

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^{*1}

¹Unabhängiger 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 – sowohl mit diagonalen Fehlern als auch mit der vollen statistisch-systematischen Kovarianzmatrix. Unter einer Flachheitsbedingung ($\Omega_m + \Omega_\Phi(a=1) = 1$) liefert das CFM $\Delta\chi^2 = -12,2$ ($-11,2$ mit voller Kovarianz) und $\Delta\text{AIC} = -8,2$ ($-7,2$) gegenüber ΛCDM ; eine 5-Fold-Kreuzvalidierung bestätigt die bessere Generalisierung. MCMC-Posterioranalysen liefern $\Omega_m = 0,368 \pm 0,024$, und vier alternative Funktionalformen (logistisch, Error-Funktion, Potenzgesetz) zeigen vergleichbare $\Delta\chi^2$ -Werte, was die Robustheit der Ergebnisse belegt. Eine Phantom-Stabilitätsanalyse zeigt: kein Big Rip (Sättigung von Ω_Φ), asymptotisch de-Sitter-Endzustand. Das Modell sagt eine messbare Zeitvariation des Zustandsgleichungsparameters voraus ($w(z) < -1$, $|\Delta w| \approx 0,4$) sowie einen früheren Beschleunigungsübergang ($z_{\text{acc}} = 0,52$ vs. $0,84$), die mit Euclid und dem Nancy Grace Roman Space Telescope innerhalb der nächsten Dekade testbar sind. 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.¹ Insbesondere identifiziert die rigorose Analyse mit $z_{\text{acc}} \approx 0,52$ einen späteren

^{*}Korrespondenz: Lukas Geiger, Geißbühlweg 1, 79872 Bernau, Deutschland.

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

Beginn der kosmischen Beschleunigung als Λ CDM ($z_{\text{acc}} = 0,84$), was eine verlängerte materiedominierte Wachstumsphase impliziert. Diese Vorhersage bietet eine natürliche Erklärung für die von JWST entdeckten “Universe Breakers” – unerwartet massereiche Galaxien bei $z > 7$ [22, 23] – sowie für statistisch unwahrscheinliche massive Galaxienhaufen wie El Gordo bei $z \approx 0,87$ [24], die das Λ CDM-Standardmodell unter erheblichen Druck setzen. 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, Krümmungsrückgabepotential, Curvature Feedback Model, Friedmann-Gleichung, Finsler-Gravitation, beschleunigte Expansion, Zustandsgleichung

Disziplinen: Theoretische Physik, Kosmologie, Spieltheorie, Mathematische Physik

Inhaltsverzeichnis

Angaben zur KI-Nutzung und Methodik	5
1 Einleitung	6
2 Spieltheoretischer Rahmen: Nullraum und Raumzeitblase	6
2.1 Grundannahmen	6
2.2 Akteure und Ziele	7
2.3 Mathematische Formulierung als Potentialspiel	7
2.4 Emergente Gesetze aus dem Gleichgewicht	7
3 Das Curvature Feedback Model (CFM)	8
3.1 Physikalische Motivation	8
3.2 Modifizierte Friedmann-Gleichung	8
3.3 Dynamischer Sättigungsmechanismus (<i>Dynamic Saturation Mechanism</i>)	9
3.4 Physikalische Interpretation der Parameter	10
3.5 Effektiver Zustandsgleichungsparameter	10
4 Numerische Tests und Modellvergleich	10
4.1 Flachheitsbedingung	10
4.2 Datenbasis: Pantheon+	11
4.3 Methodik	11
4.4 Ergebnisse	11
4.5 Modellselektion	12
4.6 MCMC-Posterioranalyse	13
4.7 Robustheit: Alternative Funktionalformen	13
4.8 Phantom-Stabilitätsanalyse	13
4.9 Dezelerationsparameter und H_0 -Implikationen	14
5 Vergleich mit alternativen Modellen	15
5.1 Λ CDM (Standardmodell)	15
5.2 Quintessenz	15
5.3 Modifizierte Gravitation: $f(R)$ -Theorien	15
5.4 Emergente Gravitation nach Verlinde	16
5.5 Finsler-Gravitation	16
5.6 Cosmological Teleodynamics	16
5.7 Synoptischer Vergleich	16
6 Komplementarität und mögliche Vereinigung	16
6.1 Drei Modelle, eine Einsicht	16
6.2 Hypothese: CFM als effektive Beschreibung	17

7	Testbarkeit und Vorhersagen	17
7.1	Beobachtbare Signaturen	17
7.2	Zukünftige Missionen	18
7.3	Unterscheidbarkeit der Modelle	18
8	Diskussion	18
8.1	Stärken des Ansatzes	18
8.2	Limitationen und offene Fragen	19
8.3	Philosophische Implikationen	19
9	Fazit und Ausblick	20
	Appendix: English Translation	23
1	Introduction (English)	24
2	Game-Theoretic Framework (English)	25
3	The Curvature Feedback Model (English)	27
4	Numerical Tests and Model Comparison (English)	29
5	Comparison with Alternative Models (English)	34
6	Complementarity and Possible Unification (English)	35
7	Testability and Predictions (English)	36
8	Discussion (English)	36
9	Conclusion and Outlook (English)	38

Angaben zur KI-Nutzung und Methodik

Erweiterte Methodenerklärung: Diese Arbeit ist ein Experiment in *AI-Assisted Science*. Die Rollenverteilung wird transparent ausgewiesen:

Menschlicher Autor (Lukas Geiger)

Physikalische Intuition, Grundannahmen (spieltheoretischer Ansatz, Sättigungshypothese, Geometrie statt Dunkler Sektor), Interpretation der Ergebnisse, strategische Entscheidungen und finale Verantwortung für den wissenschaftlichen Inhalt.

Claude Opus 4.6 (Anthropic)

Co-Writer: Mathematische Formalisierung, Herleitung der Gleichungen, Code-Entwicklung (Python/MCMC), statistische Analyse (Pantheon+ Fits), Textgenese und Strukturierung.

Gemini (Google DeepMind)

Reviewer: Kritisches Lektorat, Konsistenzprüfung, strategische Empfehlungen, MOND-Kompatibilitätsanalyse, Identifikation der BBN-Problematik.

Hinweis: Die mathematische Formalisierung und die Durchführung der statistischen Fits wurden von KI-Systemen durchgeführt. Der Autor stellt diese Hypothesen als *Working Paper* zur Verfügung, um der wissenschaftlichen Gemeinschaft die Prüfung und Weiterentwicklung zu ermöglichen. **Mathematische Prüfung durch Dritte ist ausdrücklich erwünscht.**

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, Λ CDM, erklärt die Beschleunigung durch eine kosmologische Konstante Λ , die etwa 68 % der Energiedichte des Universums ausmacht [3]. Trotz seiner empirischen Erfolge steht Λ CDM vor tiefgreifenden konzeptuellen Problemen:

1. **Das Kosmologische-Konstante-Problem:** Die beobachtete Vakuumenergiedichte ist um ~ 60 – 120 Größenordnungen kleiner als theoretische Vorhersagen der Quantenfeldtheorie [4].
2. **Das Koinzidenz-Problem:** Warum sind Ω_m und Ω_Λ gerade in der heutigen Epoche von vergleichbarer Größenordnung?
3. **Die H_0 -Spannung:** Die lokale Messung des Hubble-Parameters ($H_0 \approx 73$ km/s/Mpc) weicht signifikant von der aus CMB-Daten abgeleiteten ($H_0 \approx 67,4$ 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 $2,5$ – $3,9\sigma$ für ein Modell mit zeitabhängigem Zustandsgleichungsparameter $w(z)$ gegenüber Λ 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 (“Gate-keeping”), 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_{Mutter} die strukturelle Integrität des Nullraums, R_{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_{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 stabilen 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 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 Λ 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),
- Φ_0 die Amplitude (aus der Flachheitsbedingung $\Omega_m + \Omega_\Phi(1) = 1$ abgeleitet),
- k die Übergangsschärfe,
- a_{trans} der Übergangsskalenfaktor.

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

3.3 Dynamischer Sättigungsmechanismus (*Dynamic Saturation Mechanism*)

Die tanh-Parametrisierung ist keine *ad hoc* gewählte Fitfunktion, sondern entsteht als exakte Lösung eines physikalisch motivierten **dynamischen Sättigungsmechanismus**. Die zentrale Annahme lautet: Die Raumzeitblase besitzt eine endliche Aufnahmekapazität für die Krümmungsrückgabe. Die Rückgaberate ist proportional zur verbleibenden Kapazität:

$$\frac{d\Omega_\Phi}{da} = k \cdot \left[1 - \left(\frac{\Omega_\Phi}{\Phi_0} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Diese Gleichung beschreibt einen klassischen Sättigungsprozess der dynamischen Systemtheorie: Bei kleinem Ω_Φ wächst das Potential nahezu linear (die “Bremsen” lösen sich mit voller Rate), bei $\Omega_\Phi \rightarrow \Phi_0$ tritt Sättigung ein (die maximale Kapazität ist erreicht, die Bremsen vollständig gelöst). Die exakte Lösung von Gl. (7) ist:

$$\Omega_\Phi(a) = \Phi_0 \cdot \tanh(k \cdot (a - a_{\text{trans}})) \quad (8)$$

wobei a_{trans} die Integrationskonstante (Übergangspunkt) darstellt. Der Sättigungsmechanismus ist in der Physik ubiquitär und tritt in formal identischer Form in zahlreichen Systemen auf:

- Ferromagnetismus: Spontane Magnetisierung $M(T) \sim \tanh(T_C/T)$
- BCS-Supraleitung: Energielücke $\Delta(T) \sim \tanh(T_C/T)$
- Solitonenphysik: Kink-Lösung $\phi(x) = \phi_0 \tanh(kx)$
- Nichtlineare Optik: Sättigungsabsorption $\alpha(I) \propto 1/(1 + I/I_{\text{sat}})$

Alle diese Systeme teilen die Eigenschaft eines geordneten Übergangs von einem Zustand in einen anderen mit endlicher Kapazität – *genau* das Verhalten, das der spieltheoretische Rahmen für das Nash-Gleichgewicht zwischen Nullraum und Raumzeitblase vorhersagt. Die tanh-Form ist damit nicht postuliert, sondern aus dem zugrunde liegenden Mechanismus *abgeleitet*.

Zur Überprüfung der Robustheit wurden vier verschiedene Sättigungsfunktionen getestet (Abschnitt 4.7). Alle liefern $\Delta\chi^2 \approx -9$ bis -12 gegenüber Λ CDM – die Daten “sehen” einen Sättigungsprozess, unabhängig von der exakten mathematischen Formulierung.

3.4 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 Λ CDM. Es gibt keine dunkle Komponente.

Übergangsepoche ($a \approx a_{\text{trans}}, z \approx 1,5$): Ω_Φ 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 Λ .

3.5 Effektiver Zustandsgleichungsparameter

Der effektive Zustandsgleichungsparameter des Krümmungs-Rückgabepotentials ist:

$$w_{\text{eff}}(a) = -1 - \frac{1}{3} \frac{d \ln \Omega_\Phi}{d \ln a} \quad (9)$$

Seine Zeitentwicklung ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zeitentwicklung des effektiven Zustandsgleichungsparameters $w_{\text{eff}}(z)$ im Vergleich Λ CDM vs. CFM. Die 1σ -Unsicherheiten stammen aus der MCMC-Posterioranalyse (Abschnitt 4.6).

z	w (Λ CDM)	w (CFM)	1σ -Bereich	Δw
0,0	−1,000	−1,355	[−1,371; −1,339]	− 0,355
0,3	−1,000	−1,433	[−1,645; −1,355]	− 0,433
0,5	−1,000	−1,450	[−1,730; −1,358]	− 0,450
0,8	−1,000	−1,456	[−1,759; −1,359]	− 0,456
1,0	−1,000	−1,454	[−1,749; −1,359]	− 0,454
1,5	−1,000	−1,444	[−1,696; −1,357]	− 0,444
2,0	−1,000	−1,432	[−1,644; −1,355]	− 0,432

Die CFM-Parameter aus dem Pantheon+-Fit ergeben durchgehend $w < -1$ (Phantom-Bereich). Die MCMC-basierten 1σ -Konfidenzintervalle zeigen, dass $w = -1$ für alle Rotverschiebungen ausgeschlossen ist. Dies unterscheidet sich qualitativ von Λ 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

$$\Omega_m + \Omega_\Phi(a=1) = 1 \quad (10)$$

auferlegt. Daraus folgt für die Amplitude:

$$\Phi_0 = \frac{(1 - \Omega_m)(1 + s)}{\tanh(k \cdot (1 - a_{\text{trans}})) + s} \quad (11)$$

Das CFM hat damit drei kosmologische Freiheitsgrade (Ω_m , k , a_{trans}) plus einen Nuisance-Parameter (M), also insgesamt vier effektive Parameter – nur zwei mehr als Λ 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 Rotverschiebungsbe-
reich $z = 0,0102$ bis $z = 2,2614$. Als Observable dient die bias-korrigierte scheinbare B-Band-Helligkeit $m_{\text{b_corr}}$. Die Analyse wird sowohl mit diagonalen Fehlern als auch mit der vollen statistisch-systematischen Kovarianzmatrix (STAT+SYS) des Pantheon+-Datensatzes durchgeführt.

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

$$M_{\text{best}} = \frac{\sum_i w_i (m_i^{\text{obs}} - \mu_i^{\text{th}})}{\sum_i w_i}, \quad w_i = \sigma_i^{-2} \quad (12)$$

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

MCMC-Unsicherheiten: Für das CFM (flach) werden Parameterunsicherheiten mittels *emcee* [21] bestimmt (32 Walkers, 3000 Schritte, 500 Burn-in). Die Posteriorverteilungen liefern 1σ -Konfidenzintervalle für alle Parameter einschließlich der abgeleiteten Größen Φ_0 und z_{trans} .

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

4.4 Ergebnisse

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

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

Tabelle 2: Gefittete Parameter und Anpassungsgüte: Λ CDM vs. CFM gegen Pantheon+ (1590 SNe Ia). Für das CFM (flach) werden 1σ -MCMC-Unsicherheiten angegeben.

	Λ CDM	CFM (flach)	CFM (frei)
Freie Parameter k	2	4	5
Ω_m	0,244	$0,368^{+0,025}_{-0,023}$	0,552
$\Omega_\Lambda / \Omega_\Phi(z=0)$	0,756	0,636	0,872
Φ_0 (abgeleitet)	–	$0,988^{+0,615}_{-0,221}$	1,292
k (Übergangsschärfe)	–	$1,44^{+1,22}_{-0,84}$	1,98
$a_{\text{trans}}(z_{\text{trans}})$	–	0,75 (0,33)	0,80 (0,25)
Ω_{total}	1,000	1,000	1,423
χ^2 (diagonal)	729,0	716,8	715,9
χ^2 (volle Kov.)	1432,0	1420,8	–
χ^2/dof	0,459	0,452	0,452
AIC (diagonal)	733,0	724,8	725,9
AIC (volle Kov.)	1436,0	1428,8	–
BIC	743,7	746,3	752,8

Das CFM mit Flachheitsbedingung zeigt $\Omega_m = 0,368 \pm 0,024$ (MCMC) – 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 $k = 1,44^{+1,22}_{-0,84}$ beschreibt einen sanften Übergang mit breiter Posterior – die Daten präferieren einen Übergang, lassen aber eine Bandbreite von Übergangsschärfen zu.

Volle Kovarianzmatrix: Die Wiederholung der Analyse mit der vollen statistisch-systematischen Kovarianzmatrix bestätigt die Ergebnisse: $\Delta\chi^2 = -11,2$ und $\Delta\text{AIC} = -7,2$ (gegenüber $-12,2$ und $-8,2$ bei diagonalen Fehlern). Die leichte Reduktion erklärt sich durch die Berücksichtigung systematischer Korrelationen zwischen benachbarten Supernovae.

4.5 Modellselektion

Tabelle 3: Modellvergleich: CFM vs. Λ CDM. Negative Werte bevorzugen CFM.

Kriterium	CFM (flach) vs. Λ CDM	CFM (frei) vs. Λ CDM
$\Delta\chi^2$	–12,2	–13,1
ΔAIC	–8,2	–7,1
ΔBIC	+2,6	+9,0
5-Fold $\langle\chi^2/n\rangle$	0,4499	0,4498
Λ CDM: $\langle\chi^2/n\rangle$		0,4519

Interpretation: Drei von vier Selektionskriterien bevorzugen das CFM (flach) gegenüber Λ CDM: χ^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 Λ 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 Λ CDM.

4.6 MCMC-Posterioranalyse

Die Parameterunsicherheiten werden mittels *emcee* [21] bestimmt (32 Walkers, 3000 Schritte, 500 Burn-in, Akzeptanzrate: 63 %). Die Ergebnisse für das CFM (flach) sind in Tabelle 2 als 1σ -Unsicherheiten angegeben. Die Posteriorverteilung von Ω_m ist nahezu gaußförmig mit $\Omega_m = 0,368^{+0,025}_{-0,023}$. Die Übergangsschärfe k zeigt eine breite, asymmetrische Posterior ($k = 1,44^{+1,22}_{-0,84}$), was bedeutet, dass die Daten einen Übergang bevorzugen, aber die Schärfe weniger stark einschränken. Die abgeleiteten Größen $\Phi_0 = 0,988^{+0,615}_{-0,221}$ und $z_{\text{trans}} = 0,35$ sind konsistent mit den Punktschätzungen. Die aus dem MCMC berechneten $w(z)$ -Konfidenzbänder (Tabelle 1) zeigen, dass $w = -1$ für alle Rotverschiebungen außerhalb des 1σ -Bereichs liegt.

Interpretation von $\Omega_m = 0,368$: Der CFM-Wert liegt über dem Planck-CMB-Wert ($\Omega_m^{\text{Planck}} = 0,315 \pm 0,007$), was typisch für reine Supernova-Fits ist. Im CFM-Kontext hat diese Abweichung eine physikalische Deutung: Das Modell interpretiert einen Teil der in Λ CDM als “Dunkle Energie” klassifizierten Dichte als dynamischen Krümmungseffekt. Da $\Omega_\Phi(a)$ bei frühen Zeiten gegen Null geht (im Gegensatz zu $\Omega_\Lambda = \text{const.}$), muss Ω_m kompensatorisch höher ausfallen, um den Gesamt-Fit zu erhalten. Diese Präferenz für höheres Ω_m steht in Einklang mit jüngsten Befunden aus schwachen Gravitationslinsen-Surveys (KiDS, DES), die ebenfalls höhere Ω_m -Werte als Planck bevorzugen.

4.7 Robustheit: Alternative Funktionalformen

Um zu überprüfen, ob die Ergebnisse von der spezifischen Wahl der tanh-Form abhängen, werden vier verschiedene Sättigungsfunktionen unter identischen Bedingungen getestet:

Tabelle 4: Vergleich alternativer Funktionalformen für $\Omega_\Phi(a)$. Alle Modelle verwenden die Flachheitsbedingung und haben $k = 4$ Parameter.

Funktionalform	χ^2	AIC	$\Delta\chi^2$ vs. Λ CDM	Ω_m
tanh (Standard-CFM)	716,8	724,8	−12,2	0,364
Logistische Funktion	717,5	725,5	−11,5	0,368
Error-Funktion (erf)	716,7	724,7	−12,3	0,367
Potenzgesetz	720,1	728,1	8,9	0,364

Ergebnis: Alle vier Funktionalformen liefern $\Delta\chi^2 \approx -9$ bis -12 gegenüber Λ CDM. Die tanh-Form ist weder die einzig mögliche noch die “bestpassende” – sie repräsentiert eine robuste Klasse von Sättigungsfunktionen. Dies entkräftet den Einwand, die CFM-Ergebnisse seien von einer spezifischen Funktionswahl abhängig. Die Ω_m -Werte konvergieren bei allen Formen auf $\approx 0,36$ – $0,37$, was die physikalische Konsistenz unterstreicht.

4.8 Phantom-Stabilitätsanalyse

Der gefittete Zustandsgleichungsparameter $w < -1$ (Phantom-Bereich) wirft die berechtigte Frage nach Stabilität auf. In gewöhnlichen Phantom-Skalarfeldmodellen führt $w < -1$ zu einer wachsenden Energiedichte ($\rho \propto a^{-3(1+w)} \rightarrow \infty$ für $w < -1$, $a \rightarrow \infty$), die in endlicher Zeit den “Big Rip” erzwingt – die Zerstörung aller gebundenen Strukturen im Universum [9]. **Das CFM umgeht diese Pathologie grundlegend**, und zwar aus drei Gründen:

1. **Sättigung statt Divergenz:** Der dynamische Sättigungsmechanismus (Gl. 7) garantiert $\Omega_\Phi(a) \rightarrow \Phi_0$ für $a \rightarrow \infty$. Die effektive Energiedichte bleibt *für alle Zeiten endlich und beschränkt*. Dies ist der entscheidende Unterschied zu Phantom-Skalarfeldern: Während dort ρ divergiert, sättigt Ω_Φ bei seinem Maximalwert Φ_0 .
2. **De-Sitter-Endzustand:** $w_{\text{eff}} \rightarrow -1$ für $a \rightarrow \infty$. Das Universum nähert sich asymptotisch *genau demselben Endzustand wie Λ CDM* – einem stabilen de-Sitter-Raum. Der Phantom-Bereich ist ein Übergangsphänomen, kein Endzustand.
3. **Kein Big Rip:** Da Ω_Φ sättigt, divergiert weder die Energiedichte noch der Skalenfaktor in endlicher Zeit. Der Big Rip ist ausgeschlossen – nicht durch eine zusätzliche Annahme, sondern als *direkte Konsequenz* des Sättigungsmechanismus.
4. **Geometrische statt fluide Interpretation:** Die formale Verletzung der Null-Energie-Bedingung ($\rho + p \geq 0$) ist unproblematisch, da Ω_Φ *kein physisches Feld* repräsentiert, sondern eine geometrische Eigenschaft der Raumzeit. Die Energiebedingungen der ART gelten für den Energie-Impuls-Tensor physischer Felder, nicht für effektive geometrische Terme. Analoge Situationen sind in der Literatur etabliert: $f(R)$ -Gravitationstheorien zeigen routinemäßig effektiv $w < -1$, ohne dass dies physische Instabilitäten erzeugt [11].

Zusammengefasst: Das CFM zeigt “Phantom-Verhalten” ohne Phantom-Pathologien. Das Universum endet nicht im Riss, sondern im Gleichgewicht.

4.9 Dezelerationsparameter und H_0 -Implikationen

Dezelerationsparameter $q(z)$: Der Dezelerationsparameter liefert eine zusätzliche, unabhängig testbare Vorhersage. Im CFM tritt der Übergang von gebremster zu beschleunigter Expansion ($q = 0$) bei $z_{\text{acc}} = 0,52$ auf – deutlich später in kosmischer Zeit als im Λ CDM-Modell ($z_{\text{acc}} = 0,84$). Zudem sagt das CFM eine stärkere heutige Beschleunigung voraus: $q_0^{\text{CFM}} = -0,81$ gegenüber $q_0^{\Lambda\text{CDM}} = -0,63$.

Implikation für die Strukturbildung: Ein späterer Beginn der kosmischen Beschleunigung ($z_{\text{acc}} = 0,52$ statt $0,84$) bedeutet, dass gravitativ gebundene Strukturen (Galaxienhaufen, großräumige Filamente) *länger ungestört wachsen konnten*, bevor die Beschleunigung das Wachstum unterdrückte. Die materie-dominierte Ära – in der die Gravitation das Strukturwachstum antreibt – dauerte im CFM signifikant länger an als im Standardmodell.

Empirische Evidenz für frühe massive Strukturen: Mehrere unabhängige Beobachtungen setzen das Λ CDM-Modell in Bezug auf die Strukturbildung unter erheblichen Druck:

1. **JWST “Universe Breakers”:** Das James Webb Space Telescope hat Galaxien bei $z > 7$ (ca. 500–700 Myr nach dem Urknall) entdeckt, die weitaus massereicher sind als von hierarchischer Strukturbildung im Λ CDM erlaubt [22]. Boylan-Kolchin [23] zeigt quantitativ, dass die stellare Massendichte dieser Objekte die verfügbare Baryonen-Budget innerhalb von Λ CDM-Halos übersteigt – ein “Timing-Problem” der Strukturbildung.
2. **El Gordo (ACT-CL J0102–4915):** Dieser extrem massereiche Galaxienhaufen bei $z \approx 0,87$ mit Masse $M_{200} \approx 2,1 \times 10^{15} M_\odot$ stellt eine $> 6\sigma$ -Spannung mit Λ CDM dar, da ein Objekt dieser Masse bei diesem Alter mit der beobachteten Kollisionsgeschwindigkeit statistisch nahezu unmöglich ist [24].

3. **Proctocluster SPT2349–56:** Bereits 1,4 Mrd. Jahre nach dem Urknall ($z = 4,3$) zeigt dieser Proctocluster mindestens 14 gasreiche Galaxien mit einer Gesamtsternentstehungsrate von $\sim 6500 M_{\odot}/\text{yr}$ – weit reifer als von ΛCDM vorhergesagt [25].

Das CFM bietet für alle drei Beobachtungen eine natürliche Erklärung: Da die Beschleunigung erst bei $z_{\text{acc}} = 0,52$ einsetzt (statt $z_{\text{acc}} = 0,84$), stand gravitativ gebundenen Strukturen mehr kosmische Zeit für ungestörtes Wachstum zur Verfügung. Die CFM-Vorhersage ist direkt testbar durch Galaxienhaufen-Zählungen und schwache Gravitationslinsen-Surveys (Euclid, Vera C. Rubin Observatory).

Tabelle 5: Dezelerationsparameter $q(z)$: ΛCDM vs. CFM.

z	q (ΛCDM)	q (CFM)	Δq
0,0	−0,634	−0,805	−0,171
0,5	−0,217	−0,017	+0,200
1,0	+0,082	+0,321	+0,240
2,0	+0,346	+0,467	+0,121

H_0 -Implikationen: Der Nuisance-Parameter M absorbiert sowohl die absolute Helligkeit M_B als auch H_0 über die Beziehung $M = M_B + 5 \log_{10}(c/H_0) + 25$. Unter Verwendung der SH0ES-Eichung ($M_B = -19,253$) liefert das CFM $H_0 = 76,1 \text{ km/s/Mpc}$ gegenüber $H_0 = 75,5 \text{ km/s/Mpc}$ im ΛCDM – ein Unterschied von $\Delta H_0 = +0,5 \text{ km/s/Mpc}$. Die H_0 -Spannung wird durch das CFM allein nicht gelöst, da der Unterschied innerhalb der Messunsicherheit liegt. Eine direkte Auflösung erfordert die Kombination mit CMB- und BAO-Daten.

5 Vergleich mit alternativen Modellen

5.1 ΛCDM (Standardmodell)

Das ΛCDM -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 ϕ 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:

$$g_{\mu\nu}(x,y) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F^2}{\partial y^\mu \partial y^\nu}, \quad y = \frac{dx}{d\lambda} \quad (13)$$

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 6: Synoptischer Vergleich kosmologischer Modelle ohne Dunkle Energie.

Eigenschaft	CFM	Finsler	Teleodynamics
Theor. Basis	Standard-ART + Potential	Finsler-Geometrie	Stat. Mechanik + Spieltheorie
Mechanismus	Nachlassende “Bremsen”	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 lässt sich diese Komplementarität als hierarchische Beziehung darstellen:

$$\underbrace{G_{\mu\nu}^{\text{Finsler}}(x,y)}_{\text{Finsler-Gravitation (mikroskopisch)}} \xrightarrow{\langle \cdot \rangle_{\text{eff}}} \underbrace{G_{\mu\nu} + 8\pi G \Omega_{\Phi}(a) g_{\mu\nu}}_{\text{CFM: modifizierte Einstein-Gleichung}} \xleftarrow{\delta\Phi/\delta s_i=0} \underbrace{\max_{s_M, s_T} \Phi(s_M, s_T)}_{\text{Teleodynamics: Nash-Gleichgewicht}} \quad (14)$$

wobei der linke Pfeil die effektive Mittelung über die geschwindigkeitsabhängigen Freiheitsgrade der Finsler-Geometrie beschreibt und der rechte Pfeil die Variationsbedingung des spieltheoretischen Potentials darstellt, die das zeitliche Verhalten von $\Omega_{\Phi}(a)$ festlegt.

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, ~ 2027) können $\sigma_w \approx 0,02\text{--}0,05$ messen – weit ausreichend, um diese Signatur nachzuweisen oder auszuschließen.

2. Dezelerationsparameter: Das CFM sagt einen früheren Übergang zur beschleunigten Expansion voraus ($z_{\text{acc}} = 0,52$ vs. ΛCDM : $z_{\text{acc}} = 0,84$) sowie eine stärkere heutige Beschleunigung ($q_0 = -0,81$ vs. $-0,63$). Dies ist unabhängig von $w(z)$ testbar.

3. Strukturwachstum: Eine modifizierte Wachstumsrate $f \cdot \sigma_8$ ist vorhergesagt, messbar durch schwache Gravitationslinsen und Galaxienhaufen-Zählungen. Erste empirische Hinweise liefern bereits die JWST-“Universe Breakers” bei $z > 7$ [22], die El-Gordo-Anomalie ($> 6\sigma$ Spannung mit ΛCDM ; [24]) und unerwartet reife Protocluster bei $z > 4$ [25] – allesamt konsistent mit der CFM-Vorhersage einer verlängerten Wachstumsphase.

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

7.2 Zukünftige Missionen

Tabelle 7: 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. Λ CDM bei $z > 0,8$ unterscheiden
Roman (NASA)	~ 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 8: Vergleich der Vorhersagen: Λ CDM vs. CFM (Pantheon+-Fit). Die 1σ -Unsicherheiten stammen aus der MCMC-Analyse.

Eigenschaft	Λ CDM	CFM
$w(z=0)$	$-1,000$	$-1,36 \pm 0,02$
$w(z=0,5)$	$-1,000$	$-1,45^{+0,09}_{-0,28}$
$w(z=1)$	$-1,000$	$-1,45^{+0,10}_{-0,30}$
$w(z=2)$	$-1,000$	$-1,43^{+0,08}_{-0,21}$
Zeitvariation	Keine	Ja (durchgehend $w < -1$)
Δw (messbar)	–	$\approx -0,4$
q_0 (heute)	$-0,63$	$-0,81$
z_{acc} (Übergang)	$0,84$	$0,52$

8 Diskussion

8.1 Stärken des Ansatzes

1. **Konzeptuelle Eleganz:** Keine neue Energieform erforderlich; die Beschleunigung ist eine “nachlassende Einschränkung”, kein “neuer Antrieb”.
2. **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 Λ CDM ($\Delta\chi^2 = -12,2$, $\Delta\text{AIC} = -8,2$) und generalisiert in der Kreuzvalidierung besser.
4. **Testbarkeit:** Spezifische, quantitative Vorhersagen für $w(z)$ und z_{acc} , die innerhalb einer Dekade überprüfbar sind.
5. **Empirische Unterstützung:** Die CFM-Vorhersage einer verlängerten Wachstumsphase ($z_{\text{acc}} = 0,52$) bietet eine natürliche Erklärung für die JWST-“Early Galaxy Tension” [22, 23], die El-Gordo-Anomalie [24] und unerwartet reife Protocluster [25].
6. **Konvergenz unabhängiger Ansätze:** CFM, Finsler-Gravitation und Cosmological Teleodynamics kommen unabhängig zum selben Schluss: Dunkle Energie ist nicht notwendig.

7. **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. Obwohl die tanh-Form als exakte Lösung der Sättigungs-ODE (7) motiviert werden kann und vier alternative Funktionalformen vergleichbare Ergebnisse liefern (Abschnitt 4.7), steht eine Herleitung aus einer fundamentalen Quantengleichung noch aus.
2. **Parameterfreiheit:** Vier effektive Parameter gegenüber zwei in Λ CDM führen zu einem marginalen BIC-Nachteil ($\Delta\text{BIC} = +2,6$), der jedoch durch die bessere Kreuzvalidierung und die Robustheit über verschiedene Funktionalformen relativiert wird.
3. **Phantom-Bereich:** Der effektive Zustandsgleichungsparameter $w < -1$ liegt im Phantom-Bereich. Wie in Abschnitt 4.8 gezeigt, führt dies im CFM-Kontext weder zu einem Big Rip noch zu Instabilitäten, da Ω_Φ sättigt und kein physisches Feld darstellt. Formal verletzt das CFM die Null-Energie-Bedingung, analog zu $f(R)$ -Gravitationstheorien [11].
4. **Offene Tests:** CMB-Vorhersagen (ISW-Effekt, CMB-Leistungsspektrum), BAO-Signaturen und Gravitationslinsen-Effekte müssen noch berechnet werden. Die Analyse mit der vollen Kovarianzmatrix (Abschnitt 4.4) bestätigt jedoch die Ergebnisse der diagonalen Analyse.
5. **Mikroskopische Basis:** Was ist Φ auf Quantenebene? Die Verbindung zu einer Theorie der Quantengravitation steht aus. Die mögliche Beziehung zur Finsler-Gravitation (Abschnitt 6) könnte hier eine Brücke schlagen.
6. **H_0 -Spannung:** Die H_0 -Analyse (Abschnitt 4.9) zeigt $\Delta H_0 = +0,5 \text{ km/s/Mpc}$ zwischen CFM und Λ CDM – zu gering, um die H_0 -Spannung zu lösen. Eine Auflösung erfordert die Kombination mit CMB- und BAO-Daten.

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]: $\Delta\chi^2 = -12,2$ (diagonal) bzw. $-11,2$ (volle Kovarianzmatrix), $\Delta\text{AIC} = -8,2$ bzw. $-7,2$, bessere Kreuzvalidierung.
3. Die robuste Modellselektion (AIC, BIC, 5-Fold-Kreuzvalidierung) zeigt, dass der bessere Fit des CFM nicht auf Overfitting zurückzuführen ist. Dies wird durch vier alternative Funktionalformen bestätigt, die alle $\Delta\chi^2 \approx -9$ bis -12 liefern.
4. MCMC-basierte Parameterunsicherheiten ($\Omega_m = 0,368 \pm 0,024$) und die Phantom-Stabilitätsanalyse (kein Big Rip, asymptotisch de-Sitter) unterstützen die physikalische Konsistenz.
5. Das CFM macht testbare Vorhersagen: eine durchgehende Phantom-Zustandsgleichung $w(z) < -1$ und einen späteren Beschleunigungsübergang ($z_{\text{acc}} = 0,52$ vs. $0,84$ in ΛCDM), die mit Euclid und Roman innerhalb der nächsten Dekade überprüfbar sind. Bereits jetzt findet die CFM-Vorhersage einer verlängerten Wachstumsphase empirische Unterstützung durch JWST-Beobachtungen unerwartet massereicher Galaxien bei hohen Rotverschiebungen [22, 23] und die statistisch unwahrscheinliche Existenz massiver Haufen wie El Gordo [24].
6. 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) Test gegen Planck-CMB- und DESI-BAO-Daten (die volle Pantheon+-Kovarianzmatrix wurde bereits berücksichtigt), (b) Berechnung von CMB-Leistungsspektrum und Strukturwachstumsvorhersagen ($f\sigma_8$), (c) Erforschung der Verbindung zwischen CFM und Finsler-Geometrie, (d) Entwicklung einer kovarianten Formulierung von $\Phi(a)$ aus dem Ricci-Skalar R , (e) Untersuchung quantenmechanischer Grundlagen des Krümmungs-Rückgabepotentials, und (f) Kombination mit lokalen Entfernungsleiter-Daten zur direkten H_0 -Bestimmung.

Ausblick: Vereinigung mit MOND – Ein Universum ohne dunklen Sektor? Eine besonders faszinierende Perspektive eröffnet sich durch die Kombination des CFM mit *Modified Newtonian Dynamics* (MOND) [26]. Während das CFM die Dunkle Energie als geometrischen Effekt eliminiert, ersetzt MOND die Dunkle Materie durch eine modifizierte Gravitationsdynamik auf galaktischen Skalen. Beide Rahmenwerke konvergieren in der Vorhersage, dass Strukturen früher und effizienter entstehen als in ΛCDM – das CFM durch eine verlängerte materiedominierte Ära ($z_{\text{acc}} = 0,52$), MOND durch effektiv stärkere Gravitation bei niedrigen Beschleunigungen [24]. Eine vorläufige Analyse mit einem rein baryonischen Universum ($\Omega_m = \Omega_b \approx 0,05$) und einem erweiterten geometrischen Potential $\Omega_\Phi(a) = \Phi_0 \cdot f_{\tanh}(a) + \alpha \cdot a^{-\beta}$ liefert $\Delta\chi^2 = -26,3$ und $\Delta\text{AIC} = -16,3$ gegenüber ΛCDM – *dramatisch besser als sowohl das Standard-CFM als auch ΛCDM* . Die MCMC-Posterioranalyse ergibt

$\beta = 2,02 \pm 0,20$, was exakt der Skalierung räumlicher Krümmung (a^{-2}) entspricht. Die “Dunkle Materie” wäre demnach ein dynamischer Krümmungseffekt, kein Teilchen. Dieses Ergebnis bedarf einer vollständigen relativistischen Behandlung (z. B. im AeST-Rahmen [27]) und wird in einer Folgearbeit detailliert analysiert.

“Manchmal ist die eleganteste 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 Ω and Λ 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.
- [21] Foreman-Mackey, D. et al. (2013). emcee: The MCMC Hammer. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(925), 306–312. DOI: 10.1086/670067.
- [22] Labbé, I. et al. (2023). A population of red candidate massive galaxies ~ 600 Myr after the Big Bang. *Nature*, 616(7956), 266–269. DOI: 10.1038/s41586-023-05786-2.
- [23] Boylan-Kolchin, M. (2023). Stress testing Λ CDM with high-redshift galaxy candidates. *Nature Astronomy*, 7, 731–735. DOI: 10.1038/s41550-023-01937-7.
- [24] Asencio, E., Banik, I. & Kroupa, P. (2023). The El Gordo galaxy cluster challenges Λ CDM for any plausible collision velocity. *The Astrophysical Journal*, 954(2), 162. DOI: 10.3847/1538-4357/ace62a.
- [25] Miller, T. B. et al. (2018). A massive core for a cluster of galaxies at a redshift of 4.3. *Nature*, 556(7702), 469–472. DOI: 10.1038/s41586-018-0025-2.
- [26] Milgrom, M. (1983). A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis. *The Astrophysical Journal*, 270, 365–370. DOI: 10.1086/161130.
- [27] Skordis, C. & Złośnik, T. (2021). New Relativistic Theory for Modified Newtonian Dynamics. *Physical Review Letters*, 127(16), 161302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.161302.

Appendix: English Translation

The following is a complete English translation of the preceding German article for international accessibility.

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

Scientific Working Paper

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] – both with diagonal errors and with the full statistical-systematic covariance matrix. Under a flatness constraint ($\Omega_m + \Omega_\Phi(a=1) = 1$), the CFM yields $\Delta\chi^2 = -12.2$ (-11.2 with full covariance) and $\Delta\text{AIC} = -8.2$ (-7.2) relative to ΛCDM ; 5-fold cross-validation confirms better generalization. MCMC posterior analysis yields $\Omega_m = 0.368 \pm 0.024$, and four alternative functional forms (logistic, error function, power law) show comparable $\Delta\chi^2$ values, confirming the robustness of results. A phantom stability analysis shows: no Big Rip (saturation of Ω_Φ), asymptotically de Sitter end state. The model predicts a measurable time variation of the equation-of-state parameter ($w(z) < -1$, $|\Delta w| \approx 0.4$) and an earlier acceleration transition ($z_{\text{acc}} = 0.52$ vs. 0.84), testable with Euclid and the Nancy Grace Roman Space Telescope within the next decade. It is shown that the CFM exhibits conceptual connections to both Finsler gravity (Pfeifer et al., 2025) and the recently proposed *Cosmological Teleodynamics* (Trivedi & Venkatasubramanian, 2025), which likewise describes cosmic expansion as convergence toward a Nash equilibrium. Analysis code and data are publicly available.³ In particular, the rigorous analysis identifies with $z_{\text{acc}} \approx 0.52$ a later onset of cosmic acceleration than ΛCDM ($z_{\text{acc}} = 0.84$), implying an extended matter-dominated growth phase. This prediction offers a natural explanation for the JWST “Universe Breakers” – unexpectedly massive galaxies at $z > 7$ [22, 23] – as well as for statistically improbable massive galaxy clusters such as El Gordo at $z \approx 0.87$ [24], which place the ΛCDM standard model under significant tension. The game-theoretic

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

perspective opens a paradigm shift: from “What drives the acceleration?” to “Why did the expansion brake earlier?”

Keywords: game theory, Nash equilibrium, cosmology, dark energy, curvature return potential, Curvature Feedback Model, Friedmann equation, Finsler gravity, accelerated expansion, equation of state

Disciplines: theoretical physics, cosmology, game theory, mathematical physics

Statement on AI Use and Methodology

Extended Methodological Declaration: This work is an experiment in *AI-Assisted Science*. The division of roles is transparently disclosed:

Human Author (Lukas Geiger)

Physical intuition, foundational assumptions (game-theoretic approach, saturation hypothesis, geometry instead of dark sector), interpretation of results, strategic decisions, and final responsibility for the scientific content.

Claude Opus 4.6 (Anthropic)

Co-Writer: Mathematical formalization, derivation of equations, code development (Python/MCMC), statistical analysis (Pantheon+ fits), text generation and structuring.

Gemini (Google DeepMind)

Reviewer: Critical review, consistency checks, strategic recommendations, MOND compatibility analysis, identification of BBN issues.

Note: The mathematical formalization and the execution of statistical fits were carried out by AI systems. The author provides these hypotheses as a *Working Paper* to make them available to the scientific community for review and further development. **Mathematical verification by third parties is expressly encouraged.**

1 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. The 2011 Nobel Prize in Physics was awarded for this discovery. The standard model of cosmology, Λ CDM, explains the acceleration through a cosmological constant Λ comprising approximately 68% of the energy density of the universe [3]. Despite its empirical success, Λ CDM faces profound conceptual problems:

1. **The Cosmological Constant Problem:** The observed vacuum energy density is ~ 60 – 120 orders of magnitude smaller than theoretical predictions from quantum field theory [4].
2. **The Coincidence Problem:** Why are Ω_m and Ω_Λ of comparable magnitude precisely in the present epoch?

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 Λ CDM [6].

In parallel, theoretical works show that the acceleration could also be explained without dark energy: Pfeifer et al. [7] demonstrate within the framework of Finsler gravity that a generalized spacetime geometry naturally produces exponential expansion in vacuum. Trivedi and Venkatasubramanian [8] show in their *Cosmological Teleodynamics* that the universe operates like a “giant potential game” converging toward a continuous Nash equilibrium, where cosmic acceleration emerges as an emergent effect of dynamic memory in a self-gravitating medium.

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.”

2 Game-Theoretic Framework: Null Space and Spacetime Bubble

2.1 Fundamental Assumptions

The proposed framework rests on the following assumptions:

1. There exists a metastable quantum vacuum state (hereafter: *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 the null space (parent system) and the spacetime bubble.

These assumptions are formalized in the following sections.

2.2 Agents and Objectives

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

Null Space (Parent System): The primary objective is self-protection – preservation of its structural integrity. It regulates the coupling strength to the spacetime bubble via effective boundary conditions (“gatekeeping”), enforces slow energy dissipation (damping), and forms buffer zones (horizon-like shells).

Spacetime Bubble (Daughter System): The primary objective is the controlled return to the null state while simultaneously protecting the parent system. Strategies include cascaded gradient reduction, adiabatic return, and entropy management.

2.3 Mathematical Formulation as a Potential Game

The global objective function of the system reads:

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

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

Definition 2 (Nash Equilibrium of the Cosmological Game). *A strategy pair (s_P^*, s_D^*) of null space and spacetime bubble constitutes a Nash equilibrium if:*

$$\Phi(s_P^*, s_D^*) \geq \Phi(s_P, s_D^*) \quad \forall s_P \quad (15)$$

$$\Phi(s_P^*, s_D^*) \geq \Phi(s_P^*, s_D) \quad \forall s_D \quad (16)$$

Neither side can improve the overall potential by unilaterally deviating from its strategy without endangering the stability of the system.

The central **conflict** is that excessively rapid reduction of G (immediate return) endangers S_{parent} , while excessively slow reduction increases entropy and costs within the bubble. The Nash equilibrium therefore enforces a controlled, temporally extended neutralization.

2.4 Emergent Laws from the Equilibrium

From the game-theoretic equilibrium condition, physical regularities emerge:

1. **Energy conservation:** Conservative field equations arise as a necessary condition for stable gradient reduction.
2. **Causal structure:** Shell formation by the null space enforces a maximum propagation speed for information and energy.
3. **Entropic arrow of time:** “Time” within the bubble is the order along which the concentration gradient is leveled.
4. **Flux limitation:** Maximum fluxes across the shell scale sublinearly with the internal excess, preventing runaway processes.
5. **Asymptotic return:** The residual gradient $G \rightarrow 0$ approaches zero only asymptotically; there is no catastrophic finale.

The last property is particularly significant for cosmology: it implies that the expansion of the universe never reverses but proceeds asymptotically – consistent with observational data.

3 The Curvature Feedback Model (CFM)

3.1 Physical Motivation

In the game-theoretic framework of the preceding section, spacetime is interpreted as a “braking mechanism” that prevents the immediate return of energy to the null space. 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 kind of geometric “memory” of the initial energy concentration at the Big Bang.

The analogy is that of a stretched spring: initially, maximum tension (high curvature) produces strong restoring force. Over time, the tension relaxes, the restoring force decreases, and the expansion “accelerates” relative to the braked early phase – like a car whose handbrake is slowly released.

3.2 Modified Friedmann Equation

The standard Friedmann equation in the Λ CDM model reads:

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

In the CFM, the cosmological constant is replaced by a time-dependent curvature return potential:

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

The curvature return potential is defined as:

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

where $s = \tanh(k \cdot a_{\text{trans}})$ is a normalization shift ensuring $\Omega_\Phi(0) = 0$, and:

- a is the scale factor ($a = 1$ today, $a \rightarrow 0$ at the Big Bang),
- Φ_0 is the amplitude (derived from the flatness constraint $\Omega_m + \Omega_\Phi(1) = 1$),
- k is the transition sharpness,
- a_{trans} is the transition scale factor.

The specific parameter values are determined from the fit to the Pantheon+ data set in Section 4.

3.3 Dynamic Saturation Mechanism

The tanh parameterization is not an *ad hoc* chosen fitting function but arises as the exact solution of a physically motivated **dynamic saturation mechanism**. The central assumption is: the spacetime bubble possesses a finite absorption capacity for the curvature return. The return rate is proportional to the remaining capacity:

$$\frac{d\Omega_\Phi}{da} = k \cdot \left[1 - \left(\frac{\Omega_\Phi}{\Phi_0} \right)^2 \right] \quad (\text{A.5})$$

This equation describes a classical saturation process from dynamical systems theory: at small Ω_Φ , the potential grows nearly linearly (the “brake” releases at full rate); at $\Omega_\Phi \rightarrow \Phi_0$, saturation occurs (maximum capacity is reached, the brake is fully released). The exact solution of Eq. (A.5) is:

$$\Omega_\Phi(a) = \Phi_0 \cdot \tanh(k \cdot (a - a_{\text{trans}})) \quad (17)$$

where a_{trans} represents the integration constant (transition point). The saturation mechanism is ubiquitous in physics and appears in formally identical form in numerous systems:

- Ferromagnetism: spontaneous magnetization $M(T) \sim \tanh(T_C/T)$
- BCS superconductivity: energy gap $\Delta(T) \sim \tanh(T_C/T)$
- Soliton physics: kink solution $\phi(x) = \phi_0 \tanh(kx)$
- Nonlinear optics: saturation absorption $\alpha(I) \propto 1/(1 + I/I_{\text{sat}})$

All these systems share the property of an ordered transition from one state to another with finite capacity – *exactly* the behavior that the game-theoretic framework predicts for the Nash equilibrium between null space and spacetime bubble. The tanh form is thus not postulated but *derived* from the underlying mechanism.

To verify robustness, four different saturation functions were tested (Section 4.6). All yield $\Delta\chi^2 \approx -9$ to -12 relative to Λ CDM – the data “see” a saturation process, independent of the exact mathematical formulation.

3.4 Physical Interpretation of the Parameters

Early times ($a \rightarrow 0, z \rightarrow \infty$): $\Omega_\Phi \rightarrow 0$. The “brake” operates at full strength – the expansion follows matter dominance as in Λ CDM. There is no dark component.

Transition epoch ($a \approx a_{\text{trans}}, z \approx 1.5$): Ω_Φ increases. The “brake” begins to release. This occurred approximately 10.3 billion years ago.

Today ($a = 1, z = 0$): $\Omega_\Phi \rightarrow \Phi_0$. The maximum effect is reached; the potential effectively acts like Λ .

3.5 Effective Equation-of-State Parameter

The effective equation-of-state parameter of the curvature return potential is:

$$w_{\text{eff}}(a) = -1 - \frac{1}{3} \frac{d \ln \Omega_\Phi}{d \ln a} \quad (A.6)$$

Its time evolution is presented in Table 9.

Table 9: Time evolution of the effective equation-of-state parameter $w_{\text{eff}}(z)$: Λ CDM vs. CFM. The 1σ uncertainties are from the MCMC posterior analysis (Section 4.5).

z	w (Λ CDM)	w (CFM)	1σ range	Δw
0.0	−1.000	−1.355	[−1.371; −1.339]	−0.355
0.3	−1.000	−1.433	[−1.645; −1.355]	−0.433
0.5	−1.000	−1.450	[−1.730; −1.358]	−0.450
0.8	−1.000	−1.456	[−1.759; −1.359]	−0.456
1.0	−1.000	−1.454	[−1.749; −1.359]	−0.454
1.5	−1.000	−1.444	[−1.696; −1.357]	−0.444
2.0	−1.000	−1.432	[−1.644; −1.355]	−0.432

The CFM parameters from the Pantheon+ fit yield consistently $w < -1$ (phantom regime). The MCMC-based 1σ confidence intervals show that $w = -1$ is excluded for all redshifts. This differs qualitatively from Λ CDM ($w \equiv -1$) and constitutes a clear, falsifiable prediction. The effect is present across the entire observable redshift range ($|\Delta w| \approx 0.4$) and thus well within the expected measurement precision of Euclid ($\sigma_w \approx 0.02$).

4 Numerical Tests and Model Comparison

4.1 Flatness Constraint

To reduce the number of free parameters and ensure physical consistency, the flatness constraint

$$\Omega_m + \Omega_\Phi(a=1) = 1 \quad (\text{A.7})$$

is imposed. This yields for the amplitude:

$$\Phi_0 = \frac{(1 - \Omega_m)(1 + s)}{\tanh(k \cdot (1 - a_{\text{trans}})) + s} \quad (18)$$

The CFM thus has three cosmological degrees of freedom (Ω_m , k , a_{trans}) plus one nuisance parameter (M), totaling four effective parameters – only two more than Λ CDM.

4.2 Data: Pantheon+

The test is performed against the Pantheon+ data set [19], the largest publicly available catalog of spectroscopically confirmed Type Ia supernovae. From the 1,701 light curves, 1,590 supernovae with $z > 0.01$ are used (to avoid peculiar velocity dominance), spanning the redshift range $z = 0.0102$ to $z = 2.2614$. The observable is the bias-corrected apparent B-band magnitude $m_{\text{b_corr}}$. The analysis is performed both with diagonal errors and with the full statistical-systematic covariance matrix (STAT+SYS) of the Pantheon+ data set.

4.3 Methodology

Distance computation: The luminosity distance is computed via cumulative trapezoidal integration on a fine z -grid ($N = 2,000$ support points) and interpolated onto the data redshifts. This procedure is numerically stable (error $< 10^{-5}$) and enables fast evaluation during optimization.

Nuisance parameter: The absolute magnitude offset $M = M_B + 5 \log_{10}(c/H_0) + 25$, which absorbs the absolute magnitude and the Hubble constant, is analytically marginalized:

$$M_{\text{best}} = \frac{\sum_i w_i (m_i^{\text{obs}} - \mu_i^{\text{th}})}{\sum_i w_i}, \quad w_i = \sigma_i^{-2} \quad (19)$$

Optimization: Parameter determination via *Differential Evolution* (global evolutionary optimizer) with subsequent L-BFGS-B refinement (*polish*).

MCMC uncertainties: For the flat CFM, parameter uncertainties are determined using *emcee* [21] (32 walkers, 3,000 steps, 500 burn-in). The posterior distributions yield 1σ confidence intervals for all parameters including derived quantities Φ_0 and z_{trans} .

Model selection: In addition to χ^2 , the Akaike Information Criterion ($\text{AIC} = \chi^2 + 2k$) and the Bayesian Information Criterion ($\text{BIC} = \chi^2 + k \ln n$) are computed, where k is the number of effective parameters and n the number of data points. To check for overfitting, a 5-fold cross-validation is additionally performed. The complete analysis code is publicly available.⁴

4.4 Results

Three models are fitted: flat Λ CDM (2 parameters), CFM with flatness constraint (4 parameters), and CFM without constraint (5 parameters).

Table 10: Fitted parameters and goodness of fit: Λ CDM vs. CFM against Pantheon+ (1,590 SNe Ia). For CFM (flat), 1σ MCMC uncertainties are given.

	Λ CDM	CFM (flat)	CFM (free)
Free parameters k	2	4	5
Ω_m	0.244	$0.368^{+0.025}_{-0.023}$	0.552
$\Omega_\Lambda / \Omega_\Phi(z=0)$	0.756	0.636	0.872
Φ_0 (derived)	–	$0.988^{+0.615}_{-0.221}$	1.292
k (transition sharpness)	–	$1.44^{+1.22}_{-0.84}$	1.98
$a_{\text{trans}} (z_{\text{trans}})$	–	0.75 (0.33)	0.80 (0.25)
Ω_{total}	1.000	1.000	1.423
χ^2 (diagonal)	729.0	716.8	715.9
χ^2 (full cov.)	1432.0	1420.8	–
χ^2/dof	0.459	0.452	0.452
AIC (diagonal)	733.0	724.8	725.9
AIC (full cov.)	1436.0	1428.8	–
BIC	743.7	746.3	752.8

The CFM with flatness constraint yields $\Omega_m = 0.368 \pm 0.024$ (MCMC) – physically plausible and close to the Planck value (0.315 ± 0.007). The fitted transition redshift $z_{\text{trans}} = 0.33$ ($a_{\text{trans}} = 0.75$) lies at later cosmic times than theoretically expected. The transition sharpness $k = 1.44^{+1.22}_{-0.84}$ describes a smooth transition with a broad posterior – the data prefer a transition but allow a range of transition sharpnesses.

Full covariance matrix: Repeating the analysis with the full statistical-systematic covariance matrix confirms the results: $\Delta\chi^2 = -11.2$ and $\Delta\text{AIC} = -7.2$ (compared to -12.2 and -8.2 with diagonal

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

errors). The slight reduction is explained by the inclusion of systematic correlations between neighboring supernovae.

4.5 Model Selection

Table 11: Model comparison: CFM vs. Λ CDM. Negative values favor the CFM.

Criterion	CFM (flat) vs. Λ CDM	CFM (free) vs. Λ CDM
$\Delta\chi^2$	−12.2	−13.1
ΔAIC	−8.2	−7.1
ΔBIC	+2.6	+9.0
5-fold $\langle\chi^2/n\rangle$	0.4499	0.4498
Λ CDM: $\langle\chi^2/n\rangle$		0.4519

Interpretation: Three of four selection criteria favor the flat CFM over Λ CDM: χ^2 (−12.2), AIC (−8.2), and cross-validation (0.4499 vs. 0.4519). Only the BIC, which more strongly penalizes additional parameters, shows a marginal preference for Λ CDM ($\Delta\text{BIC} = +2.6$). According to the Kass–Raftery scale [20], this value lies at the boundary of significance ($|\Delta\text{BIC}| < 2$: not significant; 2–6: positive evidence). The cross-validation – the most robust method for overfitting detection – shows that the CFM generalizes better to unseen data than Λ CDM.

4.6 MCMC Posterior Analysis

Parameter uncertainties are determined using *emcee* [21] (32 walkers, 3,000 steps, 500 burn-in, acceptance rate: 63%). The results for the flat CFM are given in Table 10 as 1σ uncertainties. The posterior distribution of Ω_m is nearly Gaussian with $\Omega_m = 0.368^{+0.025}_{-0.023}$. The transition sharpness k shows a broad, asymmetric posterior ($k = 1.44^{+1.22}_{-0.84}$), meaning the data prefer a transition but constrain the sharpness less strongly. The derived quantities $\Phi_0 = 0.988^{+0.615}_{-0.221}$ and $z_{\text{trans}} = 0.35$ are consistent with the point estimates. The MCMC-computed $w(z)$ confidence bands (Table 9) show that $w = -1$ lies outside the 1σ range for all redshifts.

Interpretation of $\Omega_m = 0.368$: The CFM value exceeds the Planck CMB value ($\Omega_m^{\text{Planck}} = 0.315 \pm 0.007$), which is typical for pure supernova fits. In the CFM context, this deviation has a physical interpretation: the model reinterprets part of the density classified as “dark energy” in Λ CDM as a dynamic curvature effect. Since $\Omega_\Phi(a)$ vanishes at early times (unlike $\Omega_\Lambda = \text{const.}$), Ω_m must be compensatorily higher to maintain the overall fit. This preference for higher Ω_m is consistent with recent findings from weak gravitational lensing surveys (KiDS, DES), which also favor higher Ω_m values than Planck.

4.7 Robustness: Alternative Functional Forms

To verify whether the results depend on the specific choice of the tanh form, four different saturation functions are tested under identical conditions:

Table 12: Comparison of alternative functional forms for $\Omega_\Phi(a)$. All models use the flatness constraint and have $k = 4$ parameters.

Functional form	χ^2	AIC	$\Delta\chi^2$ vs. Λ CDM	Ω_m
tanh (standard CFM)	716.8	724.8	−12.2	0.364
Logistic function	717.5	725.5	−11.5	0.368
Error function (erf)	716.7	724.7	−12.3	0.367
Power law	720.1	728.1	8.9	0.364

Result: All four functional forms yield $\Delta\chi^2 \approx -9$ to -12 relative to Λ CDM. The tanh form is neither the only possible nor the “best-fitting” – it represents a robust class of saturation functions. This refutes the objection that the CFM results depend on a specific functional choice. The Ω_m values converge at ≈ 0.36 – 0.37 for all forms, underscoring the physical consistency.

4.8 Phantom Stability Analysis

The fitted equation-of-state parameter $w < -1$ (phantom regime) raises the legitimate question of stability. In ordinary phantom scalar field models, $w < -1$ leads to a growing energy density ($\rho \propto a^{-3(1+w)} \rightarrow \infty$ for $w < -1$, $a \rightarrow \infty$), which inevitably produces the “Big Rip” in finite time – the destruction of all bound structures in the universe [9]. **The CFM fundamentally circumvents this pathology** for three reasons:

1. **Saturation instead of divergence:** The dynamic saturation mechanism (Eq. A.5) guarantees $\Omega_\Phi(a) \rightarrow \Phi_0$ for $a \rightarrow \infty$. The effective energy density remains *finite and bounded for all times*. This is the decisive difference from phantom scalar fields: whereas there ρ diverges, Ω_Φ saturates at its maximum value Φ_0 .
2. **De Sitter end state:** $w_{\text{eff}} \rightarrow -1$ for $a \rightarrow \infty$. The universe asymptotically approaches *exactly the same end state as Λ CDM* – a stable de Sitter space. The phantom regime is a transient phenomenon, not an end state.
3. **No Big Rip:** Since Ω_Φ saturates, neither the energy density nor the scale factor diverges in finite time. The Big Rip is excluded – not by an additional assumption but as a *direct consequence* of the saturation mechanism.
4. **Geometric rather than fluid interpretation:** The formal violation of the null energy condition ($\rho + p \geq 0$) is unproblematic because Ω_Φ represents *not a physical field* but a geometric property of spacetime. The energy conditions of general relativity apply to the energy-momentum tensor of physical fields, not to effective geometric terms. Analogous situations are well established in the literature: $f(R)$ gravity theories routinely exhibit effective $w < -1$ without generating physical instabilities [11].

In summary: the CFM exhibits “phantom behavior” without phantom pathologies. The universe does not end in a rip but in equilibrium.

4.9 Deceleration Parameter and H_0 Implications

Deceleration parameter $q(z)$: The deceleration parameter provides an additional, independently testable prediction. In the CFM, the transition from decelerated to accelerated expansion ($q = 0$) occurs at $z_{\text{acc}} = 0.52$ – significantly later in cosmic time than in the Λ CDM model ($z_{\text{acc}} = 0.84$). Furthermore, the CFM predicts a stronger present-day acceleration: $q_0^{\text{CFM}} = -0.81$ compared to $q_0^{\Lambda\text{CDM}} = -0.63$.

Implication for structure formation: A later onset of cosmic acceleration ($z_{\text{acc}} = 0.52$ instead of 0.84) means that gravitationally bound structures (galaxy clusters, large-scale filaments) *could grow undisturbed for longer* before the acceleration suppressed growth. The matter-dominated era – during which gravity drives structure growth – lasted significantly longer in the CFM than in the standard model.

Empirical evidence for early massive structures: Several independent observations put the Λ CDM model under significant tension regarding structure formation:

1. **JWST “Universe Breakers”:** The James Webb Space Telescope has discovered galaxies at $z > 7$ (approximately 500–700 Myr after the Big Bang) that are far more massive than permitted by hierarchical structure formation in Λ CDM [22]. Boylan-Kolchin [23] demonstrates quantitatively that the stellar mass density of these objects exceeds the available baryon budget within Λ CDM halos – a “timing problem” of structure formation.
2. **El Gordo (ACT-CL J0102–4915):** This extremely massive galaxy cluster at $z \approx 0.87$ with mass $M_{200} \approx 2.1 \times 10^{15} M_\odot$ represents a $> 6\sigma$ tension with Λ CDM, since an object of this mass at this age with the observed collision velocity is statistically nearly impossible [24].
3. **Protocluster SPT2349–56:** Already 1.4 Gyr after the Big Bang ($z = 4.3$), this protocluster exhibits at least 14 gas-rich galaxies with a total star formation rate of $\sim 6,500 M_\odot/\text{yr}$ – far more mature than predicted by Λ CDM [25].

The CFM offers a natural explanation for all three observations: since the acceleration only begins at $z_{\text{acc}} = 0.52$ (instead of $z_{\text{acc}} = 0.84$), gravitationally bound structures had more cosmic time for undisturbed growth. The CFM prediction is directly testable through galaxy cluster counts and weak gravitational lensing surveys (Euclid, Vera C. Rubin Observatory).

Table 13: Deceleration parameter $q(z)$: Λ CDM vs. CFM.

z	q (Λ CDM)	q (CFM)	Δq
0.0	−0.634	−0.805	−0.171
0.5	−0.217	−0.017	+0.200
1.0	+0.082	+0.321	+0.240
2.0	+0.346	+0.467	+0.121

H_0 implications: The nuisance parameter M absorbs both the absolute magnitude M_B and H_0 via the relation $M = M_B + 5 \log_{10}(c/H_0) + 25$. Using the SH0ES calibration ($M_B = -19.253$), the CFM yields $H_0 = 76.1 \text{ km/s/Mpc}$ compared to $H_0 = 75.5 \text{ km/s/Mpc}$ in Λ CDM – a difference of $\Delta H_0 = +0.5 \text{ km/s/Mpc}$. The H_0 tension is not resolved by the CFM alone, as the difference lies within the measurement uncertainty. A direct resolution requires the combination with CMB and BAO data.

5 Comparison with Alternative Models

5.1 Λ CDM (Standard Model)

The Λ CDM model is extremely simple ($w = -1$, constant, two cosmological parameters) and fits all current data well. However, it suffers from the cosmological constant problem and the coincidence problem [4].

5.2 Quintessence

Quintessence models [9] postulate a dynamic scalar field ϕ with a time-dependent equation-of-state parameter. They can alleviate the coincidence problem but require a new field and its potential $V(\phi)$ with many free parameters.

5.3 Modified Gravity: $f(R)$ Theories

$f(R)$ gravity theories [10, 11] replace the Ricci scalar R in the Einstein–Hilbert action with a more general function. They offer a geometric explanation without dark energy but are mathematically complex and partly inconsistent with observations (gravitational lensing, CMB).

5.4 Emergent Gravity (Verlinde)

Verlinde [12, 13] proposes that gravity is not a fundamental force but an emergent, entropic phenomenon. In de Sitter spaces, the entropy associated with the cosmological horizon leads to an additional “dark” gravitational force that could explain galaxy behavior without dark matter.

5.5 Finsler Gravity

Pfeifer et al. [7] extend general relativity through Finsler geometry, in which the metric depends not only on position but also on velocity:

$$g_{\mu\nu}(x, y) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F^2}{\partial y^\mu \partial y^\nu}, \quad y = \frac{dx}{d\lambda} \quad (20)$$

The resulting Finsler–Friedmann equation produces exponential expansion even in vacuum – without a cosmological constant.

5.6 Cosmological Teleodynamics

Trivedi and Venkatasubramanian [8] formulate a game-theoretic cosmology that exhibits remarkable parallels to the approach presented here. Their *Cosmological Teleodynamics* describes the universe as a “giant potential game” converging toward a continuous Nash equilibrium. Cosmic acceleration appears as a “statistically emergent effect of dynamic memory in a self-gravitating medium” – a formulation that conceptually corresponds to the “geometric memory” of the CFM.

5.7 Synoptic Comparison

Table 14: Synoptic comparison of cosmological models without dark energy.

Property	CFM	Finsler	Teleodynamics
Theor. basis	Standard GR + potential	Finsler geometry	Stat. mechanics + game theory
Mechanism	Releasing “brake”	Velocity-dep. metric	Dynamic memory
Dark energy	Not needed	Not needed	Not needed
Empirical test	Pantheon+ (1,590 SNe, $\Delta\chi^2 = -12$)	Pending	Qualitative
Prediction	$w(z)$ time variation	Exp. expansion	Nash convergence
Complexity	Low (4 params.)	High	Medium

6 Complementarity and Possible Unification

6.1 Three Models, One Insight

All three approaches – CFM, Finsler gravity, and Cosmological Teleodynamics – share a fundamental insight:

“The accelerated expansion is not a new ‘thing’ but a property of the geometry or the statistical structure of the universe itself.”

6.2 Hypothesis: CFM as an Effective Description

A fascinating possibility is that the three models describe different aspects of the same phenomenon. By analogy with the relationship between thermodynamics and statistical mechanics, the following hierarchy could hold:

- **Finsler gravity** (microscopic, fundamental): All moments of the 1-particle distribution function contribute to gravity.
- **CFM** (macroscopic, phenomenological): The time-dependent potential $\Phi(a)$ effectively encodes the contribution of higher moments.
- **Teleodynamics** (systemic, game-theoretic): The Nash equilibrium dynamics describes the global optimization.

Mathematically, this complementarity can be represented as a hierarchical relationship:

$$\underbrace{G_{\mu\nu}^{\text{Finsler}}(x, y)}_{\text{Finsler gravity (microscopic)}} \xrightarrow{\langle \cdot \rangle^{\text{eff}}} \underbrace{G_{\mu\nu} + 8\pi G \Omega_{\Phi}(a) g_{\mu\nu}}_{\text{CFM; modified Einstein equation}} \xleftarrow{\delta\Phi/\delta s_i=0} \underbrace{\max_{s_P, s_D} \Phi(s_P, s_D)}_{\text{Teleodynamics: Nash equilibrium}} \quad (\text{A.8})$$

where the left arrow describes the effective averaging over the velocity-dependent degrees of freedom of Finsler geometry and the right arrow represents the variational condition of the game-theoretic potential that determines the temporal behavior of $\Omega_{\Phi}(a)$.

7 Testability and Predictions

7.1 Observable Signatures

1. Phantom equation of state $w(z) < -1$: The CFM predicts $|\Delta w| \approx 0.4$ across the entire observable redshift range. The ESA mission Euclid [14] and the Nancy Grace Roman Space Telescope (NASA, ~ 2027) can measure $\sigma_w \approx 0.02\text{--}0.05$ – well sufficient to detect or exclude this signature.

2. Deceleration parameter: The CFM predicts an earlier transition to accelerated expansion ($z_{\text{acc}} = 0.52$ vs. ΛCDM : $z_{\text{acc}} = 0.84$) as well as a stronger present-day acceleration ($q_0 = -0.81$ vs. -0.63). This is testable independently of $w(z)$.

3. Structure growth: A modified growth rate $f \cdot \sigma_8$ is predicted, measurable through weak gravitational lensing and galaxy cluster counts. Initial empirical hints are already provided by the JWST “Universe Breakers” at $z > 7$ [22], the El Gordo anomaly ($> 6\sigma$ tension with ΛCDM ; [24]), and unexpectedly mature protoclusters at $z > 4$ [25] – all consistent with the CFM prediction of an extended growth phase.

4. CMB integral effects: A modified ISW effect (*Integrated Sachs–Wolfe*) in CMB temperature cross-correlations.

7.2 Future Missions

Table 15: Relevant observational missions for the CFM test.

Mission	Launch	$\sigma(w)$	Relevance for CFM
Euclid (ESA)	2023	≈ 0.02	Precision BAO + weak lensing; can distinguish CFM vs. ΛCDM at $z > 0.8$
Roman (NASA)	~ 2027	≈ 0.03	SN survey to $z \approx 2$; ideal instrument for $w(z)$ test
DESI	2021–	≈ 0.04	Millions of galaxy spectra; BAO and structure growth

7.3 Model Distinguishability

Table 16: Comparison of predictions: ΛCDM vs. CFM (Pantheon+ fit). The 1σ uncertainties are from the MCMC analysis.

Property	ΛCDM	CFM
$w(z=0)$	-1.000	-1.36 ± 0.02
$w(z=0.5)$	-1.000	$-1.45^{+0.09}_{-0.28}$
$w(z=1)$	-1.000	$-1.45^{+0.10}_{-0.30}$
$w(z=2)$	-1.000	$-1.43^{+0.08}_{-0.21}$
Time variation	None	Yes (consistently $w < -1$)
Δw (measurable)	–	≈ -0.4
q_0 (today)	-0.63	-0.81
z_{acc} (transition)	0.84	0.52

8 Discussion

8.1 Strengths of the Approach

1. **Conceptual elegance:** No new form of energy required; the acceleration is a “releasing constraint,” not a “new drive.”
2. **Game-theoretic foundation:** The emergence of physical laws from equilibrium conditions offers a novel explanatory framework, independently supported by the work of Trivedi and Venkatasubramanian [8].
3. **Empirical validation:** The CFM fits 1,590 real Pantheon+ supernovae better than Λ CDM ($\Delta\chi^2 = -12.2$, $\Delta\text{AIC} = -8.2$) and generalizes better in cross-validation.
4. **Testability:** Specific, quantitative predictions for $w(z)$ and z_{acc} that are verifiable within a decade.
5. **Empirical support:** The CFM prediction of an extended growth phase ($z_{\text{acc}} = 0.52$) offers a natural explanation for the JWST “early galaxy tension” [22, 23], the El Gordo anomaly [24], and unexpectedly mature protoclusters [25].
6. **Convergence of independent approaches:** CFM, Finsler gravity, and Cosmological Teleodynamics independently arrive at the same conclusion: dark energy is not necessary.
7. **Reproducibility:** Analysis code and data are publicly available (<https://github.com/lukisch/cfm-cosmology>).

8.2 Limitations and Open Questions

1. **Phenomenological character:** The CFM is not a fundamental theory. Although the tanh form can be motivated as the exact solution of the saturation ODE (A.5) and four alternative functional forms yield comparable results (Section 4.7), a derivation from a fundamental quantum equation is still outstanding.
2. **Parameter freedom:** Four effective parameters versus two in Λ CDM lead to a marginal BIC disadvantage ($\Delta\text{BIC} = +2.6$), which is however mitigated by the better cross-validation and the robustness across different functional forms.
3. **Phantom regime:** The effective equation-of-state parameter $w < -1$ lies in the phantom regime. As shown in Section 4.8, this leads in the CFM context neither to a Big Rip nor to instabilities, since Ω_Φ saturates and does not represent a physical field. Formally, the CFM violates the null energy condition, analogous to $f(R)$ gravity theories [11].
4. **Outstanding tests:** CMB predictions (ISW effect, CMB power spectrum), BAO signatures, and gravitational lensing effects remain to be computed. The analysis with the full covariance matrix (Section 4.4) does however confirm the results of the diagonal analysis.
5. **Microscopic basis:** What is Φ at the quantum level? The connection to a theory of quantum gravity is outstanding. The possible relationship to Finsler gravity (Section 6) could bridge this gap.

6. **H_0 tension:** The H_0 analysis (Section 4.9) shows $\Delta H_0 = +0.5$ km/s/Mpc between CFM and Λ CDM – too small to resolve the H_0 tension. A resolution requires the combination with CMB and BAO data.

8.3 Philosophical Implications

If the CFM (or a related model) is confirmed, this would have profound consequences:

- **Dark energy is not a “thing”:** It would be a geometric memory, not a physical field.
- **The universe “knows” about its beginning:** The geometry possesses a “memory.”
- **Paradigm shift:** From “What drives the acceleration?” to “Why did the expansion brake earlier?”

This would be comparable to the transition from “What drives the planets?” (Ptolemy: spheres) to “How do planets move in the geometry of space?” (Kepler, Newton, Einstein).

9 Conclusion and Outlook

This paper has shown:

1. A game-theoretic framework for cosmology – the Nash equilibrium between null space and space-time bubble – naturally leads to a model in which physical laws appear as emergent equilibrium conditions.
2. The resulting *Curvature Feedback Model* (CFM) explains accelerated expansion without dark energy and passes the test against 1,590 real Type Ia supernovae from the Pantheon+ catalog [19]: $\Delta\chi^2 = -12.2$ (diagonal) / -11.2 (full covariance matrix), $\Delta\text{AIC} = -8.2 / -7.2$, and better cross-validation.
3. The robust model selection (AIC, BIC, 5-fold cross-validation) shows that the better fit of the CFM is not attributable to overfitting. This is confirmed by four alternative functional forms, all yielding $\Delta\chi^2 \approx -9$ to -12 .
4. MCMC-based parameter uncertainties ($\Omega_m = 0.368 \pm 0.024$) and the phantom stability analysis (no Big Rip, asymptotically de Sitter) support the physical consistency.
5. The CFM makes testable predictions: a persistent phantom equation of state $w(z) < -1$ and a later acceleration transition ($z_{\text{acc}} = 0.52$ vs. 0.84 in Λ CDM), testable with Euclid and Roman within the next decade. Already now, the CFM prediction of an extended growth phase finds empirical support from JWST observations of unexpectedly massive galaxies at high redshifts [22, 23] and the statistically improbable existence of massive clusters such as El Gordo [24].
6. The convergence of three independent approaches (CFM, Finsler gravity, Cosmological Teleodynamics) points toward a possible paradigm shift: *dark energy as an independent entity may be superfluous*.

Next steps include: (a) testing against Planck CMB and DESI BAO data (the full Pantheon+ covariance matrix has already been taken into account), (b) computation of CMB power spectrum and structure growth predictions ($f\sigma_8$), (c) exploration of the connection between CFM and Finsler geometry, (d) development of a covariant formulation of $\Phi(a)$ from the Ricci scalar R , (e) investigation of quantum mechanical foundations of the curvature return potential, and (f) combination with local distance ladder data for direct H_0 determination.

Outlook: Unification with MOND – A universe without a dark sector? A particularly fascinating perspective opens up through the combination of the CFM with *Modified Newtonian Dynamics* (MOND) [26]. While the CFM eliminates dark energy as a geometric effect, MOND replaces dark matter through modified gravitational dynamics on galactic scales. Both frameworks converge on the prediction that structures form earlier and more efficiently than in Λ CDM – the CFM through an extended matter-dominated era ($z_{\text{acc}} = 0.52$), MOND through effectively stronger gravity at low accelerations [24]. A preliminary analysis with a purely baryonic universe ($\Omega_m = \Omega_b \approx 0.05$) and an extended geometric potential $\Omega_\Phi(a) = \Phi_0 \cdot f_{\tanh}(a) + \alpha \cdot a^{-\beta}$ yields $\Delta\chi^2 = -26.3$ and $\Delta\text{AIC} = -16.3$ relative to Λ CDM – *dramatically outperforming both the standard CFM and Λ CDM*. The MCMC posterior analysis yields $\beta = 2.02 \pm 0.20$, which corresponds exactly to the scaling of spatial curvature (a^{-2}). “Dark matter” would thus be a dynamic curvature effect, not a particle. This result requires a full relativistic treatment (e.g., within the AeST framework [27]) and will be analyzed in detail in a companion paper.

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