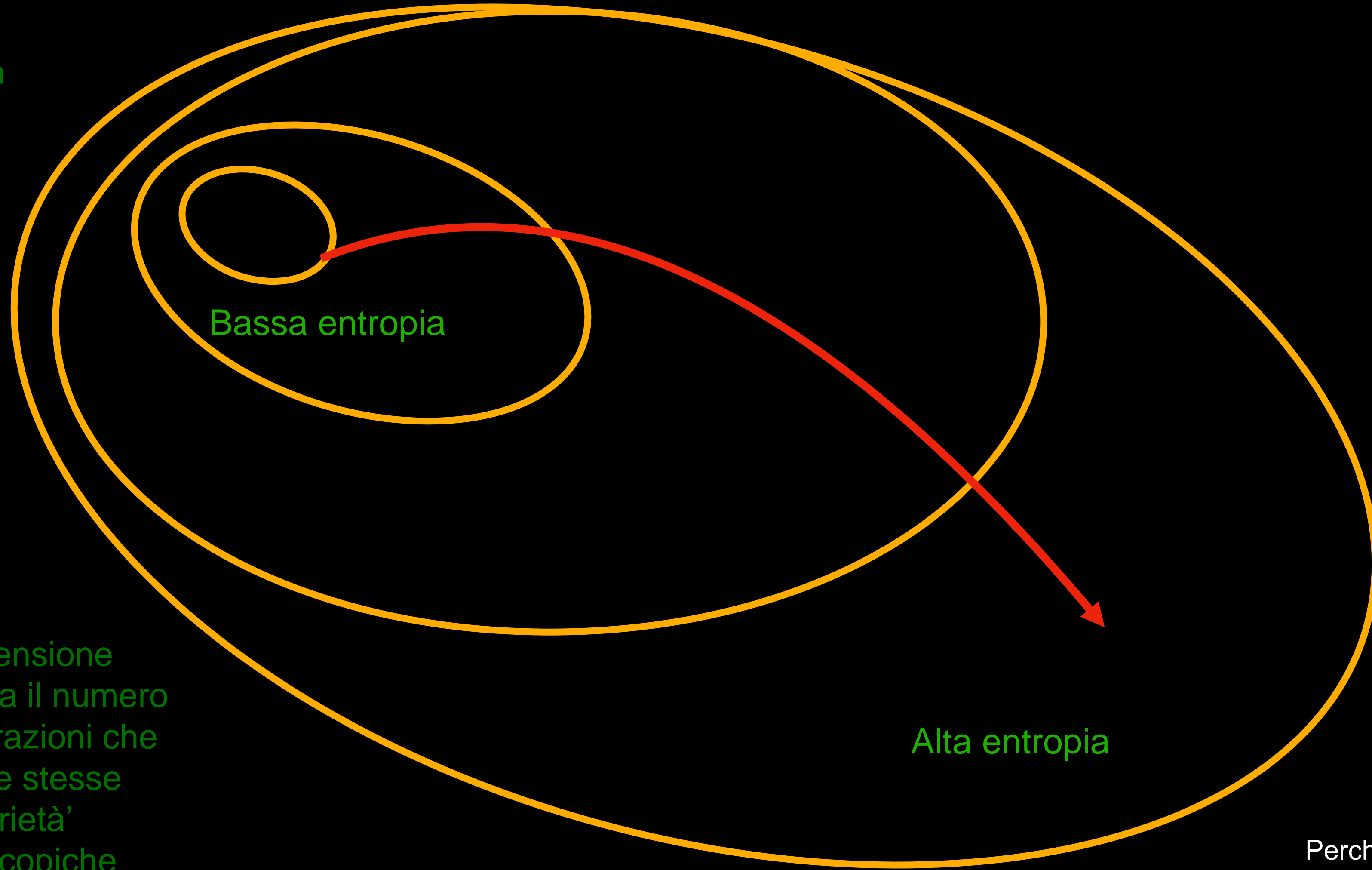
L'entropia quantifica il numero di configurazioni
Che hanno lo stesso aspetto macroscopico

$$S = k \log W$$



L. Boltzmann

Tutte le possibili
configurazioni di un
sistema



Bassa entropia

Alta entropia

La dimensione
rappresenta il numero
di configurazioni che
hanno le stesse
proprietà
macroscopiche

Perche' S era cosi bassa inizialmente



“For some reason, the universe at one time had a very low entropy for its energy content, and since then the entropy has increased...

[The arrow of time] cannot be completely understood until the *mystery of the beginnings of the history of the universe* are reduced still further from speculation to scientific understanding.”

–Feynman Lectures on Physics, Volume I, p. 46–9.



In un Universo dominato da Λ Esiste un orizzonte degli eventi

In futuro

L'Universo si espande indefinitamente

Tempo infinito

Orizzonte delle particelle

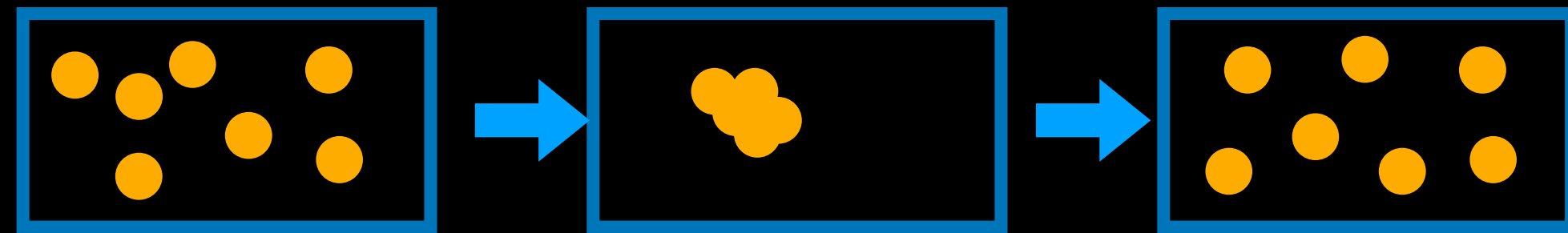
Lo spazio ci appare finito

Il vuoto quantistico ha una temperatura

Fluttuazioni termiche

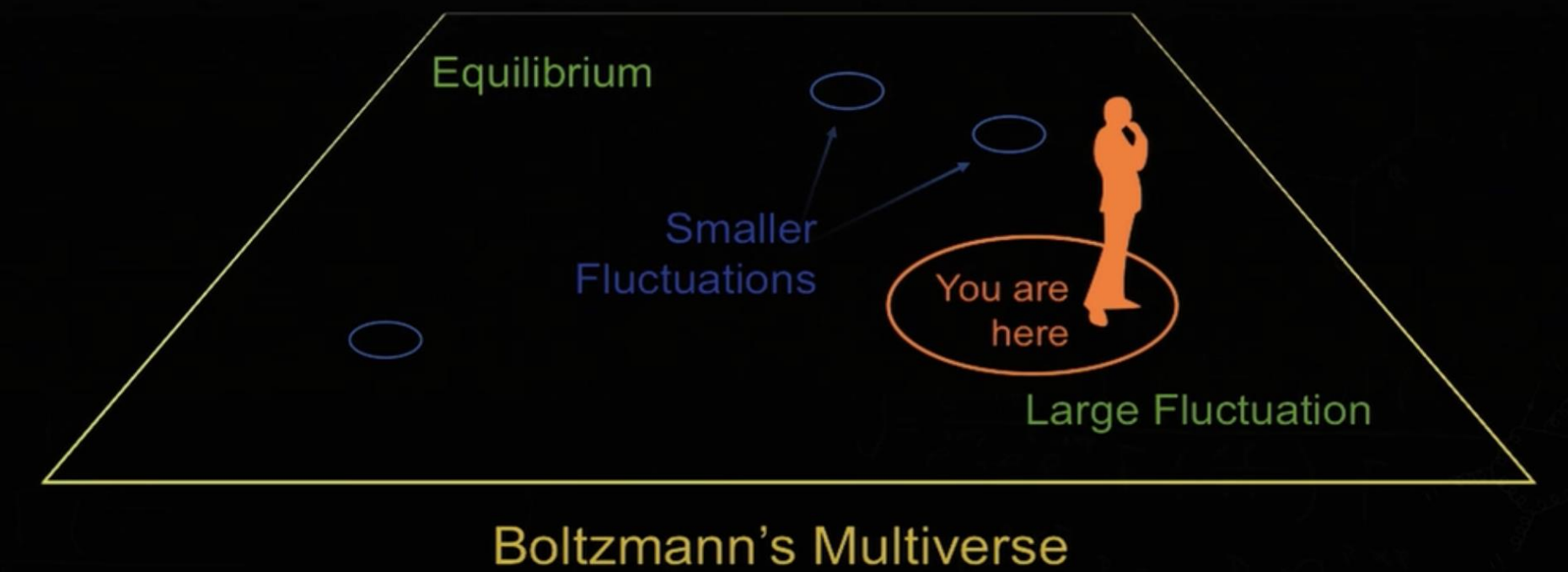
L'Universo si comporta come un volume finito riempito di gas

Un sistema del genere e' soggetto a fluttuazioni statistiche di entropia (Boltzmann fluctuations)



Occasional fluttuazioni verso configurazioni bassa entropia

Forse il nostro Universo e' solo una di queste fluttuazioni



In un Universo dominato da Λ Esiste un orizzonte degli eventi

In futuro

L'Universo si espande indefinitamente

Tempo infinito

Orizzonte delle particelle

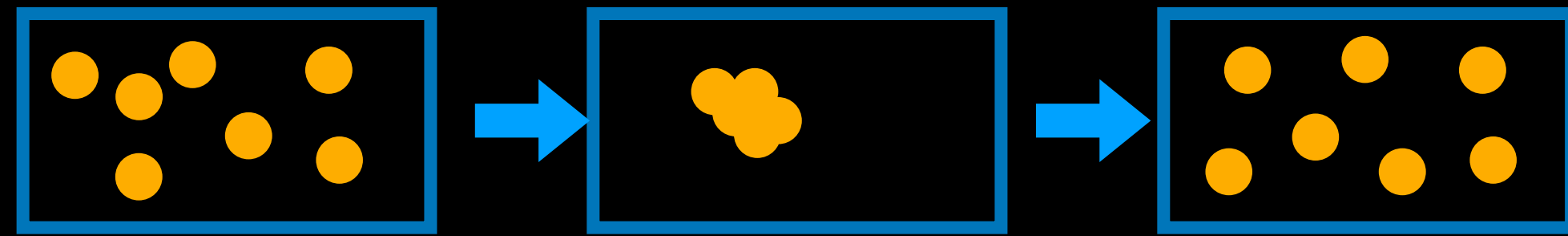
Lo spazio ci appare finito

Il vuoto quantistico ha una temperatura

Fluttuazioni termiche

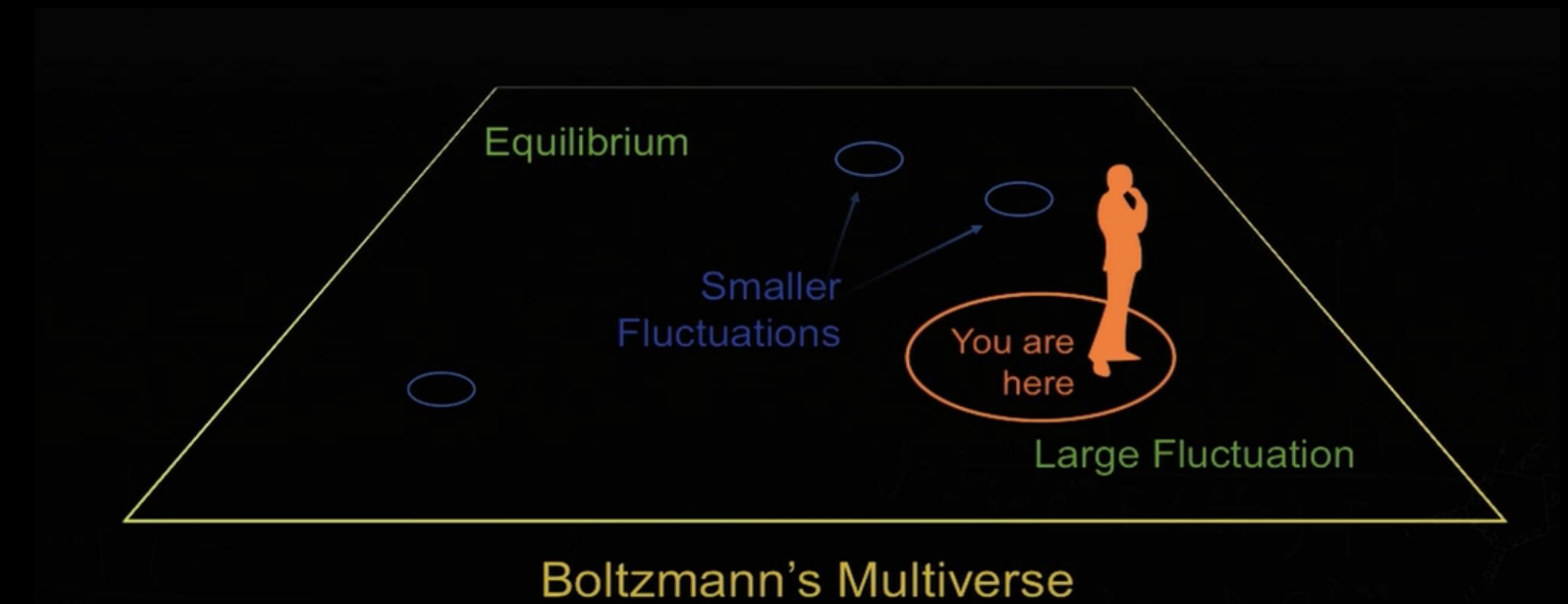
L'Universo si comporta come un volume finito riempito di gas

Un sistema del genere e' soggetto a fluttuazioni statistiche di entropia (Boltzmann fluctuations)



Occasional fluttuazioni verso configurazioni bassa entropia

Forse il nostro Universo e' solo una di queste fluttuazioni



Predizione: la fluttuazione necessaria per produrre noi ha la massima probabilità' di essere minimale

Con massima probabilità', le nostra percezioni risultano da una fluttuazione random

In un Universo dominato da Λ Esiste un orizzonte degli eventi

In futuro

L'Universo si espande indefinitamente

Orizzonte delle particelle

Il vuoto quantistico ha una temperatura

Tempo infinito

Lo spazio ci appare finito

Fluttuazioni termiche

Forse il nostro Universo e' solo una di queste fluttuazioni

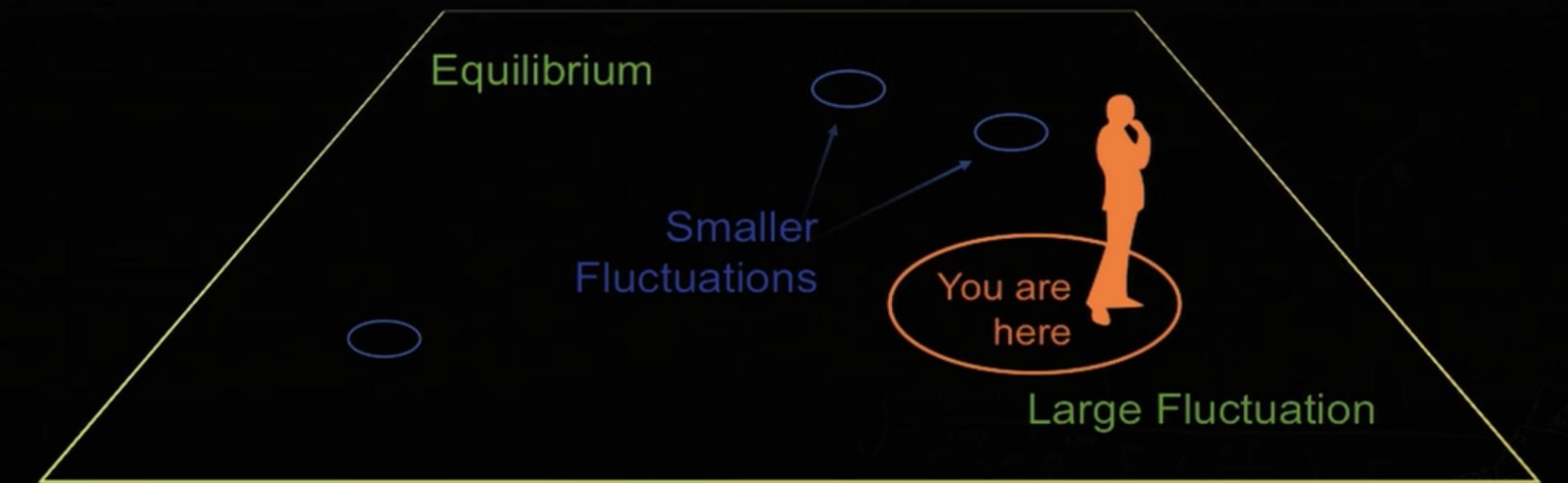


“From the hypothesis that the world is a fluctuation, all of the predictions are that if we look at a part of the world we have never seen before, we will find it mixed up, and not like the piece we just looked at. If our order were due to a fluctuation, we would not expect order anywhere but where we have just noticed it. We therefore conclude that the universe is not a fluctuation.”

–Feynman Lectures on Physics, Volume I, p. 46–8.



50



Boltzmann's Multiverse

Predizione: la fluttuazione necessaria per produrre noi ha la massima probabilità' di essere minimale

Con massima probabilità', le nostre percezioni risultano da una fluttuazione random

Falsificata: vediamo un Universo altamente strutturato molto oltre il minimo per produrre osservatori, originato attraverso una storia complessa

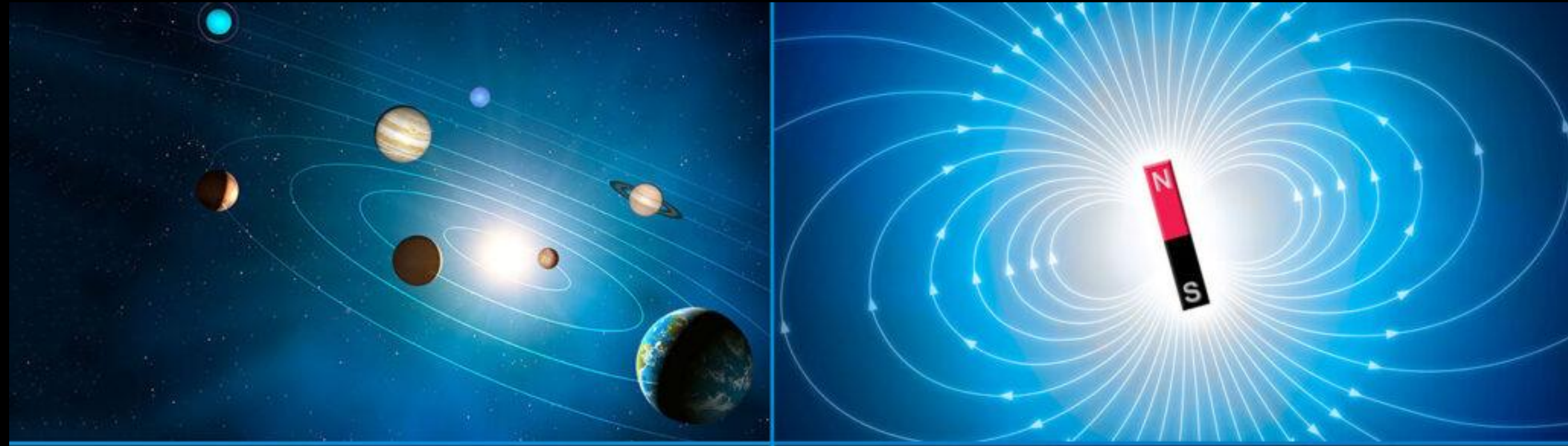
Al momento non c'è una spiegazione condivisa

Origine del Big Bang da uno stato precedente ?

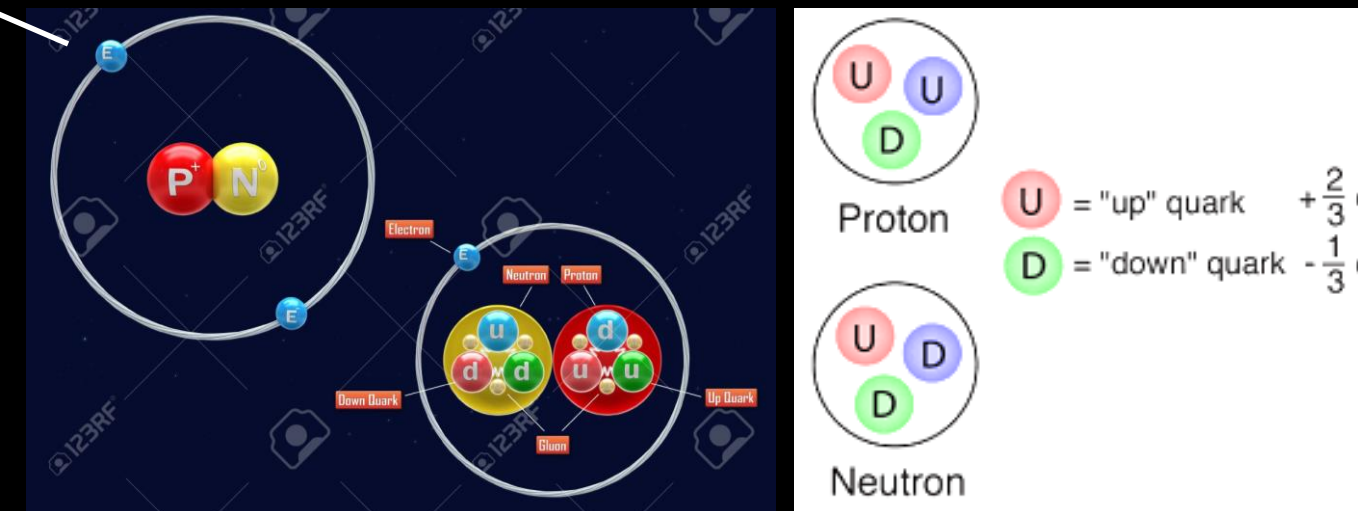
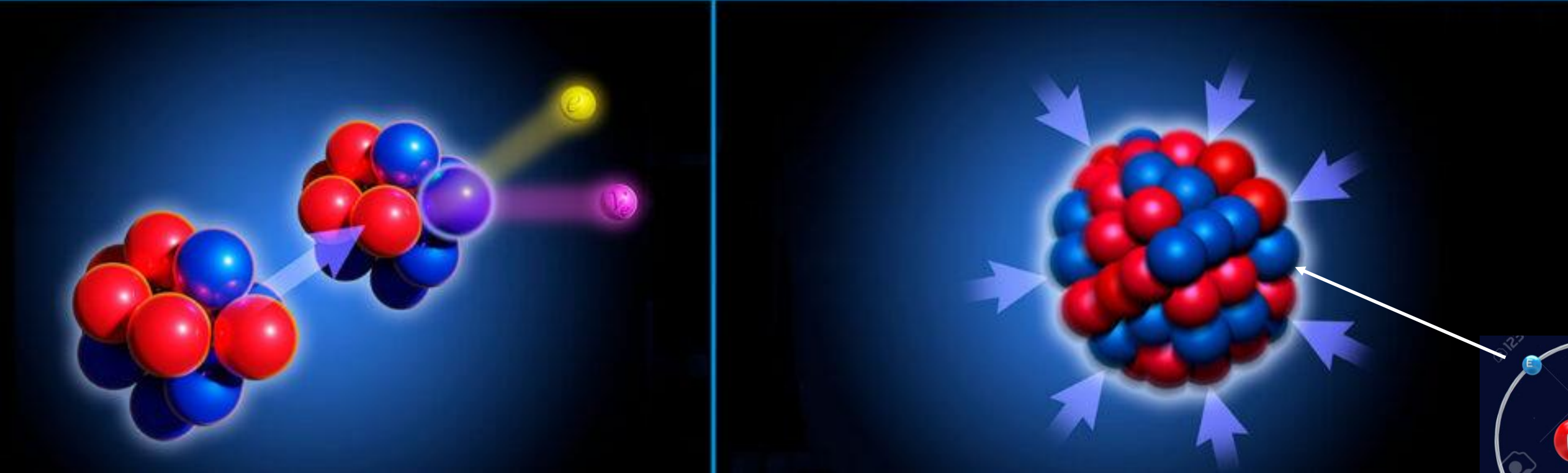
***Implicazioni e problemi concettuali legati
allo scenario delineato dalla Concordance Cosmology***

Il problema della natura della materia oscura

Materia Oscura



| Force | Property | Range | Relative strength |
|-----------------|---|--------------------------|---------------------|
| Gravitational | Attracts matter to other matter | Long | 6×10^{-39} |
| Electromagnetic | Holds electrons in orbit about the nuclei of atoms | Short and long | $\frac{1}{137}$ |
| Strong nuclear | Holds protons and neutrons inside the nuclei of atoms | Short (10^{-15} m) | 1 |
| Weak nuclear | Involved in radioactive beta decay, when a quark changes from one variety to another. Neutrinos respond only to the weak force. | Short (10^{-17} m) | 10^{-5} |



Materia Oscura

Interazione con materia ordinaria e' principalmente gravitazionale

Se interagisce con la materia ordinaria lo fa molto debolmente

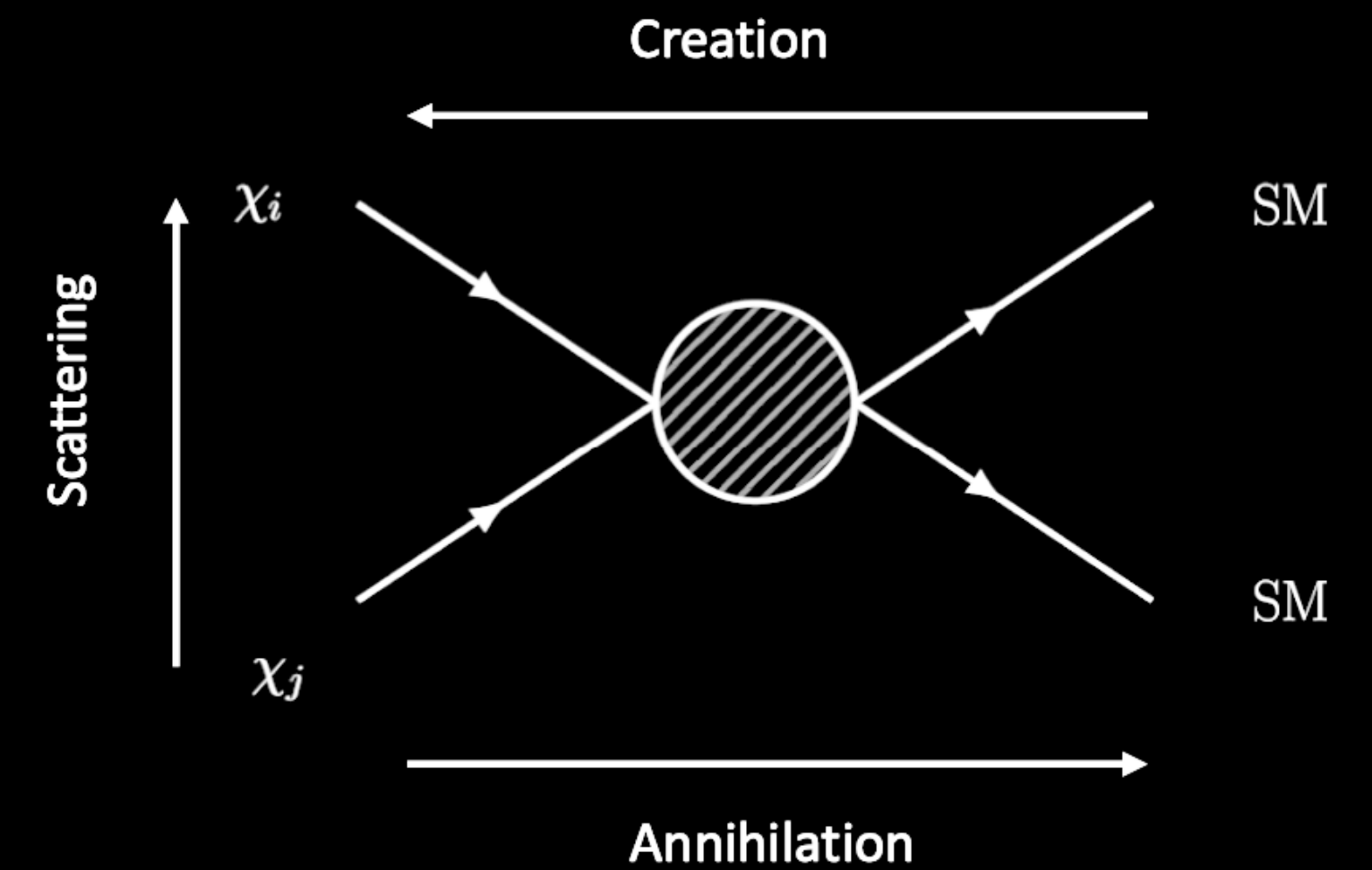
Deve essere elettricamente neutra e non avere carica di colore

Ipotesi WIMP (Weakly Interactive Massive Particle)

Interagisce con la materia attraverso

- Interazione gravitazionale
- *Forse* interazione debole

Assumiamo che inizialmente la materia oscura sia in equilibrio con le altre particelle del modello Standard attraverso interazioni deboli



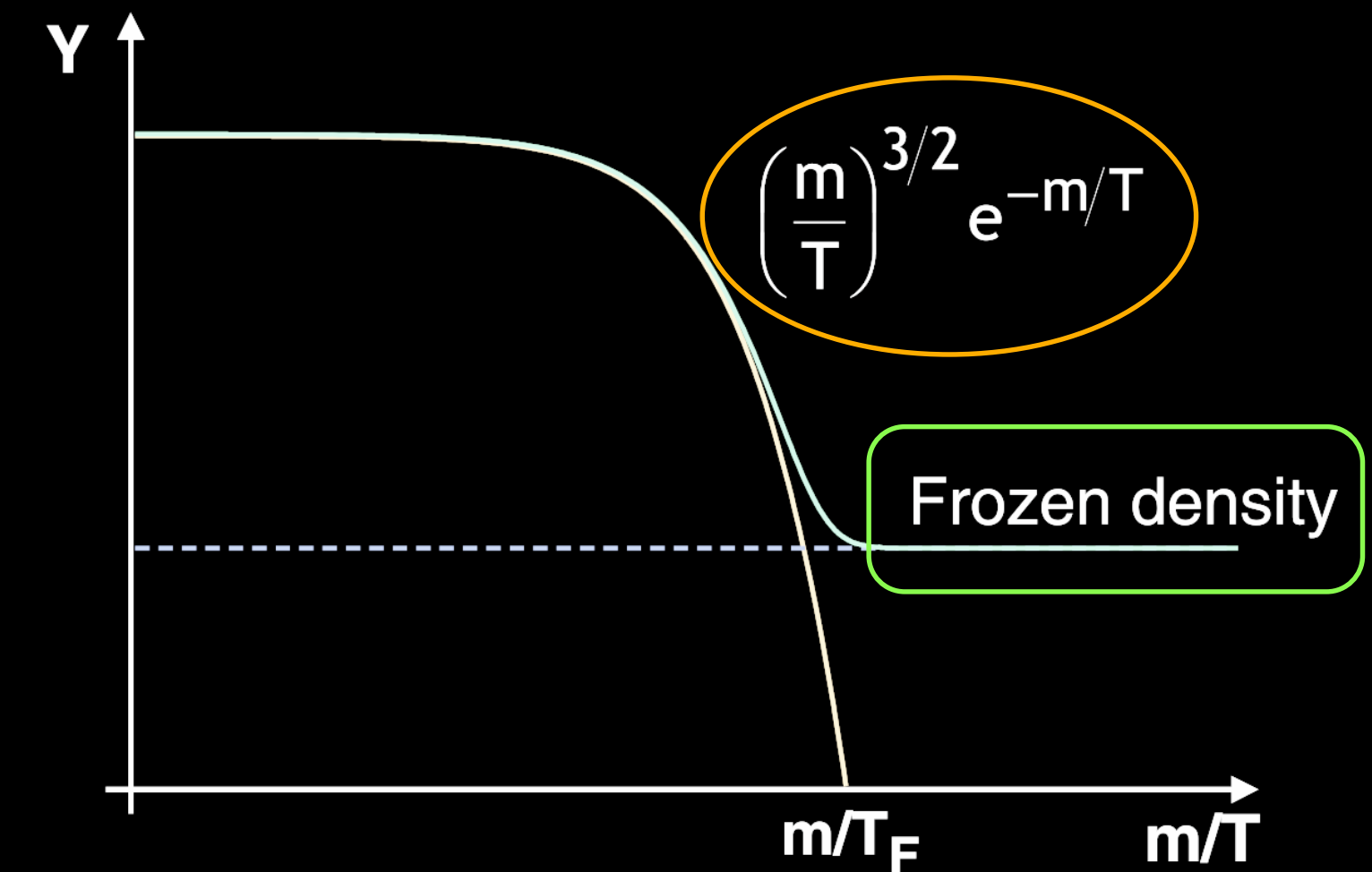
Ipotesi WIMP (Weakly Interactive Massive Particle)

Interagisce con la materia attraverso

- Interazione gravitazionale
- *Forse* interazione debole

Assumiamo che inizialmente la materia oscura sia in equilibrio con le altre particelle del modello Standard attraverso interazioni deboli

- E' possibile calcolare la distribuzione di densità' delle particelle di materia oscura al variare della temperatura T dell'Universo. Dipende dalla massa della particella di materia oscura m_χ
- E' possibile calcolare il tasso di reazione (numero di reazioni per unita' di tempo). Dipende dalla sezione d'urto σ



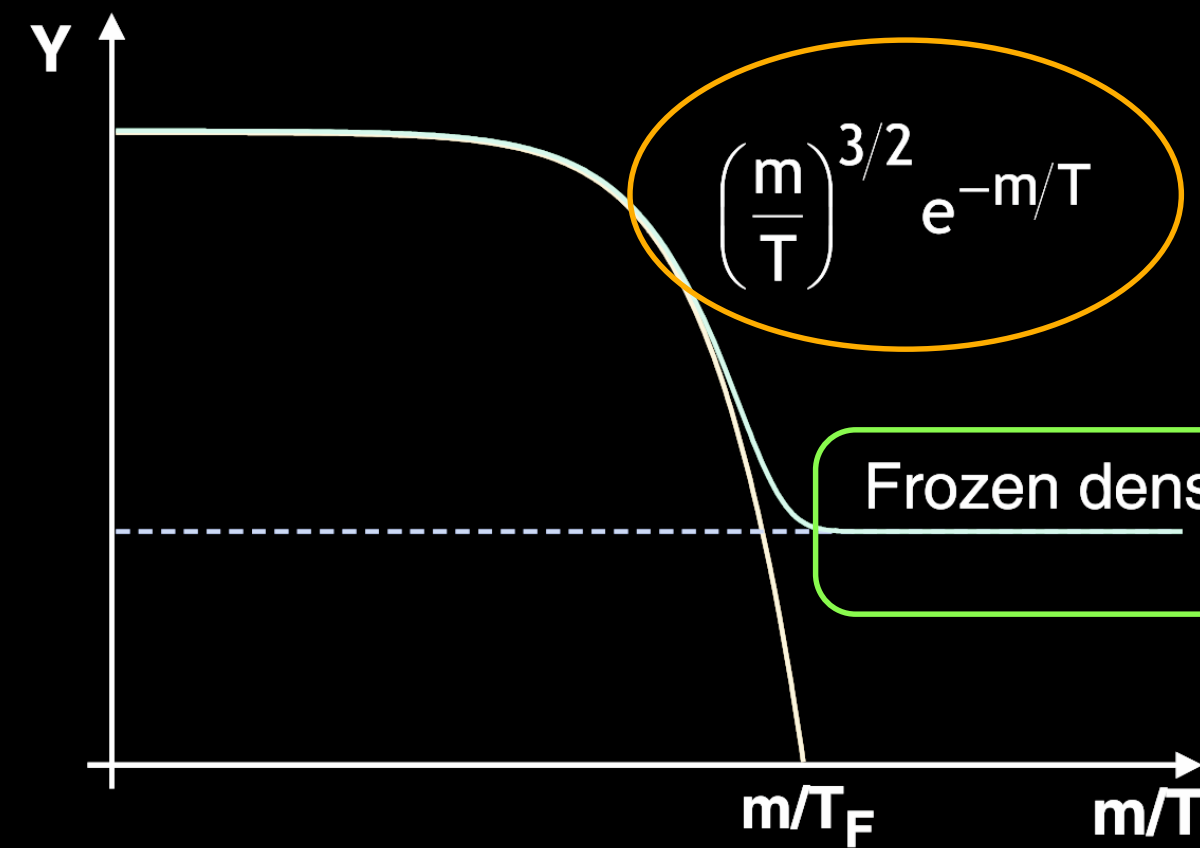
$$R = \frac{1}{n\sigma v}$$

Ipotesi WIMP (Weakly Interactive Massive Particle)

Interagisce con la materia attraverso

- Interazione gravitazionale
- *Forse* interazione debole

Assumiamo che inizialmente la materia oscura sia in equilibrio con le altre particelle del modello Standard attraverso interazioni deboli



$$R = \frac{1}{n\sigma V}$$

$$\frac{1}{H} \gtrsim \frac{1}{n\sigma V} \rightarrow n$$

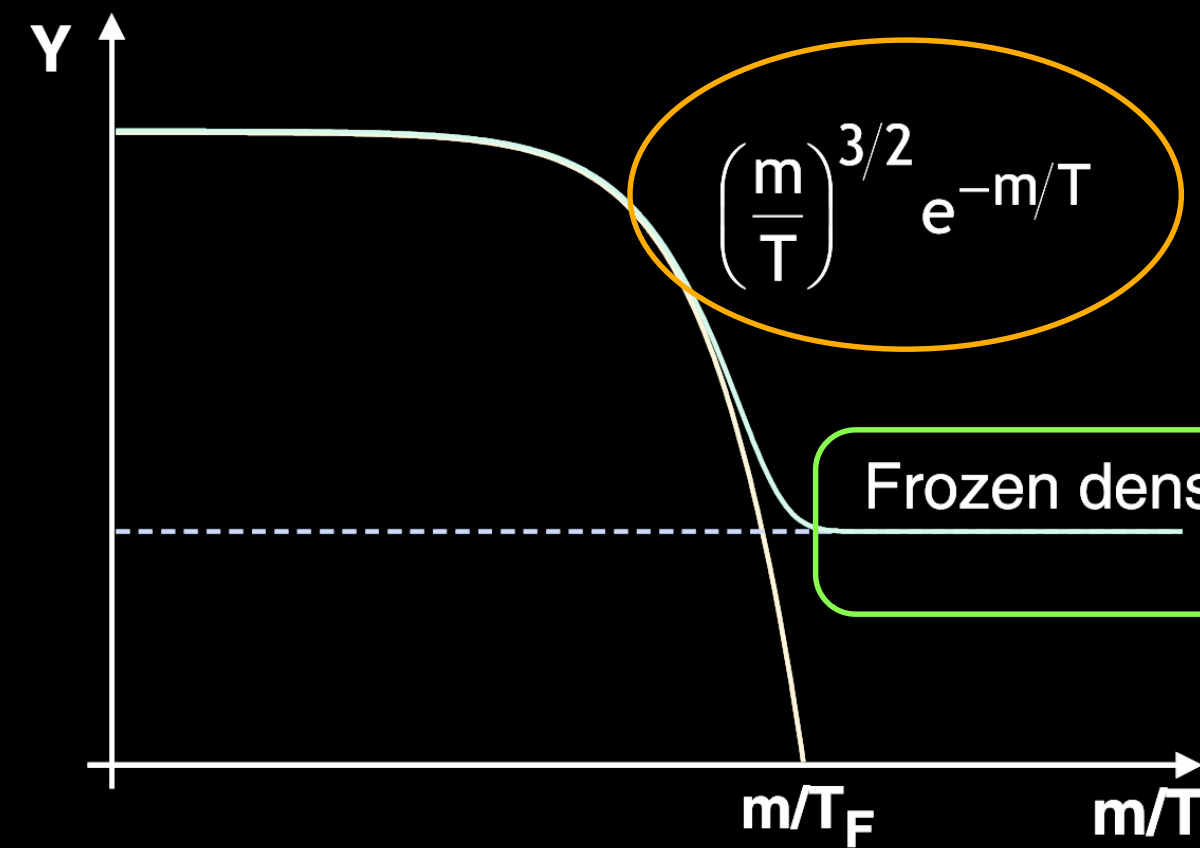
Quando il tasso di espansione dell'Universo diventa piu' rapido del tasso di interazione le reazioni non avvengono piu' efficacemente, e la **densita'** delle particelle **si congela al valore di equilibrio**

Ipotesi WIMP (Weakly Interactive Massive Particle)

Interagisce con la materia attraverso

- Interazione gravitazionale
- *Forse* interazione debole

Assumiamo che inizialmente la materia oscura sia in equilibrio con le altre particelle del modello Standard attraverso interazioni deboli



$$R = \frac{1}{n\sigma V}$$

$$\frac{1}{H} \gtrsim \frac{1}{n\sigma V} \rightarrow n$$

Quando il tasso di espansione dell'Universo diventa piu' rapido del tasso di interazione le reazioni non avvengono piu' efficacemente, e la **densita'** delle particelle **si congela al valore di equilibrio**

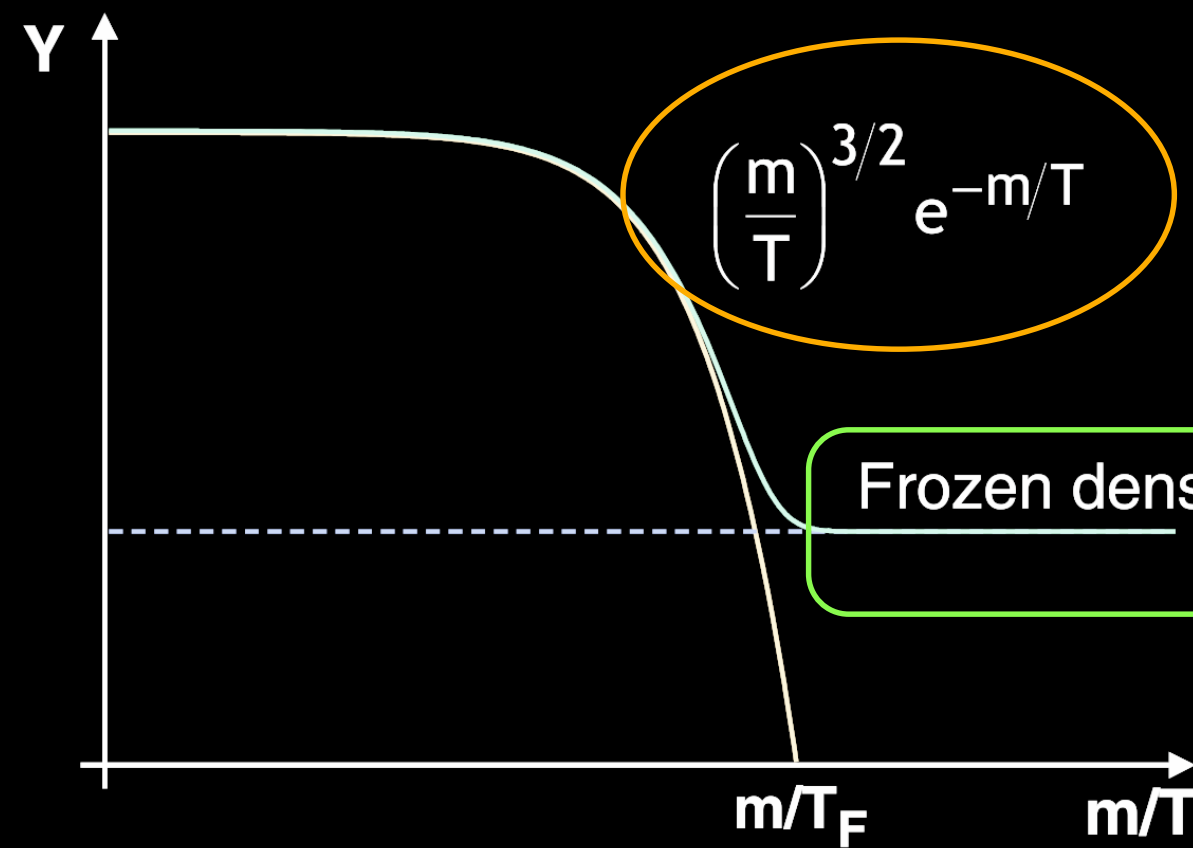
Questo fornisce il contributo di queste particelle alla densità di materia $\rho_\chi = m_\chi n \rightarrow \Omega_\chi$

Ipotesi WIMP (Weakly Interactive Massive Particle)

Interagisce con la materia attraverso

- Interazione gravitazionale
- *Forse* interazione debole

Assumiamo che inizialmente la materia oscura sia in equilibrio con le altre particelle del modello Standard attraverso interazioni deboli



$$R = \frac{1}{n\sigma V}$$

$$\frac{1}{H} \gtrsim \frac{1}{n\sigma V} \rightarrow n$$

Quando il tasso di espansione dell'Universo diventa piu' rapido del tasso di interazione le reazioni non avvengono piu' efficacemente, e la **densita'** delle particelle **si congela al valore di equilibrio**

Questo fornisce il contributo di queste particelle alla densità di materia $\rho_\chi = m_\chi n \rightarrow \Omega_\chi$

WIMP Miracle

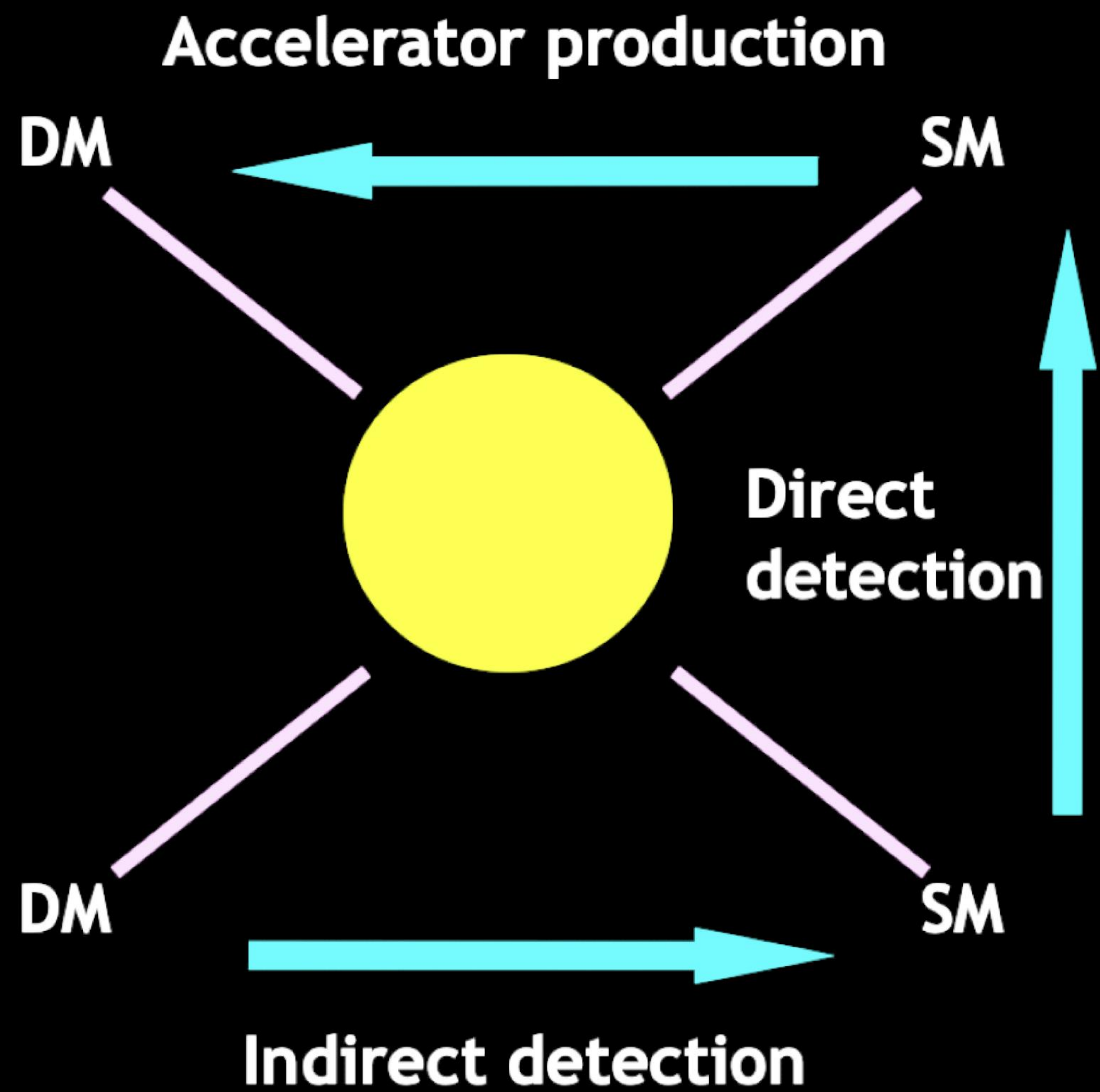
Per

- massa m_χ dell'ordine delle particelle che mediano **interazioni deboli**
- sezioni d'urto σ **tipiche delle interazioni deboli**

si ottiene una densità di materia oscura dell'ordine di quella osservata

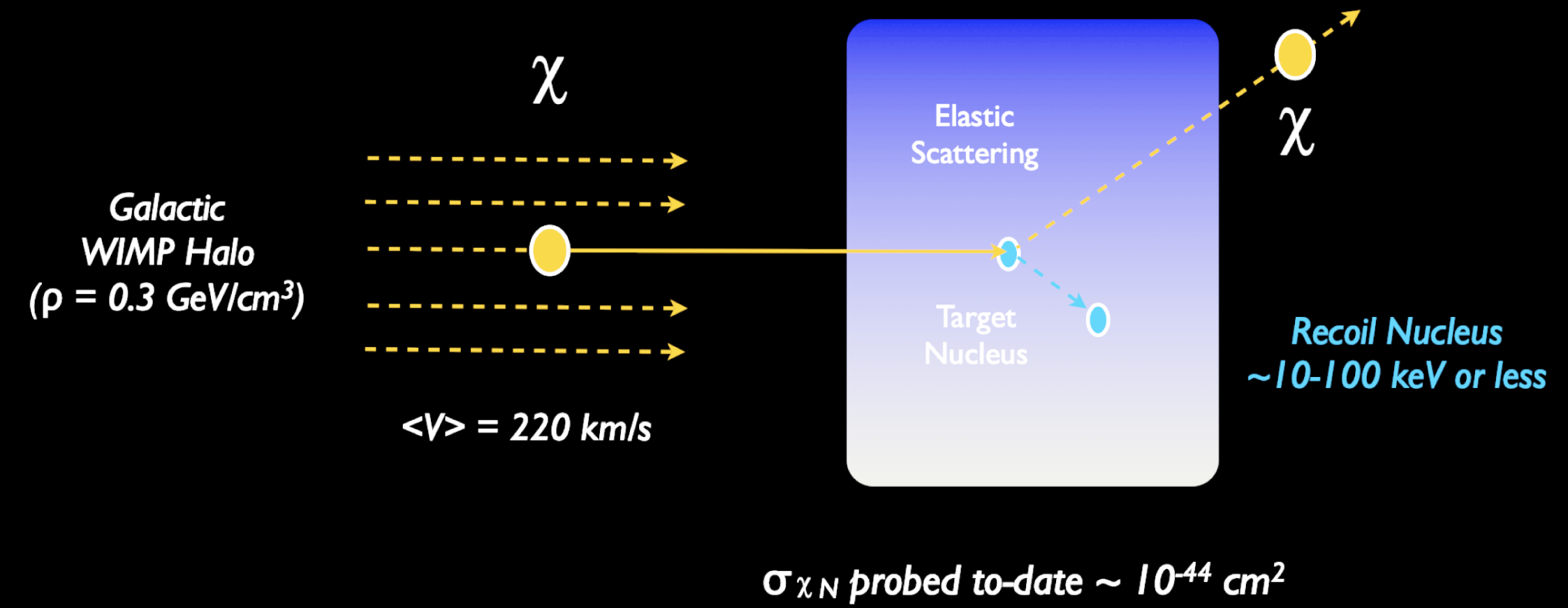
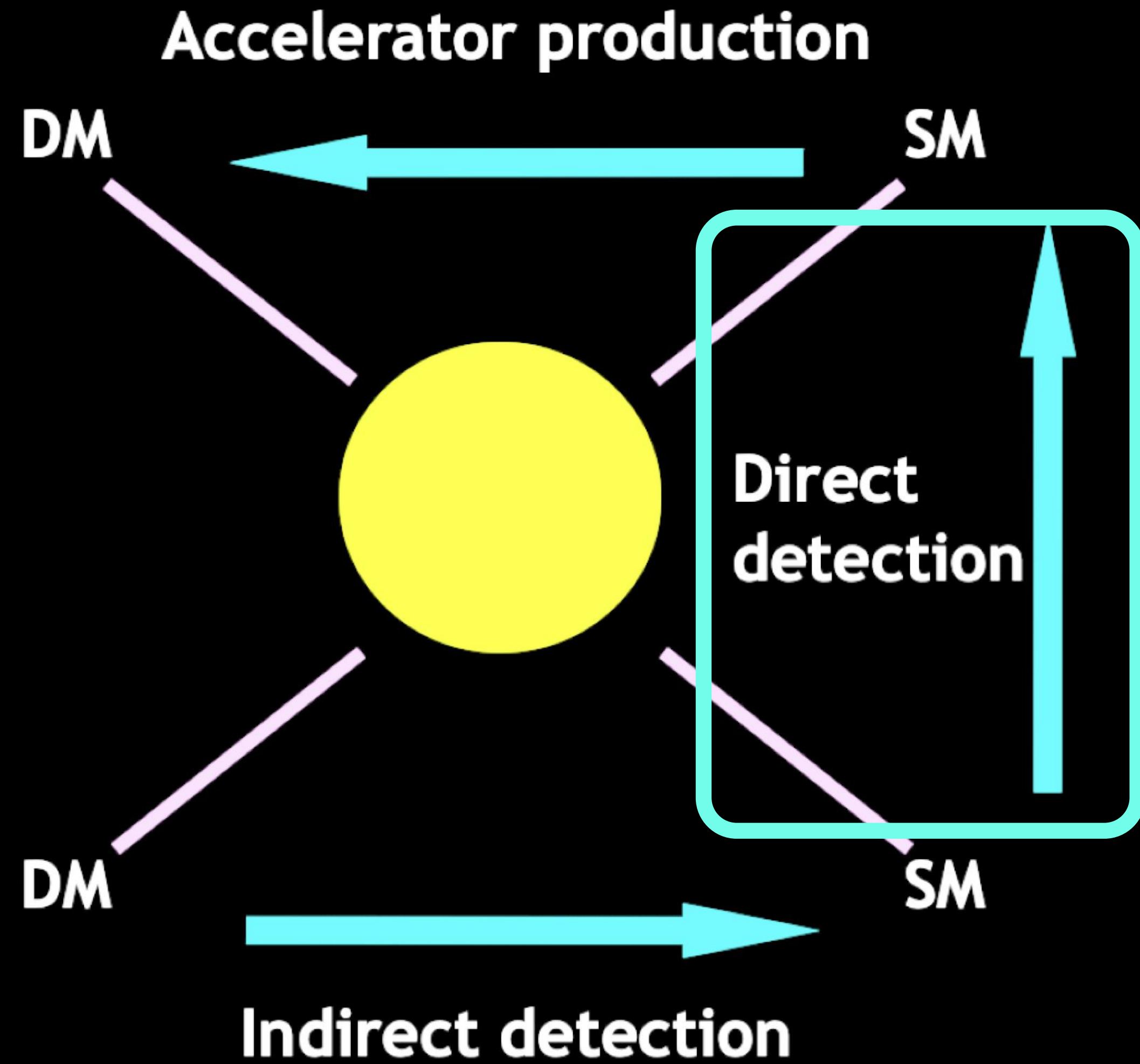
$$\Omega_\chi \approx 0.3$$

Questo ha stimolato la intensa attività' di ricerca della materia oscura sotto forma di WIMPS



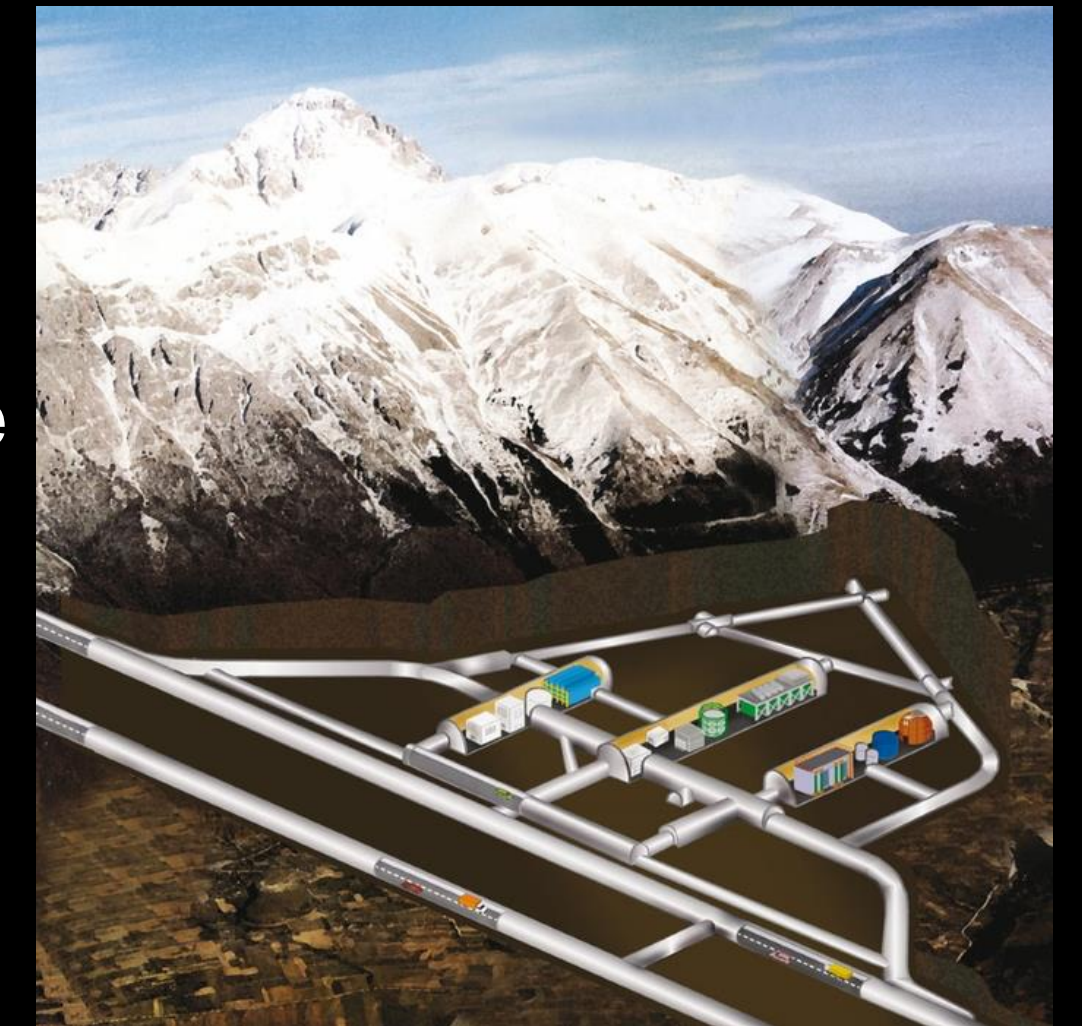
Questo ha stimolato la intensa attività' di ricerca della materia oscura sotto forma di WIMPS

Goodman and Witten: coherent scattering of WIMPs off nuclei (1985)

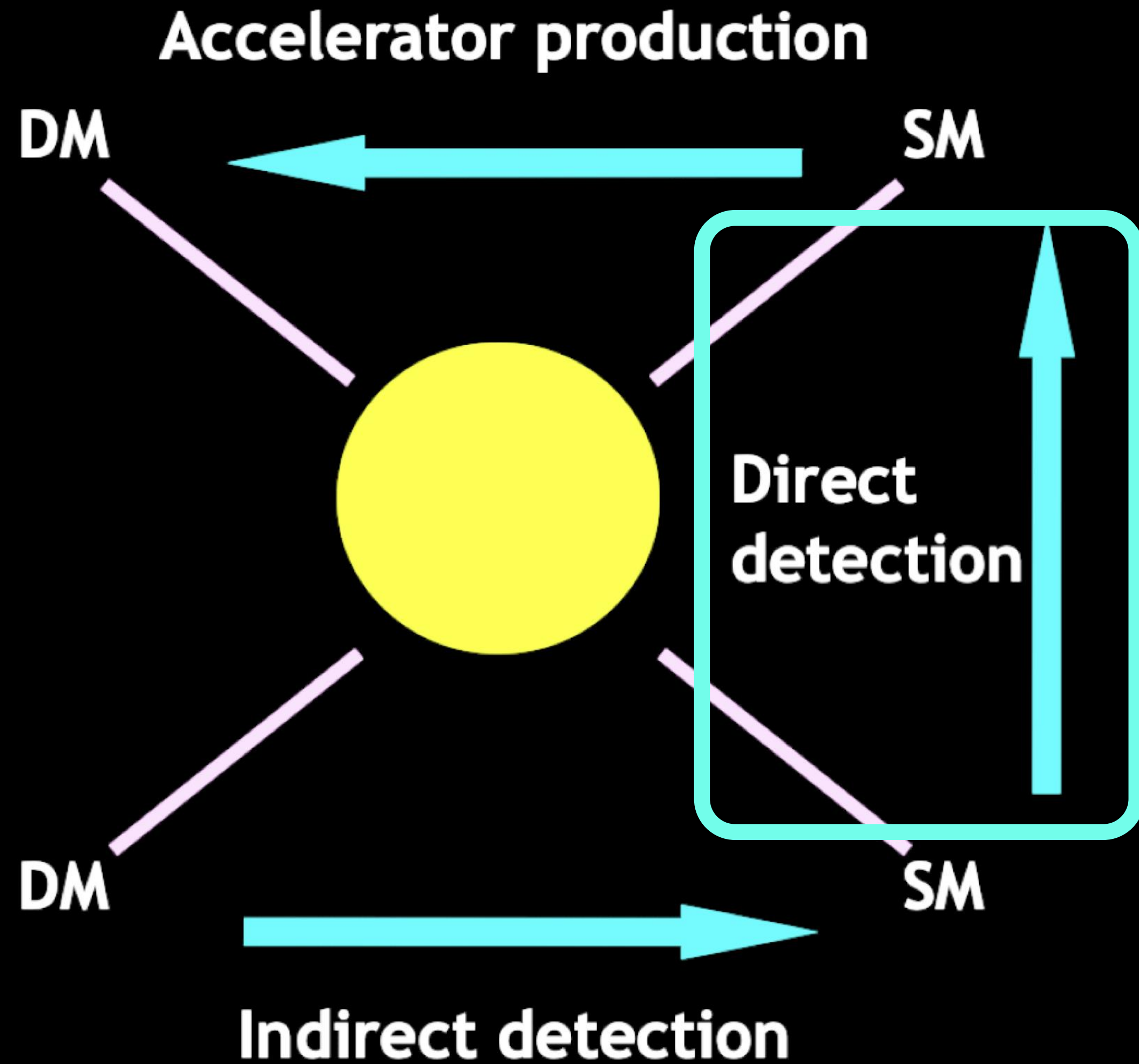


Necessario

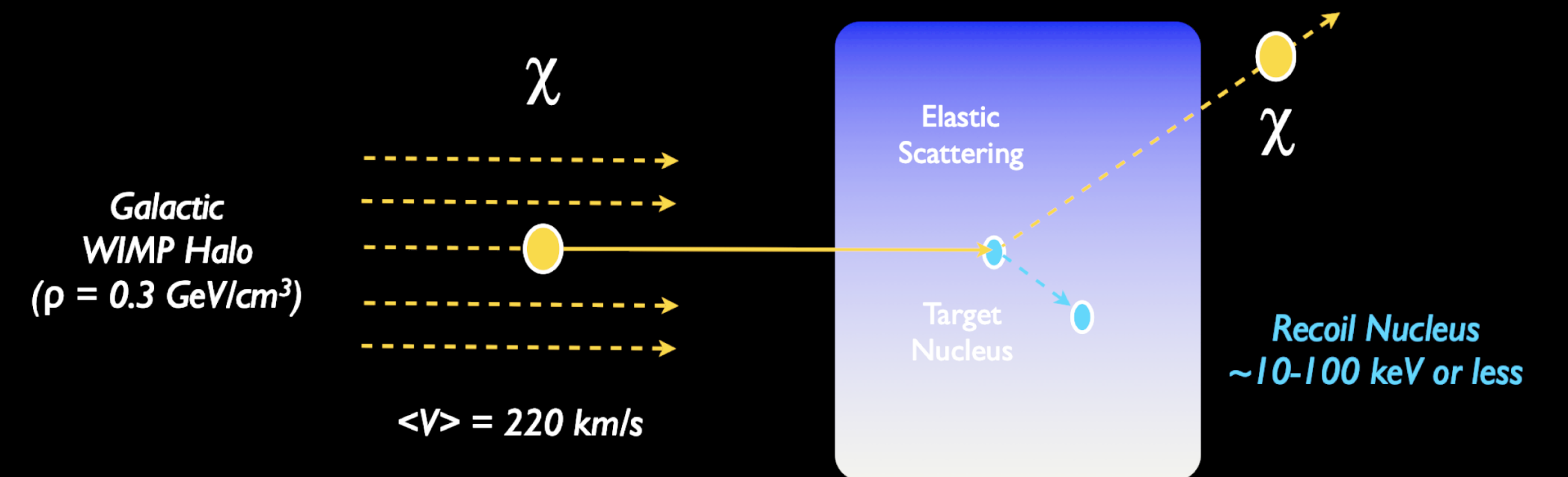
- 1) Schermarsi da raggi cosmici e particelle che possono inquinare il segnale



Questo ha stimolato la intensa attività' di ricerca della materia oscura sotto forma di WIMPS



Goodman and Witten: coherent scattering of WIMPs off nuclei (1985)



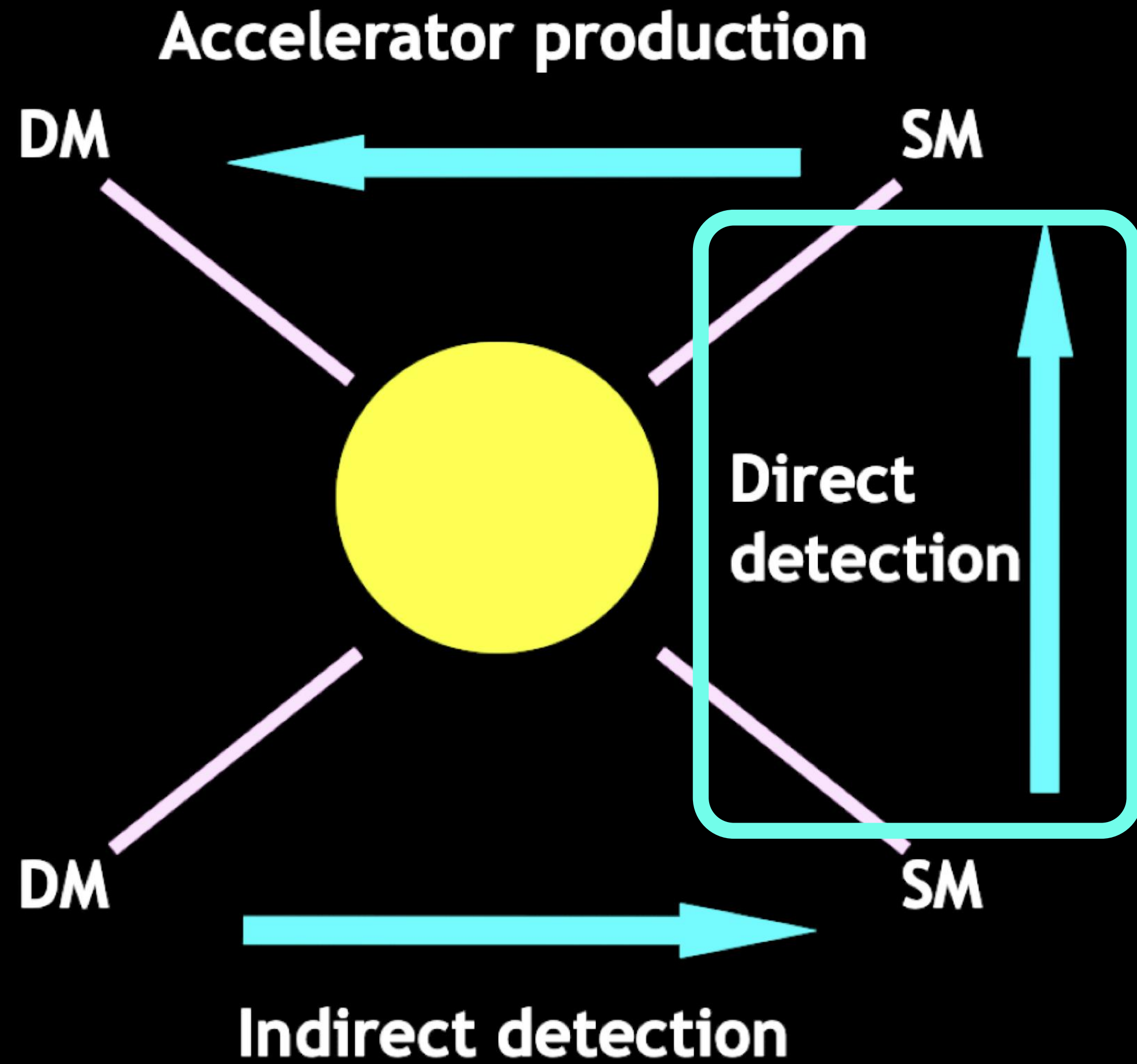
$\sigma_{\chi N}$ probed to-date $\sim 10^{-44} \text{ cm}^2$

Necessario

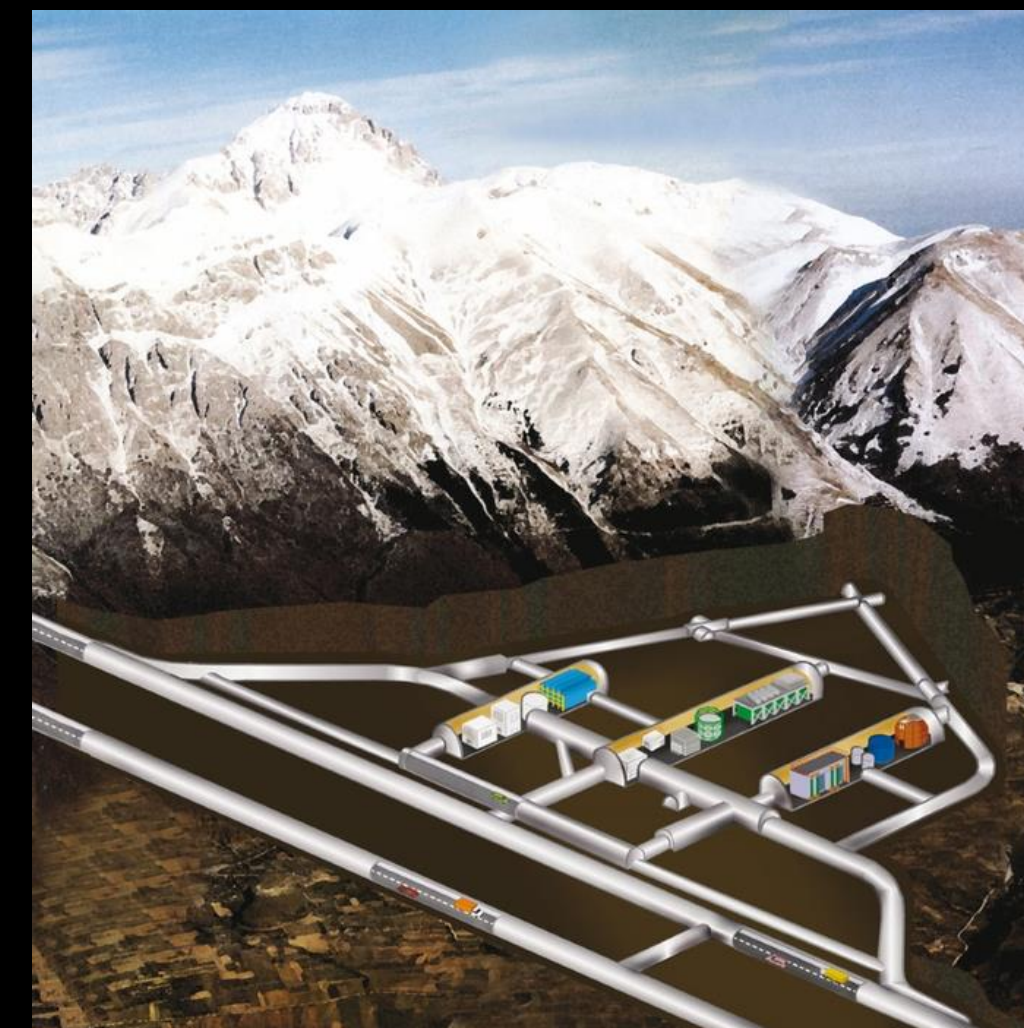
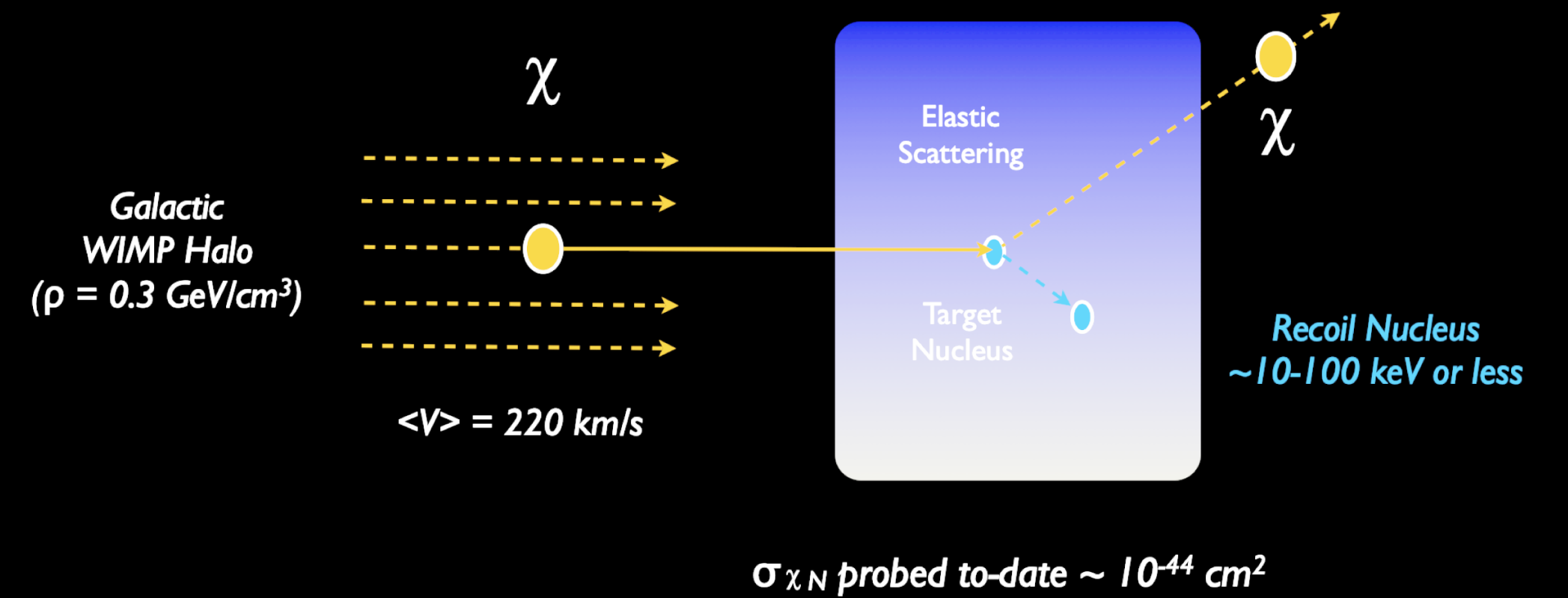
2) Usare come rivelatori materiali molto puri e assenza decadimento radioattivo nell'ambiente



Questo ha stimolato la intensa attività' di ricerca della materia oscura sotto forma di WIMPS



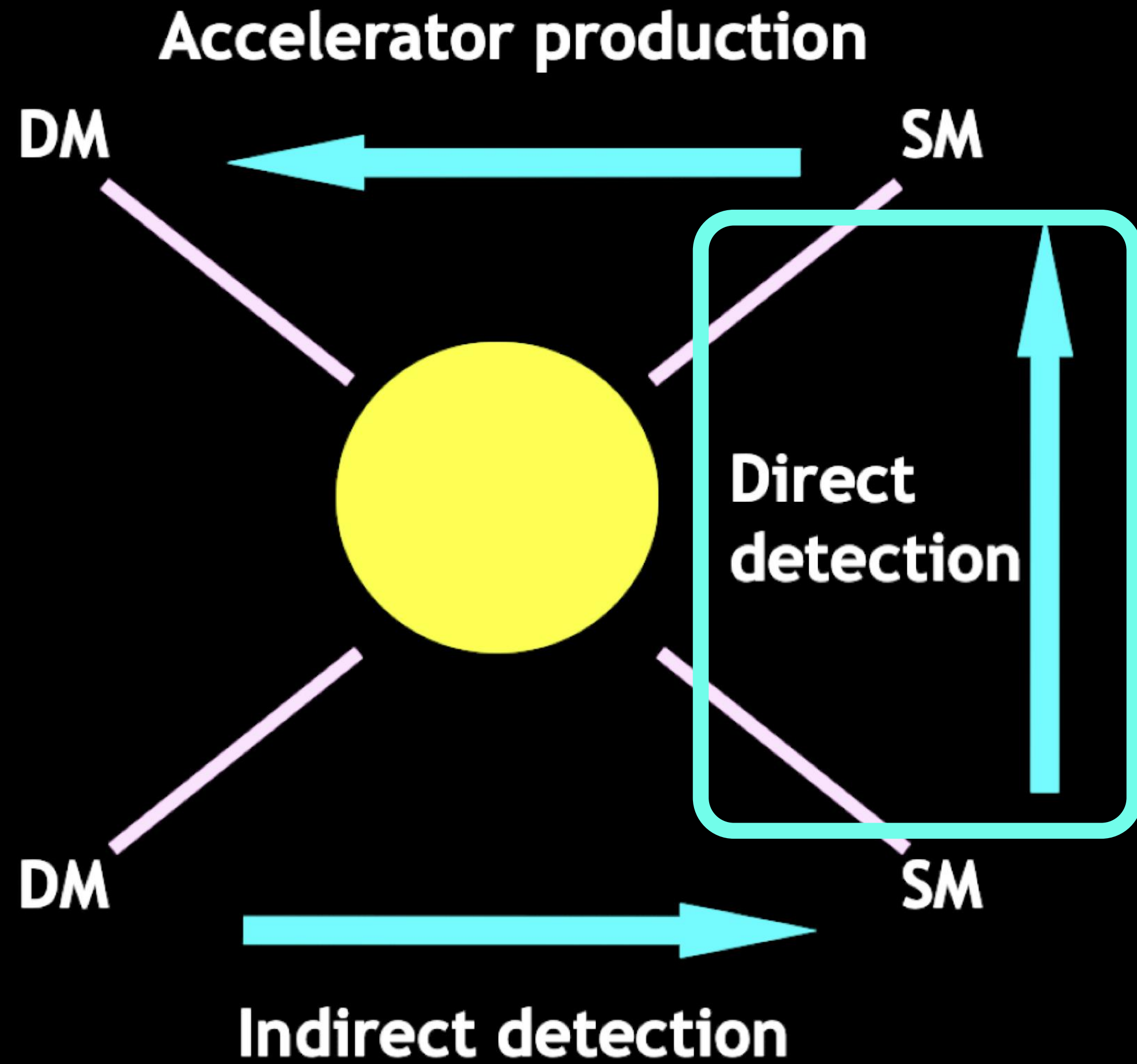
Goodman and Witten: coherent scattering of WIMPs off nuclei (1985)



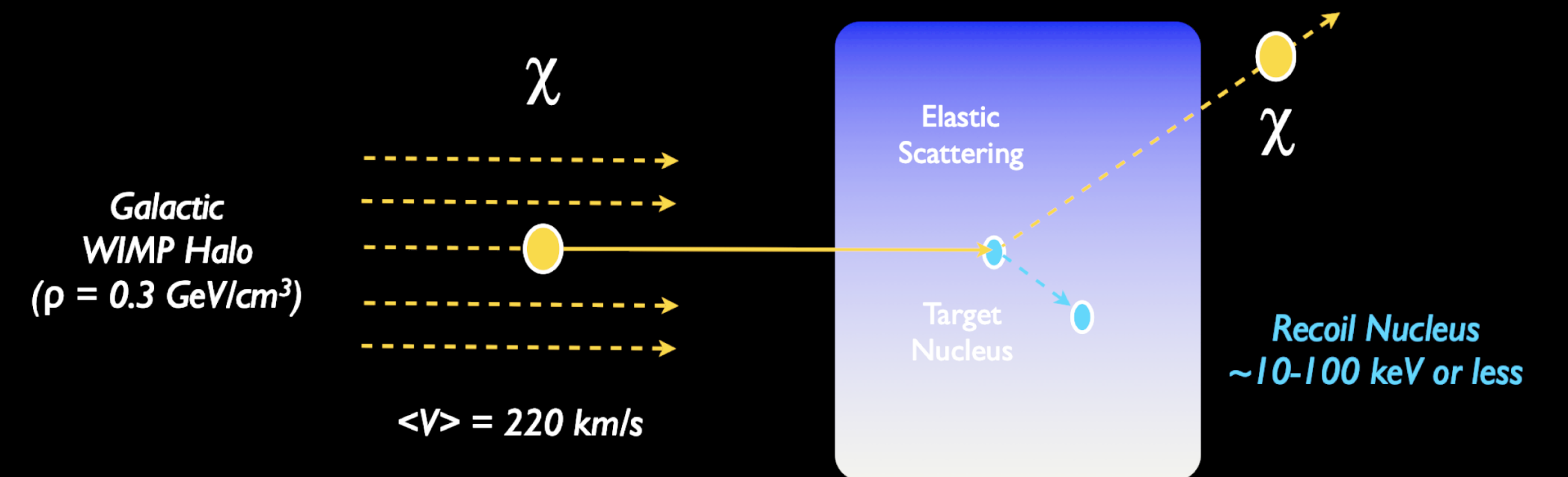
Es. DAMA



Questo ha stimolato la intensa attività' di ricerca della materia oscura sotto forma di WIMPS

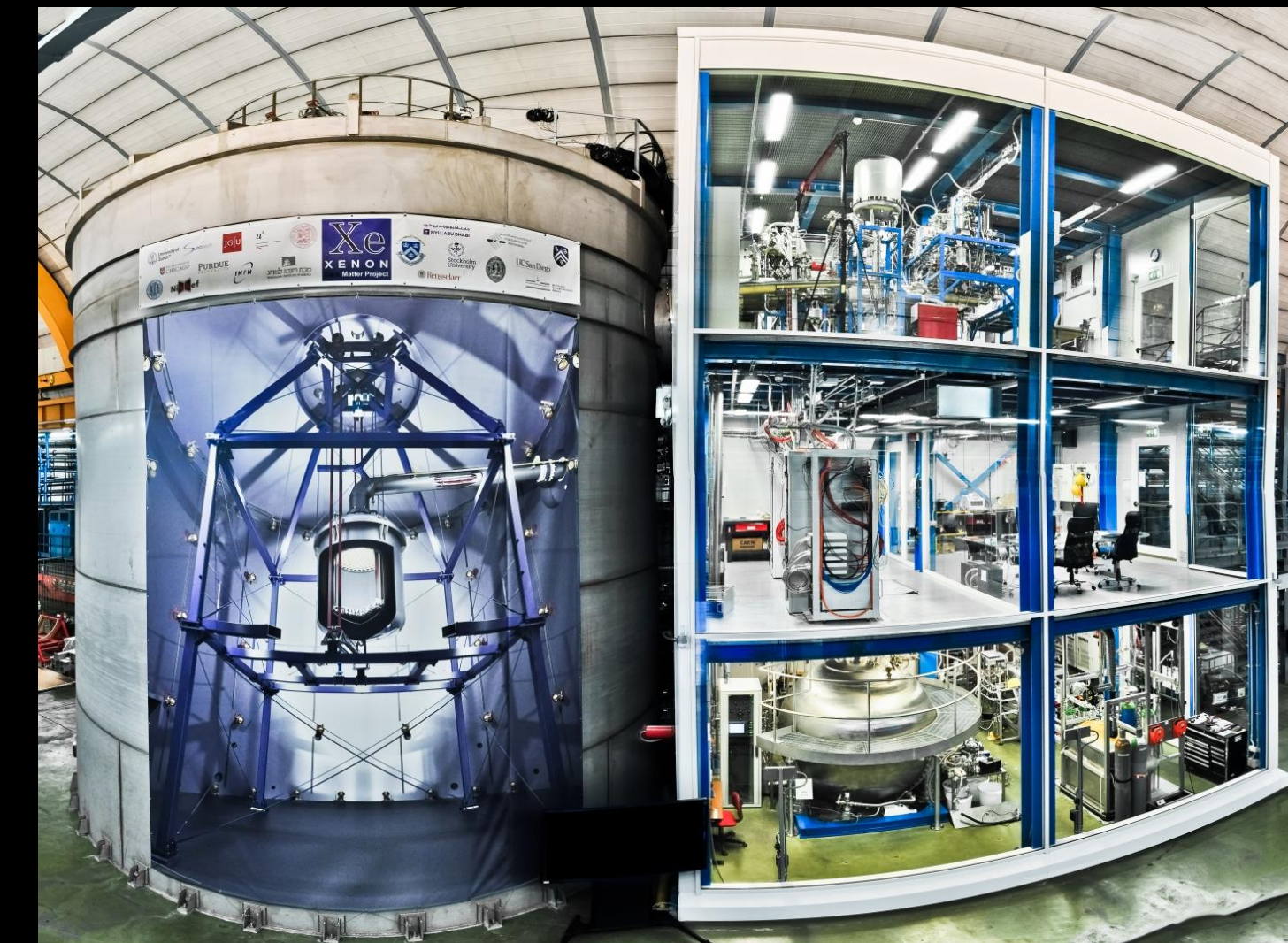


Goodman and Witten: coherent scattering of WIMPs off nuclei (1985)



$\sigma_{\chi N}$ probed to-date $\sim 10^{-44} \text{ cm}^2$

Xeno1T



Questo ha stimolato la intensa attività' di ricerca della materia oscura sotto forma di WIMPS

Ricerca indiretta attraverso 3 canali:

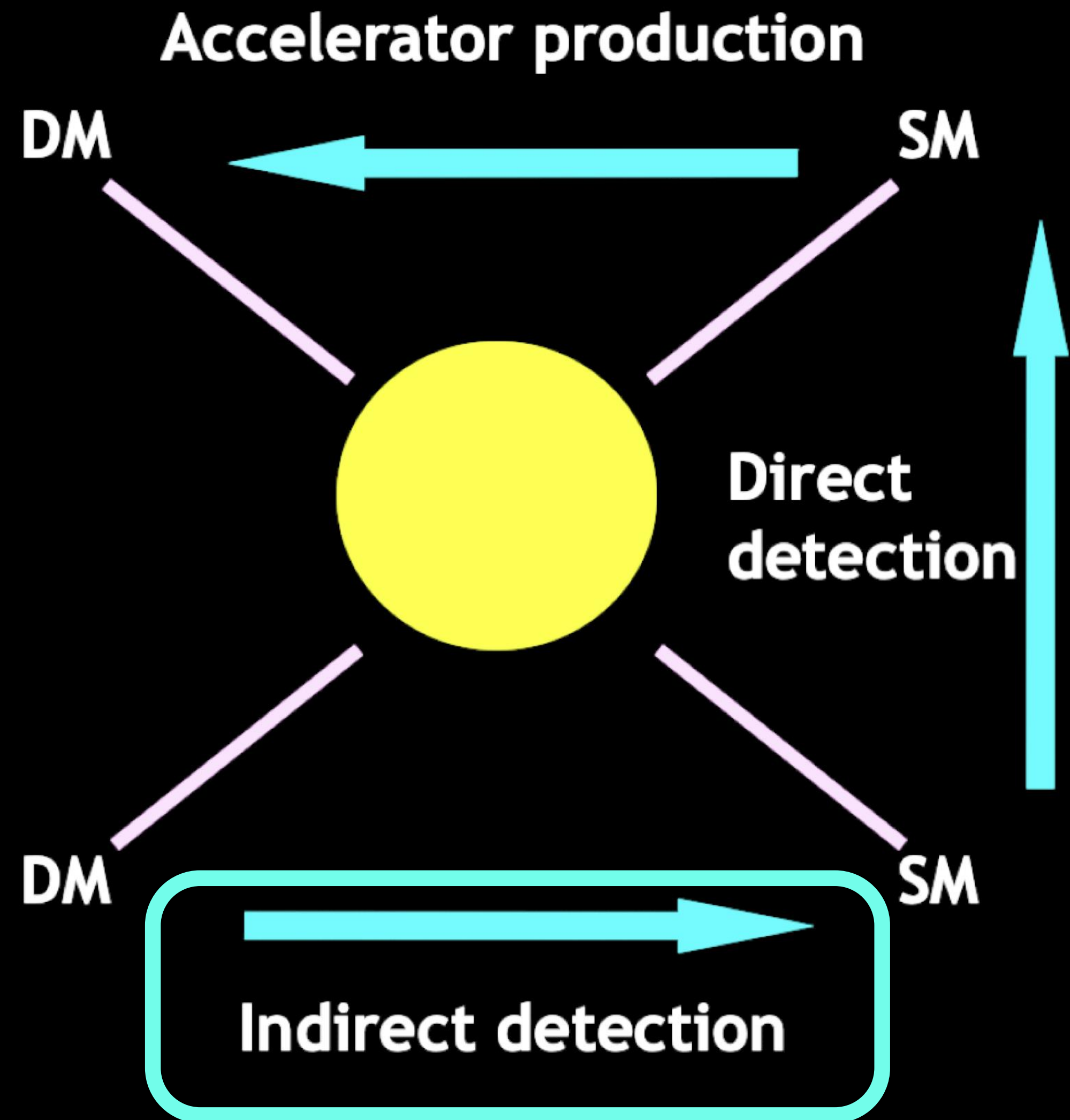
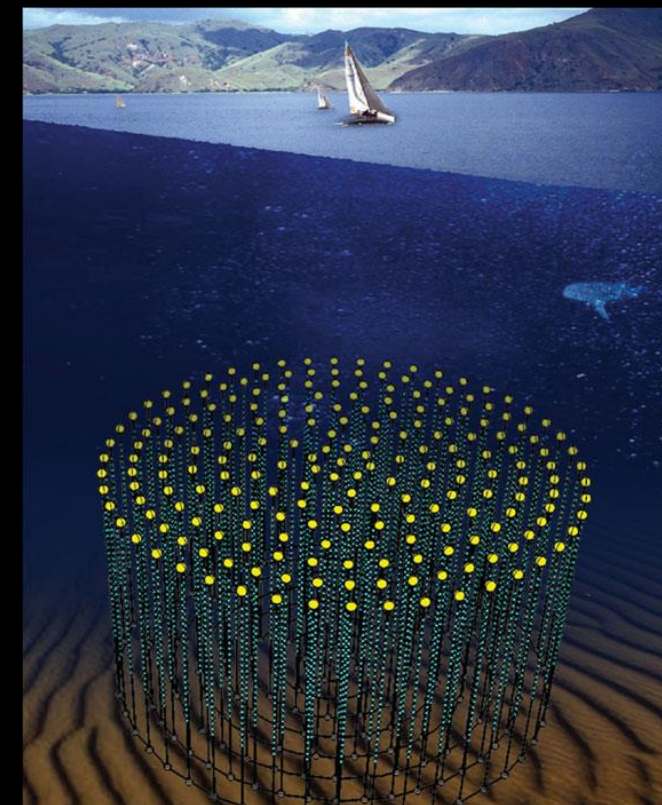
raggi γ , $e+e^-$, neutrini:

- γ φαχιλμεντε ασσορβιτι δα ματερια
- e deflessi dai campi magnetici intergalattici
- ν estremamente difficili da rilevare

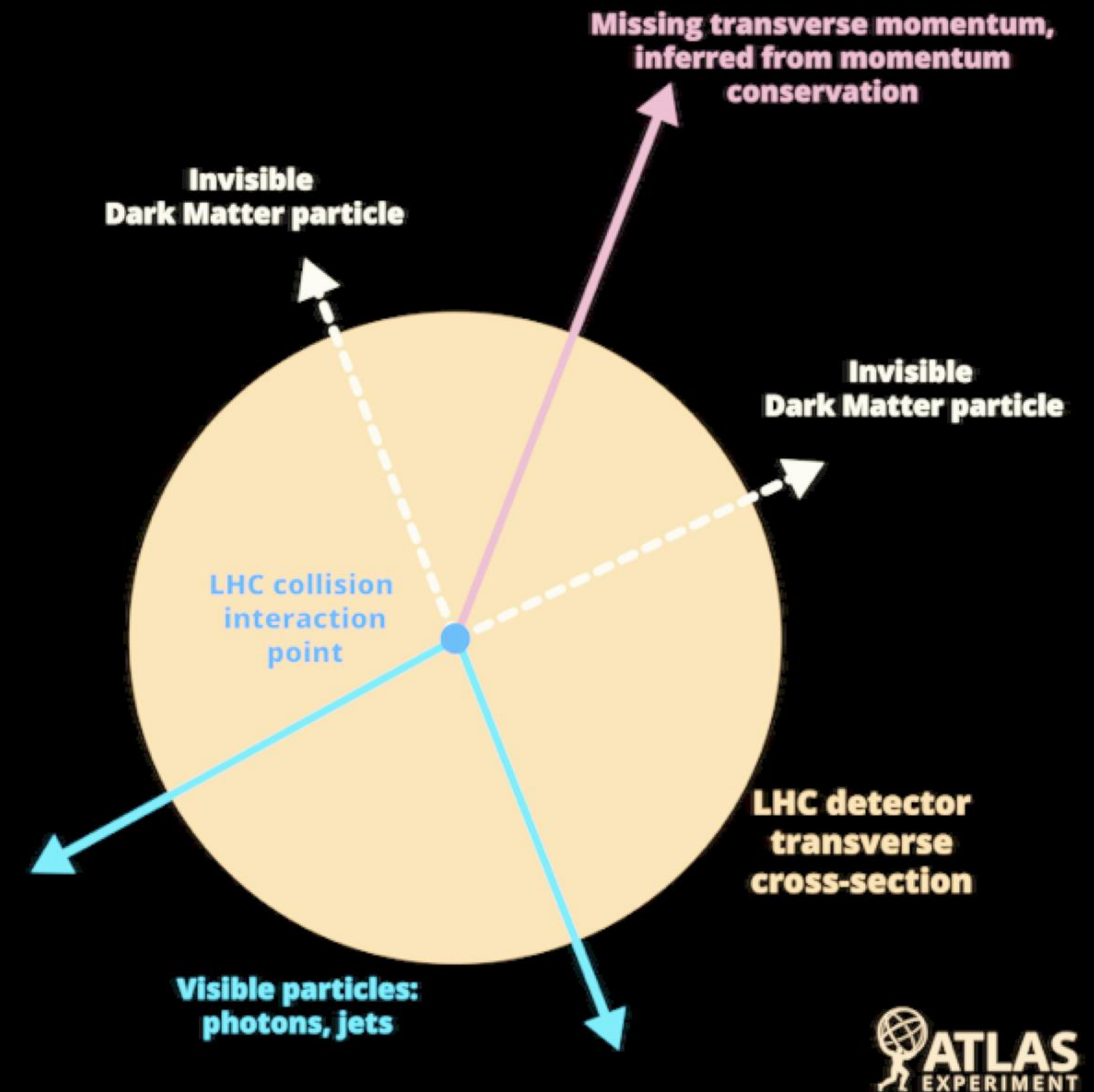
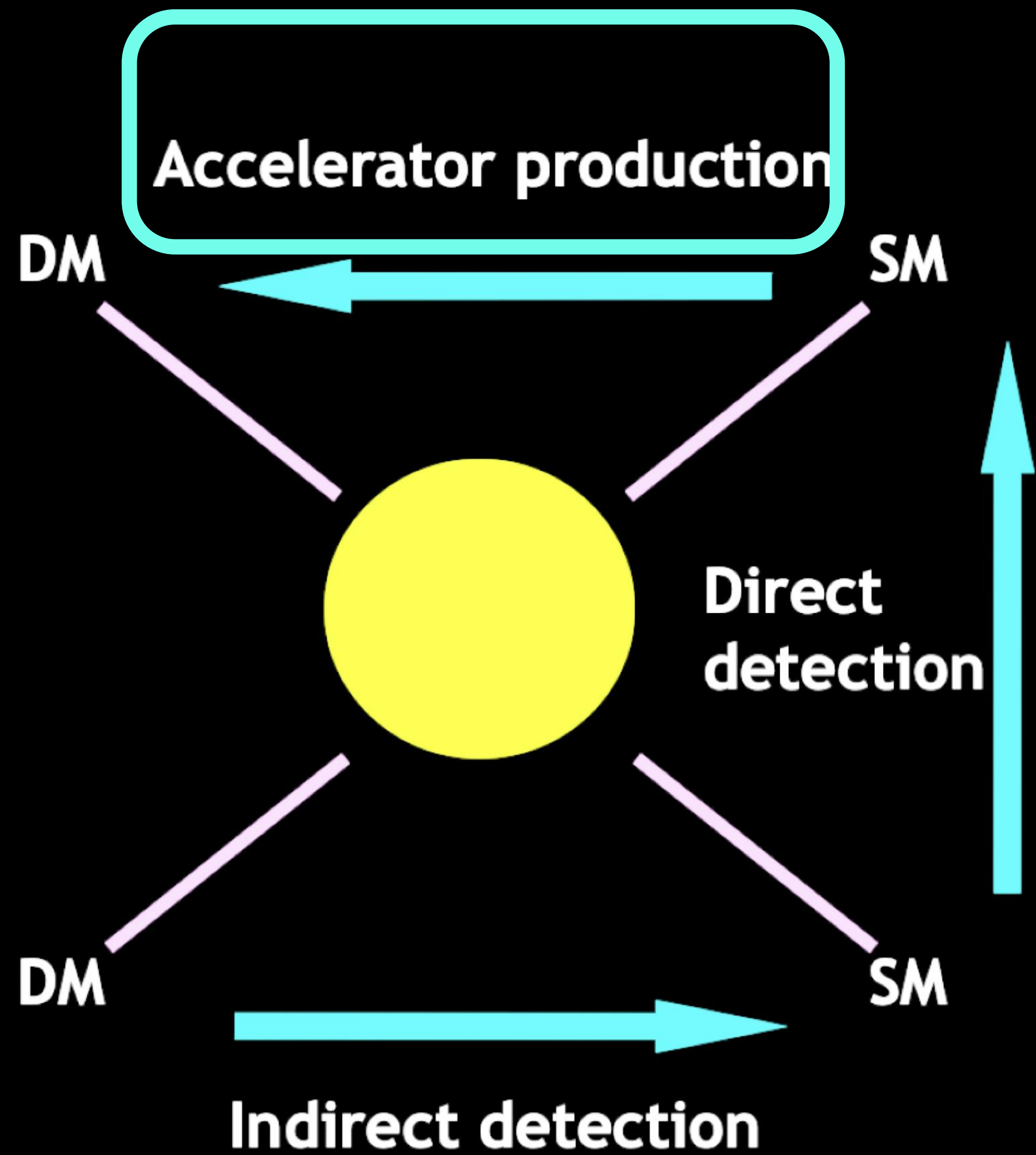
Cherenkov telescopes (superficie terrestre), satellitis

atelliti neutrino

'telescopes' (sotterranei/sottomarini)



Questo ha stimolato la intensa attività' di ricerca della materia oscura sotto forma di WIMPS



Rivelazione da momento mancante. Si sfrutta la conservazione del momento. Si inferisce la esistenza di una particella da fatto che la somma del momento di quelle rivelate e' minore del momento iniziale

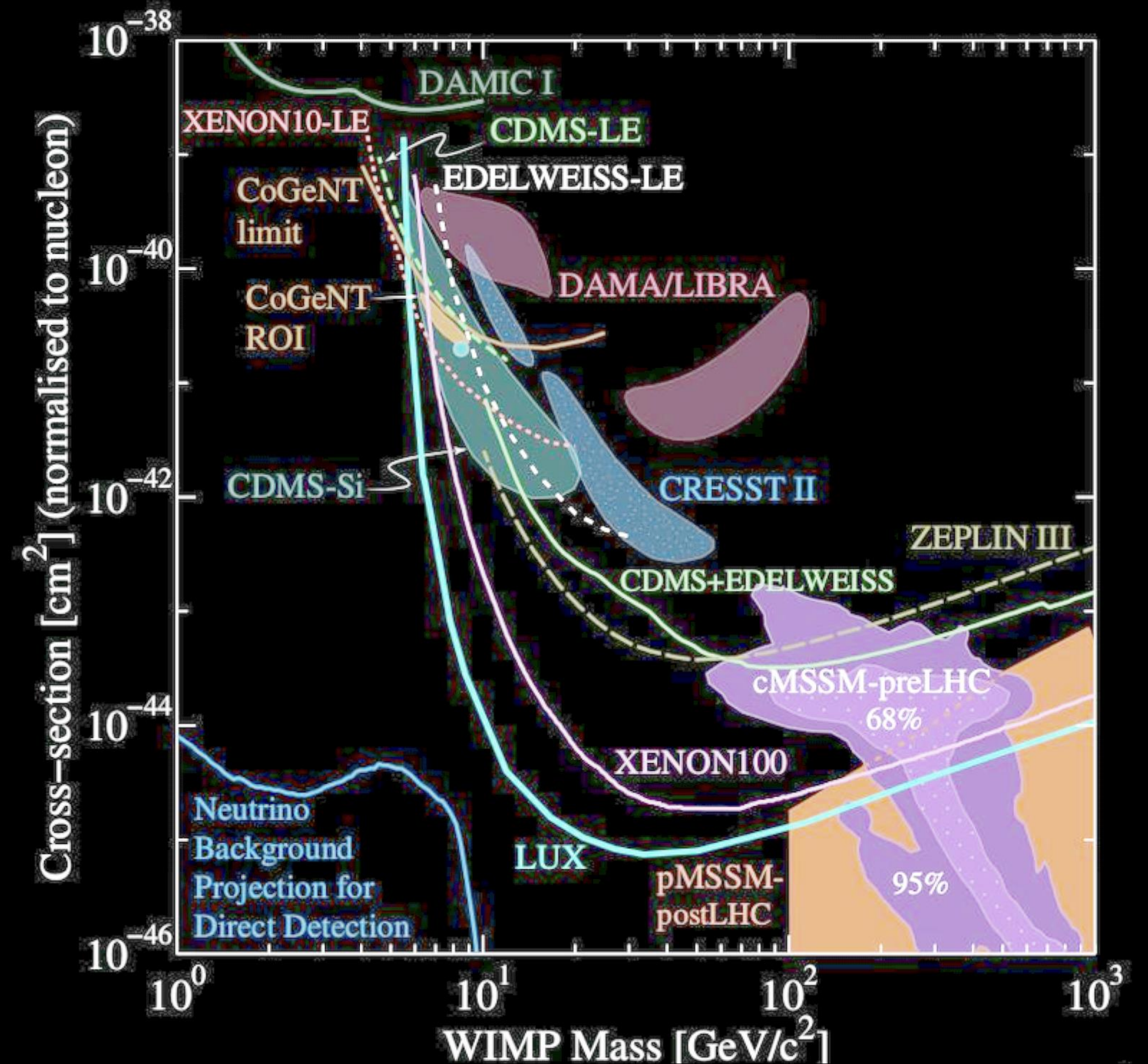
Fino ad ora NESSUNA rivelazione confermata di WIMPS

Solo limiti superiori alla combinazione

Sezione d'urto σ

Massa particella m_χ

Limiti da esperimenti di rivelazione diretta



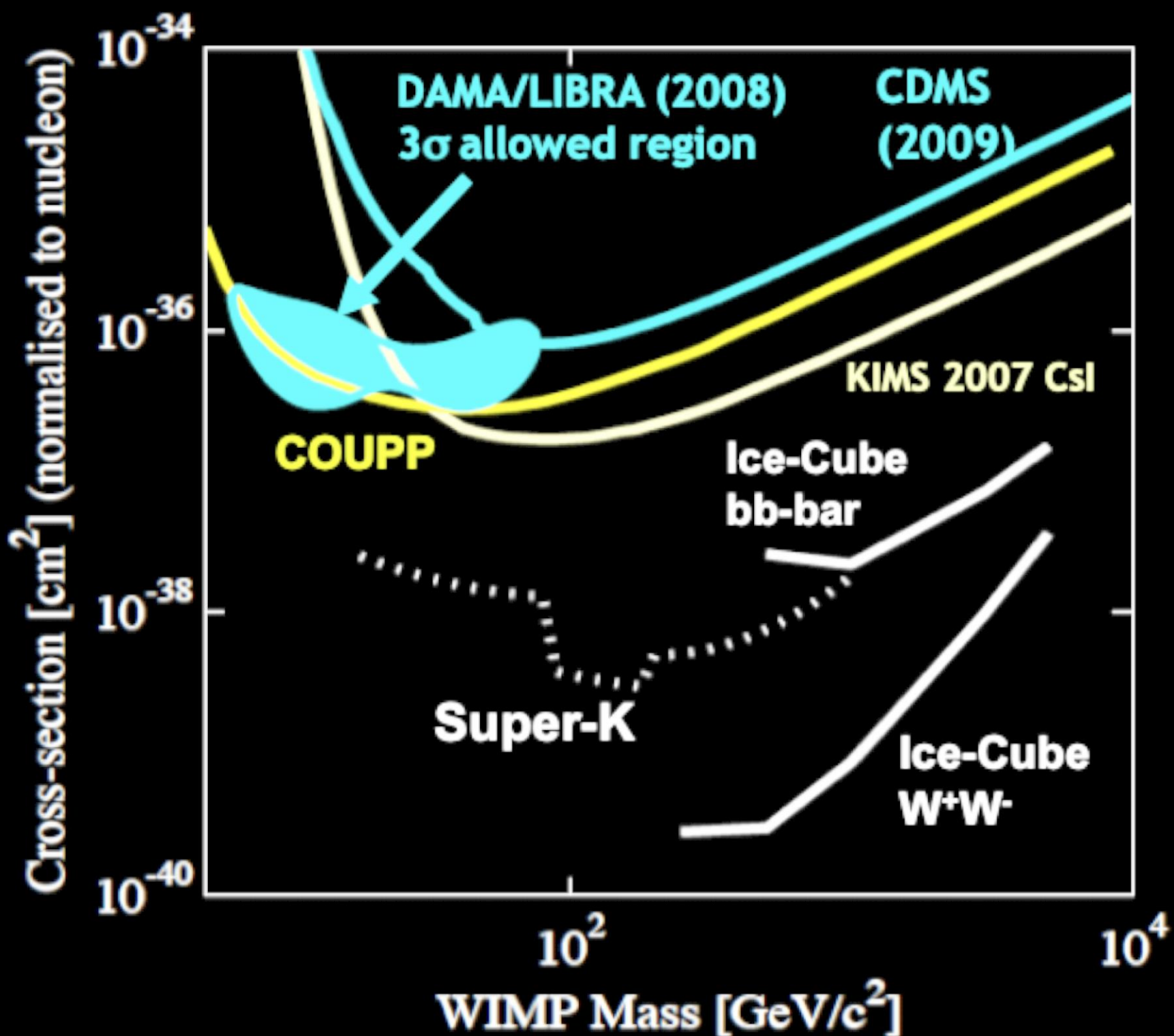
Fino ad ora NESSUNA rivelazione confermata di WIMPS

Solo limiti superiori alla combinazione

Sezione d'urto σ

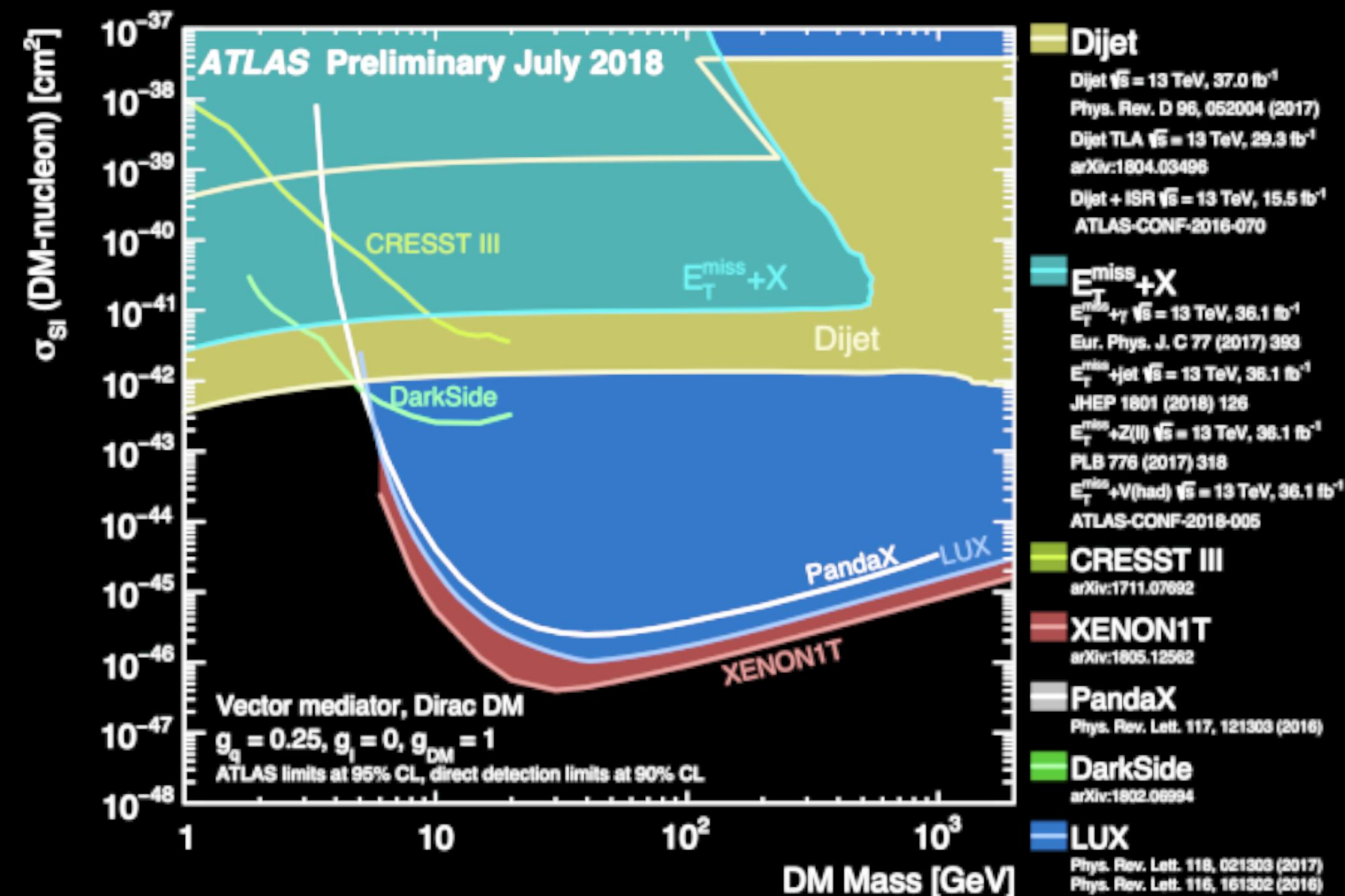
Massa particella m_χ

Limiti da esperimenti di rivelazione indiretta (neutrini)



DATA listed top to bottom on plot
 CDMS Soudan 2004-2009 Ge SD-proton
 DAMA/LIBRA 2008 3sigma SDp, no ion channeling
 COUPP 2008 SD-proton
 KIMS 2007 - 3409 kg-days CsI SD-proton
 IceCube 2009 indirect SD-proton (assuming annihilation to b-bbar)
 SuperK indirect SD-proton
 IceCube 2009 indirect SD-proton (assuming annihilation to W⁺W⁻)

Limiti da esperimenti di produzione in acceleratore



ATLAS Feature: Dark Matter