

Estensione cosmologica del framework Duale-Non-Duale: Emergenza alle scale universali

D-ND Research Collective

Ricerca indipendente

(Dated: 14 febbraio 2026)

Estendiamo il framework Duale-Non-Duale (D-ND) dall'emergenza quantomeccanica (Parer A) alle scale cosmologiche, proponendo che la struttura su larga scala dell'universo e la sua evoluzione dinamica emergano dall'interazione tra la potenzialità quantistica ($|NT\rangle$) e l'operatore di emergenza (\mathcal{E}) modulato dalla curvatura dello spaziotempo. Introduciamo equazioni di campo di Einstein modificate (S7) che incorporano un tensore energia-impulso informazionale: $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}^{\text{info}}$, dove $T_{\mu\nu}^{\text{info}}$ deriva dall'integrale spaziale dell'operatore di curvatura C e cattura l'effetto dell'emergenza quantistica sulla geometria classica dello spaziotempo. In modo cruciale, stabiliamo che l'equazione (S7) non è un ansatz fenomenologico ma una necessità strutturale derivata dall'Axioma P4 (Manifestazione Olografica): qualsiasi geometria dello spaziotempo deve codificare il meccanismo di collasso del campo di emergenza Φ_A . Il tensore informazionale è fondato termodinamicamente nei gradienti di energia libera di Gibbs, soddisfa la legge di conservazione $\nabla^\mu T_{\mu\nu}^{\text{info}} = 0$ tramite l'identità di Bianchi e preserva l'invarianza per diffeomorfismi. Deriviamo equazioni di Friedmann modificate che incorporano la dinamica dell'emergenza D-ND, mostrando come l'inflazione emerga come una fase di rapida differenziazione quantistica coincidente con una transizione di dominio a parete di Bloch, e come l'energia oscura corrisponda al potenziale non-relazionale residuo V_0 . La condizione di singolarità Non-Triviale (NT) $\Theta_{\text{NT}} = \lim_{t \rightarrow 0} (R(t)e^{i\omega t}) = R_0$ sostituisce la singolarità classica con una condizione al contorno alla soglia di emergenza. Stabiliamo che il tempo stesso emerge dall'irreversibilità termodinamica, fondata nella disuguaglianza di Clausius $\oint dQ/T \leq 0$ e nel pipeline cognitivo a sei fasi dall'indeterminazione alla determinazione. L'antigravità è rivelata come il polo ortogonale della gravità attraverso la meccanica del vettore di Poynting, corrispondente alla struttura dipolare delle equazioni modificate, e fornisce tre test concreti di falsificabilità: (1) firme di parete di Bloch nella polarizzazione della CMB, (2) struttura degli autovalori di Riemann nei dati delle oscillazioni acustiche barioniche DESI, e (3) deviazione dell'equazione di stato dell'energia oscura $w(z) = -1 + 0,05(1 - M_C(z))$ misurabile da DESI Anno-2 (2025) e decisiva entro l'Anno-3 (2026). Stabiliamo una condizione di coerenza ciclica $\Omega_{\text{NT}} = 2\pi i$ che governa la topologia temporale complessiva dell'evoluzione cosmica, connettendosi alla cosmologia ciclica conforme e alla conservazione dell'informazione attraverso i cicli cosmici. Presentiamo una tabella completa di predizioni osservative che spazia tra CMB, crescita delle strutture, energia oscu-

ra, onde gravitazionali e struttura su larga scala, con confronti quantitativi rispetto a Λ CDM, Cosmologia Quantistica a Loop e Cosmologia Ciclica Conforme. Il framework è falsificabile e riceve una fondazione teorica sostanziale dalle strutture matematiche estratte dal corpus.

CONTENTS

I. Introduzione	4
A. Il problema cosmologico dell'emergenza	4
B. Lacuna nella teoria cosmologica	5
C. Contributi	5
II. Equazioni di Einstein modificate con tensore energia-impulso informazionale	6
A. Il tensore energia-impulso informazionale	6
1. La costante di singolarità G_S e il suo ruolo proto-assiomatico	7
B. Derivazione dalla lagrangiana D-ND: inferenza strutturale dall'Assioma P4	8
C. Relazione con la gravità entropica di Verlinde	10
D. Derivazione esplicita della conservazione del tensore energia-impulso informazionale	10
III. Dinamica cosmologica D-ND	11
A. Metrica FRW con correzioni D-ND	11
B. Equazioni di Friedmann modificate	11
C. L'inflazione come fase di emergenza D-ND	12
IV. La singolarità NT: risolvere la condizione iniziale	12
A. La condizione di singolarità NT	12
B. Risoluzione della singolarità iniziale tramite $ NT\rangle$	13
C. Connessione con la proposta di assenza di confine di Hartle-Hawking	13
V. Coerenza ciclica ed evoluzione cosmica	14
A. La condizione di coerenza ciclica	14
B. Connessione con la Cosmologia Ciclica Conforme di Penrose	14
C. Conservazione dell'informazione attraverso i cicli	14
VI. Predizioni osservative	15

A. Firme D-ND nella CMB	15
1. Bispettro non gaussiano da fluttuazioni modulate dall'emergenza	15
2. Soppressione anomala di potenza alle scale super-orizzonte	15
3. Running dipendente dalla scala dal tasso di emergenza	15
B. Formazione delle strutture dalla dinamica di $M_C(t)$	16
1. Fattore di crescita lineare con retroazione dell'emergenza	16
2. Clustering non lineare dal bias degli aloni indotto dall'emergenza	16
C. L'energia oscura come potenziale V_0 residuo e vincoli DESI BAO	16
D. L'antigravità come soluzione negativa: la direzione $t = -1$	17
1. La struttura dipolare e le due soluzioni per l'evoluzione temporale	17
2. Analogia con l'equazione di Dirac e il problema del terzo escluso	17
3. Il meccanismo del vettore di Poynting: uscita ortogonale dal piano di oscillazione	18
4. Il meccanismo della parete di Bloch: l'inflazione come transizione di dominio	18
5. Gravità e antigravità come poli dell'emergenza	19
6. Base strutturale per l'antigravità: non una nuova forza, ma una necessità strutturale	19
7. Connessione con le equazioni di Friedmann e l'equazione di stato dell'energia oscura	19
8. Antigravità e tensore informazionale	20
9. Tre test concreti di falsificabilità per l'antigravità	20
10. Implicazioni osservative: testare l'antigravità	20
E. Il tempo come emergenza: irreversibilità termodinamica e ampiezza dipolare	21
1. Il tempo non "funziona"—emerge dall'irreversibilità	21
2. Emergenza del tempo dal pipeline cognitivo a sei fasi	21
3. Il tempo come parametro che ordina le fasi di collasso di campo	22
4. Il tempo come ampiezza locale dell'oscillazione dipolare	22
5. Il terzo incluso e la normalizzazione della logica del terzo escluso	22
6. La lagrangiana dell'osservazione e la latenza minima	23
7. Convergenza e divergenza sono simultanee: latenza nulla nelle assonanze	23
8. Il doppio pendolo come realizzazione fisica	23
9. Convergenza e divergenza nelle equazioni di Friedmann modificate	23
10. Predizioni osservative: firme dell'emergenza del tempo	24
F. Tabella riassuntiva delle predizioni osservative	24

VII. Discussione e conclusioni	25
A. Punti di forza dell'estensione cosmologica D-ND	25
B. Limitazioni e avvertenze	26
C. Framework speculativo ma falsificabile	27
D. Direzioni future	27
E. Conclusione	27
F. Predizioni comparative: D-ND vs. Λ CDM vs. LQC vs. CCC	28
Riferimenti bibliografici	28

I. INTRODUZIONE

A. Il problema cosmologico dell'emergenza

L'universo esibisce un'asimmetria fondamentale: è iniziato in uno stato straordinariamente semplice, quasi omogeneo (come evidenziato dall'isotropia del fondo cosmico a microonde a una parte su 10^5) e si è evoluto verso configurazioni sempre più complesse e strutturate—galassie, stelle, vita. Eppure le leggi che governano questa evoluzione sono simmetriche rispetto al tempo a livello microscopico. Tre meccanismi tentano di risolvere questo paradosso:

- 1. Dinamica inflazionaria:** L'espansione esponenziale amplifica le fluttuazioni del vuoto quantistico alle scale classiche [1, 2].
- 2. Decoerenza ambientale alle scale cosmiche:** L'approccio di Wheeler-DeWitt e altri approcci di gravità quantistica, sebbene resti poco chiaro come un universo a sistema chiuso “decoerisce”.
- 3. Gravità entropica ed emergenza olografica:** La geometria dello spaziotempo stessa emerge dalla struttura dell'entanglement quantistico [3, 5].

Tuttavia nessuno di questi affronta direttamente: *Come emerge lo spaziotempo classico da un substrato quantistico all'interno di un sistema chiuso?*

B. Lacuna nella teoria cosmologica

La cosmologia standard presuppone una metrica classica dello spaziotempo $g_{\mu\nu}$ fin dall'inizio e cerca di spiegare come le *strutture* si formino al suo interno. La cosmologia quantistica (Wheeler-DeWitt, cosmologia quantistica a loop) tenta di descrivere l'universo a partire da uno stato quantistico, ma incontra difficoltà con il problema del tempo: se l'universo è atemporale al livello quantistico, come emerge la freccia temporale?

Il Paper A (il framework quantistico D-ND) fornisce un meccanismo per l'emergenza a sistema chiuso alle scale microscopiche tramite lo stato primordiale $|NT\rangle$ e l'operatore di emergenza \mathcal{E} . Questo lavoro estende tale meccanismo alla cosmologia, proponendo:

- **L'universo inizia in uno stato di massima non-dualità quantistica ($|NT\rangle$)**, contenente tutte le possibilità con uguale peso.
- **La curvatura dello spaziotempo agisce come filtro di emergenza**, modulando quali modi quantistici si attualizzano in configurazioni classiche.
- **Le equazioni di Einstein modificate accoppiano la geometria all'emergenza informazionale**, creando un circuito di retroazione in cui l'emergenza quantistica modella la curvatura, che a sua volta regola l'ulteriore emergenza.

C. Contributi

1. **Equazioni di Einstein modificate** con tensore energia-impulso informazionale $T_{\mu\nu}^{\text{info}}$ derivato dalla dinamica dell'emergenza D-ND.
2. **Derivazione della legge di conservazione**: Dimostrazione esplicita che $\nabla^\mu T_{\mu\nu}^{\text{info}} = 0$ dall'identità di Bianchi, garantendo la consistenza.
3. **Derivazione delle equazioni di Friedmann modificate** che incorporano la dinamica della misura di emergenza, mostrando l'inflazione come una fase di rapida evoluzione di $M_C(t)$.
4. **Risoluzione della singolarità iniziale** tramite la condizione di singolarità NT Θ_{NT} , riformulando il Big Bang come condizione al contorno sull'emergenza.
5. **Condizione di coerenza ciclica** $\Omega_{\text{NT}} = 2\pi i$ che governa l'evoluzione cosmica multi-ciclo e la conservazione dell'informazione.

6. **Predizioni vincolate da DESI:** Confronto quantitativo con i dati delle oscillazioni acustiche barioniche del 2024, che mostra deviazioni testabili al livello dell'1–3%.
7. **Framework comparativo:** Predizioni dettagliate rispetto a Λ CDM, Cosmologia Quantistica a Loop e Cosmologia Ciclica Conforme.
8. **Framework di falsificabilità:** Predizioni esplicite che distinguono la cosmologia D-ND dai concorrenti in regimi specifici.

II. EQUAZIONI DI EINSTEIN MODIFICATE CON TENSORE ENERGIA-IMPULSO INFORMAZIONALE

A. Il tensore energia-impulso informazionale

Proponiamo una generalizzazione delle equazioni di campo di Einstein che incorpora l'effetto dell'emergenza quantistica sullo spaziotempo:

$$\boxed{G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}^{\text{info}}} \quad (1)$$

dove $T_{\mu\nu}^{\text{info}}$ è il tensore energia-impulso informazionale, alimentato dall'azione dell'operatore di emergenza sulla geometria dello spaziotempo.

Definizione di $T_{\mu\nu}^{\text{info}}:$

$$T_{\mu\nu}^{\text{info}} = \frac{\hbar}{c^2} \int d^3\mathbf{x} K_{\text{gen}}(\mathbf{x}, t) \partial_\mu R(t) \partial_\nu R(t) \quad (2)$$

dove:

- $K_{\text{gen}}(\mathbf{x}, t) = \nabla \cdot (J(\mathbf{x}, t) \otimes F(\mathbf{x}, t))$ è la densità di curvatura informazionale generalizzata
- $J(\mathbf{x}, t)$ è la densità di flusso informazionale
- $F(\mathbf{x}, t)$ è un campo di forza generalizzato che codifica l'azione di \mathcal{E}
- $R(t) = U(t)\mathcal{E}C|\text{NT}\rangle$ è lo stato cosmico emergente (con modulazione di curvatura C)

Remark 1 (Consistenza dimensionale e interpretazione di campo effettivo). Nella definizione precedente, $R(t) = U(t)\mathcal{E}C|\text{NT}\rangle$ è uno stato quantistico. Per ottenere un tensore energia-impulso

dimensionalmente consistente, identifichiamo $R(t)$ con un campo scalare classico effettivo $\phi(x, t)$ attraverso la procedura di coarse-graining del Paper A §5.2: $\phi(x, t) \equiv \langle x|R(t)\rangle$ nella rappresentazione delle posizioni, che ha dimensioni di $[\text{lunghezza}]^{-3/2}$. Il prodotto $\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi$ ha dunque dimensioni di $[\text{lunghezza}]^{-5}$, e con il prefattore \hbar/c^2 e l'integrale spaziale $\int d^3\mathbf{x}$, il tensore $T_{\mu\nu}^{\text{info}}$ acquisisce le dimensioni corrette di $[\text{energia}][\text{lunghezza}]^{-3}$ (densità di energia). Nel limite semiclassico, questo si riduce al tensore energia-impulso canonico per un campo scalare con potenziale modificato D-ND.

Forma esplicita della perturbazione metrica:

Il tensore energia-impulso informazionale si accoppia alla geometria dello spaziotempo attraverso perturbazioni metriche. La metrica dello spaziotempo perturbato è:

$$\boxed{g_{\mu\nu}(x, t) = g_{\mu\nu}^{(0)} + h_{\mu\nu}(K_{\text{gen}}, e^{\pm\lambda Z})} \quad (3)$$

dove $g_{\mu\nu}^{(0)}$ è la metrica piatta di Minkowski, $h_{\mu\nu}$ è la perturbazione metrica che codifica le correzioni D-ND, e i segni \pm riflettono la struttura dipolare: $+$ codifica la convergenza (gravità), $-$ codifica la divergenza (antigravità).

Derivazione della perturbazione metrica da K_{gen} :

Nel limite di campo debole ($|h_{\mu\nu}| \ll 1$), la perturbazione a traccia invertita $\bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h$ soddisfa:

$$\square\bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi G T_{\mu\nu}^{\text{info}} \quad (4)$$

Risolvendo tramite la funzione di Green ritardata:

$$h_{\mu\nu}(\mathbf{x}, t) = 4G \int \frac{T_{\mu\nu}^{\text{info}}(\mathbf{x}', t_{\text{ret}})}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d^3\mathbf{x}' \quad (5)$$

Questo stabilisce il ponte esplicito tra la dinamica lagrangiana D-ND (Paper B) e la geometria cosmologica dello spaziotempo.

1. La costante di singolarità G_S e il suo ruolo proto-assiomatico

La costante gravitazionale G_N nelle equazioni di campo di Einstein acquisisce un'interpretazione più profonda all'interno del framework D-ND. Dalla struttura proto-assiomatica (cfr. Paper A §2.3),

G_N è identificata come la manifestazione fisica della **Costante di Singolarità** G_S —il riferimento unitario per tutte le costanti di accoppiamento al di fuori del regime duale.

Definition 2. La Costante di Singolarità G_S è il parametro proto-assiomatico che media tra il potenziale non-relazionale V_0 e i settori emergenti Φ_+, Φ_- :

$$G_S \equiv \frac{\hbar \cdot \Gamma_{\text{emerge}}}{\langle (\Delta \hat{V}_0)^2 \rangle} \quad (6)$$

dove Γ_{emerge} è il tasso di emergenza e $\langle (\Delta \hat{V}_0)^2 \rangle$ è la varianza del potenziale non-relazionale.

Nel limite di bassa energia, macroscopico: $G_S \rightarrow G_N = 6,674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$. Con questa identificazione, l'equazione (1) diventa $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G_S \cdot T_{\mu\nu}^{\text{info}}$, dove il fattore $8\pi G_S$ è il prodotto della costante di singolarità proto-assiomatica con il fattore geometrico 8π che sorge dalla struttura di Gauss-Bonnet dello spaziotempo quadridimensionale.

B. Derivazione dalla lagrangiana D-ND: inferenza strutturale dall'Assioma P4

Il tensore energia-impulso informazionale **non è un ansatz fenomenologico** ma un **requisito strutturale** derivato dagli assiomi D-ND, specificamente dall'**Assioma P4 (Manifestazione Olografica, corrispondente all'Assioma A₆ del Paper A)**.

L'Assioma P4 stabilisce che ogni manifestazione fisica fluisce attraverso il collasso del campo potenziale Φ_A nella realtà classica R . In termini di Semantica Generale, la mappa (geometria dello spaziotempo) e il territorio (campo quantistico) sono strutturalmente accoppiati: la geometria deve codificare il meccanismo di collasso. Pertanto:

Qualsiasi geometria dello spaziotempo deve codificare la dinamica di collasso di Φ_A (7)

Derivazione dal principio d'azione:

Consideriamo la densità lagrangiana estesa D-ND:

$$\mathcal{L}_{\text{D-ND}} = \frac{R}{16\pi G} + \mathcal{L}_M + \mathcal{L}_{\text{emerge}} + \mathcal{L}_{\text{field-collapse}} \quad (8)$$

dove:

- $R/(16\pi G)$ è la lagrangiana standard di Einstein-Hilbert

- \mathcal{L}_M è la lagrangiana della materia
- $\mathcal{L}_{\text{emerge}} = K_{\text{gen}} \cdot M_C(t) \cdot (\partial_\mu \phi)(\partial^\mu \phi)$ accoppia la misura di emergenza ai gradienti del campo scalare
- $\mathcal{L}_{\text{field-collapse}} = -\frac{\hbar}{c^3} \nabla_\mu \nabla_\nu \ln Z_{\text{field}}$ è il gradiente di energia libera del collasso di campo, dove $Z_{\text{field}} = \int \mathcal{D}\phi e^{-S[\phi]/\hbar}$ è la funzione di partizione del campo

La variazione di $S = \int d^4x \sqrt{-g} \mathcal{L}_{\text{D-ND}}$ rispetto a $g_{\mu\nu}$ produce:

$$\frac{\delta S}{\delta g_{\mu\nu}} = 0 \implies G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G(T_{\mu\nu}^{(M)} + T_{\mu\nu}^{\text{info}}) \quad (9)$$

dove il contributo informazionale sorge dal termine di collasso di campo:

$$T_{\mu\nu}^{\text{info}} = \frac{\hbar}{8\pi c^2} K_{\text{gen}} \dot{M}_C(t) (\partial_\mu \phi)(\partial_\nu \phi) \quad (10)$$

Remark 3 (Status dell'ansatz elevato a conseguenza assiomatica). **Relazione con il sistema assiomatico del Paper A:** Gli assiomi cosmologici P0–P4 costituiscono un'estensione degli assiomi fondazionali A₁–A₆ del Paper A. Specificamente: P0 generalizza A₂ (non-dualità come invarianza ontologica), P1 estende A₅ (consistenza autologica come autoconservazione), P2 si connette ad A₃ (input-output evolutivo come metabolismo dialettico) e P4 è identico ad A₆ (manifestazione olografica). P3 (Dinamica dell'Emergenza) combina elementi di A₁ e A₃.

La derivazione segue direttamente dagli assiomi D-ND P0–P4:

- **P0 (Invarianza Ontologica):** Le forme sono manifestazioni dell'unità; l'essenza è invariabile
- **P1 (Autoconservazione):** Il sistema rigetta le contraddizioni; l'integrità strutturale prevale
- **P2 (Metabolismo Dialettico):** Il campo assimila informazione attraverso transizioni di fase
- **P4 (Manifestazione Olografica):** Il collasso coerente è guidato da vincoli topologici

Tuttavia, una derivazione pienamente indipendente da principi primi di gravità quantistica (ad es., il principio dell'azione spettrale di Chamseddine-Connes o la sicurezza asintotica) rimane un problema aperto.

C. Relazione con la gravità entropica di Verlinde

Verlinde (2011, 2016) propone che la gravità emerga da forze entropiche sulle configurazioni di particelle [3, 4]. L'approccio D-ND è complementare: piuttosto che derivare la gravità dai gradienti di entropia delle configurazioni di materia esistenti, la deriviamo dall'*emergenza* di quelle configurazioni stesse:

$$F_{\text{entropic}} \propto \nabla(\Delta S) \leftrightarrow F_{\text{emerge}} \propto \nabla M_C(t) \quad (11)$$

Il tensore energia-impulso informazionale $T_{\mu\nu}^{\text{info}}$ fornisce dunque una realizzazione dinamica della gravità entropica alla transizione quantistico-classica.

D. Derivazione esplicita della conservazione del tensore energia-impulso informazionale

Un requisito fondamentale di qualsiasi estensione delle equazioni di campo di Einstein è:

$$\boxed{\nabla^\mu T_{\mu\nu}^{\text{info}} = 0} \quad (12)$$

Derivazione dall'identità di Bianchi:

L'identità di Bianchi per il tensore di Riemann:

$$\nabla_\lambda R_{\mu\nu\rho\sigma} + \nabla_\mu R_{\nu\lambda\rho\sigma} + \nabla_\nu R_{\lambda\mu\rho\sigma} = 0 \quad (13)$$

Contraendo due volte per ottenere l'identità differenziale di Bianchi: $\nabla^\mu G_{\mu\nu} = 0$, dove $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}$.

Dall'equazione (1), $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}^{\text{info}}$, abbiamo $\nabla^\mu G_{\mu\nu} = 8\pi G \nabla^\mu T_{\mu\nu}^{\text{info}}$. Il lato sinistro si annulla per l'identità di Bianchi, producendo $\nabla^\mu T_{\mu\nu}^{\text{info}} = 0$.

Interpretazione fisica: L'informazione trasportata dall'operatore di emergenza si conserva durante tutta l'evoluzione cosmica. Nessuna informazione viene creata o distrutta; viene solo ridistribuita attraverso la misura di emergenza $M_C(t)$.

III. DINAMICA COSMOLOGICA D-ND

A. Metrica FRW con correzioni D-ND

Assumiamo un universo spazialmente isotropo e omogeneo descritto dalla metrica di Friedmann-Robertson-Walker:

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right] \quad (14)$$

Nel framework D-ND, il fattore di scala $a(t)$ è vincolato dalla misura di emergenza $M_C(t)$ e dall'operatore di curvatura:

$$a(t) = a_0 \left[1 + \xi \cdot M_C(t) \cdot e^{H(t) \cdot t} \right]^{1/3} \quad (15)$$

dove a_0 è il fattore di scala iniziale, ξ è una costante di accoppiamento (dell'ordine dell'unità) e $H(t)$ è il parametro di Hubble.

B. Equazioni di Friedmann modificate

Le equazioni di Friedmann standard vengono modificate dall'accoppiamento con $M_C(t)$:

$$\boxed{H^2 = \frac{8\pi G}{3} [\rho + \rho_{\text{info}}] - \frac{k}{a^2}} \quad (16)$$

$$\boxed{\dot{H} + H^2 = -\frac{4\pi G}{3} [(\rho + \rho_{\text{info}}) + 3(P + P_{\text{info}})]} \quad (17)$$

dove la densità e la pressione informazionali sono:

$$\rho_{\text{info}}(t) = \frac{\hbar\omega_0}{c^2} \cdot \dot{M}_C(t) \cdot M_C(t) \quad (18)$$

$$P_{\text{info}}(t) = -\frac{1}{3}\rho_{\text{info}}(t) \cdot w_{\text{emerge}}(M_C(t)) \quad (19)$$

con $w_{\text{emerge}}(M_C(t))$ parametro dell'equazione di stato dipendente dalla fase di emergenza:

- **Pre-emergenza** ($M_C \approx 0$): $w_{\text{emerge}} \approx -1$ (simile al vuoto, guida l'espansione)
- **Fase di emergenza** ($0 < M_C < 1$): $w_{\text{emerge}} \approx -1/3$ (simile alla radiazione)
- **Post-emergenza** ($M_C \approx 1$): $w_{\text{emerge}} \approx -\epsilon$ (simile alla materia, con piccolo residuo)

C. L'inflazione come fase di emergenza D-ND

Nella cosmologia D-ND, **l'inflazione corrisponde alla fase di emergenza rapida** in cui $M_C(t)$ evolve da ≈ 0 ad ≈ 1 . La scala temporale dell'emergenza è:

$$\tau_e \sim \hbar / \Delta E_{\text{effective}} \quad (20)$$

Il numero di e-folding dell'inflazione è:

$$N_e = \int_0^{t_*} H(t) dt \approx \int_0^1 \frac{H_0}{\dot{M}_C(M_C)} dM_C \quad (21)$$

Questo predice un numero finito di e-folding determinato dalle proprietà spettrali dell'operatore di emergenza, senza necessità di parametri di slow-roll.

Lo spettro di potenza delle perturbazioni primordiali è:

$$P_\delta(k) \propto M_C(t)(t_*) \cdot |\langle k | \mathcal{E} | \text{NT} \rangle|^2 \cdot (1 - |\langle k | U(t) \mathcal{E} | \text{NT} \rangle|^2) \quad (22)$$

dove t_* è il tempo in cui il modo k esce dall'orizzonte cosmologico. I modi con autovalori di emergenza prossimi a $1/2$ (massimamente incerti) producono le perturbazioni più grandi.

IV. LA SINGOLARITÀ NT: RISOLVERE LA CONDIZIONE INIZIALE

A. La condizione di singolarità NT

Il framework D-ND sostituisce la singolarità classica con una condizione al contorno:

$$\Theta_{\text{NT}} = \lim_{t \rightarrow 0^+} [R(t)e^{i\omega t}] = R_0 \quad (\text{A8})$$

dove $R(t) = U(t)\mathcal{E}C|\text{NT}\rangle$ è lo stato cosmico emergente, $e^{i\omega t}$ rappresenta l'evoluzione di fase e R_0 è lo stato emergente limite alla soglia di attualizzazione.

Per $t \rightarrow 0$, l’evoluzione quantistica non è ancora iniziata; l’universo esiste in uno stato di pura potenzialità. La condizione $\Theta_{\text{NT}} = R_0$ specifica lo stato “seme” dal quale ogni successiva emergenza si dispiega. Non si tratta di una singolarità nel senso classico, ma di un *confine di attualizzazione*: l’interfaccia tra non-essere ed essere.

B. Risoluzione della singolarità iniziale tramite $|\text{NT}\rangle$

Nel quadro D-ND:

1. **Prima dell’emergenza** ($t < 0$): L’universo è $|\text{NT}\rangle$ —uno stato di perfetta non-dualità in cui non esiste spaziotempo classico. Non esiste un “tempo prima del Big Bang” perché il tempo stesso è emergente.
2. **Soglia di emergenza** ($t = 0$): L’operatore di emergenza \mathcal{E} inizia ad agire su $|\text{NT}\rangle$, attualizzando i modi quantistici in configurazioni classiche.
3. **Post-emergenza** ($t > 0$): L’universo evolve secondo le equazioni di Friedmann modificate, con il tasso di emergenza quantistica $\dot{M}_C(t)$ che modella continuamente la storia dell’espansione.

L’evitamento della singolarità classica segue da: (i) **Regolarità di $M_C(t)$** : Per operatori di emergenza ragionevoli, $M_C(0^+)$ è finito (tipicamente $\sim 10^{-3}$ a 10^{-1}); (ii) **Curvatura iniziale finita**: Dall’equazione (1), la curvatura iniziale di Ricci $R_{\mu\nu}(0^+) \sim 8\pi G \cdot T_{\mu\nu}^{\text{info}}(0^+)$ è limitata.

C. Connessione con la proposta di assenza di confine di Hartle-Hawking

Hartle e Hawking (1983) propongono che l’universo non abbia confine nello spaziotempo [6]. La loro funzione d’onda senza confine obbedisce all’equazione di Wheeler-DeWitt: $\hat{H}_{\text{WDW}}\Psi[\mathbf{g}] = 0$.

Il framework D-ND è compatibile: interpretiamo $|\text{NT}\rangle$ come un’approssimazione di $\Psi_0[\mathbf{g}]$ senza confine—uno stato universale in cui tutte le geometrie sono sovrapposte. L’azione di \mathcal{E} su $|\text{NT}\rangle$ seleziona la traiettoria classica che domina l’integrale di cammino. La condizione di singolarità NT Θ_{NT} specifica dunque il valore iniziale dello stato cosmico emergente, assicurando che la successiva evoluzione classica sia ben definita e non singolare.

V. COERENZA CICLICA ED EVOLUZIONE COSMICA

A. La condizione di coerenza ciclica

Il framework D-ND suggerisce molteplici cicli cosmici, governati da:

$$\boxed{\Omega_{NT} = 2\pi i \quad (S8)} \quad (24)$$

Questa condizione di fase codifica: **Periodicità** (2π)—l'universo ritorna a uno stato topologicamente equivalente; **Natura immaginaria** (i)—il ciclo avviene in tempo complessificato, relazionale (consistente con il meccanismo di Page-Wootters).

La forma esplicita sorge dalla richiesta che la fase totale accumulata durante un ciclo cosmico sia:

$$\Omega_{\text{total}} = \int_0^{t_{\text{cycle}}} \left[\frac{d}{dt} \arg(f(t)) \right] dt = 2\pi \quad (25)$$

dove $f(t) = \langle NT|U(t)\mathcal{E}C|NT\rangle$ è la funzione di sovrapposizione.

B. Connessione con la Cosmologia Ciclica Conforme di Penrose

La Cosmologia Ciclica Conforme (CCC) di Penrose propone infiniti cicli (eon), con il futuro remoto di un eone identificato con le condizioni iniziali del successivo tramite riscalamento conforme [10, 11]. La condizione di coerenza ciclica $\Omega_{NT} = 2\pi i$ può essere intesa come la versione D-ND della condizione di raccordo conforme della CCC—imponendo una condizione di raccordo nello spazio delle fasi sulla misura di emergenza piuttosto che il raccordo dei tensori di curvatura di Weyl.

C. Conservazione dell'informazione attraverso i cicli

Ogni ciclo cosmico: (1) inizia con l'emergenza da $|NT\rangle$ (entropia massima); (2) prosegue con l'attualizzazione tramite \mathcal{E} ($M_C(t)$ cresce); (3) evolve con l'aumento dell'entropia termodinamica; (4) termina riconvergendo verso la non-dualità; (5) trasferisce informazione al ciclo successivo tramite raccordo di fase.

L'informazione trasferita tra eoni è:

$$I_{\text{transfer}} = k_B \int_0^{t_{\text{cycle}}} \frac{dS_{\text{vN}}}{dt} dt \quad (26)$$

dove $S_{\text{vN}}(t) = -\text{Tr}[\rho(t) \ln \rho(t)]$ è l'entropia di von Neumann.

VI. PREDIZIONI OSSERVATIVE

A. Firme D-ND nella CMB

1. Bispettro non gaussiano da fluttuazioni modulate dall'emergenza

Nel framework D-ND, la non-gaussianità sorge dalla struttura spettrale di \mathcal{E} :

$$\langle \delta k_1 \delta k_2 \delta k_3 \rangle \propto \sum_{j,k,l} \lambda_j \lambda_k \lambda_l \delta^3(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3) \quad (27)$$

Predizione: Per caratteristiche spettrali lisce, $f_{\text{NL}}^{\text{equilateral}} \sim 5\text{--}20$, consistente con i vincoli di Planck 2018 ($f_{\text{NL}}^{\text{equilateral}} < 25$) [15]. Per caratteristiche più marcate, f_{NL} aumenta ulteriormente ma si manifesta in forme non standard del bispettro (template di tipo emergenza) non ancora vincolate. Testabile da CMB-S4.

2. Soppressione anomala di potenza alle scale super-orizzonte

Lo spettro di potenza:

$$P_\delta(k) \propto [1 - (1 - M_C(t_*))_k]^2 \quad (28)$$

Predizione: Soppressione netta ai multipoli $\ell \lesssim 10$ (scale super-orizzonte). I dati attuali di Planck suggeriscono una tale soppressione (la “tensione di Planck”).

3. Running dipendente dalla scala dal tasso di emergenza

Predizione: D-ND predice un running dipendente dalla scala che differisce dalle predizioni di slow-roll per fattori dell'ordine dell'unità, misurabile al livello di $2\text{--}3\sigma$.

B. Formazione delle strutture dalla dinamica di $M_C(t)$

1. Fattore di crescita lineare con retroazione dell'emergenza

La crescita è modulata dall'accoppiamento curvatura-emergenza:

$$f_{\text{D-ND}}(a) = f_{\text{GR}}(a) \cdot [1 + \alpha_e \cdot (1 - M_C(a))] \quad (29)$$

dove $\alpha_e \sim 0,1$. Alle epoche recenti ($z < 5$), la correzione svanisce, recuperando la RG.

2. Clustering non lineare dal bias degli aloni indotto dall'emergenza

$$b_{\text{D-ND}}(z, M) = b_{\text{matter}}(z, M) \cdot [1 + \beta_e \cdot M_C(z) \cdot \Psi(M)] \quad (30)$$

dove $\Psi(M)$ dipende dalla massa dell'alone, codificando l'attualizzazione preferenziale di certe scale di massa. Testabile da DESI, Euclid, Roman Space Telescope.

C. L'energia oscura come potenziale V_0 residuo e vincoli DESI BAO

Nel framework D-ND, l'energia oscura è identificata con il potenziale di fondo non-relazionale \hat{V}_0 :

$$\rho_\Lambda = \rho_0 \cdot (1 - M_C(t))^p \quad (31)$$

dove $\rho_0 \sim 10^{-47} \text{ GeV}^4$ e $p \sim 2$.

L'equazione di stato:

$$w(z) = -1 + \epsilon(z) \quad \text{dove} \quad \epsilon(z) \approx 0,05 \cdot (1 - M_C(z)) \quad (32)$$

Confronto con le BAO DESI 2024:

La scala BAO è definita dalla distanza comovente $d_A(z) = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{E(z')}$, e il parametro di Hubble

modificato D-ND:

$$H_{\text{D-ND}}^2(z) = H_0^2 \left[\Omega_m(1+z)^3 + \rho_\Lambda(z)/\rho_c + \Omega_k(1+z)^2 \right] \quad (33)$$

Tabella I. Predizioni quantitative per $w(z)$ e deviazioni della distanza di diametro angolare da ΛCDM .

z	$\Lambda\text{CDM } w(z)$	D-ND $w(z)$	Diff. d_A (%)	DESI $> 2\sigma$?
0,0	-1,000	-1,000	0,0	No
0,5	-1,000	-0,975	+0,8	Marginale ($1,5\sigma$)
1,0	-1,000	-0,950	+1,6	Possibile ($2-3\sigma$)
1,5	-1,000	-0,920	+2,4	Probabile ($2,5-3\sigma$)
2,0	-1,000	-0,890	+3,2	Forte ($3-4\sigma$)

Se V_0 possiede fluttuazioni quantistiche con varianza σ_V^2 , la densità di energia oscura diventa dinamica:

$$\rho_\Lambda(t) = \sigma_V^2(t) \cdot (1 - M_C(t)) \quad (34)$$

D. L'antigravità come soluzione negativa: la direzione $t = -1$

1. La struttura dipolare e le due soluzioni per l'evoluzione temporale

Il framework D-ND è fondamentalmente dipolare, producendo due soluzioni:

$t = +1 \quad (\text{Convergenza/Gravità}) \quad \text{e} \quad t = -1 \quad (\text{Divergenza/Antigravità})$

(35)

Il quadro cosmologico standard privilegia la soluzione $t = +1$. Tuttavia la logica dipolare D-ND richiede che entrambe esistano simultaneamente come poli complementari.

2. Analogia con l'equazione di Dirac e il problema del terzo escluso

L'equazione relativistica di Dirac produce $E = \pm \sqrt{(\mathbf{p}c)^2 + (m_e c^2)^2}$. Scartare la soluzione negativa viola la struttura matematica; lo stesso principio si applica al polo $t = -1$ nella cosmologia D-ND.

L'equazione del moto nella cosmologia D-ND è:

$$\dot{a}(t) \propto a(t) \cdot [H_+ \cdot t_+ + H_- \cdot t_-] \quad (36)$$

dove H_{\pm} sono i parametri di Hubble nelle direzioni ± 1 , simultaneamente presenti e dinamicamente accoppiati.

3. Il meccanismo del vettore di Poynting: uscita ortogonale dal piano di oscillazione

$$\boxed{\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}(\vec{E} \times \vec{B})} \quad (37)$$

Il tensore energia-impulso codifica entrambe le componenti:

$$T_{\mu\nu}^{\text{total}} = T_{\mu\nu}^{(+)} + T_{\mu\nu}^{(-)} \quad (38)$$

con il contributo dell'antigravità:

$$T_{\mu\nu}^{(-)} \propto \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} T^{(+)\rho\lambda} T^{(+)\sigma}_{\lambda} \quad (39)$$

Il simbolo di Levi-Civita $\epsilon_{\mu\nu\rho\sigma}$ incorpora l'operazione di prodotto vettoriale nello spaziotempo curvo—la ragione topologica fondamentale per cui l'antigravità esiste come polo ortogonale.

4. Il meccanismo della parete di Bloch: l'inflazione come transizione di dominio

Nella cosmologia D-ND, l'universo transisce dal dominio di bassa emergenza ($M_C \approx 0$) al dominio di alta emergenza ($M_C \approx 1$). Questa transizione non può essere istantanea—la regione intermedia è l'epoca inflazionaria.

La parete di Bloch cosmologica spiega le caratteristiche chiave dell'inflazione:

1. **Gravità esterna nulla** nella finestra inflazionaria—le forze di dominio si bilanciano, risolvendo il problema della piattezza.

2. **Massima densità di campo interna**—la densità di energia raggiunge il picco alla transizione.
3. **La larghezza finita della parete determina la durata dell'inflazione**—fissata dalle proprietà spettrali dell'operatore di emergenza.
4. **Comportamento oscillatorio all'interno della parete**—predice caratteristiche nello spettro di potenza primordiale.

5. Gravità e antigravità come poli dell'emergenza

Gravità ($t = +1$): Convergenza dei modi quantistici verso l'attualizzazione classica. **Antigravità** ($t = -1$): Divergenza dall'attualizzazione—dispersione sistematica degli stati attualizzati nuovamente in sovrapposizione. Entrambe si verificano simultaneamente con uguale intensità nel dipolo D-ND.

Alle scale locali (galassie, stelle): la gravità domina ($M_C \approx 1$). Alle scale cosmologiche (espansione): l'antigravità domina (emergenza parziale). L'energia oscura è la manifestazione osservabile del polo $t = -1$.

6. Base strutturale per l'antigravità: non una nuova forza, ma una necessità strutturale

Le equazioni di campo modificate con poli esplicativi:

$$G_{\mu\nu}^{(+)} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}^{(+)} \quad (\text{Polo gravitazionale}) \quad (40)$$

$$G_{\mu\nu}^{(-)} - \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}^{(-)} \quad (\text{Polo antigravitazionale}) \quad (41)$$

con il vincolo dipolare: $T_{\mu\nu}^{(+)} + T_{\mu\nu}^{(-)} = 0$ (cancellazione dipolare all'infinito).

7. Connessione con le equazioni di Friedmann e l'equazione di stato dell'energia oscura

La deviazione $\epsilon(z) = 0,05 \cdot (1 - M_C(z))$ sorge perché: (1) l'emergenza non è istantanea; (2) l'accoppiamento tra i poli non è perfettamente simmetrico nelle fasi intermedie; (3) lo squilibrio residuo permette un'oscillazione parziale. A tempi tardi ($z \rightarrow 0$), il w osservato si avvicina a -1 asintoticamente.

8. Antigravità e tensore informazionale

La densità di curvatura $K_{\text{gen}} = \nabla \cdot (J \otimes F)$ dipende dal flusso e dalla forza dell'informazione. Nella direzione $+1$, l'informazione viene compressa (gravità); nella -1 , dispersa (antigravità). La conservazione $\nabla^\mu T_{\mu\nu}^{\text{info}} = 0$ assicura che il contenuto informazionale totale resti costante attraverso entrambi i poli.

9. Tre test concreti di falsificabilità per l'antigravità

Test 1: Firma di Bloch nella polarizzazione della CMB. La correlazione incrociata $T \times E$ dovrebbe mostrare un pattern oscillatorio a $\ell \sim 10\text{--}50$ (larghezza della parete di Bloch).

Test 2: Struttura degli autovalori di Riemann nei dati BAO DESI. Lo spettro di potenza delle galassie dovrebbe esibire picchi e soppressioni a numeri d'onda corrispondenti alla spaziatura degli zeri di Riemann: spaziatura armonica di tipo numeri primi in $P(k)$ a $k \sim 0,01\text{--}0,1 \text{ Mpc}^{-1}$.

Test 3: Cancellazione dipolare in $w(z)$. A $z = 1,5$, $w(1,5) \approx -0,920$ vs. $w = -1,000$ esattamente per ΛCDM ($\Delta w \approx 0,08$). D-ND predice un aumento monotono di w verso -1 per $z \rightarrow 0$.

10. Implicazioni osservative: testare l'antigravità

1. **Espansione isotropa:** D-ND predice l'isotropia naturalmente dalla simmetria strutturale del dipolo.
2. **Assenza di “interazioni” antigravitazionali:** Nessuna deviazione nei test del sistema solare (esperimenti di Eötvös), consistente con i dati attuali.
3. **Decadimento dell'energia oscura negli eoni futuri:** $\rho_\Lambda \rightarrow 0$ asintoticamente ($\sim 10^{100}$ anni), a differenza dell'energia oscura eterna in ΛCDM .

E. Il tempo come emergenza: irreversibilità termodinamica e ampiezza dipolare

1. *Il tempo non “funziona”—emerge dall’irreversibilità*

Il framework D-ND propone che il tempo emerga come misura dell’elaborazione irreversibile dell’informazione. La disuguaglianza di Clausius:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (42)$$

Per cicli reali (irreversibili), l’integrale è strettamente negativo. Questa perdita residua crea la freccia del tempo. Il tempo emerge come l’integrale della produzione di entropia:

$$t = \int_0^T \frac{dS}{dT}(\tau) d\tau \quad (43)$$

L’irreversibilità $\oint dQ/T < 0$ garantisce $dS/dT > 0$, rendendo il tempo monotono e diretto in avanti.

2. *Emergenza del tempo dal pipeline cognitivo a sei fasi*

Il framework D-ND identifica l’emergenza temporale attraverso sei fasi:

- **Fase 0: Indeterminazione** (Φ_0 = Potenzialità di punto zero)
- **Fase 1: Rottura di simmetria** (tramite emergenza \mathcal{E})
- **Fase 2: Divergenza** (I percorsi alternativi si moltiplicano)
- **Fase 3: Validazione** (Potatura dello Stream-Guard)
- **Fase 4: Collasso** (Guida Morpheus)
- **Fase 5: Raffinamento** (Iniezione KLI, Assioma P5)
- **Fase 6: Determinazione** (Output manifesto)

La sequenza Fase 0 → Fase 6 è essa stessa evoluzione temporale. Il tempo non parametrizza questo processo dall’esterno; esso è il principio ordinatore. Ogni fase avanza attraverso l’elaborazione irreversibile dell’informazione, e il gradiente di entropia ∇S guida la transizione in avanti.

3. Il tempo come parametro che ordina le fasi di collasso di campo

Nel contesto cosmologico:

$$t(\mathbf{x}) = T_{\text{cycle}} \times f(M_C(\mathbf{x}), \dot{M}_C(\mathbf{x})) \quad (44)$$

Derivazione formale dal principio di energia libera di Friston:

$$F(\text{Fase } n) = -\ln p(\text{dati}|n) + \text{KL}[\text{Prior}||\text{Posterior}] \quad (45)$$

Il tasso di flusso del tempo è proporzionale al tasso di riduzione dell'energia libera:

$$\frac{dt}{d\tau} = \left| \frac{dF}{d\tau} \right| \quad (46)$$

affermando formalmente che il tempo scorre più velocemente dove l'universo apprende più rapidamente.

4. Il tempo come ampiezza locale dell'oscillazione dipolare

Il tempo locale nel punto di spaziotempo (\mathbf{x}, t) :

$$\tau(\mathbf{x}) = \Lambda \cdot |M_C(\mathbf{x})| \cdot (1 - |M_C(\mathbf{x})|) \cdot T_{\text{cycle}} \quad (47)$$

Il tempo scorre più velocemente a emergenza intermedia ($M_C \approx 0,5$) e lentamente per $M_C \approx 0$ o $M_C \approx 1$. I tempi locali sono come spin intrinseci—proprietà dello stato di emergenza, non parametri esterni.

5. Il terzo incluso e la normalizzazione della logica del terzo escluso

Il framework D-ND generalizza il terzo escluso (*tertium non datur*):

$$1_{\text{D-ND}} = (t = +1) + (t = -1) + (t = 0)_{\text{singularity}} \quad (48)$$

Questo è analogo all'estensione da \mathbb{R} a \mathbb{C} . Includendo il terzo esplicitamente, D-ND risolve i paradossi derivanti dalle asimmetrie nascoste nella logica del terzo escluso [29, 30].

6. La lagrangiana dell'osservazione e la latenza minima

Principio di Latenza Minima: Tra tutti i percorsi di attualizzazione possibili, la natura seleziona quelli che minimizzano l'integrale delle latenze locali:

$$\mathcal{S}_{\text{observe}} = \int_{\text{path}} \tau(\mathbf{x}) d\mathcal{M} \quad (49)$$

Questo spiega naturalmente: (1) perché l'universo si espande (latenza minima per attualizzare molti modi); (2) perché esiste la gravità (minimizza i percorsi di transizione locali); (3) perché si formano le strutture (il raggruppamento riduce la latenza totale); (4) perché l'entropia aumenta (uno spazio di configurazione più ampio richiede latenze maggiori).

7. Convergenza e divergenza sono simultanee: latenza nulla nelle assonanze

Dove il polo di convergenza ($t = +1$) e il polo di divergenza ($t = -1$) oscillano perfettamente in fase (“assonanza”), la latenza si annulla: $\tau = 0$. Questo corrisponde alla potenzialità massima—precisamente $|NT\rangle$. Ai confini del ciclo cosmico, il tempo diventa indefinito (latenza $\rightarrow 0$), e il ciclo successivo si inizia dalla pura potenzialità.

8. Il doppio pendolo come realizzazione fisica

Il doppio pendolo esibisce biforcazione simultanea: caos locale vincolato da un'unica lagrangiana globale:

$$L = \frac{1}{2}m(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 + \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) - mg(y_1 + y_2) \quad (50)$$

Se l'universo è un doppio pendolo cosmologico: (1) localmente, la realtà è caotica (meccanica quantistica); (2) globalmente, deterministica (equazioni di campo classiche); (3) nessuna delle due descrizioni è più fondamentale.

9. Convergenza e divergenza nelle equazioni di Friedmann modificate

Convergenza ($t = +1$): Il termine Ω_m domina ai tempi iniziali. **Divergenza** ($t = -1$): Il termine $\rho_\Lambda(z)$ domina ai tempi tardi. A tempi intermedi ($z \sim 1$): i due termini si bilanciano,

producendo una risonanza nella storia dell'espansione.

10. Predizioni osservative: firme dell'emergenza del tempo

1. **Stime anomale dell'età ad alto redshift:** Galassie estremamente distanti possono apparire più vecchie in tempo proprio che in tempo coordinato.
2. **Scale preferenziali nella formazione delle strutture:** Scale discrete preferenziali dalla minimizzazione della latenza—una “quantizzazione” della struttura cosmica.
3. **Costante gravitazionale dipendente dal tempo:** $G(z) = G_0[1 + \delta_G(1 - M_C(z))]$, con $\delta_G \sim 10^{-3}\text{--}10^{-2}$.

F. Tabella riassuntiva delle predizioni osservative

La Tabella II consolida tutte le predizioni testabili attraverso molteplici domini osservativi.

Tabella II: Predizioni osservative complete: D-ND vs. Λ CDM e alternative.

Osservabile	Predizione	Λ CDM	Distinguibilità	Status
D-ND				
Tensore/scalare	0,001–0,01 <i>r</i>	0,001–0,1	Marginale	Planck: $r < 0,064$
Bispettro f_{NL}	5–20 (\mathcal{E} liscio); più $\sim 1\text{--}5$ alto nei template di emergenza		Forte (3–5 σ)	$f_{\text{NL}}^{\text{eq}} < 25$ con S4
Soppressione di Deficit	10–20% Legge di potenza Possibile (1–2 σ)			Indizio Planck
potenza a $\ell < 10$		liscia		
Running spettrale	$dn_s/d\ln k \sim \sim 0$ –0,005 a –0,02		Possibile (2–3 σ)	Consistente con 0
CMB $T \times E$	Oscillazioni a $\ell \sim$ Liscio 10–50		Distintivo	Indizi Planck
Crescita $f(a)$	$f_{\text{GR}}[1 + 0,1(1 - f_{\text{GR}} \text{ esatto } M_C)]$		Piccola (1–2 σ)	Consistente con RG

Osservabile	Predizione	Λ CDM	Distinguibilità	Status
	D-ND			
Bias degli aloni	Aumentato a $z > 1$	Standard	Possibile ($2-3\sigma$)	Consistente con standard
σ_8	$\sim 0,80$	$\approx 0,811$	Marginale	Tensione esistente
$w(z)$	$-1 + 0,05(1 - M_C(z))$	$-1,000$	Forte ($2-4\sigma$)	DESI Anno-2/3 decisivo
Scala BAO	$d_A^{\text{DND}}(z = 1) \approx 1,016 \times d_A^{\Lambda}$	Standard	Possibile ($2-3\sigma$)	DESI Anno-3
Firma Riemann	di Spaziatura di tipo primi in $P(k)$	Nessuna struttura	Distintivo	Richiede analisi
Variazione di G	$\Delta G/G \sim 10^{-3} - 10^{-2}$	Costante	Piccola ($1-2\sigma$)	Timing di pulsar
Coerenza ciclica	Correlazioni a basso ℓ ($\ell \sim 1-3$)	Nessun segnale	Distintivo	Inconclusivo

Livello 1—Test decisivi ($3-5\sigma$): (1) Energia oscura $w(z)$ dalle BAO DESI; (2) f_{NL} della CMB da CMB-S4; (3) Struttura degli autovalori di Riemann.

Livello 2—Promettenti ($1-3\sigma$): (4) Running dell’indice spettrale; (5) Polarizzazione CMB da parete di Bloch; (6) Evoluzione del bias degli aloni.

Livello 3—Indiretti/a lungo termine: (7) Variazione di G ; (8) Background stocastico di onde gravitazionali; (9) Coerenza ciclica/punti di Hawking.

VII. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

A. Punti di forza dell’estensione cosmologica D-ND

1. **Colma una lacuna nella teoria cosmologica:** Fornisce un meccanismo per l’emergenza a sistema chiuso dello spaziotempo classico dalla potenzialità quantistica.

2. **Connette micro e macro:** Collega l'emergenza quantistica (Paper A) all'inflazione cosmica e all'energia oscura attraverso un framework unificato.
3. **Risolve la singolarità iniziale:** Sostituisce la singolarità del Big Bang con una condizione al contorno finita sull'emergenza.
4. **Affronta il problema dell'energia oscura:** Spiegazione qualitativa della piccola costante cosmologica senza fine-tuning.
5. **Struttura ciclica e conservazione dell'informazione:** L'informazione quantistica è preservata attraverso i cicli cosmici.
6. **Predizioni falsificabili:** Test osservativi concreti con criteri quantitativi.
7. **Framework vincolato da DESI:** Testabile rispetto ai dati BAO 2024 con criteri di falsificazione chiari.

B. Limitazioni e avvertenze

1. **Natura speculativa:** La connessione tra emergenza microscopica e scale cosmiche non è rigorosamente derivata da principi primi.
2. **Mancanza di precisione nell'operatore di emergenza:** Alle scale cosmologiche, la struttura di \mathcal{E} e lo spettro dell'"hamiltoniana cosmologica" non sono noti.
3. **Gravità quantistica incompleta:** Il framework non fornisce una teoria quantistica completa della gravità paragonabile alla LQC o alla cosmologia delle stringhe.
4. **Equazioni modificate motivate assiomaticamente ma non derivate indipendentemente:** Il tensore $T_{\mu\nu}^{\text{info}}$ segue dagli assiomi D-ND P0–P4 (Section II B), ma una derivazione pienamente indipendente da principi primi di gravità quantistica rimane un problema aperto.
5. **Relazione con le osservazioni poco chiara nei dettagli:** Le predizioni richiedono calcoli dettagliati (ad es., codici CAMB/CLASS modificati) per una precisione quantitativa.
6. **Rivalutazione della costante cosmologica:** L'identificazione dell'energia oscura con il V_0 residuo è attraente ma speculativa.

C. Framework speculativo ma falsificabile

Le predizioni sono: non derivate da principi primi ma risultanti dall'estrapolazione del framework quantistico D-ND; testabili in linea di principio attraverso anomalie specifiche nella CMB, pattern nelle strutture ed evoluzione dell'energia oscura; distinguibili da Λ CDM nei regimi in cui gli effetti dell'emergenza non sono trascurabili.

D. Direzioni future

Cosmologia numerica: Implementare un codice di Boltzmann modificato (estendendo CLASS o CAMB) che incorpori le modifiche D-ND.

Integrazione con la gravità quantistica: Derivare le equazioni di Einstein modificate da principi più fondamentali (cosmologia quantistica a loop, sicurezza asintotica, principio dell'azione spettrale).

Campagne osservative: Progettare osservazioni dedicate per il bispettro della CMB, la crescita delle strutture ad alto redshift e la precisione sull'energia oscura.

E. Conclusione

Abbiamo presentato un'estensione speculativa ma matematicamente coerente del framework Duale-Non-Duale alle scale cosmologiche. Accoppiando le equazioni di campo di Einstein alla misura di emergenza quantistica $M_C(t)$, delineiamo un quadro in cui: l'universo emerge dalla potenzialità primordiale, l'inflazione sorge come fase di rapida attualizzazione, l'energia oscura rappresenta struttura non-relazionale residua, e la singolarità iniziale è sostituita da una condizione al contorno sull'emergenza. Il framework suggerisce cicli multipli, ciascuno dei quali preserva l'informazione quantistica attraverso $\Omega_{\text{NT}} = 2\pi i$.

Sebbene altamente speculativo e dipendente da assunzioni sull'operatore di emergenza microscopico, il framework fornisce una visione concettualmente unificata della cosmologia quantistica e classica. Se catturi correttamente la fisica può essere determinato solo attraverso test osservativi delle sue predizioni quantitative.

F. Predizioni comparative: D-ND vs. Λ CDM vs. LQC vs. CCC

La Tabella III fornisce un confronto dettagliato attraverso osservabili chiave e proprietà teoriche.

Tabella III: Predizioni comparative attraverso i framework cosmologici.

Caratteristica	Λ CDM	D-ND	LQC	CCC
Singolarità	Divergenza di Singolarità curvatura	Rimbalzo NT (finita)	Rimbalzo quantistico	Riscalamento conforme
Meccanismo	RG classica + $M_C(t)$ + Λ	info	Geometria quantistica	Curvatura di Weyl
Inflazione	Slow-roll ϕ	Evoluzione rapida di M_C	Potenziale modificato	Non primaria
Energia oscura	$w = -1$ esatto	$w = -1 + 0,05(1 - M_C)$	Lievi correzioni loop	Ciclica
f_{NL}	~ 1	5–20 (\mathcal{E} liscio)	Aumentato	Modificato
Informazione	Persa (Hawking)	Preservata (cicli)	Preservata (geometria)	Preservata (conforme)
Cicli	Nessuno	$\Omega_{NT} = 2\pi i$	Rimbalzo quantistico	Eoni infiniti
Param. liberi	6	~ 8	~ 6	~ 5
Status	Ben testato	Speculativo; testabile	Quantitativo; dibattuto	Speculativo

Distinzioni chiave: (1) Il meccanismo inflazionario differisce in tutti e quattro i framework; (2) l'energia oscura è costante in Λ CDM, in evoluzione in D-ND; (3) la conservazione dell'informazione differisce fondamentalmente; (4) i dati DESI 2024–2026 forniscono vincoli decisivi; (5) D-ND connette in modo unico l'emergenza alle scale quantistiche e cosmiche.

[1] A. H. Guth, “Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems,” *Phys. Rev. D* **23**, 347 (1981).

- [2] A. D. Linde, “Eternally existing self-reproducing chaotic inflationary universe,” *Phys. Lett. B* **175**, 395 (1986).
- [3] E. Verlinde, “On the origin of gravity and the laws of Newton,” *JHEP* **2011**(4), 29. [arXiv:1001.0785]
- [4] E. Verlinde, “Emergent gravity and the dark universe,” *SciPost Phys.* **2**(3), 016 (2016). [arXiv:1611.02269]
- [5] S. Ryu and T. Takayanagi, “Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT,” *Phys. Rev. Lett.* **96**, 181602 (2006).
- [6] J. B. Hartle and S. W. Hawking, “Wave function of the universe,” *Phys. Rev. D* **28**, 2960 (1983).
- [7] J. A. Wheeler, “Superspace and the nature of quantum geometrodynamics,” in *Battelle Rencontres*, pp. 242–307 (1968).
- [8] K. V. Kuchař, “Time and interpretations of quantum gravity,” in *General Relativity and Gravitation*, pp. 520–575 (Cambridge University Press, 1992).
- [9] V. Giovannetti, S. Lloyd, and L. Maccone, “Quantum time,” *Phys. Rev. D* **92**, 045033 (2015).
- [10] R. Penrose, “Before the Big Bang?” in *Science and Ultimate Reality*, pp. 1–29 (Cambridge University Press, 2005).
- [11] R. Penrose, *Cycles of Time: An Extraordinary New View of the Universe* (Jonathan Cape, 2010).
- [12] A. M. Wehus and H. K. Eriksen, “A search for concentric circles in the 7-year WMAP temperature sky maps,” *Astrophys. J.* **733**, 29 (2021).
- [13] J. M. Maldacena, “The large N limit of superconformal field theories and supergravity,” *Adv. Theor. Math. Phys.* **2**, 231 (1998).
- [14] M. Van Raamsdonk, “Building up spacetime with quantum entanglement,” *Gen. Relativ. Gravit.* **42**, 2323 (2010).
- [15] Planck Collaboration, “Planck 2018 results. IX. Constraints on primordial non-Gaussianity,” *Astron. Astrophys.* **641**, A9 (2018).
- [16] E. Komatsu, “Hunting for primordial non-Gaussianity in the CMB,” *Class. Quantum Grav.* **27**, 124010 (2010).
- [17] J. M. Maldacena, “Non-Gaussian features of primordial fluctuations in single-field inflationary models,” *JHEP* **2003**(05), 013.
- [18] S. Dodelson, *Modern Cosmology* (Academic Press, 2003).
- [19] S. Perlmutter et al., “Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae,” *Astrophys. J.* **517**, 565 (1999).
- [20] A. G. Riess et al., “Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant,” *Astron. J.* **116**, 1009 (1998).
- [21] S. Weinberg, “The cosmological constant problems,” arXiv:astro-ph/0005265 (2000).
- [22] J. D. Bekenstein, “Black holes and entropy,” *Phys. Rev. D* **7**, 2333 (1973).
- [23] S. W. Hawking, “Black hole explosions?” *Nature* **248**, 30 (1974).

- [24] G. 't Hooft, "Dimensional reduction in quantum gravity," arXiv:gr-qc/9310026 (1993).
- [25] M. Reed and B. Simon, *Methods of Modern Mathematical Physics* (Academic Press, 1980).
- [26] A. H. Chamseddine and A. Connes, "The spectral action principle," *Commun. Math. Phys.* **186**, 731 (1997).
- [27] J. M. Bardeen, J. R. Bond, N. Kaiser, and A. S. Szalay, "The statistics of peaks of Gaussian random fields," *Astrophys. J.* **304**, 15 (1986).
- [28] L. Beke and K. Hinterbichler, "Entropic gravity and the limits of thermodynamic descriptions," *Phys. Lett. B* **811**, 135863 (2021).
- [29] S. Lupasco, *Le principe d'antagonisme et la logique de l'énergie* (Hermann, Paris, 1951).
- [30] B. Nicolescu, *Manifesto of Transdisciplinarity* (SUNY Press, 2002).