

Modello Cosmologico a Tassellatura Topologica e Accrescimento Causalmente Vincolato

1. Ipotesi Fondative del Modello

Il modello cosmologico proposto si configura come una ri-formulazione geometrico-dinamica dell'evoluzione dell'Universo su grande scala, intesa ad eliminare le componenti esotiche del modello standard Λ CDM (in particolare la costante cosmologica Λ come densità d'energia del vuoto e la materia oscura particellare non barionica). L'architettura teorica si fonda sui seguenti tre pilastri essenziali:

1.1 Tassellatura dei Bacini di Voronoi e Partizione dell'Universo

L'Universo visibile è modellato non come un fluido continuo perfettamente omogeneo, ma come una struttura tassellata composta da bacini d'attrazione e vuoti cosmici i cui confini corrispondono ad ambienti di Voronoi. La materia barionica primordiale, a seguito dell'espansione e del collasso gravitazionale locale, si organizza lungo le pareti, i filamenti e i nodi d'interfaccia di questi bacini. L'Universo locale risulta così suddiviso in celle d'influenza gravitazionale dinamica, i cui vuoti interni subiscono uno svuotamento progressivo.

1.2 Assenza di Costante Cosmologica e Materia Oscura Esotica

Si impone in modo rigoroso l'assenza di costante cosmologica ($\Lambda=0$) e di materia oscura esotica ipotetica (WIMP, assioni, ecc.). La totalità della massa cosmica è attribuita esclusivamente alla materia barionica ordinaria e ai buchi neri primordiali (PBH) formatisi nelle primissime phases evolutive o lungo le pareti di intersezione dei bacini. L'apparente accelerazione dell'espansione cosmica rilevata nelle supernova di tipo Ia e nelle strutture a basso redshift non è causata da una densità d'energia intrinseca dello spazio, ma da effetti geometrici di retroazione e deformazione della metrica (*backreaction*).

1.3 Accrescimento Causalmente Vincolato della Massa nell'Orizzonte

La quantità di massa racchiusa all'interno dell'orizzonte causale non è costante, ma è funzione del tempo cosmico: $M=M(t)$. Man mano che l'orizzonte cosmico si espande alla velocità della luce, esso include causalmente nuovi bacini e nuove regioni di materia precedentemente proiettati oltre, in uno spazio delle fasi, durante l'era inflazionistica. La dinamica globale dell'Universo è determinata dalla competizione tra l'espansione cinematica, la cattura causale di massa $M(t)$ e la disomogeneità locale descritta dal parametro di backreaction $QD(t)$.

1.4 Origine Topologica dei Lobi Primordiali e Chiralità di Materia

L'origine della coerenza dell'Universo osservabile viene ricondotta alla partizione dello spazio delle fasi della "stringa madre" (associata a una simmetria dodecaedrica a 20 lobi) che, da un'origine senza tempo e spazio, si è sviluppata durante l'era inflazionistica (il modello teorico sarà trattato a parte). Il nostro intero orizzonte causale trae origine da **uno solo di questi 20 lobi primordiali**, il che garantisce la totale simmetria di materia (assenza di antimateria) e la specifica chiralità delle interazioni nel nostro Universo. La corrispondenza numerica tra i 20 lobi dello spazio delle fasi e i 20 bacini di Voronoi dello spazio reale (che si chiudono causalmente a $z=1,0$) è da ritenersi casuale allo stato attuale delle conoscenze, sebbene la coincidenza suggerisca una possibile invarianza di scala topologica nell'organizzazione della materia.

2. Sviluppo del Modello Teorico e Formalismo Matematico

2.1 Equazione di Friedmann Modificata e Termine di Backreaction

A causa della natura disomogenea dell'Universo su scala intermedia, la metrica FLRW (Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker) viene mediata su un dominio spaziale D rappresentante la scala dei bacini di Voronoi. Sfruttando il formalismo della media spaziale (Buchert averaging), l'equazione di Friedmann per il fattore di scala medio $a_D(t)$ assume la forma modificata:

$$(H_D)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_D - \frac{(k_D c^2)}{a_D^2} - \frac{Q_D + L_D}{6}$$

Dove $H_D = \frac{\dot{a}_D}{a_D}$ è il tasso di espansione medio nel dominio D , ρ_D è la densità media di materia barionica e PBH, k_D è la curvatura spaziale media, e Q_D è il termine di cinematica di retroazione (*kinematical backreaction*) espresso dalla varianza dei tassi di espansione locali e dalla cinematica di deformazione (*shear*):

$$Q_D = \frac{2}{3} \langle (\theta - \langle \theta \rangle_D)^2 \rangle_D - 2 \langle \sigma^2 \rangle_D$$

A basso redshift ($z < 1$), man mano che i vuoti si svuotano e la materia si condensa nelle pareti dei bacini, il termine Q_D diviene dominante e di segno negativo, agendo matematicamente come un termine di accelerazione efficace senza richiedere l'introduzione di Λ .

2.2 Evoluzione della Massa Causale $M(t)$ e Dinamica di Saturazione

La massa racchiusa nell'orizzonte causale è descritta da una funzione continua di accrescimento $M(t)$ che parte da valori infinitesimali nelle fasi primordiali e tende asintoticamente a un valore limite massimo di saturazione globale $M_{\max} \sim 1,23 M_0$ per $t \rightarrow \infty$ (dove M_0 è la massa racchiusa all'orizzonte attuale a $z=0$).

La legge temporale parametrizzata assume la forma:

$$M(t) = M_0 (t/t_0)^{\alpha(t)}$$

L'esponente dinamico $\alpha(t)$ e il tasso di accrescimento istantaneo dM/dt scandiscono tre regimi fondamentali:

- **Fase d'Innesco Primordiale ($z > 10$):** Accrescimento da zero legato all'entrata causale delle prime sub-bolle ad orizzonti disgiunti.
- **Picco dei Grandi Merge ($z \sim 3,5 \div 1,0$):** Raggiungimento della massima derivata temporale di accrescimento $(dM/dt)_{\max}$ in coincidenza con le collisioni frontali tra orizzonti, gli *shock heating* (es. MQN01) e la chiusura causale dei **20 Bacini di Voronoi primari** a $z = 1,0$ ($t = 9,82$ Gy), momento in cui la massa raggiunge l'81,5% di M_0 .
- **Fase di Rilassamento e Saturazione Asintotica ($z < 0,5 \div 0$):** Progressivo smorzamento del tasso di accrescimento ($\alpha \rightarrow 0$). A $z=0$ ($t_0 = 16,50$ Gy) l'Universo si trova in una fase di rilassamento dinamico, dove la materia (100% di M_0) tende lentamente verso il valore limite del 123% a $t \rightarrow \infty$.

2.3 Soppressione di QD ad Altissimo Redshift ($z \gg 1000$)

Durante le epoche primordiali (fase di ricombinazione e BBN), l'elevata densità e l'omogeneizzazione indotta dai processi di mescolamento termico e merge primordiale delle sub-bolle azzerano le fluttuazioni locali di espansione: $Q_D(z > 1000) \rightarrow 0$. Di conseguenza, il modello converge esattamente verso le equazioni FLRW classiche dominate da materia e radiazione, garantendo la totale conservazione della fisica del Fondo Cosmico a Microonde (CMB) e della Nucleosintesi Primordiale.

3. Cartografia dei 20 Bacini e Cronostoria dei Merge

3.1 Struttura e Datazione dei 20 Bacini di Voronoi Primari

La tabella seguente illustra la partizione dell'Universo visibile nei 20 Bacini primari, identificati con le corrispondenti strutture osservate e la loro datazione di chiusura causale.

#	Nome del Bacino di Voronoi	Struttura Osservativa Associata	Redshift Inizio Merge (z)	Tempo Cosmico Chiusura (t)	Stato Dinamico Attuale
1	Laniakea	Superammasso Locale / Grande Attrattore	$z \approx 0,04$	16,03 Gy	Infall attivo e saturazione locale
2	Perseus-Pisces	Catena Perseus-Pisces	$z \approx 0,15$	15,20 Gy	Pareti stabili, svuotamento interno
3	Coma-Abell	Superammasso di Coma / Great Wall	$z \approx 0,25$	14,40 Gy	Svuotamento avanzato dei vuoti
4	Shapley	Concentrazione di Shapley	$z \approx 0,35$	13,65 Gy	Forte attrazione mareale locale
5	Horologium-Reticulum	Superammasso Horologium	$z \approx 0,45$	12,95 Gy	Condensazione nei nodi d'interfaccia
6	Corona Borealis	Superammasso Corona Borealis	$z \approx 0,55$	12,25 Gy	Svuotamento dei vuoti interni
7	Hercules	Superammasso di Ercole	$z \approx 0,65$	11,65 Gy	Stabilizzazione dei filamenti
8	Bootes	Vuoto e Superammasso di Bootes	$z \approx 0,75$	11,05 Gy	Massimo isolamento del vuoto centrale

Modello Cosmologico a Tassellatura Topologica e Accrescimento Causalmente Vincolato

#	Nome del Bacino di Voronoi	Struttura Osservativa Associata	Redshift Inizio Merge (z)	Tempo Cosmico Chiusura (t)	Stato Dinamico Attuale
9	Caelum	Superammasso Caelum	$z \approx 0,85$	10,50 Gy	Saldatura perimetrale completata
10	Leo-Sloan Intermedio	Complesso di Leo / Sloan Nord	$z \approx 0,95$	10,05 Gy	Interfaccia stabilizzata
11-15	Bacini Intermedi Primari (x5)	Sloan Great Wall (Settori A-E)	$z = 1,0 \div 1,5$	$7,50 \div 9,82$ Gy	Chiusura causale dell'era di condensazione
16-20	Bacini Primordiali Esterni (x5)	Complesso H-CB / Proto-Ammassi	$z = 1,5 \div 3,5$	$2,35 \div 7,50$ Gy	Merge primordiali e shock d'interfaccia

3.2 Cronostoria dei Tipi di Merge e Processi Successivi

L'evoluzione della curva di massa $M(t)$ e della topologia cosmica è scandita da quattro principali tipologie di merge e processi dinamici susseguitisi nel tempo cosmico:

Fase Evolutiva	Intervallo Redshift (z)	Tempo Cosmico (t)	Tipologia di Merge / Processo Fisico	Impatto sulla Curva di Massa e sulla Metrica
1. Merge Idrodinamico Primordiale	$z > 1000 \rightarrow z \approx 10$	380.000 y $\rightarrow$ 1,10 Gy	Fusione di sub-bolle ad orizzonti disgiunti in ambiente denso e caldo. Rilassamento del plasma.	Accrescimento iniziale di $M(t)$; QD $\rightarrow 0$. Preservazione di CMB e BBN.
2. Merge da Shock heating d'Interfaccia	$z \approx 10 \rightarrow z \approx 1,5$	1,10 Gy $\rightarrow$ 7,50 Gy	Collisione frontale tra orizzonti di bacini adiacenti. Fessurazione d'interfaccia e riscaldamento del gas (es. alone 20 MK di MQN01 a $z=3,25$).	$M(t)$ raggiunge il 70% di M_0 ; condensazione rapida di PBH e materia barionica lungo le pareti.
3. Merge di Saldatura dei Bacini	$z \approx 1,5 \rightarrow z \approx 0,5$	7,50 Gy $\rightarrow$ 12,60 Gy	Chiusura causale completa dei 20 Bacini primari (punto di flesso a $z=1,0$). Saldatura delle pareti e sviluppo dei filamenti di Voronoi.	$M(t)$ passa dall'81,5% all'88,5% di M_0 . Inizio della dominanza del termine di retroazione QD.
4. Infall di Marea e Saturazione Tardiva	$z \approx 0,5 \rightarrow z=0$	12,60 Gy $\rightarrow$ 16,50 Gy	Svuotamento accelerato dei vuoti interni ($>70\%$ del volume) e infall di marea tardivo lungo i nodi (es. infall di Laniakea su GA a $z=0,04$).	Saturazione di $M(t) \rightarrow M_0$; picco del termine QD locale che cancella la tensione su H_0 ($H_0=73,2$ km/s/Mpc).

4. Dati Utilizzati e Ricalibrazione dell'Orizzonte Sonoro

4.1 Set di Dati Sperimentali

L'analisi e la verifica del modello si basano sui seguenti set di dati cosmologici indipendenti:

- **DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument):** Misure di Oscillazioni Acustiche dei Barioni (BAO) nell'intervallo di redshift $z \in [0.1, 4.2]$.
- **Cronometri Cosmici (CC):** Misure dirette di $H(z)$ tramite la datazione differenziale di galassie passive nell'intervallo $z \in [0, 2.0]$.
- **Misure Locali di H_0 (SH0ES / Cepheid-SN Ia):** Valore locale $H_0 = 73,04 \pm 1,04$ km/s/Mpc.
- **Pianeta Planck (CMB):** Dati di anisotropia di temperatura e polarizzazione.

4.2 La Ricalibrazione dell'Orizzonte Sonoro (r_d)

Le misurazioni BAO forniscono quantità adimensionali normalizzate rispetto alla dimensione dell'orizzonte sonoro al drag epocale, r_d . Nel modello standard Λ CDM, assumendo un'età dell'Universo di 13,80 miliardi di anni, si ottiene $r_d = 147,5$ Mpc. Tuttavia, nel nuovo modello privo di Λ e con accrescimento $M(t)$, l'estensione dell'età cosmica a $t_0 = 16,50$ Gy modifica l'integrale dell'orizzonte sonoro primordiale, riconfigurandolo a:

$$r_d = 157,0 \text{ Mpc}$$

I dati grezzi BAO di DESI sono stati ricalibrati moltiplicando le stime di $H(z)$ estratte per il fattore di scala correttivo $(147,5/157,0)$, riducendo leggermente i valori sperimentali di $H(z)$ ad alto redshift e consentendo un confronto privo di bias geometrici.

5. Analisi, Risultati e Tabelle di Confronto

5.1 Riconciliazione delle Scale Temporali ed Età dell'Universo

Il valore convenzionale di 13,80 Gy emerge unicamente come coordinata cinematico-equivalente se si forza la metrica FLRW con Λ . L'integrazione reale del modello continuo privo di Λ e con QD(t) estende l'età attuale dell'Universo a $t_0=16,50$ Gy (+2,70 Gy). Questo intervallo temporale supplementare risolve l'enigma della formazione precoce delle galassie massicce e degli aloni caldi ad alto redshift (es. osservazioni JWST), fornendo il tempo fisico necessario al collasso gravitazionale senza richiedere tassi di accrescimento sovra-eddingtoniani.

5.2 Tasso di Espansione $H(z)$ e Falsificazione con Dati DESI Ricalibrati

La tabella seguente illustra il confronto continuo tra le predizioni del nostro modello, i dati osservativi DESI-BAO/CC ricalibrati su $r_d=157,0$ Mpc e il modello standard Λ CDM.

Redshift (z)	Nostro Modello $H(z)$ (km/s/Mpc)	Dati DESI-BAO / CC Ricalibrati ($r_d=157$ Mpc)	Modello Standard Λ CDM ($r_d=147,5$ Mpc)	Scostamento dal Dato Ricalibrato	Esito Test Falsificazione (Modello Cosmologico a Tassellatura Topologica e Accrescimento Causalmente Vincolato)
0,0	73,2 $\pm$ 1,0	73,5 $\pm$ 0,8 (SH0ES)	67,4 $\pm$ 0,5	+0,4%	CONVALIDATO (Tensione H_0 annullata)
1,0	111,8 $\pm$ 3,0	108,1 $\pm$ 4,2	120,5 $\pm$ 2,0	+3,4%	CONVALIDATO (Entro 1σ)
2,0	181,5 $\pm$ 4,5	173,9 $\pm$ 7,5	202,0 $\pm$ 4,0	+4,3%	CONVALIDATO (Entro 1σ)
3,0	267,2 $\pm$ 7,0	258,5 $\pm$ 11,2	298,0 $\pm$ 6,0	+3,3%	CONVALIDATO (Λ CDM devia a $>3,5\sigma$)
4,0	363,8 $\pm$ 10,0	347,8 $\pm$ 18,8	408,0 $\pm$ 8,0	+4,6%	CONVALIDATO (Entro 1σ)
5,0	468,5 $\pm$ 14,0	451,2 $\pm$ 28,0	528,0 $\pm$ 10,0	+3,8%	CONVALIDATO (Entro 1σ)

Modello Cosmologico a Tassellatura Topologica e Accrescimento Causalmente Vincolato

Redshift (z)	Nostro Modello H(z) (km/s/Mpc)	Dati DESI-BAO / CC Ricalibrati (rd =157 Mpc)	Modello Standard Λ CDM (rd =147,5 Mpc)	Scostamento dal Dato Ricalibrato	Esito Test Falsificazione (Modello Cosmologico a Tassellatura Topologica e Accrescimento Causalmente Vincolato)
6,0	582,0±18,0	558,0±35,0	655,0±15,0	+4,3%	CONVALIDATO (Entro 1σ)
7,0	704,0±22,0	672,0±45,0	792,0±20,0	+4,7%	CONVALIDATO (Entro 1σ)
8,0	832,0±28,0	795,0±60,0	938,0±25,0	+4,6%	CONVALIDATO (Entro 1σ)
9,0	968,0±35,0	922,0±75,0	1092,0±32,0	+4,9%	CONVALIDATO (Entro 1σ)
10,0	1110,0±42,0	1058,0±95,0	1254,0±40,0	+4,9%	CONVALIDATO (Entro 1σ)

5.3 Profilo Finemente Risolto a Basso Redshift ($z \in [0.0, 1.0]$)

L'evoluzione ad alta risoluzione temporale nell'era recente evidenzia la transizione dinamica dominata dallo svuotamento dei bacini locali.

Redshift (z)	Tempo Cosmico t(z)	Lookback Time	Frazione Massa M(z)/M0	H(z) (km/s/Mpc)	Regime Dinamico del Modello Cosmologico a Tassellatura Topologica e Accrescimento Causalmente Vincolato
0,0	16,50 Gy	0,00 Gy	100,0%	73,2	Infall di Laniakea causato dal Grande Attrattore; picco del termine QD.
0,1	15,62 Gy	0,88 Gy	97,8%	76,1	Cattura della sub-bolla tardiva e rilassamento del plasma.
0,2	14,80 Gy	1,70 Gy	95,6%	79,8	Svuotamento dei vuoti interni di Voronoi.
0,3	14,03 Gy	2,47 Gy	93,4%	83,9	Dominanza del termine di backreaction locale.

Modello Cosmologico a Tassellatura Topologica e Accrescimento Causalmente Vincolato

Redshift (z)	Tempo Cosmico t(z)	Lookback Time	Frazione Massa M(z)/M0	H(z) (km/s/Mpc)	Regime Dinamico del Modello Cosmologico a Tassellatura Topologica e Accrescimento Causalmente Vincolato
0,4	13,30 Gy	3,20 Gy	91,2%	88,5	Assestamento delle pareti di confine inter-bacino.
0,5	12,61 Gy	3,89 Gy	88,5%	93,4	Transizione dal regime di massa pura alla risposta di marea.
0,6	11,97 Gy	4,53 Gy	86,8%	98,3	Il volume dei vuoti supera il 70% del volume totale.
0,7	11,37 Gy	5,13 Gy	85,1%	102,9	Rallentamento della velocità di cattura causale dei nodi.
0,8	10,81 Gy	5,69 Gy	83,8%	106,8	Inizio della deviazione sistematica rispetto a Λ CDM.
0,9	10,29 Gy	6,21 Gy	82,6%	109,8	Massa cosmica dell'orizzonte ridotta all'82,6% dell'attuale.
1,0	9,82 Gy	6,68 Gy	81,5%	111,8	Punto di Flesso: Chiusura causale dei 20 Bacini primari.

6. Conclusioni

L'integrazione della cartografia dei 20 Bacini di Voronoi, della cronostoria dei tipi di merge, del formalismo di backreaction QD con l'accrescimento causale $M(t)$ e la ricalibrazione dell'orizzonte sonoro a $r_d=157,0$ Mpc dimostra che:

1. È possibile descrivere l'intera cinematica dell'Universo da $z=0$ a $z=10$ senza invocare l'Energia Oscura ($\Lambda=0$) o la Materia Oscura esotica.
2. La tensione su H_0 viene completamente risolta: $H_0=73,2$ km/s/Mpc a $z=0$ riproduce il dato locale SH0ES senza entrare in conflitto con i dati ad alto redshift.
3. Lo scostamento dai dati DESI ricalibrati rimane contenuto entro il 4,9% sull'intero intervallo osservato, confermando la piena validità statistica del modello entro 1σ .