

# Spieltheoretische Kosmologie und das Krümmungs-Rückgabepotential-Modell

Nash-Gleichgewichte zwischen Nullraum und Raumzeitblase  
als Erklärungsrahmen für die beschleunigte Expansion  
Ein integrativer theoretischer Ansatz

Lukas Geiger<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Unabhängiger Forscher, Bernau im Schwarzwald

Februar 2026

*Wissenschaftliches Arbeitspapier*

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit entwickelt einen spieltheoretischen Rahmen für die Kosmologie, in dem die Entstehung und Entwicklung der Raumzeit als Nash-Gleichgewicht zwischen zwei Akteuren modelliert wird: einem metastabilen Quantenvakuum (Nullraum) und einer daraus hervorgehenden Raumzeitblase. Das zentrale Ergebnis ist das *Curvature Feedback Model* (CFM), das die beobachtete beschleunigte Expansion des Universums nicht durch eine neue Energieform (Dunkle Energie) erklärt, sondern durch ein nachlassendes Krümmungs-Rückgabepotential  $\Phi(a)$  – ein geometrisches “Gedächtnis” der anfänglichen Energiekonzentration beim Urknall. Die modifizierte Friedmann-Gleichung  $H^2(a) = H_0^2 [\Omega_m a^{-3} + \Omega_\Phi(a)]$  mit  $\Omega_\Phi(a) = \Phi_0 \cdot \tanh(k \cdot (a - a_{\text{trans}}))$  wird gegen 1590 reale Typ-Ia-Supernovae des Pantheon+-Katalogs [19] getestet. Unter einer Flachheitsbedingung ( $\Omega_m + \Omega_\Phi(a=1) = 1$ ) liefert das CFM  $\Delta\chi^2 = -12,2$  und  $\Delta\text{AIC} = -8,2$  gegenüber  $\Lambda\text{CDM}$ ; eine 5-Fold-Kreuzvalidierung bestätigt die bessere Generalisierung ( $\langle\chi^2/n\rangle = 0,450$  vs.  $0,452$ ). Das Modell sagt eine messbare Zeitvariation des Zustandsgleichungsparameters voraus ( $w(z) < -1$ ), die mit Euclid und dem Nancy Grace Roman Space Telescope innerhalb der nächsten Dekade testbar ist. Es wird gezeigt, dass das CFM konzeptuelle Verbindungen sowohl zur Finsler-Gravitation (Pfeifer et al., 2025) als auch zur jüngst vorgeschlagenen *Cosmological Teleodynamics* (Trivedi & Venkatasubramanian, 2025) aufweist, welche die kosmische Expansion ebenfalls als Konvergenz zu einem Nash-Gleichgewicht beschreibt. Analysecode und Daten sind öffentlich verfügbar.<sup>1</sup> Die spieltheoretische Perspektive eröffnet einen Paradigmenwechsel: von “Was treibt die Beschleunigung an?” zu “Warum bremste die Expansion früher?”

**Schlüsselbegriffe:** Spieltheorie, Nash-Gleichgewicht, Kosmologie, Dunkle Energie, Krümmungs-Rückgabepotential, Curvature Feedback Model, Friedmann-Gleichung, Finsler-Gravitation, beschleunigte Expansion, Zustandsgleichung

**Disziplinen:** Theoretische Physik, Kosmologie, Spieltheorie, Mathematische Physik

---

<sup>\*</sup>Korrespondenz: Lukas Geiger, Geißbühlweg 1, 79872 Bernau, Deutschland.

<sup>1</sup><https://github.com/lukisch/cfm-cosmology>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Angaben zur KI-Nutzung und Methodik</b>	<b>4</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2 Spieltheoretischer Rahmen: Nullraum und Raumzeitblase</b>	<b>5</b>
2.1 Grundannahmen . . . . .	5
2.2 Akteure und Ziele . . . . .	6
2.3 Mathematische Formulierung als Potentialspiel . . . . .	6
2.4 Emergente Gesetze aus dem Gleichgewicht . . . . .	6
<b>3 Das Curvature Feedback Model (CFM)</b>	<b>7</b>
3.1 Physikalische Motivation . . . . .	7
3.2 Modifizierte Friedmann-Gleichung . . . . .	7
3.3 Physikalische Interpretation der Parameter . . . . .	8
3.4 Effektiver Zustandsgleichungsparameter . . . . .	8
<b>4 Numerische Tests und Modellvergleich</b>	<b>8</b>
4.1 Flachheitsbedingung . . . . .	9
4.2 Datenbasis: Pantheon+ . . . . .	9
4.3 Methodik . . . . .	9
4.4 Ergebnisse . . . . .	9
4.5 Modellselektion . . . . .	10
<b>5 Vergleich mit alternativen Modellen</b>	<b>10</b>
5.1 $\Lambda$ CDM (Standardmodell) . . . . .	10
5.2 Quintessenz . . . . .	11
5.3 Modifizierte Gravitation: $f(R)$ -Theorien . . . . .	11
5.4 Emergente Gravitation nach Verlinde . . . . .	11
5.5 Finsler-Gravitation . . . . .	11
5.6 Cosmological Teleodynamics . . . . .	11
5.7 Synoptischer Vergleich . . . . .	12
<b>6 Komplementarität und mögliche Vereinigung</b>	<b>12</b>
6.1 Drei Modelle, eine Einsicht . . . . .	12
6.2 Hypothese: CFM als effektive Beschreibung . . . . .	12
<b>7 Testbarkeit und Vorhersagen</b>	<b>13</b>
7.1 Beobachtbare Signaturen . . . . .	13
7.2 Zukünftige Missionen . . . . .	13
7.3 Unterscheidbarkeit der Modelle . . . . .	13

<b>8 Diskussion</b>	<b>13</b>
8.1 Stärken des Ansatzes . . . . .	13
8.2 Limitationen und offene Fragen . . . . .	14
8.3 Philosophische Implikationen . . . . .	14
<b>9 Fazit und Ausblick</b>	<b>15</b>
<b>10 Introduction</b>	<b>18</b>
<b>11 Game-Theoretic Framework: Null Space and Spacetime Bubble</b>	<b>19</b>
11.1 Fundamental Assumptions . . . . .	19
11.2 Agents and Objectives . . . . .	19
11.3 Mathematical Formulation as a Potential Game . . . . .	19
11.4 Emergent Laws from the Equilibrium . . . . .	20
<b>12 The Curvature Feedback Model (CFM)</b>	<b>20</b>
12.1 Physical Motivation . . . . .	20
12.2 Modified Friedmann Equation . . . . .	20
12.3 Effective Equation-of-State Parameter . . . . .	20
<b>13 Numerical Tests and Model Comparison</b>	<b>21</b>
<b>14 Comparison with Alternative Models</b>	<b>21</b>
<b>15 Complementarity and Possible Unification</b>	<b>21</b>
<b>16 Testability and Predictions</b>	<b>21</b>
<b>17 Discussion</b>	<b>22</b>
<b>18 Conclusion and Outlook</b>	<b>22</b>

## **Angaben zur KI-Nutzung und Methodik**

Die vorliegende Arbeit wurde unter intensiver Mitwirkung folgender KI-Systeme erstellt. Da ihre Beiträge über bloße Hilfestellungen hinausgingen, werden sie hier detailliert ausgewiesen:

### **Claude Opus 4.6 (Anthropic)**

Co-Writer: Textgenese, Strukturierung und argumentative Ausarbeitung.

### **Gemini (Google DeepMind) & Copilot (Microsoft)**

Reviewer: Kritisches Lektorat, Prüfung auf Konsistenz und systematische Literaturrecherche.

*Hinweis:* Trotz des erheblichen maschinellen Beitrags liegt die finale Verantwortung für den wissenschaftlichen Inhalt und die Interpretation der Ergebnisse beim menschlichen Autor.

# 1 Einleitung

Die Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums durch die Beobachtung entfernter Typ-Ia-Supernovae im Jahr 1998 durch die Teams um Perlmutter [2] sowie Riess und Schmidt [1] markiert einen Wendepunkt der modernen Kosmologie. Für diese Entdeckung wurde 2011 der Nobelpreis für Physik verliehen. Das Standardmodell der Kosmologie,  $\Lambda$ CDM, erklärt die Beschleunigung durch eine kosmologische Konstante  $\Lambda$ , die etwa 68 % der Energiedichte des Universums ausmacht [3]. Trotz seiner empirischen Erfolge steht  $\Lambda$ CDM vor tiefgreifenden konzeptuellen Problemen:

1. **Das Kosmologische-Konstante-Problem:** Die beobachtete Vakuumenergiedichte ist um  $\sim 60\text{--}120$  Größenordnungen kleiner als theoretische Vorhersagen der Quantenfeldtheorie [4].
2. **Das Koinzidenz-Problem:** Warum sind  $\Omega_m$  und  $\Omega_\Lambda$  gerade in der heutigen Epoche von vergleichbarer Größenordnung?
3. **Die  $H_0$ -Spannung:** Die lokale Messung des Hubble-Parameters ( $H_0 \approx 73 \text{ km/s/Mpc}$ ) weicht signifikant von der aus CMB-Daten abgeleiteten ( $H_0 \approx 67,4 \text{ km/s/Mpc}$ ) ab [3, 5].

Jüngste Resultate des *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI) verstärken die Zweifel an einer strikt konstanten Dunklen Energie: Die Analyse baryonischer akustischer Oszillationen in Kombination mit CMB- und Supernova-Daten zeigt eine Präferenz von  $2,5\text{--}3,9\sigma$  für ein Modell mit zeitabhängigem Zustandsgleichungsparameter  $w(z)$  gegenüber  $\Lambda$ CDM [6].

Parallel dazu zeigen theoretische Arbeiten, dass die Beschleunigung auch ohne Dunkle Energie erklärbar sein könnte: Pfeifer et al. [7] demonstrieren im Rahmen der Finsler-Gravitation, dass eine verallgemeinerte Raumzeitgeometrie natürlicherweise eine exponentielle Expansion im Vakuum erzeugt. Trivedi und Venkatasubramanian [8] zeigen in ihrer *Cosmological Teleodynamics*, dass das Universum wie ein “riesiges Potentialspiel” operiert und sich einem kontinuierlichen Nash-Gleichgewicht annähert, wobei die kosmische Beschleunigung als emergenter Effekt dynamischen Gedächtnisses in einem selbst-gravitierenden Medium erscheint.

Die vorliegende Arbeit verknüpft diese Entwicklungen mit einem eigenständigen Ansatz: Ausgehend von einer spieltheoretischen Modellierung der Wechselwirkung zwischen Quantenvakuum und Raumzeit wird das *Curvature Feedback Model* (CFM) entwickelt, das die beschleunigte Expansion als “nachlassende Bremse” statt als “neuen Antrieb” interpretiert.

## 2 Spieltheoretischer Rahmen: Nullraum und Raumzeitblase

### 2.1 Grundannahmen

Der hier vorgeschlagene Rahmen geht von folgenden Annahmen aus:

1. Es existiert ein metastabiler Quantenvakuumzustand (im Folgenden: *Nullraum*), der durch Quantenfluktuationen charakterisiert ist.
2. Eine außergewöhnlich große Fluktuation entnimmt dem Nullraum einmalig eine Energiemenge  $E_0$ , die einen Konzentrationsgradienten erzeugt.

3. Zur Einkapselung und kontrollierten Neutralisation dieses Gradienten entsteht Raumzeit als dynamische Struktur – die *Raumzeitblase* (Tochtersystem).
4. Zwischen Nullraum (Muttersystem) und Raumzeitblase besteht ein spieltheoretisches Gleichgewicht.

Diese Annahmen werden im Folgenden in einen formalen Rahmen überführt.

## 2.2 Akteure und Ziele

Das System wird als Zweipersonen-Potentialspiel modelliert:

**Nullraum (Muttersystem):** Primärziel ist der Selbstschutz – die Erhaltung seiner strukturellen Integrität. Er reguliert die Kopplungsstärke zur Raumzeitblase über effektive Randbedingungen (“Gatekeeping”), erzwingt langsame Energieabfuhr (Dämpfung) und bildet Pufferzonen (horizontartige Hüllen).

**Raumzeitblase (Tochtersystem):** Primärziel ist die kontrollierte Rückkehr in den Nullzustand bei gleichzeitigem Schutz des Muttersystems. Die Strategien umfassen kaskadierten Gradientenabbau, adiabatische Rückführung und Entropiemanagement.

## 2.3 Mathematische Formulierung als Potentialspiel

Die globale Zielfunktion des Systems lautet:

$$\Phi = \alpha \cdot S_{\text{Mutter}} + \beta \cdot R_{\text{Tochter}} - \gamma \cdot G \quad (1)$$

wobei  $S_{\text{Mutter}}$  die strukturelle Integrität des Nullraums,  $R_{\text{Tochter}}$  den Rückkehrfortschritt und  $G$  den verbleibenden Konzentrationsgradienten beschreibt;  $\alpha, \beta, \gamma > 0$ .

**Definition 1** (Nash-Gleichgewicht des kosmologischen Spiels). *Ein Strategiepaar  $(s_M^*, s_T^*)$  von Nullraum und Raumzeitblase bildet ein Nash-Gleichgewicht, wenn gilt:*

$$\Phi(s_M^*, s_T^*) \geq \Phi(s_M, s_T^*) \quad \forall s_M \quad (2)$$

$$\Phi(s_M^*, s_T^*) \geq \Phi(s_M^*, s_T) \quad \forall s_T \quad (3)$$

*Keine Seite kann durch einseitige Abweichung von ihrer Strategie das Gesamtpotential verbessern, ohne die Stabilität des Systems zu gefährden.*

Der zentrale **Zielkonflikt** besteht darin, dass eine zu schnelle Reduktion von  $G$  (sofortige Rückkehr)  $S_{\text{Mutter}}$  gefährdet, während eine zu langsame Reduktion die Entropie und die Kosten innerhalb der Blase erhöht. Das Nash-Gleichgewicht erzwingt daher eine kontrollierte, zeitlich gestreckte Neutralisation.

## 2.4 Emergente Gesetze aus dem Gleichgewicht

Aus der spieltheoretischen Gleichgewichtsbedingung emergieren physikalische Gesetzmäßigkeiten:

1. **Energieerhaltung:** Konservative Feldgleichungen entstehen als notwendige Bedingung für stabile Gradientenabbau.

2. **Kausalstruktur:** Die Hüllenbildung des Nullraums erzwingt eine maximale Ausbreitungsgeschwindigkeit für Informationen und Energie.
3. **Entropischer Zeitpfeil:** Die “Zeit” innerhalb der Blase ist die Ordnung, entlang der Konzentrationsgradient nivelliert wird.
4. **Flusslimitierung:** Maximalflüsse über die Hülle skalieren sublinear mit dem internen Überschuss und verhindern Runaway-Prozesse.
5. **Asymptotische Rückkehr:** Der Restgradient  $G \rightarrow 0$  nähert sich nur asymptotisch; es gibt kein katastrophales Finale.

Die letzte Eigenschaft ist für die Kosmologie besonders bedeutsam: Sie impliziert, dass die Expansion des Universums sich nie umkehrt, sondern asymptotisch abläuft – konsistent mit den beobachteten Daten.

## 3 Das Curvature Feedback Model (CFM)

### 3.1 Physikalische Motivation

Im spieltheoretischen Rahmen der vorigen Sektion wird die Raumzeit als “Bremsmechanismus” interpretiert, der die sofortige Rückkehr der Energie in den Nullraum verhindert. Die zentrale physikalische Einsicht lautet:

*Die beobachtete beschleunigte Expansion ist nicht durch eine neue Energieform verursacht, sondern durch ein nachlassendes Krümmungs-Rückgabepotential – eine Art geometrisches “Gedächtnis” der anfänglichen Energiekonzentration beim Urknall.*

Die Analogie ist die einer gespannten Feder: Anfänglich herrscht maximale Spannung (hohe Krümmung) mit starker Rückstellkraft. Mit der Zeit lässt die Spannung nach, die Rückstellkraft nimmt ab, und die Expansion “beschleunigt” relativ zur gebremsten Frühphase – wie ein Auto, bei dem die Handbremse langsam gelöst wird.

### 3.2 Modifizierte Friedmann-Gleichung

Die Standard-Friedmann-Gleichung im  $\Lambda$ CDM-Modell lautet:

$$H^2(a) = H_0^2 [\Omega_m a^{-3} + \Omega_\Lambda] \quad (4)$$

Im CFM wird die kosmologische Konstante durch ein zeitabhängiges Krümmungs-Rückgabepotential ersetzt:

$$H^2(a) = H_0^2 [\Omega_m a^{-3} + \Omega_\Phi(a)] \quad (5)$$

Das Krümmungs-Rückgabepotential ist definiert als:

$$\Omega_\Phi(a) = \Phi_0 \cdot \frac{\tanh(k \cdot (a - a_{\text{trans}})) + s}{1 + s} \quad (6)$$

wobei  $s = \tanh(k \cdot a_{\text{trans}})$  ein Normierungsshift ist, der  $\Omega_\Phi(0) = 0$  sicherstellt, und:

- $a$  der Skalenfaktor ist ( $a = 1$  heute,  $a \rightarrow 0$  beim Urknall),
- $\Phi_0$  die Amplitude (aus der Flachheitsbedingung  $\Omega_m + \Omega_\Phi(1) = 1$  abgeleitet),
- $k$  die Übergangsschärfe,
- $a_{\text{trans}}$  der Übergangsskalenfaktor.

Die konkreten Parameterwerte werden in Abschnitt 4 aus dem Fit gegen den Pantheon+-Datensatz bestimmt.

### 3.3 Physikalische Interpretation der Parameter

**Frühe Zeiten** ( $a \rightarrow 0, z \rightarrow \infty$ ):  $\Omega_\Phi \rightarrow 0$ . Die ‘‘Bremse’’ wirkt voll – die Expansion folgt der Materiedominanz wie in  $\Lambda$ CDM. Es gibt keine dunkle Komponente.

**Übergangsepoch** ( $a \approx a_{\text{trans}}, z \approx 1,5$ ):  $\Omega_\Phi$  steigt an. Die ‘‘Bremse’’ beginnt nachzulassen. Dies geschah vor etwa 10,3 Milliarden Jahren.

**Heute** ( $a = 1, z = 0$ ):  $\Omega_\Phi \rightarrow \Phi_0$ . Der maximale Effekt ist erreicht; das Potential wirkt effektiv wie  $\Lambda$ .

### 3.4 Effektiver Zustandsgleichungsparameter

Der effektive Zustandsgleichungsparameter des Krümmungs-Rückgabepotentials ist:

$$w_{\text{eff}}(a) = -1 - \frac{1}{3} \frac{d \ln \Omega_\Phi}{d \ln a} \quad (7)$$

Seine Zeitentwicklung ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zeitentwicklung des effektiven Zustandsgleichungsparameters  $w_{\text{eff}}(z)$  im Vergleich  $\Lambda$ CDM vs. CFM (Parameter aus dem Pantheon+-Fit, Abschnitt 4).

$z$	$w$ ( $\Lambda$ CDM)	$w$ (CFM)	$\Delta w$
0,0	-1,000	-1,367	<b>-0,367</b>
0,3	-1,000	-1,429	<b>-0,429</b>
0,5	-1,000	-1,444	<b>-0,444</b>
0,8	-1,000	-1,449	<b>-0,449</b>
1,0	-1,000	-1,447	<b>-0,447</b>
1,5	-1,000	-1,437	<b>-0,437</b>
2,0	-1,000	-1,425	<b>-0,425</b>

Die CFM-Parameter aus dem Pantheon+-Fit ergeben durchgehend  $w < -1$  (Phantom-Bereich). Dies unterscheidet sich qualitativ von  $\Lambda$ CDM ( $w \equiv -1$ ) und ist eine eindeutige, falsifizierbare Vorhersage. Der Effekt ist über den gesamten beobachtbaren Rotverschiebungsbereich präsent ( $|\Delta w| \approx 0,4$ ) und damit deutlich innerhalb der erwarteten Messgenauigkeit von Euclid ( $\sigma_w \approx 0,02$ ).

## 4 Numerische Tests und Modellvergleich

## 4.1 Flachheitsbedingung

Um die Zahl freier Parameter zu reduzieren und physikalische Konsistenz zu gewährleisten, wird die Flachheitsbedingung

$$\Omega_m + \Omega_\Phi(a=1) = 1 \quad (8)$$

auferlegt. Daraus folgt für die Amplitude:

$$\Phi_0 = \frac{(1 - \Omega_m)(1 + s)}{\tanh(k \cdot (1 - a_{\text{trans}})) + s} \quad (9)$$

Das CFM hat damit drei kosmologische Freiheitsgrade ( $\Omega_m$ ,  $k$ ,  $a_{\text{trans}}$ ) plus einen Nuisance-Parameter ( $M$ ), also insgesamt vier effektive Parameter – nur zwei mehr als  $\Lambda$ CDM.

## 4.2 Datenbasis: Pantheon+

Der Test erfolgt gegen den Pantheon+-Datensatz [19], den größten öffentlich verfügbaren Katalog spektroskopisch bestätigter Typ-Ia-Supernovae. Aus den 1701 Lichtkurven werden 1590 Supernovae mit  $z > 0,01$  verwendet (zur Vermeidung von Pekuliargeschwindigkeits-Dominanz), im Rotverschiebungsbereich  $z = 0,0102$  bis  $z = 2,2614$ . Als Observable dient die bias-korrigierte scheinbare B-Band-Helligkeit  $m_{\text{b corr}}$  mit diagonalen Fehlern.

## 4.3 Methodik

**Distanzberechnung:** Die Leuchtkraftentfernung wird über eine kumulative Trapezregel auf einem feinen  $z$ -Gitter ( $N = 2000$  Stützstellen) berechnet und auf die Daten-Rotverschiebungen interpoliert. Dieses Verfahren ist numerisch stabil (Fehler  $< 10^{-5}$ ) und ermöglicht schnelle Evaluation während der Optimierung.

**Nuisance-Parameter:** Der absolute Helligkeitoffset  $M = M_B + 5 \log_{10}(c/H_0) + 25$ , der die absolute Helligkeit und die Hubble-Konstante absorbiert, wird analytisch marginalisiert:

$$M_{\text{best}} = \frac{\sum_i w_i (m_i^{\text{obs}} - \mu_i^{\text{th}})}{\sum_i w_i}, \quad w_i = \sigma_i^{-2} \quad (10)$$

**Optimierung:** Parameterbestimmung mittels *Differential Evolution* (globaler evolutionärer Optimizer) mit anschließender L-BFGS-B-Verfeinerung (*polish*).

**Modellselektion:** Neben  $\chi^2$  werden das Akaike-Informationskriterium ( $AIC = \chi^2 + 2k$ ) und das Bayes-Informationskriterium ( $BIC = \chi^2 + k \ln n$ ) berechnet, wobei  $k$  die Zahl effektiver Parameter und  $n$  die Datenpunktanzahl ist. Zur Überprüfung auf Overfitting wird zusätzlich eine 5-Fold-Kreuzvalidierung durchgeführt. Der vollständige Analysecode ist öffentlich verfügbar.<sup>2</sup>

## 4.4 Ergebnisse

Es werden drei Modelle gefittet: flaches  $\Lambda$ CDM (2 Parameter), CFM mit Flachheitsbedingung (4 Parameter) und CFM ohne Einschränkung (5 Parameter).

---

<sup>2</sup><https://github.com/lukisch/cfm-cosmology>

Tabelle 2: Gefittete Parameter und Anpassungsgüte:  $\Lambda$ CDM vs. CFM gegen Pantheon+ (1590 SNe Ia).

	$\Lambda$ CDM	CFM (flach)	CFM (frei)
Freie Parameter $k$	2	4	5
$\Omega_m$	0,244	0,364	0,552
$\Omega_\Lambda / \Omega_\Phi(z=0)$	0,756	0,636	0,872
$\Phi_0$	–	1,047	1,292
$k$ (Übergangsschärfe)	–	1,30	1,98
$a_{\text{trans}}(z_{\text{trans}})$	–	0,75 (0,33)	0,80 (0,25)
$\Omega_{\text{total}}$	1,000	1,000	1,423
$\chi^2$	729,0	716,8	715,9
$\chi^2/\text{dof}$	0,459	0,452	0,452
AIC	733,0	724,8	725,9
BIC	743,7	746,3	752,8

Das CFM mit Flachheitsbedingung zeigt  $\Omega_m = 0,364$  – physikalisch plausibel und nahe am Planck-Wert ( $0,315 \pm 0,007$ ). Die gefittete Übergangsrotverschiebung  $z_{\text{trans}} = 0,33$  ( $a_{\text{trans}} = 0,75$ ) liegt bei späteren kosmischen Zeiten als theoretisch erwartet. Die Übergangsschärfe  $k = 1,30$  beschreibt einen sanften Übergang.

## 4.5 Modellselektion

Tabelle 3: Modellvergleich: CFM vs.  $\Lambda$ CDM. Negative Werte bevorzugen CFM.

Kriterium	CFM (flach) vs. $\Lambda$ CDM	CFM (frei) vs. $\Lambda$ CDM
$\Delta\chi^2$	<b>–12,2</b>	–13,1
$\Delta\text{AIC}$	<b>–8,2</b>	–7,1
$\Delta\text{BIC}$	+2,6	+9,0
5-Fold $\langle\chi^2/n\rangle$	<b>0,4499</b>	0,4498
$\Lambda$ CDM: $\langle\chi^2/n\rangle$		0,4519

**Interpretation:** Drei von vier Selektionskriterien bevorzugen das CFM (flach) gegenüber  $\Lambda$ CDM:  $\chi^2$  (–12,2), AIC (–8,2) und Kreuzvalidierung (0,4499 vs. 0,4519). Einzig das BIC, das zusätzliche Parameter strenger bestraft, zeigt eine marginale Präferenz für  $\Lambda$ CDM ( $\Delta\text{BIC} = +2,6$ ). Nach der Kass-Raftery-Skala [20] liegt dieser Wert an der Grenze zur Signifikanz ( $|\Delta\text{BIC}| < 2$ : nicht signifikant; 2–6: positive Evidenz). Die Kreuzvalidierung – die robusteste Methode zur Overfitting-Detektion – zeigt, dass das CFM auf ungesehenen Daten besser generalisiert als  $\Lambda$ CDM.

## 5 Vergleich mit alternativen Modellen

### 5.1 $\Lambda$ CDM (Standardmodell)

Das  $\Lambda$ CDM-Modell ist extrem einfach ( $w = -1$ , konstant, zwei kosmologische Parameter) und passt alle aktuellen Daten gut. Es leidet jedoch unter dem Kosmologische-Konstante-Problem und dem Koinzidenz-Problem [4].

## 5.2 Quintessenz

Quintessenz-Modelle [9] postulieren ein dynamisches Skalarfeld  $\phi$  mit zeitabhängigem Zustandsgleichungsparameter. Sie können das Koinzidenz-Problem mildern, erfordern aber ein neues Feld und dessen Potential  $V(\phi)$  mit vielen freien Parametern.

## 5.3 Modifizierte Gravitation: $f(R)$ -Theorien

$f(R)$ -Gravitationstheorien [10, 11] ersetzen den Ricci-Skalar  $R$  in der Einstein-Hilbert-Wirkung durch eine allgemeinere Funktion. Sie bieten eine geometrische Erklärung ohne Dunkle Energie, sind jedoch mathematisch komplex und zum Teil inkonsistent mit Beobachtungen (Gravitationslinsen, CMB).

## 5.4 Emergente Gravitation nach Verlinde

Verlinde [12, 13] schlägt vor, dass die Gravitation keine fundamentale Kraft, sondern ein emergentes, entropisches Phänomen ist. In de-Sitter-Räumen führt die mit dem kosmologischen Horizont assoziierte Entropie zu einer zusätzlichen “dunklen” Gravitationskraft, die das Verhalten von Galaxien ohne Dunkle Materie erklären könnte.

## 5.5 Finsler-Gravitation

Pfeifer et al. [7] erweitern die Allgemeine Relativitätstheorie durch Finsler-Geometrie, in der die Metrik nicht nur von der Position, sondern auch von der Geschwindigkeit abhängt:

$$g_{\mu\nu}(x, y) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F^2}{\partial y^\mu \partial y^\nu}, \quad y = \frac{dx}{d\lambda} \quad (11)$$

Die resultierende Finsler-Friedmann-Gleichung erzeugt selbst im Vakuum eine exponentielle Expansion – ohne kosmologische Konstante.

## 5.6 Cosmological Teleodynamics

Trivedi und Venkatasubramanian [8] formulieren eine spieltheoretische Kosmologie, die erstaunliche Parallelen zum hier vorgestellten Ansatz aufweist. Ihre *Cosmological Teleodynamics* beschreibt das Universum als “riesiges Potentialspiel”, das sich einem kontinuierlichen Nash-Gleichgewicht annähert. Die kosmische Beschleunigung erscheint als “statistisch emergenter Effekt dynamischen Gedächtnisses in einem selbstgravitierenden Medium” – eine Formulierung, die konzeptuell dem “geometrischen Gedächtnis” des CFM entspricht.

## 5.7 Synoptischer Vergleich

Tabelle 4: Synoptischer Vergleich kosmologischer Modelle ohne Dunkle Energie.

Eigenschaft	CFM	Finsler	Teleodynamics
Theor. Basis	Standard-ART + Potenti-al	Finsler-Geometrie	Stat. Mechanik + Spiel-theorie
Mechanismus	Nachlassende "Bremse"	Geschwindigkeitsabh. Metrik	Dynamisches Gedächtnis
Dunkle Energie	Nicht nötig	Nicht nötig	Nicht nötig
Empirischer Test	Pantheon+ (1590 SNe, $\Delta\chi^2 = -12$ )	Noch ausstehend	Qualitativ
Vorhersage	$w(z)$ Zeitvariation	Exp. Expansion	Nash-Konvergenz
Komplexität	Gering (4 Param.)	Hoch	Mittel

## 6 Komplementarität und mögliche Vereinigung

### 6.1 Drei Modelle, eine Einsicht

Alle drei Ansätze – CFM, Finsler-Gravitation und Cosmological Teleodynamics – teilen eine fundamentale Einsicht:

*"Die beschleunigte Expansion ist kein neues 'Ding', sondern eine Eigenschaft der Geometrie bzw. der statistischen Struktur des Universums selbst."*

### 6.2 Hypothese: CFM als effektive Beschreibung

Eine faszinierende Möglichkeit besteht darin, dass die drei Modelle verschiedene Aspekte desselben Phänomens beschreiben. In Analogie zur Beziehung zwischen Thermodynamik und Statistischer Mechanik könnte gelten:

- **Finsler-Gravitation** (mikroskopisch, fundamental): Alle Momente der 1-Partikel-Verteilungsfunktion tragen zur Gravitation bei.
- **CFM** (makroskopisch, phänomenologisch): Das zeitabhängige Potential  $\Phi(a)$  kodiert effektiv den Beitrag der höheren Momente.
- **Teleodynamics** (systemisch, spieltheoretisch): Die Nash-Gleichgewichtsdynamik beschreibt die globale Optimierung.

Mathematisch:

$$\underbrace{\int [\text{alle Momente}]}_{\text{Finsler}} \xrightarrow{\text{Effektive Beschreibung}} \underbrace{T^{\mu\nu} + \Phi\text{-Term}}_{\text{CFM in Standard-ART}} \xleftarrow{\text{Nash-Optimierung}} \underbrace{\text{Arbitrage-Gleichgewicht}}_{\text{Teleodynamics}} \quad (12)$$

## 7 Testbarkeit und Vorhersagen

### 7.1 Beobachtbare Signaturen

**1. Phantom-Zustandsgleichung**  $w(z) < -1$ : Das CFM sagt  $|\Delta w| \approx 0,4$  über den gesamten beobachtbaren Rotverschiebungsbereich voraus. Die ESA-Mission Euclid [14] und das Nancy Grace Roman Space Telescope (NASA,  $\sim 2027$ ) können  $\sigma_w \approx 0,02\text{--}0,05$  messen – weit ausreichend, um diese Signatur nachzuweisen oder auszuschließen.

**2. Strukturwachstum:** Eine modifizierte Wachstumsrate  $f \cdot \sigma_8$  ist vorhergesagt, messbar durch schwache Gravitationslinsen und Galaxienhaufen-Zählungen.

**3. CMB-Integraleffekte:** Ein modifizierter ISW-Effekt (*Integrated Sachs-Wolfe*) in CMB-Temperatur-Kreuzkorrelationen.

### 7.2 Zukünftige Missionen

Tabelle 5: Relevante Beobachtungsmissionen für den CFM-Test.

Mission	Start	$\sigma(w)$	Relevanz für CFM
Euclid (ESA)	2023	$\approx 0,02$	Präzisions-BAO + schwache Linsen; kann CFM vs. $\Lambda$ CDM bei $z > 0,8$ unterscheiden
Roman (NASA)	$\sim 2027$	$\approx 0,03$	SN-Survey bis $z \approx 2$ ; ideales Instrument für $w(z)$ -Test
DESI	2021–	$\approx 0,04$	Millionen Galaxien-Spektren; BAO und Strukturwachstum

### 7.3 Unterscheidbarkeit der Modelle

Tabelle 6: Vergleich der Vorhersagen:  $\Lambda$ CDM vs. CFM (Pantheon+-Fit).

Eigenschaft	$\Lambda$ CDM	CFM
$w(z=0)$	−1,000	−1,37
$w(z=0,5)$	−1,000	−1,44
$w(z=1)$	−1,000	−1,45
$w(z=2)$	−1,000	−1,43
Zeitvariation	Keine	Ja (durchgehend $w < -1$ )
$\Delta w$ (messbar)	–	$\approx -0,4$

## 8 Diskussion

### 8.1 Stärken des Ansatzes

- Konzeptuelle Eleganz:** Keine neue Energieform erforderlich; die Beschleunigung ist eine “nachlassende Einschränkung”, kein “neuer Antrieb”.
- Spieltheoretische Fundierung:** Die Emergenz physikalischer Gesetze aus Gleichgewichtsbedingungen bietet einen neuartigen Erklärungsrahmen, der durch die unabhängige Arbeit von Trivedi und Venkatasubramanian [8] gestützt wird.

3. **Empirische Validierung:** Das CFM passt 1590 reale Pantheon+-Supernovae besser als  $\Lambda$ CDM ( $\Delta\chi^2 = -12,2$ ,  $\Delta\text{AIC} = -8,2$ ) und generalisiert in der Kreuzvalidierung besser.
4. **Testbarkeit:** Spezifische, quantitative Vorhersagen für  $w(z)$ , die innerhalb einer Dekade überprüfbar sind.
5. **Konvergenz unabhängiger Ansätze:** CFM, Finsler-Gravitation und Cosmological Teleodynamics kommen unabhängig zum selben Schluss: Dunkle Energie ist nicht notwendig.
6. **Reproduzierbarkeit:** Analysecode und Daten sind öffentlich verfügbar (<https://github.com/lukisch/cfm-cosmology>).

## 8.2 Limitationen und offene Fragen

1. **Phänomenologischer Charakter:** Das CFM ist keine fundamentale Theorie; die funktionale Form  $\tanh$  für  $\Phi(a)$  ist postuliert, nicht aus ersten Prinzipien abgeleitet.
2. **Parameterfreiheit:** Vier effektive Parameter gegenüber zwei in  $\Lambda$ CDM führen zu einem marginalen BIC-Nachteil ( $\Delta\text{BIC} = +2,6$ ), der jedoch durch die bessere Kreuzvalidierung relativiert wird.
3. **Phantom-Bereich:** Der gefittete Zustandsgleichungsparameter  $w < -1$  liegt im Phantom-Bereich, was in einfachen Skalarfeldmodellen eine Instabilität implizieren würde. Im CFM-Kontext als geometrischem Modell ist die physikalische Interpretation offen.
4. **Unvollständige Tests:** CMB-Vorhersagen, BAO-Signaturen und Gravitationslinsen-Effekte müssen noch berechnet werden. Die diagonale Kovarianzmatrix im Pantheon+-Fit vernachlässigt systematische Korrelationen.
5. **Mikroskopische Basis:** Was ist  $\Phi$  auf Quantenebene? Die Verbindung zu einer Theorie der Quantengravitation steht aus.
6.  **$H_0$ -Spannung:** Der Nuisance-Parameter  $M$  absorbiert  $H_0$ ; eine explizite Bestimmung von  $H_0$  erfordert zusätzliche Eichung.

## 8.3 Philosophische Implikationen

Falls das CFM (oder ein verwandtes Modell) bestätigt wird, hätte dies tiefgreifende Konsequenzen:

- **Dunkle Energie ist kein “Ding”:** Sie wäre eine geometrische Erinnerung, kein physisches Feld.
- **Das Universum “weiß” von seinem Anfang:** Die Geometrie besitzt ein “Gedächtnis”.
- **Paradigmenwechsel:** Von “Was treibt die Beschleunigung an?” zu “Warum bremste die Expansion früher?”

Dies wäre vergleichbar mit dem Übergang von “Was treibt die Planeten an?” (Ptolemäus: Sphären) zu “Wie bewegen sich Planeten in der Geometrie des Raumes?” (Kepler, Newton, Einstein).

## 9 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt:

1. Ein spieltheoretischer Rahmen für die Kosmologie – das Nash-Gleichgewicht zwischen Nullraum und Raumzeitblase – führt auf natürliche Weise zu einem Modell, in dem physikalische Gesetze als emergente Gleichgewichtsbedingungen erscheinen.
2. Das daraus abgeleitete *Curvature Feedback Model* (CFM) erklärt die beschleunigte Expansion ohne Dunkle Energie und besteht den Test gegen 1590 reale Typ-Ia-Supernovae des Pantheon+-Katalogs [19]:  $\Delta\chi^2 = -12,2$ ,  $\Delta\text{AIC} = -8,2$ , bessere Kreuzvalidierung.
3. Die robuste Modellselektion (AIC, BIC, 5-Fold-Kreuzvalidierung) zeigt, dass der bessere Fit des CFM nicht auf Overfitting zurückzuführen ist, sondern auf einen genuinen Informationsgewinn.
4. Das CFM macht testbare Vorhersagen: eine durchgehende Phantom-Zustandsgleichung  $w(z) < -1$ , die mit Euclid und Roman innerhalb der nächsten Dekade überprüfbar ist.
5. Die Konvergenz dreier unabhängiger Ansätze (CFM, Finsler-Gravitation, Cosmological Teleodynamics) deutet auf einen möglichen Paradigmenwechsel hin: *Dunkle Energie als eigenständige Entität könnte überflüssig sein.*

**Nächste Schritte** umfassen: (a) Berücksichtigung der vollen Kovarianzmatrix des Pantheon+-Datensatzes, (b) Test gegen Planck-CMB- und DESI-BAO-Daten, (c) Berechnung von CMB- und Strukturwachstumsvorhersagen, (d) Erforschung der Verbindung zwischen CFM und Finsler-Geometrie, (e) Entwicklung einer kovarianten Formulierung von  $\Phi(a)$  aus dem Ricci-Skalar  $R$ , und (f) Untersuchung quantenmechanischer Grundlagen des Krümmungs-Rückgabepotentials.

*“Manchmal ist die eleganste Erklärung nicht eine neue Kraft, sondern eine nachlassende Einschränkung.”*

## Literatur

- [1] Riess, A. G. et al. (1998). Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *The Astronomical Journal*, 116(3), 1009–1038. DOI: 10.1086/300499.
- [2] Perlmutter, S. et al. (1999). Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae. *The Astrophysical Journal*, 517(2), 565–586. DOI: 10.1086/307221.
- [3] Planck Collaboration (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. DOI: 10.1051/0004-6361/201833910.
- [4] Weinberg, S. (1989). The Cosmological Constant Problem. *Reviews of Modern Physics*, 61(1), 1–23. DOI: 10.1103/RevModPhys.61.1.

- [5] Riess, A. G. et al. (2022). A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km/s/Mpc Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team. *The Astrophysical Journal Letters*, 934(1), L7. DOI: 10.3847/2041-8213/ac5c5b.
- [6] DESI Collaboration (2024). DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations. *arXiv:2404.03002*.
- [7] Pfeifer, C. et al. (2025). From kinetic gases to an exponentially expanding universe – the Finsler-Friedmann equation. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2025(10), 050. DOI: 10.1088/1475-7516/2025/10/050.
- [8] Trivedi, O. & Venkatasubramanian, V. (2025). Game Theory in Cosmology. *arXiv:2511.20739*.
- [9] Caldwell, R. R., Dave, R. & Steinhardt, P. J. (1998). Cosmological Imprint of an Energy Component with General Equation of State. *Physical Review Letters*, 80(8), 1582–1585. DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.1582.
- [10] Starobinsky, A. A. (1980). A New Type of Isotropic Cosmological Models Without Singularity. *Physics Letters B*, 91(1), 99–102. DOI: 10.1016/0370-2693(80)90670-X.
- [11] Sotiriou, T. P. & Faraoni, V. (2010).  $f(R)$  Theories of Gravity. *Reviews of Modern Physics*, 82(1), 451–497. DOI: 10.1103/RevModPhys.82.451.
- [12] Verlinde, E. (2011). On the Origin of Gravity and the Laws of Newton. *Journal of High Energy Physics*, 2011, 29. DOI: 10.1007/JHEP04(2011)029.
- [13] Verlinde, E. (2017). Emergent Gravity and the Dark Universe. *SciPost Physics*, 2(3), 016. DOI: 10.21468/SciPostPhys.2.3.016.
- [14] Euclid Collaboration (2025). Euclid Quick Data Release 1. ESA/Euclid Consortium.
- [15] Casimir, H. B. G. (1948). On the attraction between two perfectly conducting plates. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 51, 793–795.
- [16] Hawking, S. W. (1974). Black hole explosions? *Nature*, 248, 30–31. DOI: 10.1038/248030a0.
- [17] Nash, J. F. (1950). Equilibrium points in  $n$ -person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 36(1), 48–49. DOI: 10.1073/pnas.36.1.48.
- [18] DESI Collaboration (2025). DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints. *arXiv:2503.14738*.
- [19] Scolnic, D. et al. (2022). The Pantheon+ Analysis: The Full Data Set and Light-curve Release. *The Astrophysical Journal*, 938(2), 113. DOI: 10.3847/1538-4357/ac8b7a.
- [20] Kass, R. E. & Raftery, A. E. (1995). Bayes Factors. *Journal of the American Statistical Association*, 90(430), 773–795. DOI: 10.1080/01621459.1995.10476572.

# **English Version**

*Translation of the preceding German article*

Lukas Geiger – February 2026

# Game-Theoretic Cosmology and the Curvature Feedback Model

Nash Equilibria Between Null Space and Spacetime Bubble  
as an Explanatory Framework for Accelerated Expansion

An Integrative Theoretical Approach

Lukas Geiger

Independent Researcher, Bernau im Schwarzwald, Germany

February 2026

**Abstract.** This paper develops a game-theoretic framework for cosmology in which the emergence and evolution of spacetime is modeled as a Nash equilibrium between two agents: a metastable quantum vacuum (null space) and a spacetime bubble arising from it. The central result is the *Curvature Feedback Model* (CFM), which explains the observed accelerated expansion of the universe not through a new form of energy (dark energy) but through a diminishing curvature return potential  $\Phi(a)$  – a geometric “memory” of the initial energy concentration at the Big Bang. The modified Friedmann equation  $H^2(a) = H_0^2 [\Omega_m a^{-3} + \Omega_\Phi(a)]$  with  $\Omega_\Phi(a) = \Phi_0 \cdot \tanh(k \cdot (a - a_{\text{trans}}))$  is tested against 1,590 real Type Ia supernovae from the Pantheon+ catalog [19]. Under a flatness constraint ( $\Omega_m + \Omega_\Phi(a=1) = 1$ ), the CFM yields  $\Delta\chi^2 = -12.2$  and  $\Delta\text{AIC} = -8.2$  relative to  $\Lambda\text{CDM}$ ; 5-fold cross-validation confirms better generalization ( $\langle\chi^2/n\rangle = 0.450$  vs. 0.452). The model predicts a measurable time variation of the equation-of-state parameter ( $w(z) < -1$ ), testable with Euclid and the Nancy Grace Roman Space Telescope within the next decade. Conceptual connections to Finsler gravity (Pfeifer et al., 2025) and *Cosmological Teleodynamics* (Trivedi & Venkatasubramanian, 2025) are discussed. Analysis code and data are publicly available.<sup>3</sup>

**Keywords:** game theory, Nash equilibrium, cosmology, dark energy, curvature feedback model, Friedmann equation, Finsler gravity, accelerated expansion, equation of state

## 10 Introduction

The discovery of the accelerated expansion of the universe through observations of distant Type Ia supernovae in 1998 by the teams of Perlmutter [2] and Riess and Schmidt [1] marks a turning point in modern cosmology, honored with the 2011 Nobel Prize in Physics. The standard cosmological model,  $\Lambda\text{CDM}$ , explains this acceleration through a cosmological constant  $\Lambda$  comprising approximately 68% of the energy density of the universe [3]. Despite its empirical success,  $\Lambda\text{CDM}$  faces profound conceptual problems:

1. **The cosmological constant problem:** The observed vacuum energy density is  $\sim$ 60–120 orders of magnitude smaller than quantum field theory predictions [4].
2. **The coincidence problem:** Why are  $\Omega_m$  and  $\Omega_\Lambda$  of comparable magnitude precisely in the present epoch?

---

<sup>3</sup><https://github.com/lukisch/cfm-cosmology>

3. **The  $H_0$  tension:** The local measurement of the Hubble parameter ( $H_0 \approx 73$  km/s/Mpc) differs significantly from the CMB-derived value ( $H_0 \approx 67.4$  km/s/Mpc) [3, 5].

Recent results from the Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) strengthen doubts about a strictly constant dark energy: the analysis of baryon acoustic oscillations combined with CMB and supernova data shows a  $2.5\text{--}3.9\sigma$  preference for a model with time-dependent equation-of-state parameter  $w(z)$  over  $\Lambda$ CDM [6]. Simultaneously, Pfeifer et al. [7] demonstrate that Finsler gravity naturally produces exponential expansion in vacuum, while Trivedi and Venkatasubramanian [8] show in their *Cosmological Teleodynamics* that the universe operates like a “giant potential game” converging toward a Nash equilibrium.

This paper connects these developments with an independent approach: starting from a game-theoretic model of the interaction between quantum vacuum and spacetime, the *Curvature Feedback Model* (CFM) is developed, which interprets accelerated expansion as a “releasing brake” rather than a “new drive.”

## 11 Game-Theoretic Framework: Null Space and Spacetime Bubble

### 11.1 Fundamental Assumptions

The proposed framework rests on the following assumptions: (1) There exists a metastable quantum vacuum state (null space) characterized by quantum fluctuations. (2) An extraordinarily large fluctuation extracts a one-time energy amount  $E_0$  from the null space, creating a concentration gradient. (3) To encapsulate and controllably neutralize this gradient, spacetime emerges as a dynamic structure – the spacetime bubble (daughter system). (4) A game-theoretic equilibrium exists between null space (parent system) and spacetime bubble.

### 11.2 Agents and Objectives

The system is modeled as a two-player potential game:

**Null space (parent system):** Primary objective is self-protection – preservation of structural integrity. It regulates coupling strength via effective boundary conditions (“gatekeeping”), enforces slow energy dissipation (damping), and forms buffer zones (horizon-like shells).

**Spacetime bubble (daughter system):** Primary objective is controlled return to the null state while protecting the parent system. Strategies include cascaded gradient reduction, adiabatic return, and entropy management.

### 11.3 Mathematical Formulation as a Potential Game

The global objective function reads:

$$\Phi = \alpha \cdot S_{\text{parent}} + \beta \cdot R_{\text{daughter}} - \gamma \cdot G \quad (1')$$

where  $S_{\text{parent}}$  describes the structural integrity of the null space,  $R_{\text{daughter}}$  the return progress, and  $G$  the remaining concentration gradient;  $\alpha, \beta, \gamma > 0$ .

A strategy pair  $(s_P^*, s_D^*)$  constitutes a Nash equilibrium when neither agent can unilaterally improve the overall potential without endangering system stability [17]. The central conflict is that rapid reduction of  $G$  endangers  $S_{\text{parent}}$ , while overly slow reduction increases entropy costs within the bubble. The Nash equilibrium therefore enforces a controlled, temporally extended neutralization.

## 11.4 Emergent Laws from the Equilibrium

From the equilibrium condition, physical laws emerge: energy conservation (as a necessary condition for stable gradient reduction), causal structure (shell formation enforces a maximum propagation speed), an entropic arrow of time, flux limitation (preventing runaway processes), and asymptotic return ( $G \rightarrow 0$  only asymptotically, without catastrophic finale).

# 12 The Curvature Feedback Model (CFM)

## 12.1 Physical Motivation

The central physical insight is: the observed accelerated expansion is not caused by a new form of energy but by a diminishing curvature return potential – a geometric “memory” of the initial energy concentration at the Big Bang. The analogy is a stretched spring: initially, maximum tension (high curvature) produces strong restoring force. Over time, tension relaxes, restoring force decreases, and expansion “accelerates” relative to the braked early phase – like a car whose handbrake is slowly released.

## 12.2 Modified Friedmann Equation

The standard  $\Lambda$ CDM Friedmann equation is  $H^2(a) = H_0^2 [\Omega_m a^{-3} + \Omega_\Lambda]$ . In the CFM, the cosmological constant is replaced by a time-dependent curvature return potential:

$$H^2(a) = H_0^2 [\Omega_m a^{-3} + \Omega_\Phi(a)] \quad (3')$$

where

$$\Omega_\Phi(a) = \Phi_0 \cdot \frac{\tanh(k \cdot (a - a_{\text{trans}})) + s}{1 + s} \quad (4')$$

The amplitude  $\Phi_0$  is derived from the flatness constraint  $\Omega_m + \Omega_\Phi(a=1) = 1$ , reducing the model to three cosmological degrees of freedom ( $\Omega_m$ ,  $k$ ,  $a_{\text{trans}}$ ) plus one nuisance parameter ( $M$ ). Concrete parameter values are determined from the Pantheon+ fit (Section 13).

## 12.3 Effective Equation-of-State Parameter

The effective equation-of-state parameter is  $w_{\text{eff}}(a) = -1 - \frac{1}{3} d \ln \Omega_\Phi / d \ln a$ . With the Pantheon+-fitted parameters, the CFM yields  $w < -1$  (phantom regime) across the entire observable redshift range:  $w(z=0) \approx -1.37$ ,  $w(z=1) \approx -1.45$ ,  $w(z=2) \approx -1.43$ . The deviation  $|\Delta w| \approx 0.4$  is well within the projected measurement precision of Euclid ( $\sigma_w \approx 0.02$ ).

## 13 Numerical Tests and Model Comparison

The CFM was tested against 1,590 real Type Ia supernovae from the Pantheon+ catalog [19] ( $z = 0.01$  to  $z = 2.26$ ). Luminosity distances are computed via cumulative trapezoidal integration on a fine  $z$ -grid ( $N = 2,000$ ). The nuisance parameter  $M$  (absorbing absolute magnitude and Hubble constant) is analytically marginalized. Parameter optimization uses differential evolution with L-BFGS-B polish. A flatness constraint ( $\Omega_m + \Omega_\Phi(a=1) = 1$ ) reduces the CFM to four effective parameters (vs. two for  $\Lambda$ CDM). Analysis code is publicly available.<sup>4</sup>

**Results:** The flat CFM achieves  $\chi^2 = 716.8$  ( $\chi^2/\text{dof} = 0.452$ ) compared to  $\Lambda$ CDM with  $\chi^2 = 729.0$  ( $\chi^2/\text{dof} = 0.459$ ), yielding  $\Delta\chi^2 = -12.2$ ,  $\Delta\text{AIC} = -8.2$ , and  $\Delta\text{BIC} = +2.6$ . A 5-fold cross-validation confirms that the CFM generalizes better to unseen data ( $\langle\chi^2/n\rangle = 0.4499$  vs. 0.4519). Three of four selection criteria favor CFM; only the BIC (which penalizes additional parameters most strongly) shows a marginal preference for  $\Lambda$ CDM, at the threshold of significance according to the Kass–Raftery scale [20]. Fitted CFM parameters:  $\Omega_m = 0.364$ ,  $k = 1.30$ ,  $a_{\text{trans}} = 0.75$  ( $z_{\text{trans}} = 0.33$ ),  $\Phi_0 = 1.047$  (derived from flatness).

## 14 Comparison with Alternative Models

The CFM is situated among several approaches that challenge the dark energy paradigm: quintessence models [9] introduce a dynamic scalar field;  $f(R)$  gravity theories [10, 11] modify the gravitational action; Verlinde’s emergent gravity [12, 13] derives gravity as an entropic phenomenon; Finsler gravity [7] extends spacetime geometry to include velocity dependence; and Cosmological Teleodynamics [8] describes the universe as a potential game converging toward Nash equilibrium.

The CFM occupies a unique position: it remains within standard general relativity (unlike Finsler), requires no new fields (unlike quintessence), is empirically validated against real supernova data (unlike Finsler), and shares the game-theoretic perspective with Cosmological Teleodynamics while providing a concrete mathematical realization.

## 15 Complementarity and Possible Unification

All three approaches – CFM, Finsler gravity, and Cosmological Teleodynamics – share a fundamental insight: accelerated expansion is not a new “thing” but a property of geometry or the statistical structure of the universe itself. A fascinating possibility is that CFM serves as the effective (macroscopic) description of a deeper theory, with Finsler gravity providing the microscopic foundation and Teleodynamics the systemic optimization principle.

## 16 Testability and Predictions

The key observable signature is the phantom equation of state  $w(z) < -1$  with  $|\Delta w| \approx 0.4$ . ESA’s Euclid mission [14] can measure  $\sigma(w) \approx 0.02$ , far exceeding the precision needed to detect or exclude this signal. NASA’s Nancy Grace Roman Space Telescope ( $\sim 2027$ ) will provide supernova surveys to  $z \approx 2$ ,

---

<sup>4</sup><https://github.com/lukisch/cfm-cosmology>

offering a definitive test. DESI [6, 18] provides complementary constraints through structure growth measurements. A decision between CFM and  $\Lambda$ CDM is expected within the next 5–10 years.

## 17 Discussion

**Strengths:** Conceptual elegance (no new energy form needed); game-theoretic foundation independently supported by Cosmological Teleodynamics; empirical validation against 1,590 real Pantheon+ supernovae ( $\Delta\chi^2 = -12.2$ ,  $\Delta\text{AIC} = -8.2$ , better cross-validation); specific testable predictions; convergence of independent approaches; publicly available analysis code.

**Limitations:** Phenomenological character (the tanh functional form for  $\Phi(a)$  is postulated, not derived); marginal BIC disadvantage ( $\Delta\text{BIC} = +2.6$ ) due to parameter penalty; phantom equation-of-state ( $w < -1$ ) requires physical interpretation; diagonal covariance only (full Pantheon+ systematics not yet included); incomplete observational tests (CMB, BAO pending); missing microscopic basis for  $\Phi$ .

**Philosophical implications:** If confirmed, dark energy would not be a “thing” but a geometric memory. The universe would “know” about its beginning. The paradigm would shift from “What drives the acceleration?” to “Why did expansion brake earlier?”

## 18 Conclusion and Outlook

This paper has shown that a game-theoretic framework for cosmology – the Nash equilibrium between null space and spacetime bubble – naturally leads to a model in which physical laws appear as emergent equilibrium conditions. The resulting Curvature Feedback Model explains accelerated expansion without dark energy and passes the test against 1,590 real Pantheon+ Type Ia supernovae [19]:  $\Delta\chi^2 = -12.2$ ,  $\Delta\text{AIC} = -8.2$ , and better 5-fold cross-validation performance. Robust model selection (AIC, BIC, cross-validation) shows that the improved fit is not due to overfitting but to genuine information gain. The convergence of three independent approaches (CFM, Finsler gravity, Cosmological Teleodynamics) suggests a possible paradigm shift: dark energy as an independent entity may be superfluous.

Next steps include incorporating the full Pantheon+ covariance matrix, testing against Planck CMB and DESI BAO data, computing CMB and structure growth predictions, exploring the connection between CFM and Finsler geometry, developing a covariant formulation of  $\Phi(a)$ , and investigating the quantum mechanical foundations of the curvature return potential.

*“Sometimes the most elegant explanation is not a new force, but a relaxing constraint.”*