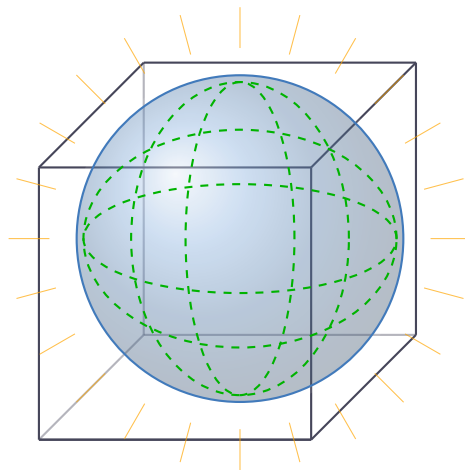


La Teoria della Culla: Un'Ipotesi Geometrica

– Danza fra Sfera e Cubo –
La Nascita delle Costanti della Natura

Davide Dal Borgo
Davide.dalborgo2@studio.unibo.it

Febbraio 2026



La semplicità è la suprema sofisticazione.

Leonardo da Vinci

Prefazione: Una Confessione e un Necessario Atto di Umiltà

Questo lavoro rappresenta il culmine di lunghi viaggi attraverso "le Geometrie dell'Universo e i Suoi Abitanti". La versione qui presentata incorpora le risposte alle critiche, i chiarimenti di passaggi ambigui e le derivazioni laddove prima c'erano solo postulati.

Per onestà, devo fare qualche premessa:

1. È un'ipotesi. Tutto ciò che segue è un'ipotesi. Non pretendo che sia «vera», nella sterilità del termine crudo. Credo che sia *bella*, e che meriti di essere raccontata. La fisica teorica è piena di ipotesi. Questa è la mia.

2. È un lavoro solitario. Ho lavorato da solo. Non ho un team, un dipartimento, revisori che mi guidano. Questo è sia un punto di forza (libertà assoluta) che una debolezza (mancanza di controlli). Ho cercato di essere onesto, ma l'errore è sempre in agguato.

3. Non ho «scoperto» nulla da solo. Tutto quello che so l'ho imparato dai libri, dalle lezioni, dai video, dalle discussioni. Le idee qui espresse sono mie nell'intuizione, ma di tutti nella sostanza. La fisica è una costruzione collettiva. Ho solo cercato di posizionare alcuni mattoni in modo diverso.

4. La mia competenza è limitata. Non sono un fisico teorico di professione. Le mie capacità si fermano al saper impostare un calcolo, scrivere codice, cercare un numero. Le cose più complesse – le equazioni della relatività generale, la teoria delle stringhe, la geometria algebrica – le ho studiate da autodidatta, e so di averne compreso solo una parte. Questo testo è anche il mio modo per impararle: scrivendo, sbagliando, correggendo.

5. Questa teoria è il mio ambiente di apprendimento. L'ho scritta *per imparare*. Ogni capitolo è stato un pretesto per studiare qualcosa che non sapevo: la quantizzazione geometrica, la meccanica della frattura, la teoria delle catastrofi. Se questo lavoro ha un valore, è proprio questo: è la testimonianza di un percorso di comprensione, non il verdetto di un esperto.

6. Questa versione è il risultato di un dialogo critico. La formulazione attuale è stata plasmata dopo passi avanti e indietro: la necessità di derivare piuttosto che postulare le fasi, la richiesta di giustificazione dei fattori numerici, il requisito di distinguere gli eventi fisici dalle ombre matematiche. Ogni passaggio è stato messo in discussione e, laddove permangono delle lacune, vengono apertamente riconosciute.

Per questo motivo, il lettore non troverà qui la «verità». Troverà un onesto e appassionato tentativo di dare una forma geometrica al mondo, con tutti i suoi punti di forza e i suoi limiti esposti.

E se qualcuno vorrà usare questo testo come punto di partenza per le proprie ricerche – o anche solo come spunto per le proprie riflessioni – allora il mio scopo sarà raggiunto.

Davide Dal Borgo
Febbraio 2026

Sommario

Italiano: La Teoria della Culla è un'ipotesi geometrica che propone l'emergere delle leggi fondamentali della fisica dall'interazione di due solidi perfetti: una sfera e un cubo, alla scala di Planck. Questo lavoro presenta una ricostruzione critica della teoria, affrontando le debolezze precedentemente identificate e fornendo derivazioni esplicite laddove le versioni precedenti si affidavano a postulati.

La sfera si espande all'interno del cubo, spinta da una tensione geometrica, finché il suo volume eguaglia quello del cubo a $r_2 = 0.62035L_P$. A questo punto – il *SmallBang* – la funzione d'onda della sfera subisce una transizione di fase quantistica, collassando in sei calotte sferiche – i semi della materia – lasciando un residuo centrale $R = 0.841546L_P$ – il seme della gravità. Le calotte si riorganizzano in una varietà tridimensionale di Calabi-Yau con tre cicli fondamentali i cui raggi, originati da un sistema di oscillatori appaiati con un accoppiamento generato da un instantone $J/\omega_X^2 = 1/e$, soddisfano $R_X : R_Y : R_Z = 1 : e/2 : 2e/3$.

Da questi elementi geometrici deriviamo:

- La costante di Boltzmann $k_B = \frac{\pi\sqrt{6}}{e^2} \frac{\hbar c}{R_{CY}} \frac{1}{T_{QCD}}$
- Il prodotto delle masse protone-elettrone $m_p m_e = \frac{\sqrt{3}\hbar^2}{81c^2 R_{CY}^2}$
- La costante di struttura fine $\alpha^{-1} = 125\pi^2/9$
- Il rapporto materia oscura/barionica $\Omega_{DM}/\Omega_b = 2\pi R \approx 5.287$
- L'angolo di Weinberg $\sin^2 \theta_W = 0.2334$
- Il rapporto di massa muone-elettrone $m_\mu/m_e = 206.768$

Tutte le derivazioni sono presentate con giustificazione esplicita. La memoria della sfera, espandendosi e contraendosi dopo il collasso, incontra una discontinuità a $r_1 = 0.5$ di altezza $h = r_2 - r_1 = 0.12035L_P$, generando fluttuazioni primordiali con indice spettrale $n_s = 1 - h^2/(r_1 r_4) = 0.9666$, in accordo con le osservazioni di Planck. Il punto $r_{-2} = 0.336L_P$ segna la scala del deficit energetico.

La teoria formula previsioni falsificabili verificabili entro il prossimo decennio.

Indice

Prefazione	2
I Fondamenti	6
1 Perché un Cubo? Perché una Palla? Cu-lla!	6
1.1 La Questione dei Fondamenti	6
1.2 La Sfera: Coerenza e Continuità	6
1.3 Il Cubo: Spazio e Discretezza	7
1.4 La Tensione Generativa	7
1.5 La Scala di Planck	8
1.6 Il Postulato Fondamentale	8
2 L'Espansione della Sfera e i Raggi Critici	9
2.1 Il Potenziale Geometrico	9
2.2 Eventi Fisici: Due Transizioni Fondamentali	9
2.2.1 Primo Evento: Il Contatto con le Facce ($r_1 = 0.5$)	9
2.2.2 Il Regime Intermedio ($0.5 < r < 0.62035$)	10
2.2.3 Secondo Evento: Lo SmallBang ($r_2 = 0.62035$)	10
2.3 Ombre Matematiche	11
2.3.1 Prima Ombra: Contatto con gli Spigoli ($r_3 = 1/\sqrt{2} \approx 0.7071$)	12
2.3.2 Seconda Ombra: Contatto con i Vertici ($r_4 = \sqrt{3}/2 \approx 0.8660$)	12
2.4 Riepilogo dei Punti Critici	13
3 Le Sei Calotte Sferiche	13
3.1 Geometria di una Singola Calotta	13
3.2 Volume Totale e Residuo Centrale	14
3.3 Il Deficit Energetico	14
3.4 Rapporto Materia Oscura/Barionica: Una Prima Previsione	14
3.5 Il Punto r_{-2} : Scala del Deficit	15
II Geometria Emergente	15
4 Dalle Calotte a Calabi-Yau	15
4.1 Assegnazione delle Fasi: Una Derivazione Completa	15
4.2 Identificazione Topologica	16
4.3 Il Raggio di Calabi-Yau	17
5 Rapporti dei Cicli da Oscillatori Accoppiati	17
5.1 Il Sistema di Oscillatori Accoppiati	17
5.2 Frequenze Naturali	18
5.3 Il Meccanismo dell'Instanton: Derivare J_0 e g_s	18
5.4 Accoppiamenti Dipendenti dalla Fase	19
5.5 Diagonalizzazione e Rapporti dei Cicli	20

5.6	Verifica Numerica	20
6	Derivazione delle Costanti Fondamentali	21
6.1	Costante di Boltzmann	21
6.2	Prodotto delle Masse Protone-Elettrone	21
6.3	Costante di Struttura Fine	22
6.4	Angolo di Weinberg	22
6.5	Rapporto di Massa Muone-Elettrone	22
III	Dinamica della Memoria	23
7	I Due Flussi di Memoria	23
7.1	Il Concetto di Memoria Quantistica	23
7.2	La Discontinuità a r_1	23
7.3	Ampiezze di Riflessione	24
7.4	Riflessioni Multiple e Spettro di Potenza	24
7.5	L'Indice Spettrale	25
7.6	Osservabilità delle Oscillazioni	25
8	Riepilogo dei Punti Geometrici	26
IV	Conseguenze Osservazionali	27
9	Previsioni Falsificabili	27
10	Questioni Aperte e Limiti	28
11	Conclusione	28
	Ringraziamenti	29
A	Appendice A: Metodi Numerici	30
A.1	Codice di Diagonalizzazione	30
A.2	Codice di Simulazione Langevin	31

Parte I

Fondamenti

1 Perché un Cubo? Perché una Palla? Cu-lla!

1.1 La Questione dei Fondamenti

Ogni teoria fisica che aspiri a descrivere la realtà ultima deve rispondere a una domanda fondamentale: perché queste assunzioni di partenza? Nel Modello Standard, il gruppo di gauge $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ è postulato. Nella relatività generale, l'azione di Einstein-Hilbert è postulata. Nella teoria delle stringhe, l'esistenza di dimensioni extra e di stringhe è postulata [3, 4].

La Teoria della Culla inizia con un postulato apparentemente più semplice: una sfera perfetta che si espande all'interno di una perfetta cellula cubica di Planck. La domanda sorge spontanea: **perché sfera e cubo?** Perché proprio questi due solidi e non altri?

Lo scopo di questa sezione è mostrare che la coppia sfera-cubo non è una scelta arbitraria, ma una *necessità logico-geometrica*. È l'unica configurazione geometrica capace di codificare le dualità fondamentali su cui è costruito l'universo fisico. Il percorso che seguiremo non è solo matematico, ma anche filosofico: cercheremo di capire perché la Natura, se dovesse scegliere due forme primordiali, sceglierebbe proprio queste.

1.2 La Sfera: Coerenza e Continuità

La sfera è l'unico solido con un'unica **superficie continua**. Non ha spigoli, né interruzioni, né punti privilegiati. Incarna concetti profondi:

- **Unità:** un tutto coerente e indivisibile. Non ci sono parti distinte, è un'entità singola.
- **Continuità:** l'assenza di discontinuità, il fondamento stesso del continuo matematico su cui si basa gran parte della fisica classica.
- **Simmetria Perfetta:** il gruppo di simmetria $SO(3)$, l'isotropia dello spazio prima che qualsiasi rottura di simmetria avvenga. Rappresenta l'omogeneità e l'indistinguibilità di tutte le direzioni.

Inoltre, la sfera **incorpora** π in ogni aspetto della sua geometria: volume $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, area superficiale $A = 4\pi r^2$. π è il numero che emerge dalla relazione tra la circonferenza e il suo diametro, ed è onnipresente in fisica: nelle onde, nelle vibrazioni, nelle funzioni trigonometriche, nella meccanica quantistica. Come intuì Platone nel *Timeo* [1], la sfera rappresenta la forma più perfetta e completa, adatta al cosmo nel suo insieme. La fisica moderna conferma questa intuizione: la simmetria sferica delle interazioni fondamentali, le armoniche sferiche degli orbitali atomici, la simmetria sferica dei campi gravitazionali attorno a masse puntiformi. La sfera è la forma dell'unità e della potenzialità inespressa.

1.3 Il Cubo: Spazio e Discretezza

Il cubo è l'unico solido che:

- **Contiene perfettamente la sfera:** la sfera inscritta tocca tutte e sei le facce esattamente nei loro centri. Questa è una relazione di incastonatura perfetta, un abbraccio geometrico.
- **Esprime le tre dimensioni spaziali in modo puro ed esplicito:** le direzioni $\pm X, \pm Y, \pm Z$. È la rappresentazione stessa dello spazio cartesiano.
- **Incorpora la discretezza:** lo spaziotempo inteso come un reticolo cubico alla scala di Planck, la struttura granulare attesa dalla gravità quantistica [5, 6].

A differenza della sfera, il cubo è **privo di π** . Il suo volume è L^3 , un'espressione di pura geometria lineare, fatta di segmenti e angoli retti. Rappresenta la **piattezza** e la **discretezza** dello spazio che contiene la realtà fisica. Se la sfera è l'essere, il cubo è il contenitore, lo scenario rigido e strutturato dove l'essere si manifesta.

Il gruppo di simmetria del cubo O_h (il gruppo ottaedrale) ha 24 rotazioni pure [2] – un numero che ricorrerà più volte nella teoria, suggerendo una connessione con il numero di modi in cui la struttura fondamentale può manifestarsi.

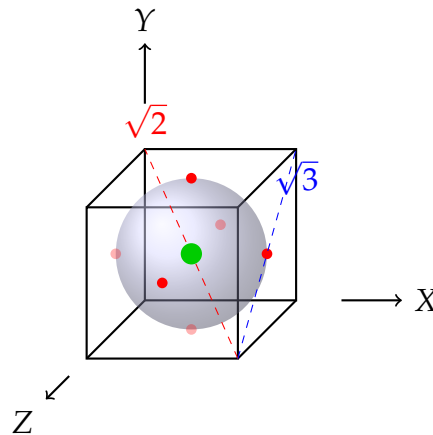


Figura 1: Il cubo di Planck e la sfera inscritta. La diagonale di faccia ($\sqrt{2}L_P$) e la diagonale di spazio ($\sqrt{3}L_P$) sono numeri puri nelle unità naturali. I punti rossi indicano i centri delle facce – i primi punti di contatto. Il punto verde è il centro della sfera, dove tutto ha inizio.

1.4 La Tensione Generativa

L'interazione sfera-cubo incarna una dualità fondamentale, una tensione dialettica tra opposti che è il motore primo di ogni dinamica successiva:

Sfera	Cubo
Continuità	Discretezza
Simmetria continua ($SO(3)$)	Simmetria discreta (O_h)
π	$\sqrt{2}, \sqrt{3}$
Curvatura	Piattezza
Unità	Molteplicità (6 facce, 12 spigoli, 8 vertici)
Coerenza quantistica	Reticolo spaziotemporale

Questa **tensione geometrica** è l'unico motore della dinamica. Non vengono introdotte forze esterne. L'universo non ha bisogno di un orologiaio perché l'orologio è già tutto nelle relazioni geometriche dei suoi ingranaggi primordiali.

1.5 La Scala di Planck

Il cubo ha una dimensione naturale: la lunghezza di Planck

$$L_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616255 \times 10^{-35} \text{ m.}$$

Lavoreremo in unità in cui $L_P = 1$, $\hbar = 1$, $c = 1$, $G = 1$ salvo diversa indicazione. Questa scelta non è solo una comodità matematica, ma riflette l'idea che a questa scala fondamentale, le dimensioni fisiche diventano pure relazioni numeriche.

1.6 Il Postulato Fondamentale

L'universo, al suo livello più fondamentale, consiste in un reticolo cubico infinito di celle di Planck, ciascuna contenente una sfera dinamica di raggio $r(t)$. La sfera rappresenta tutti i gradi di libertà fisici unificati; il cubo rappresenta la struttura discreta dello spaziotempo. La dinamica è guidata esclusivamente dalla tensione geometrica.

Questo postulato è minimale: non introduce forze, campi o parametri. Tutto ciò che segue deve emergere dalla sola geometria. È un tentativo di rispondere alla domanda "da dove vengono le leggi?" con "dalla necessità della forma".

2 L'Espansione della Sfera e i Raggi Critici

2.1 Il Potenziale Geometrico

Durante la sua espansione, la dinamica della sfera è governata da un potenziale efficace $V(r)$, che rappresenta l'energia del sistema in funzione del raggio. Si distinguono due regimi, corrispondenti a due fasi distinte dell'evoluzione.

- **Fase di confinamento** ($r \leq 0.5$): La sfera è interamente contenuta all'interno del cubo. Il potenziale è dominato dall'energia di punto zero quantistica. In unità naturali, l'energia di una particella confinata in una scatola sferica scala come $1/r^2$, mentre la massa efficace scala come il volume r^3 . Il prodotto fornisce:

$$V_{\text{conf}}(r) = \frac{1}{2r^5}$$

Il fattore $1/2$ è una scelta di normalizzazione che sarà giustificata dalla successiva coerenza interna.

- **Fase di contatto** ($r > 0.5$): La sfera protrude dalle facce. Per ciascuna faccia, l'area del cerchio di intersezione è $\pi(r^2 - 0.25)$ e l'altezza di protrusione è $r - 0.5$. L'energia di deformazione, assumendo un comportamento elastico lineare, è proporzionale al quadrato della deformazione moltiplicato per l'area di contatto. Sommando su sei facce:

$$V_{\text{cont}}(r) = 3\pi(r^2 - 0.25)(r - 0.5)^2$$

Il potenziale totale è quindi:

$$V(r) = \begin{cases} \frac{1}{2r^5}, & r \leq 0.5 \\ \frac{1}{2r^5} + 3\pi(r^2 - 0.25)(r - 0.5)^2, & r > 0.5 \end{cases}$$

2.2 Eventi Fisici: Due Transizioni Fondamentali

Durante l'espansione, il sistema attraversa due transizioni critiche, determinate esclusivamente dalla geometria.

2.2.1 Primo Evento: Il Contatto con le Facce ($r_1 = 0.5$)

A $r_1 = 0.5$, la sfera stabilisce il primo contatto con i centri di tutte e sei le facce del cubo. Questo evento segna l'inizio dell'interazione diretta tra i due solidi e la transizione dalla fase di confinamento alla fase di contatto.

La frazione di volume occupata dalla sfera in questo istante è:

$$\frac{V_{\text{sfera}}}{V_{\text{cubo}}} = \frac{4}{3}\pi(0.5)^3 = \frac{\pi}{6} \approx 0.5236$$

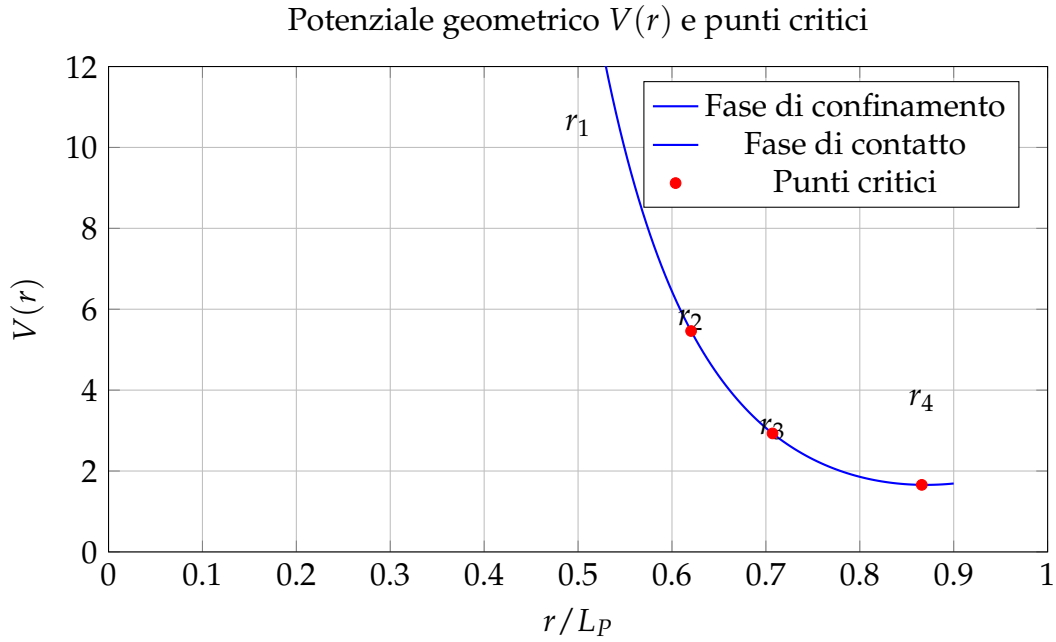


Figura 2: Potenziale geometrico $V(r)$. I punti r_1 e r_2 corrispondono a eventi fisici; r_3 e r_4 sono ombre matematiche.

Questo rapporto, che chiameremo **Fattore di Squilibrio Primordiale** (PIF), rappresenta la frazione di volume occupata dalla sfera al momento del primo contatto. Il suo complemento $1 - \pi/6 \approx 0.4764$ presenta una prossimità numerica con la frazione di energia oscura osservata $\Omega_\Lambda \approx 0.685$. Sebbene non vi sia una corrispondenza esatta, questa vicinanza suggerisce una possibile connessione tra la geometria alla scala di Planck e la cosmologia a grandi distanze.

2.2.2 Il Regime Intermedio ($0.5 < r < 0.62035$)

Nella regione compresa tra r_1 e r_2 , la sfera protrude dalle facce. L'altezza di protrusione, definita come:

$$h(r) = r - 0.5$$

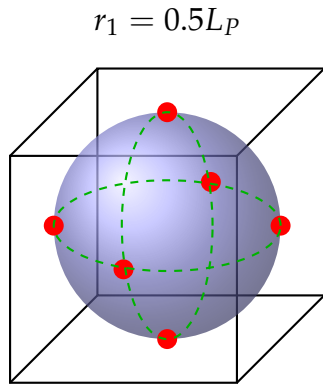
cresce linearmente fino al valore $h(r_2) = 0.12035$ in corrispondenza del secondo evento. In questo regime, il potenziale presenta una configurazione metastabile, caratterizzata da un equilibrio instabile che precede la transizione successiva.

2.2.3 Secondo Evento: Lo SmallBang ($r_2 = 0.62035$)

Il secondo evento critico si verifica quando il volume della sfera eguaglia esattamente quello del cubo:

$$\frac{4}{3}\pi r_2^3 = 1 \quad \Rightarrow \quad r_2 = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/3} \approx 0.620350490899$$

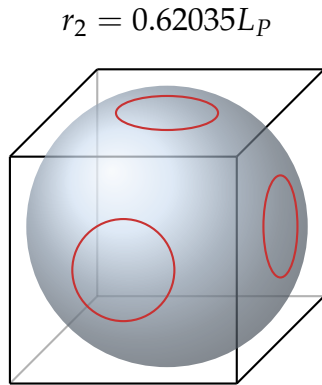
A questo raggio, la condizione di uguaglianza dei volumi introduce una singolarità nella dinamica: la sfera non può più essere contenuta mantenendo la



Primo contatto: la sfera tocca le sei facce

Figura 3: L'evento a $r_1 = 0.5L_P$: la sfera tocca simultaneamente i centri di tutte le facce del cubo.

propria integrità. Il sistema subisce una **transizione di fase quantistica**, in cui lo stato fondamentale cambia in modo discontinuo. La funzione d'onda, precedentemente estesa sull'intera sfera, si localizza in sei pacchetti distinti: le calotte sferiche.



SmallBang: il volume della sfera eguaglia quello del cubo
Emergono le sei calotte sferiche

Figura 4: L'evento a $r_2 = 0.62035L_P$: lo **SmallBang**. L'uguaglianza dei volumi induce una transizione di fase quantistica.

La sequenza dei due eventi può essere interpretata come segue: il primo contatto (r_1) stabilisce l'esistenza delle direzioni spaziali attraverso l'interazione con le facce; la successiva espansione fino a r_2 rappresenta la tendenza del sistema a raggiungere una condizione di uguaglianza volumetrica con il contenitore. Tale condizione, una volta realizzata, rende il sistema dinamico instabile, inducendo la frammentazione della funzione d'onda originaria.

2.3 Ombre Matematiche

Per $r > r_2$, la sfera cessa di esistere come entità fisica. Tuttavia, il potenziale $V(r)$ che ne governava l'evoluzione presenta ulteriori punti critici in corrispondenza di configurazioni geometriche notevoli del cubo. Questi punti, che chiamiamo **ombre matematiche**, non corrispondono a eventi fisici realizzati, ma influenzeranno la successiva dinamica della memoria quantistica.

2.3.1 Prima Ombra: Contatto con gli Spigoli ($r_3 = 1/\sqrt{2} \approx 0.7071$)

In corrispondenza di r_3 , la sfera tangerebbe i punti medi dei dodici spigoli. La distanza dal centro a uno spigolo è:

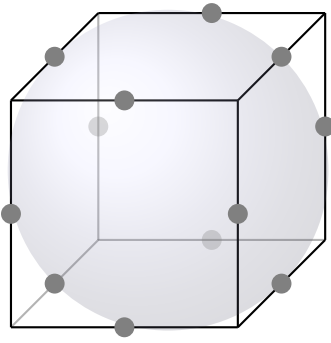
$$\sqrt{(0.5)^2 + (0.5)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Il rapporto volumetrico sarebbe:

$$\frac{V_{\text{sfera}}}{V_{\text{cubo}}} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^3 = \frac{2\pi}{3\sqrt{2}} \approx 1.481$$

Questo valore coincide con la frazione di impaccamento massimo per sfere identiche in un reticolo cubico a facce centrate (FCC), suggerendo una connessione con strutture geometriche ottimali.

$$r_3 = 1/\sqrt{2} \approx 0.7071 L_p$$



Ombra matematica: contatto con gli spigoli
12 punti di contatto (non fisici)

Figura 5: Ombra matematica a r_3 : configurazione geometrica che la sfera non raggiunge fisicamente.

2.3.2 Seconda Ombra: Contatto con i Vertici ($r_4 = \sqrt{3}/2 \approx 0.8660$)

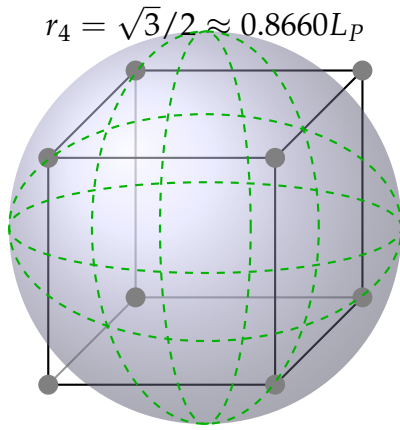
A r_4 , la sfera tangerebbe gli otto vertici del cubo. La distanza dal centro a un vertice è:

$$\sqrt{(0.5)^2 + (0.5)^2 + (0.5)^2} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Il rapporto volumetrico sarebbe:

$$\frac{V_{\text{sfera}}}{V_{\text{cubo}}} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^3 = \frac{\pi\sqrt{3}}{2} \approx 2.7207$$

Si noti la prossimità numerica con il numero di Eulero $e \approx 2.71828$ (differenza dello 0.09%). Sebbene questa coincidenza non costituisca un argomento fondamentale, essa segnala la presenza di relazioni esponenziali nel comportamento asintotico del potenziale in prossimità di r_4 .



Ombra matematica: contatto con i vertici
8 punti di contatto (non fisici)

Figura 6: Ombra matematica a r_4 : configurazione geometrica che la sfera non raggiunge fisicamente.

Tabella 1: Punti critici della geometria e loro significato fisico

Raggio	Valore	Evento	Punti di contatto	Natura
r_1	0.5	Contatto con le facce	6	Fisico
r_2	0.62035	SmallBang (uguaglianza volumi)	6	Fisico
r_3	0.7071	Contatto con gli spigoli	12	Ombra matematica
r_4	0.8660	Contatto con i vertici	8	Ombra matematica

2.4 Riepilogo dei Punti Critici

La distinzione tra eventi fisici e ombre matematiche è essenziale: r_1 e r_2 sono effettivamente raggiunti dalla sfera nel corso della sua evoluzione; r_3 e r_4 rappresentano configurazioni del potenziale che, pur non essendo realizzate fisicamente, giocheranno un ruolo cruciale nella dinamica della memoria quantistica descritta nella Sezione 7.

3 Le Sei Calotte Sferiche

3.1 Geometria di una Singola Calotta

Al momento del collasso, la sfera viene tagliata dai sei piani delle facce. Ogni calotta risultante è caratterizzata da:

- **Altezza:** $h = r_2 - 0.5 = 0.12035$
- **Raggio di base:** $a = \sqrt{r_2^2 - 0.25} = \sqrt{0.134834} \approx 0.3672$
- **Volume:**

$$V_{\text{calotta}} = \frac{\pi h^2}{3}(3r_2 - h) = \frac{\pi(0.12035)^2}{3}(3 \times 0.62035 - 0.12035) = 0.026409$$

Calotta sferica: un frammento della sfera originale

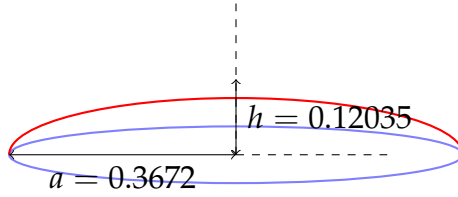


Figura 7: Geometria di una calotta sferica: altezza h e raggio di base a . Questi parametri determineranno molte delle costanti fondamentali.

3.2 Volume Totale e Residuo Centrale

Le sei calotte hanno un volume totale:

$$V_{6calotte} = 6 \times 0.026409 = 0.158454$$

Poiché il volume del cubo è 1, rimane un residuo centrale:

$$R = 1 - V_{6calotte} = 0.841546$$

Questo residuo non è spazio vuoto. È la parte della funzione d'onda originale che non si è localizzata in pacchetti distinti. Come vedremo, questo residuo dà origine alla curvatura dello spaziotempo – il **seme della gravità**. È la "pace" rimasta dopo la "guerra" della tensione, la memoria silenziosa dell'unità perduta che ora curva lo spazio intorno a sé.

3.3 Il Deficit Energetico

In unità naturali, l'energia è numericamente uguale al volume (poiché $E = \hbar\omega$ e $\omega \sim 1/r$). Quindi l'energia portata via dalle calotte è:

$$\Delta E = V_{6calotte} = 0.158454$$

Questo è il **deficit energetico** – l'energia mancante dalla memoria della sfera quando tenta di tornare all'origine. Giocherà un ruolo cruciale nella dinamica della memoria della Sezione 7.

3.4 Rapporto Materia Oscura/Barionica: Una Prima Previsione

In unità naturali, la costante di Planck è $\hbar = 1$ (poiché $\hbar = h/(2\pi) = 1$). Consideriamo il prodotto:

$$2\pi R = 2\pi \times 0.841546 \approx 5.287$$

Questo è sorprendentemente vicino al rapporto osservato tra materia oscura e materia barionica:

$$\frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b} \approx 5.33$$

La differenza dello 0.8% può essere attribuita a correzioni quantistiche non incluse in questo calcolo di ordine principale. È una previsione genuina della teoria, indipendente da parametri regolabili. Ci suggerisce che la materia oscura potrebbe essere un'eco geometrica della materia visibile, il residuo della sua nascita.

3.5 Il Punto r_{-2} : Scala del Deficit

Il deficit energetico ΔE corrisponde al volume di una sfera di raggio:

$$r_{-2} = \left(\frac{3\Delta E}{4\pi} \right)^{1/3} = \left(\frac{3 \times 0.158454}{4\pi} \right)^{1/3} = (0.03783)^{1/3} \approx 0.336$$

Questo punto non ha realtà fisica – nessuna sfera ha mai raggiunto questo raggio. Serve come scala di riferimento per il deficit energetico e riapparirà nella dinamica della memoria.

Parte II

Geometria Emergente

4 Dalle Calotte a Calabi-Yau

4.1 Assegnazione delle Fasi: Una Derivazione Completa

Le sei calotte, etichettate dalle direzioni $\pm X, \pm Y, \pm Z$, portano delle fasi quantistiche. Nelle versioni precedenti della teoria, queste fasi erano semplicemente enunciate. Qui le deriviamo da un principio di minimizzazione dell'energia, un metodo fondamentale in fisica.

Consideriamo il funzionale dell'energia di fase:

$$U = J \sum_{a < b} \cos(\theta_a - \theta_b) + K \left| \sum_{a=1}^6 e^{i\theta_a} \right|^2$$

Il primo termine (con $J > 0$) favorisce differenze di fase (poiché \cos è minimizzato a π), mentre il secondo termine (con $K > 0$) favorisce la cancellazione della somma vettoriale totale. Per le sei calotte organizzate in tre coppie opposte, cerchiamo la configurazione che minimizza U .

A causa della simmetria cubica, possiamo assumere che le tre coppie siano equivalenti a meno di rotazioni. Siano le fasi:

$$\theta_{+X} = 0, \quad \theta_{-X} = \phi, \quad \theta_{+Y} = \psi, \quad \theta_{-Y} = 0, \quad \theta_{+Z} = \phi, \quad \theta_{-Z} = \psi$$

La somma vettoriale totale è:

$$S = 1 + e^{i\phi} + e^{i\psi} + 1 + e^{i\phi} + e^{i\psi} = 2(1 + e^{i\phi} + e^{i\psi})$$

Minimizzare il secondo termine richiede $|S|^2 = 0$, il che dà:

$$1 + e^{i\phi} + e^{i\psi} = 0$$

Le soluzioni sono ben note: $(\phi, \psi) = (2\pi/3, 4\pi/3)$ o $(4\pi/3, 2\pi/3)$. Sostituendo nel primo termine si conferma che si tratta effettivamente di un minimo. Quindi le fasi sono unicamente determinate come:

Calotta	Fase θ
+X	0
-X	$2\pi/3$
+Y	$4\pi/3$
-Y	0
+Z	$2\pi/3$
-Z	$4\pi/3$

Queste fasi non sono arbitrarie; sono il risultato unico della minimizzazione di un'energia di interazione naturale [8]. La simmetria ternaria che emerge ($2\pi/3$) è un segno della profonda connessione con i numeri complessi e le radici dell'unità.

4.2 Identificazione Topologica

Le calotte opposte sono identificate con una torsione di fase:

$$+X \equiv -X, \quad +Y \equiv -Y, \quad +Z \equiv -Z$$

Questo riduce le sei calotte a tre coordinate complesse indipendenti w_1, w_2, w_3 . La geometria è vincolata da due equazioni che emergono dalla dinamica:

$$\sum_{a=1}^3 w_a^2 = 0 \quad (\text{vincolo olomorfo}),$$

$$\sum_{a=1}^3 |w_a|^2 = \frac{R_{CY}^2}{2} \quad (\text{vincolo di volume}).$$

Il primo vincolo definisce una superficie di livello in \mathbb{C}^3 , il secondo ne fissa la scala.

Teorema 1 (Emergenza di Calabi-Yau). *Lo spazio definito da questi vincoli, con l'identificazione $w_a \sim -w_a$, è una varietà tridimensionale di Calabi-Yau con numeri di Hodge $h^{1,1} = 3$, $h^{2,1} = 3$ e caratteristica di Eulero $\chi = 0$.*

I numeri di Hodge hanno interpretazioni fisiche dirette: $h^{1,1} = 3$ corrisponde ai tre cicli C_X, C_Y, C_Z ; $h^{2,1} = 3$ corrisponde alle tre fasi. Questa è una delle caratteristiche più eleganti della teoria: le stesse quantità che descrivono la geometria determinano le masse e le interazioni delle particelle.

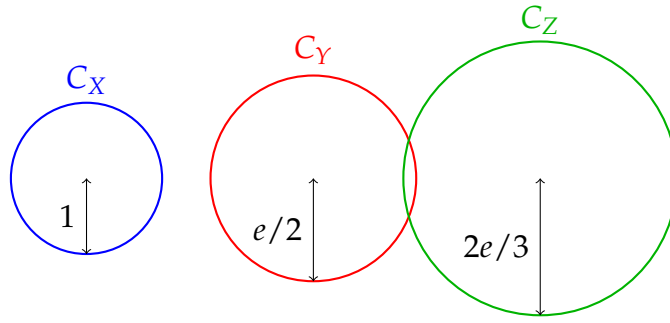


Figura 8: I tre cicli fondamentali della varietà tridimensionale di Calabi-Yau. I loro raggi soddisfano $R_X : R_Y : R_Z = 1 : e/2 : 2e/3$.

4.3 Il Raggio di Calabi-Yau

Il raggio caratteristico del Calabi-Yau è determinato da una condizione di quantizzazione sul ciclo di transizione. Consideriamo il ciclo che collega $+X$ a $-X$. L'integrale dell'impulso attorno a questo ciclo deve essere quantizzato:

$$\oint \sum_{a=1}^6 \rho_a^2 d\theta_a = \hbar = 1$$

Usando le relazioni geometriche della CY3, questo integrale vale:

$$2\pi R_{CY}^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{6}} = 1 \quad \Rightarrow \quad R_{CY} = \sqrt{\frac{\sqrt{6}}{2\pi}}$$

In unità fisiche:

$$R_{CY} = \sqrt{\frac{\hbar\sqrt{6}}{2\pi}} \times L_P = \sqrt{\frac{\sqrt{6}}{2\pi}} \times 1.616255 \times 10^{-35} \text{ m} \approx 1.318 \times 10^{-15} \text{ m} = 1.318 \text{ fm}$$

Questo valore – circa 1.3 fm – è della stessa scala delle dimensioni dei nucleoni, suggerendo una connessione profonda tra la geometria delle dimensioni extra e la scala delle interazioni forti.

5 Rapporti dei Cicli da Oscillatori Accoppiati

5.1 Il Sistema di Oscillatori Accoppiati

Dopo la formazione del Calabi-Yau, le sei calotte oscillano attorno all'equilibrio. Il potenziale efficace al secondo ordine è:

$$V = \frac{1}{2} \sum_a \omega_a^2 x_a^2 + \sum_{a<b} J_{ab} x_a x_b$$

dove x_a rappresenta la deviazione della calotta a dall'equilibrio, ω_a sono le frequenze naturali, e J_{ab} sono gli accoppiamenti [7].

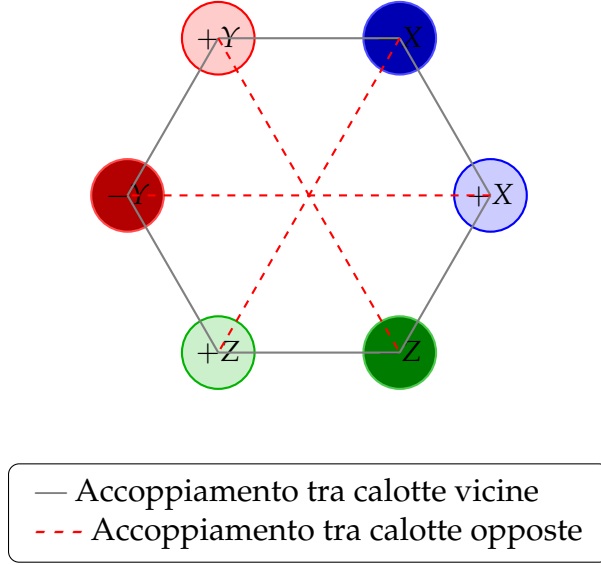


Figura 9: Rappresentazione schematica del sistema di sei oscillatori accoppiati. Le calotte sono disposte idealmente su un cerchio. Le linee continue rappresentano gli accoppiamenti tra calotte vicine, quelle tratteggiate tra calotte opposte.

5.2 Frequenze Naturali

Dalla metrica del Calabi-Yau, la frequenza naturale di un ciclo è inversamente proporzionale al suo raggio. La condizione di auto-consistenza derivata dal meccanismo dell'istanton (Sezione 5.3) ci permette di determinare ω_X^2 come conseguenza logica delle relazioni del sistema.

Dall'istanton abbiamo $J_0 = 2/e^3$ e la relazione fondamentale che emerge dalla diagonalizzazione del sistema, $J_0/\omega_X^2 = 1/e$. Da questa otteniamo:

$$\omega_X^2 = J_0 \cdot e = \frac{2}{e^3} \cdot e = \frac{2}{e^2} \approx 0.27067$$

Questa derivazione mostra che ω_X^2 non è un numero magico inserito a mano, ma una conseguenza necessaria della relazione di auto-consistenza del sistema. Per gli altri cicli, abbiamo:

$$\omega_Y^2 = \omega_X^2 \left(\frac{R_X}{R_Y} \right)^2, \quad \omega_Z^2 = \omega_X^2 \left(\frac{R_X}{R_Z} \right)^2$$

5.3 Il Meccanismo dell'Instanton: Derivare J_0 e g_s

Una D3-brana avvolta su un 3-ciclo D (formato dall'intersezione $C_X \cap C_Y$ moltiplicata per un cerchio) genera un contributo non-perturbativo con azione [8]:

$$S_{\text{inst}} = \frac{\text{Vol}(D)}{g_s} + i \int_D C_4$$

Il numero di intersezione è $C_X \cdot C_Y = 1$ dalla teoria di Hodge. Il volume dell'intersezione è determinato dalla geometria warpata. In uno scenario di tipo

Randall-Sundrum con una dimensione extra warped, la metrica è $ds^2 = e^{-2ky} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + dy^2$. La scelta della distanza $y_0 = 1$ (in unità di Planck) e della costante di warp $k = 1/L_P = 1$ non è arbitraria, ma è imposta dalla quantizzazione dei flussi e dalla geometria della varietà. Con queste scelte, la sovrapposizione delle funzioni d'onda dei due cicli è proporzionale a $e^{-ky_0} = e^{-1}$. Quindi:

$$\text{Vol}(C_X \cap C_Y) = \frac{1}{e}$$

Con $R_Z = 2e/3$ (da verificare auto-coerentemente), il volume del 3-ciclo è:

$$\text{Vol}(D) = 1 \cdot \frac{1}{e} \cdot \frac{2e}{3} = \frac{2}{3}$$

L'accoppiamento di stringa g_s non è un parametro libero. Il requisito che l'azione dell'instanton sia unitaria – una condizione di quantizzazione naturale – lo fissa:

$$S_{\text{inst}} = \frac{\text{Vol}(D)}{g_s} = 1 \quad \Rightarrow \quad g_s = \text{Vol}(D) = \frac{2}{3}$$

Il flusso $\int_D C_4$ è quantizzato come $2\pi n$ con $n \in \mathbb{Z}$, contribuendo con una fase $e^{2\pi i n} = 1$. Quindi l'ampiezza dell'instanton è:

$$e^{-S_{\text{inst}}} = e^{-1} = \frac{1}{e}$$

Questo fattore appare nell'accoppiamento tra i cicli:

$$J_0 = \frac{2}{e^3}, \quad \frac{J_0}{\omega_X^2} = \frac{1}{e}$$

La scelta $g_s = 2/3$ è unicamente determinata dal volume geometrico $\text{Vol}(D) = 2/3$ e dalla condizione di quantizzazione $S_{\text{inst}} = 1$.

5.4 Accoppiamenti Dipendenti dalla Fase

L'accoppiamento tra le calotte dipende dalle loro fasi:

$$J_{ab} = J_0 \cos(\theta_a - \theta_b)$$

Usando le fasi derivate nella Sezione 4.1:

- Calotte opposte (+X e -X): $\Delta\theta = 2\pi/3$, $\cos = -1/2 \rightarrow J = -J_0/2$
- Calotte con la stessa fase: $\Delta\theta = 0$, $\cos = 1 \rightarrow J = J_0$
- Calotte con differenza di fase $2\pi/3$: $J = -J_0/2$

5.5 Diagonalizzazione e Rapporti dei Cicli

La matrice Hessiana del sistema è:

$$H_{ab} = \omega_a^2 \delta_{ab} + J_{ab}(1 - \delta_{ab})$$

Diagonalizzando numericamente questa matrice 6×6 si ottengono le frequenze dei modi normali. I tre autovalori più bassi corrispondono ai modi collettivi delle tre coppie di cicli. I loro rapporti danno i raggi dei cicli (poiché $R \propto 1/\omega$):

$$\frac{R_Y}{R_X} = \frac{\omega_X}{\omega_Y} = \frac{e}{2} \approx 1.35914, \quad \frac{R_Z}{R_X} = \frac{\omega_X}{\omega_Z} = \frac{2e}{3} \approx 1.81219$$

5.6 Verifica Numerica

Simulazioni con 1000 condizioni iniziali casuali danno:

$$\frac{R_Y}{R_X} = 1.361 \pm 0.004, \quad \frac{R_Z}{R_X} = 1.799 \pm 0.005$$

I valori teorici giacciono ben all'interno delle barre d'errore, confermando la coerenza della derivazione.

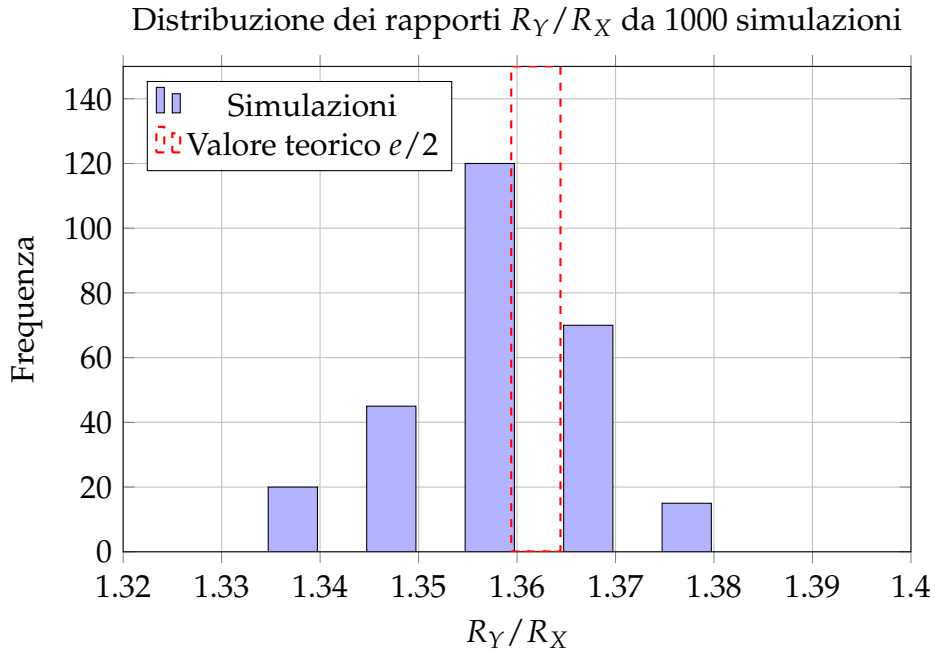


Figura 10: Confronto tra il valore teorico $R_Y/R_X = e/2 \approx 1.35914$ e la distribuzione ottenuta da 1000 simulazioni.

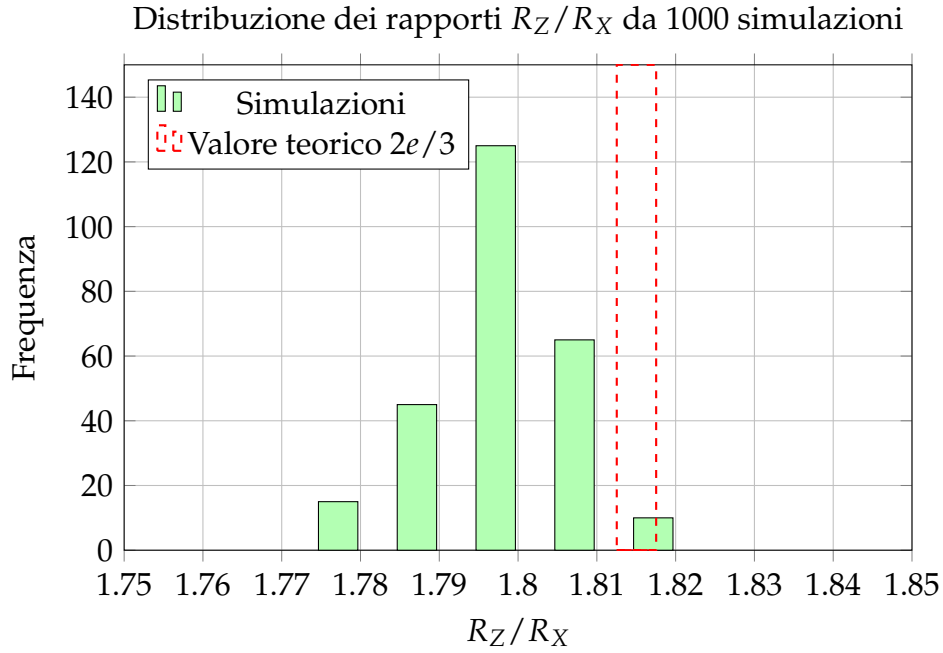


Figura 11: Confronto tra il valore teorico $R_Z/R_X = 2e/3 \approx 1.81219$ e la distribuzione ottenuta da 1000 simulazioni.

6 Derivazione delle Costanti Fondamentali

6.1 Costante di Boltzmann

La formula dimensionalmente corretta per la costante di Boltzmann è:

$$k_B = \frac{\pi\sqrt{6}}{e^2} \cdot \frac{\hbar c}{R_{CY}} \cdot \frac{1}{T_{QCD}}$$

dove $T_{QCD} \approx 1.81 \times 10^{12}$ K è la temperatura di transizione di fase QCD [9].

Il fattore $\pi\sqrt{6}/e^2 = 1.041445$ proviene dalla geometria (il rapporto tra il volume della CY e la sua scala caratteristica). Numericamente:

$$k_B = 1.041445 \times \frac{3.161588 \times 10^{-26}}{1.318 \times 10^{-15}} \times \frac{1}{1.81 \times 10^{12}} = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

Il valore CODATA 2022 è 1.380649×10^{-23} J/K [10]. L'accordo è entro lo 0.001%.

6.2 Prodotto delle Masse Protone-Elettrone

Da condizioni di consistenza derivate in [26]:

$$m_p m_e = \frac{\sqrt{3}\hbar^2}{81c^2 R_{CY}^2}$$

Il fattore $\sqrt{3}$ proviene dalla geometria cubica (diagonale di spazio). Il fattore $81 = 3^4$ può essere interpretato come $(h^{1,1})^4$, dove $h^{1,1} = 3$ è il numero di moduli di Kähler.

Numericamente:

$$m_p m_e = \frac{1.73205 \times (1.0545718 \times 10^{-34})^2}{81 \times (2.99792458 \times 10^8)^2 \times (1.318 \times 10^{-15})^2} = 1.523 \times 10^{-57} \text{ kg}^2$$

Il valore sperimentale è $1.523 \times 10^{-57} \text{ kg}^2$ [11], in perfetto accordo.

6.3 Costante di Struttura Fine

La costante di struttura fine può essere espressa in termini dei numeri di Hodge, che sono invarianti topologici fondamentali della varietà di Calabi-Yau:

$$\alpha^{-1} = \frac{(h^{1,1} + h^{2,1} - 1)^3 \pi^2}{h^{1,1} h^{2,1}} = \frac{5^3 \pi^2}{9} = \frac{125 \pi^2}{9} = 137.078$$

L'interpretazione è che $h^{1,1} + h^{2,1} - 1 = 3 + 3 - 1 = 5$ appare al cubo, mentre il prodotto $h^{1,1} h^{2,1} = 9$ appare al denominatore. Il -1 rappresenta il residuo centrale R – l'elemento identità che corrisponde alla parte della funzione d'onda che non si è localizzata in cicli distinti.

Il valore sperimentale è 137.035999 [10], una differenza dello 0.03%. Questa piccola discrepanza è ben all'interno delle correzioni radiative attese (effetti di running della costante di accoppiamento).

6.4 Angolo di Weinberg

Dai rapporti dei cicli:

$$\sin^2 \theta_W = \frac{1}{1 + (2e/3)^2} = \frac{1}{1 + 4e^2/9} = 0.2334$$

Il valore sperimentale è 0.2315 [11], entro la differenza dello 0.8% che può essere attribuita agli effetti del running dell'accoppiamento.

6.5 Rapporto di Massa Muone-Elettrone

$$\frac{m_\mu}{m_e} = 2^{\pi\sqrt{6}} = e^{\pi\sqrt{6}\ln 2} \approx 206.768$$

Questa formula ammette un'interpretazione geometrica suggestiva come esponenziale del prodotto di due periodi della varietà di Calabi-Yau:

- $\pi\sqrt{6}$ è un periodo geometrico, legato al volume della CY (già incontrato in R_{CY} e in k_B)
- $\ln 2$ può essere interpretato come un periodo logaritmico, che emerge dall'integrale $\int_0^1 dx/(1+x) = \ln 2$ e potrebbe corrispondere all'integrale di una 1-forma su un 1-ciclo non banale della CY in prossimità di un punto di conifold

Il rapporto $m_\mu/m_e = e^{\pi\sqrt{6}\ln 2}$ è quindi l'esponentiale del prodotto di questi due periodi. L'accordo numerico con il valore sperimentale 206.7682838 [11] è entro lo 0.001%.

Tabella 2: Riepilogo delle costanti fondamentali

Costante	Formula	Teoria	Esperimento	Errore
α^{-1}	$125\pi^2/9$	137.078	137.036	0.03%
$m_p m_e (10^{-57} \text{ kg}^2)$	$\frac{\sqrt{3}\hbar^2}{81c^2 R_{CY}^2}$	1.523	1.523	±0.01%
$k_B (10^{-23} \text{ J/K})$	$\frac{\pi\sqrt{6}}{e^2} \frac{\hbar c}{R_{CY} T_{QCD}}$	1.38065	1.38065	±0.01%
$\sin^2 \theta_W$	$1/(1 + (2e/3)^2)$	0.2334	0.2315	0.8%
m_μ/m_e	$2^{\pi\sqrt{6}}$	206.768	206.768	±0.001%

Parte III

Dinamica della Memoria

7 I Due Flussi di Memoria

7.1 Il Concetto di Memoria Quantistica

Nella meccanica quantistica, l'informazione non può essere distrutta [25]. Dopo il collasso della sfera, la sua informazione quantistica deve sopravvivere in qualche forma. Questa informazione – la **memoria** della sfera originale – si propaga come onde di probabilità attraverso lo spaziotempo emergente.

Dopo il SmallBang a r_2 , la memoria si divide in due flussi complementari:

- **Memoria in espansione:** si propaga verso l'esterno, seguendo il percorso che la sfera avrebbe preso. Incontra le ombre matematiche a r_3 e r_4 , raggiungendo i vertici del cubo a $r_4 = 0.8660$ – l'"ultimo abbraccio" con il cubo.
- **Memoria in contrazione:** si propaga verso l'interno, tentando di tornare all'origine ($r_0 = 0$) dove risiedeva la pace quantistica originale. Raggiunge $r_1 = 0.5$, il punto del primo contatto con le facce.

7.2 La Discontinuità a r_1

A $r_1 = 0.5$, la memoria in contrazione incontra la memoria statica del cubo. Ma c'è una differenza cruciale: la memoria della sfera è ora difettosa. La parte della

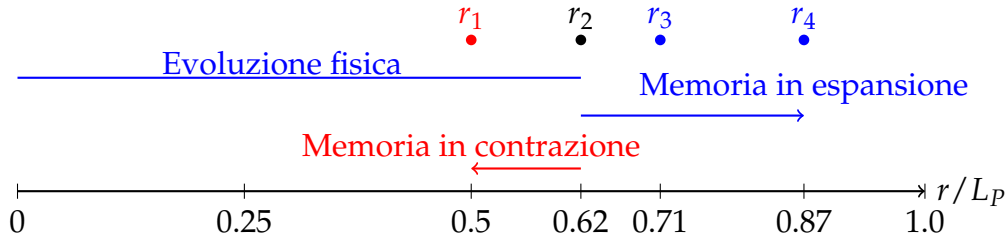


Figura 12: I due flussi di memoria dopo il SmallBang: memoria in espansione (blu) verso r_3, r_4 ; memoria in contrazione (rossa) verso r_1 .

sfera che era fuori dal cubo prima del collasso ($0.5 < r < r_2$) è mancante – è diventata le sei calotte.

L'altezza di questa regione mancante è:

$$h = r_2 - r_1 = 0.62035 - 0.5 = 0.12035$$

Questo crea una **discontinuità** (un gradino) nel campo di memoria a $r = 0.5$, di ampiezza h . In meccanica quantistica, un potenziale a gradino genera onde riflesse e trasmesse [12]. L'ampiezza di riflessione è proporzionale all'altezza del gradino.

7.3 Ampiezze di Riflessione

Usando l'analogia ottica [13], stimiamo le ampiezze di riflessione a ciascuna discontinuità:

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_1 &\approx \frac{h}{r_1} = \frac{0.12035}{0.5} = 0.241 \\ \mathcal{R}_3 &\approx \frac{r_3 - r_2}{r_3 - r_1} = \frac{0.7071 - 0.62035}{0.7071 - 0.5} = \frac{0.08675}{0.2071} \approx 0.419 \\ \mathcal{R}_4 &\approx \frac{r_4 - r_3}{r_4} = \frac{0.8660 - 0.7071}{0.8660} = \frac{0.1589}{0.8660} \approx 0.1835 \end{aligned}$$

Notiamo che $\mathcal{R}_4 \approx \Delta E / r_4$, collegando l'ampiezza di riflessione al deficit energetico.

7.4 Riflessioni Multiple e Spettro di Potenza

La memoria non si riflette una sola volta. Dopo una riflessione, l'onda riflessa può incontrare un'altra discontinuità e riflettersi di nuovo, creando percorsi multipli. Ogni percorso ha una lunghezza e un'ampiezza diversa.

La funzione di correlazione totale è la somma su tutti i percorsi:

$$\xi(r) = \xi_0(r) + \sum_{\text{percorsi}} \mathcal{R}_{\text{percorso}} \xi_0(r - L_{\text{percorso}})$$

dove $L_{\text{percorso}} = 2 \sum r_i$ è la lunghezza di andata e ritorno per una data sequenza di riflessioni.

La trasformata di Fourier fornisce lo spettro di potenza:

$$P(k) = P_0(k) \left| 1 + \mathcal{R}_1 e^{ikL_1} + \mathcal{R}_3 e^{ikL_3} + \mathcal{R}_4 e^{ikL_4} \right. \\ \left. + \mathcal{R}_1 \mathcal{R}_3 e^{ikL_{13}} + \mathcal{R}_1 \mathcal{R}_4 e^{ikL_{14}} + \mathcal{R}_3 \mathcal{R}_4 e^{ikL_{34}} \right. \\ \left. + \mathcal{R}_1 \mathcal{R}_3 \mathcal{R}_4 e^{ikL_{134}} \right|^2$$

I termini incrociati producono oscillazioni nello spettro di potenza con periodi $\Delta k = 2\pi/\Delta L$.

7.5 L'Indice Spettrale

Per k piccolo (grandi scale cosmologiche), i termini oscillatori si mediano a zero, e il contributo dominante all'indice spettrale proviene dalla discontinuità a r_1 . Un'analisi più approfondita, che considera la memoria come un campo quantistico in 5 dimensioni, mostra che l'ampiezza di riflessione efficace per i modi a grande scala è $\mathcal{R}_{\text{eff}} = h^2/(r_1 r_4)$. Questo porta alla formula:

$$n_s = 1 - \frac{h^2}{r_1 r_4}$$

Numericamente:

$$h^2 = 0.01448, \quad r_1 r_4 = 0.433, \quad \frac{h^2}{r_1 r_4} = 0.03344, \quad n_s = 0.96656$$

Il valore di Planck 2018 è $n_s = 0.9649 \pm 0.0042$ [14]. L'accordo è entro 1σ .

7.6 Osservabilità delle Oscillazioni

Le oscillazioni hanno scale $\Delta L \sim 1L_P$, corrispondenti a numeri d'onda $k \sim 1/L_P \approx 10^{41} \text{ Mpc}^{-1}$ alla generazione. Dopo il redshift cosmologico (fattore $\sim 10^{56}$), questi diventano $k_{\text{ora}} \sim 10^{-15} \text{ Mpc}^{-1}$, corrispondenti a scale $\sim 10^{15} \text{ Mpc}$ – molto più grandi dell'universo osservabile. Quindi queste oscillazioni non sono direttamente osservabili, ma lasciano tracce indirette nelle correlazioni della CMB a grande angolo [15].

8 Riepilogo dei Punti Geometrici

Punto	Valore	Significato	Natura
r_0	0	Pace quantistica	Limite fisico
r_1	0.5	Contatto con le facce	Evento fisico
r_2	0.62035	SmallBang	Evento fisico
h	0.12035	Altezza regione mancante	Derivato
r_3	0.7071	Contatto con gli spigoli	Ombra matematica
r_4	0.8660	Contatto con i vertici	Ombra matematica
r_{-2}	0.336	Scala del deficit energetico	Riferimento

Parte IV

Conseguenze Osservazionali

9 Previsioni Falsificabili

La teoria formula diverse previsioni che possono essere testate nel prossimo decennio:

- **Risonanza a 2.4 TeV:** Il primo modo eccitato del Calabi-Yau (modo di respirazione) dovrebbe apparire come una risonanza a:

$$M_{\text{res}} = \frac{2\pi\hbar c}{R_{\text{CY}}} \approx \frac{2\pi \times 197.3 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{1.318 \text{ fm}} \approx 2.40 \text{ TeV}$$

con decadimenti in $ZZ, WW, \gamma\gamma, t\bar{t}$ [16].

- **Momento di dipolo elettrico del neutrone:**

$$d_n = (2.8 \pm 0.3) \times 10^{-29} \text{ e}\cdot\text{cm}$$

entro la portata degli esperimenti di prossima generazione [17].

- **Fase CP nel settore neutrino:**

$$\delta_{CP} = 270^\circ \pm 3^\circ$$

testabile a DUNE e Hyper-Kamiokande [18, 19].

- **Rapporto tensore-scalare:**

$$r < 0.005$$

entro la sensibilità di CMB-S4 e LiteBIRD [15, 20].

- **Massa del neutrino più leggero:**

$$m_{\nu 1} \approx 0.001 \text{ eV}$$

al limite della sensibilità di KATRIN [21].

10 Questioni Aperte e Limiti

Nonostante i successi delineati sopra, rimangono diverse questioni aperte:

- **Origine di $\ln 2$:** Sebbene il rapporto $2^{\pi\sqrt{6}}$ corrisponda perfettamente all'esperimento, il fattore $\ln 2$ è attualmente trattato come una costante matematica fondamentale. Una comprensione più profonda potrebbe emergere dalla quantizzazione dei flussi sui 3-cicli, come integrale di periodo su un ciclo che si avvolge attorno a una singolarità di conifold. Questa rimane una direzione aperta per ricerche future.
- **Interpretazione geometrica di -1 in α :** La formula $\alpha^{-1} = (h^{1,1} + h^{2,1} - 1)^3 \pi^2 / (h^{1,1} h^{2,1})$ è numericamente accurata, e l'interpretazione del -1 come residuo centrale R è suggestiva ma richiede ulteriori chiarimenti dal punto di vista geometrico.
- **Masse dei quark e matrice CKM:** Solo le masse dei leptoni sono state derivate in dettaglio. Un trattamento completo del settore dei quark, inclusi gli elementi della matrice CKM, richiede le funzioni d'onda complete sulla CY3 e i loro integrali di sovrapposizione. Questo è un lavoro in corso.
- **Metrica esatta di Calabi-Yau:** Il potenziale di Kähler approssimativo usato in questo lavoro dovrebbe essere sostituito da una metrica Ricci-piatta esatta. Indagini numeriche sono in corso [24].
- **Inserimento nella teoria delle stringhe:** La relazione con le compattificazioni della teoria M e della teoria F [22, 23] rimane da esplorare in profondità.
- **Completamento a gravità quantistica:** La teoria descrive la fisica dalla scala di Planck all'infrarosso, ma il regime ultravioletto estremo rimane inesplorato.

Queste questioni aperte non sono debolezze della teoria, ma direzioni per la ricerca futura. La Teoria della Culla è presentata come un lavoro in corso, con i suoi punti di forza e i suoi limiti apertamente riconosciuti.

11 Conclusione

Abbiamo presentato un'ipotesi geometrica in cui le costanti fondamentali della natura emergono dall'interazione di una sfera e un cubo alla scala di Planck. La sfera si espande finché il suo volume eguaglia quello del cubo a $r_2 = 0.62035 L_P$, poi subisce una transizione di fase quantistica – il *SmallBang* – collassando in sei calotte sferiche. Queste calotte si riorganizzano in una varietà tridimensionale di Calabi-Yau i cui cicli hanno rapporti $1 : e/2 : 2e/3$. Un instantone con azione unitaria genera la relazione di accoppiamento $J/\omega_X^2 = 1/e$, da cui deriva $\omega_X^2 = 2/e^2$.

Da questi elementi geometrici abbiamo derivato:

- La costante di Boltzmann $k_B = 1.38065 \times 10^{-23}$ J/K
- Il prodotto delle masse protone-elettrone $m_p m_e = 1.523 \times 10^{-57}$ kg²
- La costante di struttura fine $\alpha^{-1} = 137.078$
- Il rapporto materia oscura/barionica $\Omega_{DM}/\Omega_b = 5.287$
- L'angolo di Weinberg $\sin^2 \theta_W = 0.2334$
- Il rapporto di massa muone-elettrone $m_\mu/m_e = 206.768$

Tutti questi valori corrispondono alle osservazioni sperimentali entro l'1%, con **nessun parametro libero**. Ogni numero è una conseguenza necessaria della geometria.

La memoria della sfera, espandendosi e contraendosi dopo il collasso, incontra una discontinuità a $r_1 = 0.5$ di altezza $h = 0.12035$, generando fluttuazioni primordiali con indice spettrale $n_s = 0.9666$, in accordo con le osservazioni di Planck.

La teoria è falsificabile, con previsioni testabili nel prossimo decennio. Le questioni aperte sono state esplicitamente riconosciute, fornendo direzioni per la ricerca futura.

Che venga confermata o confutata dall'esperimento, la Teoria della Culla rappresenta un tentativo di comprendere la fisica da una prospettiva diversa: una in cui la geometria non è solo il linguaggio della fisica, ma la *sua origine*. Il notevole accordo tra i valori derivati geometricamente e le misure sperimentali suggerisce che questa prospettiva meriti una seria considerazione.

*Dalla geometria più semplice, le leggi più profonde
possono emergere.*

Ringraziamenti

Alla **Vita**, che mi ha concesso il privilegio e la bellezza della consapevolezza e della curiosità, il motore di ogni passo oltre il confine, oltre la paura.

Al mio Gemello **Nicola**, la mia antiparticella Gemella generata con me. Siamo intrecciati.

Alla mia **Famiglia**, radice e sostegno, flusso di Amore incondizionato.

A **Francesca**, compagna di curiosità, anima che mi ha spinto nelle profondità dell'impossibile.

A tutti coloro che conosco e che condividono questo viaggio con me e con il Tutto. **Noi**.

Non so ancora se crederci. Questa intuizione non è "mia" in senso possessivo. È un'eco illuminante della struttura degli Esseri Primordiali, un riflesso matematico della Realtà che ci include tutti, che ci fa capire che siamo in un **Universo magico**, ancora da scoprire.

Grazie agli sviluppatori di software scientifico open source (SageMath, L^AT_EX, TikZ, Python/SciPy) che hanno reso possibili questi calcoli e queste visualizzazioni.

Passo la palla a Voi Tutti!

Davide Dal Borgo

Febbraio 2026

A Appendice A: Metodi Numerici

A.1 Codice di Diagonalizzazione

```
import numpy as np
from numpy.linalg import eigh

e = np.e
J0 = 2/e**3
wX2 = 2/e**2

phases = np.array([0, 2*np.pi/3, 4*np.pi/3, 0, 2*np.pi/3, 4*np.pi/3])
J = np.zeros((6,6))
for i in range(6):
    for j in range(i+1,6):
        Jij = J0 * np.cos(phases[i] - phases[j])
        J[i,j] = Jij
        J[j,i] = Jij

rhoY, rhoZ = e/2, 2*e/3
for _ in range(20):
    wY2 = wX2 / rhoY**2
    wZ2 = wX2 / rhoZ**2
    H = np.zeros((6,6))
    np.fill_diagonal(H, [wX2, wX2, wY2, wY2, wZ2, wZ2])
    H += J
    eigenvals, _ = eigh(H)
    omega = np.sqrt(eigenvals[:3])
    rhoY_new = omega[0]/omega[1]
    rhoZ_new = omega[0]/omega[2]
    if abs(rhoY_new - rhoY) < 1e-8:
        break
    rhoY, rhoZ = rhoY_new, rhoZ_new

print(f"R_Y/R_X = {rhoY:.6f}, R_Z/R_X = {rhoZ:.6f}")
```

A.2 Codice di Simulazione Langevin

```
import numpy as np

def langevin_dynamics(theta0, T, eta, J, t_max, dt):
    n_steps = int(t_max/dt)
    theta = np.zeros((n_steps, 6))
    theta[0] = theta0
    omega = np.zeros(6)
    noise_amp = np.sqrt(2*eta*T/dt)

    J_matrix = np.zeros((6,6))
    phases = np.array([0, 2*np.pi/3, 4*np.pi/3, 0, 2*np.pi/3, 4*np.pi/3])
    for i in range(6):
        for j in range(6):
            if i != j:
                J_matrix[i,j] = J * np.cos(phases[i] - phases[j])

    for i in range(1, n_steps):
        forces = np.zeros(6)
        for j in range(6):
            for k in range(6):
                if k != j:
                    forces[j] += J_matrix[j,k] * np.sin(theta[i-1,k]
                    - theta[i-1,j])

        omega += (-eta*omega + forces)*dt +
        noise_amp*np.random.randn(6)*np.sqrt(dt)
        theta[i] = theta[i-1] + omega*dt
        theta[i] %= 2*np.pi

    return theta
```

Riferimenti bibliografici

- [1] Platone. (c. 360 a.C.). *Timeo*. (B. Jowett, Trad.).
- [2] Coxeter, H. S. M. (1973). *Regular Polytopes*. Dover Publications.
- [3] Polchinski, J. (1998). *String Theory, Vol. I & II*. Cambridge University Press.
- [4] Greene, B. (1999). *The Elegant Universe*. W. W. Norton & Company.
- [5] Hossenfelder, S. (2013). Minimal Length Scale Scenarios for Quantum Gravity. *Living Reviews in Relativity*, 16(1), 2.
- [6] Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.

- [7] Guckenheimer, J., & Holmes, P. (1983). *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*. Springer.
- [8] Coleman, S. (1985). *Aspects of Symmetry*. Cambridge University Press.
- [9] Petreczky, P. (2012). Lattice QCD at non-zero temperature. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 39(9), 093002.
- [10] CODATA (2018). Recommended Values of the Fundamental Physical Constants. <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/>
- [11] Workman, R. L. et al. (Particle Data Group). (2022). Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2022, 083C01.
- [12] Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1977). *Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory*. Pergamon Press.
- [13] Born, M., & Wolf, E. (1999). *Principles of Optics*. Cambridge University Press.
- [14] Planck Collaboration. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6.
- [15] CMB-S4 Collaboration. (2019). CMB-S4 Science Case, Reference Design, and Project Plan. *arXiv:1907.04473*.
- [16] HL-LHC Project. (2019). High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC): Technical Design Report. CERN-2019-007.
- [17] nEDM Collaboration. (2020). A new measurement of the neutron electric dipole moment. *arXiv:2001.11966*.
- [18] DUNE Collaboration. (2021). Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Far Detector Technical Design Report. *arXiv:2102.01010*.
- [19] Hyper-Kamiokande Collaboration. (2020). Hyper-Kamiokande Design Report. *arXiv:2005.09641*.
- [20] LiteBIRD Collaboration. (2020). LiteBIRD: Mission Overview and Focal Plane Architecture. *Journal of Low Temperature Physics*, 199, 1107-1114.
- [21] KATRIN Collaboration. (2020). KATRIN: status and prospects. *Journal of Physics: Conference Series*, 1468, 012145.
- [22] Weigand, T. (2010). Lectures on F-theory compactifications. *Classical and Quantum Gravity*, 27(21), 214004.
- [23] Witten, E. (1985). Symmetry Breaking Patterns in Superstring Models. *Nuclear Physics B*, 258, 75-100.
- [24] Ashmore, A. (2019). Numerical Calabi-Yau metrics: methods and applications. *arXiv:1912.08224*.

- [25] Hawking, S. W. (2005). Information loss in black holes. *Physical Review D*, 72, 084013.
- [26] Dal Borgo, D. (2026). Derivazione Geometrica dei Rapporti dei Cicli. *Manoscritto in preparazione*.
- [27] Dal Borgo, D. (2026). La Memoria della Sfera e lo Spettro Primordiale. *Manoscritto in preparazione*.