

Kosmologische Anomalien jenseits des Standardmodells Λ CDM

Executive Summary

Das kosmologische Standardmodell Λ CDM (kalte Dunkle Materie + kosmologische Konstante Λ innerhalb der Allgemeinen Relativitätstheorie) erklärt einen großen Teil der präzisen Datenlage bemerkenswert gut, insbesondere die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung (CMB) und viele großskalige Struktursignaturen. ¹ Gleichzeitig existieren mehrere „Anomalien“ – meist **Spannungen zwischen hochpräzisen Datensätzen** statt einzelne spektakuläre Messfehler –, die entweder zusätzliche Physik nahelegen oder auf schwer fassbare Systematiken hinweisen.

Am robustesten und am stärksten diskutiert sind:

- **Hubble-Spannung (H_0):** CMB-inferierte Werte um $\sim 67\text{--}68$ km/s/Mpc gegenüber lokalen Distanzleiter-Messungen um ~ 73 km/s/Mpc. ² Die Diskrepanz wird in der Literatur häufig als $>5\sigma$ -Problem (method- und dataset-abhängig) diskutiert und ist damit schwer als bloßer Zufall abzutun. ³
- **Spannungen in der Strukturbildung („ S_8/σ_8 “-Tension):** Schwache Gravitationslinsen (Cosmic Shear) bevorzugen tendenziell niedrigere Werte der Linsenamplitude S_8 als CMB-basierte Λ CDM-Fits; je nach Datensatz liegen typische Spannungen im Bereich $\sim 2\text{--}3\sigma$. ⁴
- **Hinweise auf dynamischere Dunkle Energie (mild):** Erste BAO-Ergebnisse aus DESI ⁵ (DR1) sind unter Λ CDM konsistent, zeigen aber in Kombinationen mit CMB und verschiedenen Supernova-Samples teils eine Präferenz für zeitvariable $w(z)$ -Modelle (je nach Kombination bis in den Bereich $\sim >3\sigma$ berichtet). ⁶

Daneben gibt es **kontroverse oder daten-/systematiklimitierte** Kandidaten:

- **Großwinklige CMB-Anomalien** (Ausrichtungen/Asymmetrien auf niedrigen Multipolen) sind seit WMAP/Planck bekannt, bleiben aber wegen A-posteriori-Statistik, Look-Elsewhere-Effekten und möglicher Systematiken schwer zu interpretieren. ⁷
- **„A_L“-Lensing-Anomalie in Planck** (phänomenologischer Lensing-Amplitudenparameter > 1) liegt im Bereich von $\sim 2\text{--}3\sigma$ und zeigt Abhängigkeiten von Frequenz/Maskierung/Scan-Geometrie, was systematische Erklärungen plausibel macht. ⁸
- **Kosmische Birefringenz** (Rotation der CMB-Polarisation) wurde in Planck-Daten in $\sim 2.4\sigma$ berichtet; die Interpretation ist stark kalibrationssensitiv und wird durch neue Daten (u. a. aus ACT/Planck-PR4-Analysen) aktiv getestet. ⁹
- **EDGES-21-cm-Absorption** (ungewöhnlich tiefer globaler 21-cm-Trog) ist entweder neue Physik oder unbekannte Systematik; es existieren substantielle methodische Kritiken und alternative Re-Analysen. ¹⁰
- **Unerklärte Röntgen-Spektrallinie bei ~ 3.5 keV** (Steril-Neutrino-Dunkle-Materie-Kandidat) wurde in gestapelten Clusterdaten und M31 diskutiert, aber hochauflösende Messungen (Hitomi/Perseus) setzten starke Einschränkungen; der heutige Status ist „uneindeutig/konfliktär“. ¹¹

Wichtig ist auch die „Negativ-Anomalie“: **Die Pioneer-Anomalie** gilt mittlerweile als durch anisotrope thermische Abstrahlung erklärbar – ein Lehrstück dafür, wie scheinbar fundamentale Abweichungen durch detaillierte Systematikmodellierung verschwinden können. ¹²

Im weiteren Bericht werden (i) die wichtigsten aktuellen Phänomene, (ii) zugehörige Messinstrumente/ Daten, (iii) Theorieklassen jenseits/ergänzend zu Λ CDM, (iv) eine methodische Bewertung und (v) konkrete priorisierte Tests/Experimente strukturiert zusammengeführt.

Ausgangspunkt: Λ CDM und was als „nicht erklärbar“ gilt

Λ CDM ist ein minimal-parametrisches, empirisch stark gestütztes Modell: Seine Parameter werden vor allem durch CMB-Anisotropien, BAO und großskalige Strukturdaten fixiert. In den finalen Planck ¹³ - Analysen sind die Daten mit einem sechsparemetrigen, flachen Λ CDM-Fit weitgehend konsistent; zugleich werden einzelne Spannungen (z. B. H_0 , A_L) explizit als offene Punkte diskutiert. ¹⁴

Im Kontext „nicht durch das Standardbild erklärbar“ sind drei Kategorien analytisch hilfreich:

- 1) **Persistente Parameter-Spannungen:** Zwei robuste Messprogramme (mit unterschiedlichen Systematiken) liefern inkompatible Parameterwerte (Beispiel H_0). ¹⁵
- 2) **Phänomenologische Residuen/Anomalie-Statistiken:** Die Daten zeigen systematische Abweichungen von Fit-Residuen oder ungewöhnliche Statistik (Beispiel Planck A_L ; großwinklige CMB-Anomalien). ¹⁶
- 3) **Unerklärte Astrophysik/Signalsuche:** Das Phänomen selbst ist real, aber Ursprung/Mechanismus offen (Beispiel schnelle Radioblitz/FRBs) – das ist nicht zwingend ein Λ CDM-Bruch, kann aber neue Teilchen/Wechselwirkungen berühren (Beispiel 3.5 keV). ¹⁷

Zentrale Phänomene und Stand der Evidenz

Vergleichstabelle der wichtigsten Fälle

Phänomen	Kurzbeschreibung	Typische Größenordnung / Signifikanz (Literatur)	Primäre Datenträger/ Analysen	
Hubble-Spannung (H_0)	CMB-inferiertes H_0 vs lokale Distanzleiter	$\sim 67\text{--}68$ vs ~ 73 km/s/Mpc; häufig als $>5\sigma$ diskutiert (methodabhängig)	Planck- Λ CDM-Fit $H_0=67.4\pm 0.5$ ¹⁸ ; lokale Distanzleiter $H_0=73.04\pm 1.04$ ¹⁹	S P P k
„Zwischenmethoden“- H_0 (TRGB)	Alternative Distanzleiter über Tip of the Red Giant Branch	$H_0 \approx 69.8$ mit separaten Statistik/ Systematikanteilen	TRGB-basierte H_0 -Bestimmung ~ 69.8 ²¹	T B n re v

Phänomen	Kurzbeschreibung	Typische Größenordnung / Signifikanz (Literatur)	Primäre Datenträger/ Analysen	S
Time-delay Cosmography	H_0 aus Zeitverzögerungen stark gelinster Quasare	Beispiel: $H_0=73.3_{-1.8}^{+1.7}$ (flaches Λ CDM)	H0LiCOW XIII ²³	H m U S u K li d E
Standard Sirens (GW)	H_0 direkt aus Gravitationswellenentfernungen	GW170817 „bright siren“; jüngere „dark siren“-Kombinationen noch breit	GW170817 Standard-Siren- H_0 ²⁵ ; neuere Dark-Siren-Kombinationen (Beispiel) ²⁶	M w (n U V
S_8 -/ σ_8 -Spannung	Cosmic Shear bevorzugt geringere Strukturbildung als CMB	typ. $\sim 2-3\sigma$ je nach Survey/Analyse	KIDS-1000: $S_8 \approx 0.759$ ²⁸ ; DES Y3 cosmic shear $S_8 \approx 0.759-0.772$ ²⁹ ; HSC Y3 $S_8 \approx 0.776$ ³⁰ vs Planck- Λ CDM $\sigma_8=0.811$, $\Omega_m=0.315$ ¹⁸	R s S P B e
DESI: Hinweis auf $w(z) \neq -1$	BAO+Kombinationen bevorzugen teils dynamische Dunkle Energie	je nach SN-Sample bis $\sim 3-4\sigma$ berichtet	DESI DR1 BAO Kosmologie: dynamische-DE-Präferenzen in bestimmten Kombinationen ³² ; Interpretation/Reviews ³³	A k K o s u B
Planck A_L-Anomalie	Phänomenologischer Lensing-Amplitudenparameter >1 in CMB-Spektren	$\sim 2-3\sigma$; abhängig von Frequenz/Maskierung/ Ekliptik	Neu-Analysen der Planck-TT Daten und Frequenzabhängigkeiten ³⁴ ; ältere Statusdiskussion ³⁵	V s f a g
Großwinklige CMB-Anomalien	Niedrig- ℓ Ausrichtungen, hemisphärische Asymmetrie etc.	„Anomalien“ bestätigt, Interpretation statistisch schwierig	Planck „Isotropy and Statistics“ bestätigt das Fortbestehen ³⁶	I (A E p p

Phänomen	Kurzbeschreibung	Typische Größenordnung / Signifikanz (Literatur)	Primäre Datenträger/ Analysen	
Kosmische Radio-Dipol-Anomalie	Dipol in Radioquellen-Zählstatistik größer als erwartet	Richtung ~CMB-Dipol, Amplitude teils größer; lokale Kontamination relevant	Bayesian Analysen NVSS/RACS etc. ³⁷ ; A&A-Analyse ³⁸ ; RMP-Colloquium ³⁹	S M S a K F Q
Kosmische Birefringenz	Rotation der CMB-Polarisation, evtl. Paritätsverletzung/Axionen	Planck-Analyse: $\beta \approx 0.35^\circ \pm 0.14^\circ$ ($\sim 2.4\sigma$)	Planck-basierte Extraktion ⁴¹ ; weitere Constraints PR4/Multifrequenz ⁴² ; ACT-Analysen ⁴³	S P is
EDGES 21-cm global signal	Trog bei 78 MHz mit ~ 0.5 K Tiefe (zu groß für Standardmodelle)	„>2× tiefer“ als Standardvorhersagen; starke Systematikdebatte	EDGES-Detektion ⁴⁵ ; Kritik an Modellierung ⁴⁶ ; Bayesian Re-Analysen ⁴⁷	K v In S B e
3.5-keV-Röntgenlinie	Schwache Linie, DM-Zerfall (Sterilneutrino) möglich	Detektionen vs Nicht-Dektionen; starke Umgebungsabhängigkeit	Cluster-Stacking mit XMM-Newton ⁴⁹ ⁵⁰ ; M31/Perseus-Analysen ⁵¹ ; hochauflösendes Hitomi ⁵² (Perseus) ⁵³	U h S A re
Schnelle Radioblitze (FRBs)	Millisekunden-Radioblitze extragalaktischen Ursprungs	Ursprung teils magnetarisch plausibel, aber Populationsmix offen	Entdeckung ⁵⁵ ; großer Katalog ⁵⁶	A o A a s Z
Pioneer-Anomalie	Scheinbar unerklärte zusätzliche Sonnen-gerichtete Beschleunigung	später konsistent mit thermischer Rückstoßkraft	Thermalerklärungsarbeit ¹²	V d W (S
UAPs (falls relevant)	Heterogene Beobachtungen „Unidentified Anomalous Phenomena“	Datenqualität/ Metadaten/ Instrumentierung oft unzureichend	NASA ⁵⁹ Independent Study Team Report ⁶⁰ ; All-domain Anomaly Resolution Office ⁶¹ Historical Record Report Vol. 1 ⁶²	N a re s F o m

Diagramme: H_0 - und S_8 -Landschaft (indikativ)

```
xychart-beta
  title "H0 nach Methode (km/s/Mpc)"
  x-axis ["Planck CMB", "DESI BAO+BBN", "TRGB", "Time-delay Lenses",
"Lokale Distanzleiter"]
  y-axis "H0" 65 --> 75
  bar [67.4, 68.52, 69.8, 73.3, 73.04]
```

Die dargestellten Werte basieren auf: Planck- Λ CDM $H_0=67.4\pm0.5$ ¹⁸; DESI DR1 BAO (+BBN prior + CMB acoustic scale) $H_0=68.52\pm0.62$ ³²; TRGB-basierte Bestimmung $H_0\approx69.8$ (mit separaten stat./sys. Anteilen) ²¹; Time-delay Cosmography (H0LiCOW) $H_0=73.3_{-1.8}^{+1.7}$ ²³; lokale Distanzleiter (Cepheid-SN, SH0ES) $H_0=73.04\pm1.04$ ¹⁹.

```
xychart-beta
  title "S8 aus Cosmic Shear vs CMB (indikativ)"
  x-axis ["Planck- $\Lambda$ CDM", "KiDS-1000", "DES Y3 cosmic shear", "HSC Y3"]
  y-axis "S8" 0.72 --> 0.86
  bar [0.834, 0.759, 0.759, 0.776]
```

Der Planck-Balken ist aus σ_8 und Ω_m des Planck- Λ CDM-Fits abgeleitet ($\sigma_8=0.811$, $\Omega_m=0.315$), was $S_8\approx0.834$ ergibt. ¹⁸ KiDS-1000 liefert $S_8=0.759_{-0.021}^{+0.024}$. ²⁸ DES Y3 cosmic shear berichtet $S_8\approx0.759_{-0.023}^{+0.025}$ (fiduzial) bzw. $0.772_{-0.017}^{+0.018}$ (optimierte Cuts). ²⁹ HSC Y3 findet $S_8=0.776_{-0.033}^{+0.032}$ ³⁰.

Zeitachse wichtiger Anomalie-Linien

```
timeline
  title Historische Entwicklung ausgewählter kosmologischer "Anomalien"
  1978 : Flache Galaxien-Rotationskurven (Rotation-Curve-Ära)
  1983 : MOND als Alternative zur Dunklen Materie vorgeschlagen
  1998 : Beschleunigte Expansion aus SN-Ia-Distanzrelationen
  2006 : Bullet-Cluster-Lensing als starkes Indiz für nicht-baryonische
Masse
  2007 : Erster FRB in Archivdaten identifiziert
  2012 : Pioneer-Anomalie durch thermischen Rückstoß gestützt
  2014 : 3.5-keV-Linie als möglicher DM-Zerfall diskutiert
  2018 : Planck-Endergebnisse; EDGES meldet globales 21-cm-
Absorptionssignal
  2019 : EDE als prominente H0-Lösung; präzisere Time-delay H0-Messungen
  2020 : Planck-basierte  $\sim 2.4\sigma$  kosmische Birefringenz-Extraktion
  2024 : DESI DR1 BAO; Planck A_L erneut systematik-fokussiert untersucht
  2025 : Erste große Euclid-Datenfreigabe; Review zur kosmischen Dipol-
Anomalie
```

Zu den genannten Eckpunkten: Rotationskurven-Arbeiten ⁶⁴; MOND-Ursprung ⁶⁵; Bullet-Cluster-Lensing ⁶⁶; FRB-Entdeckung ⁵⁵; Pioneer thermisch ⁵⁸; 3.5-keV Linie ⁶⁷; Planck-Endergebnisse

18 ; EDGES 45 ; EDE 68 ; Time-delay H_0 23 ; Birefringenz 44 ; DESI BAO 32 ; A_L-Analyse 34 ; Euclid Datenfreigabe 69 ; Dipol-Review 39 .

Messdaten und Beobachtungsinstrumente

Viele der oben genannten Spannungen entstehen nicht aus „einer“ Messung, sondern aus dem **Zusammenspiel**: CMB (frühes Universum) vs Distanzleiter/Strukturdaten (spätes Universum), plus Zwischenmethoden (BAO, Lensing, Standard Sirens). 70

Vergleichstabelle: zentrale Messprogramme, Stärken, typische Systematiken

Messprogramm / Instrument	Gemessene Schlüsselgrößen	Relevante Anomalien/ Spannungen	Systematik-Hauptachsen (Beispiele)	Primärquellen/Datenanker
Atacama Cosmology Telescope 71	CMB (T,E,B), CMB-Lensing, Parameterfits	H_0 -Konsistenztests (CMB), Lensing-Amplitude, Birefringenz	Foregrounds, Polarisation-Kalibration, Beam/Noise-Modell, Maskierung	DR6 Lensing Map & Parameter 72
CMB via Planck (Legacy)	CMB-Primäranisotropien, Lensing-Rekonstruktion	H_0 (early), A_L, großwinkl. Anomalien	Scan-Strategie, Frequenz-Foregrounds, Masken, absolute Polarisation	Planck Parameter 18 ; Isotropy/Statistics 36 ; A_L-Revisit 34
Distanzleiter: Hubble Space Telescope 73 + Gaia 74	Cepheid-Parallaxen, SN-Ia Kalibrierung $\rightarrow H_0$	H_0 (late)	Parallax-Zeropoint, Photometrie-/Blend-Korrekturen, Extinktion/ Metallizität, SN-Standardisierung	Gaia EDR3 Cepheid-Kalibrierung 75 ; SH0ES- H_0 19
BAO/Clustering: DESI	D_M/r_d , D_H/r_d in z-Bins; Expansion $H(z)$	DE-Dynamik-Hinweise, H_0 -Konsistenz	Auswahlfunktionen, Quasar/Ly α -Systematiken, Rekonstruktion, Modellannahmen in Kombinationsfits	DESI DR1 BAO Kosmologie 32
Weak Lensing: DES/KiDS/HSC (Stage III)	Cosmic Shear 2pt, 3x2pt $\rightarrow S_8, \Omega_m, w$	S_8 -Spannung; teils w-Constraints	Shear-Kalibration, Photo-z, Intrinsic Alignments, Baryonen/Nonlinearität	KiDS-1000 S_8 28 ; DES Y3 S_8 76 ; HSC Y3 S_8 30 ; IA-Review 77
Euclid 78 (Stage IV)	Wide-area Lensing + Clustering, große Galaxienstatistik	Entscheidende Tests für S_8 /DE; Systematik-Reduktion	PSF-Stabilität, Photometrie, Redshift-Inferenz, Datenpipeline	Mission-Overview 79 ; erste große Datenfreigabe 19.03.2025 80

Messprogramm / Instrument	Gemessene Schlüsselgrößen	Relevante Anomalien/ Spannungen	Systematik-Hauptachsen (Beispiele)	Primärquellen/Datenanker
James Webb Space Telescope ⁸¹	Hoch-z Galaxien/ SEDs → frühe Strukturbildung	Debatte: „zu frühe massive Galaxien?“	Stellar-Population-Modelle, Staub, Linsenmagnifikation, Massen-to-Light	Tension-Claim ⁸² ; Gegenargument/ Simulationen ⁸³
LIGO ⁸⁴ + Virgo ⁸⁵ + KAGRA ⁸⁶	Standard Sirens: Entfernungen (GW) + Rotverschiebungen/ Kataloge → H_0	Unabhängiger H_0 -Schiedsrichter	Galaxy-Katalogvollständigkeit (dark sirens), Inclination-Entartung, Peculiar Velocities	GW170817 Standard siren ²⁵ ; O4a+Kombinationsbeispiel ⁸⁷ ; LVK-Whitepaper ²⁷
X-ray Spektroskopie: Hitomi/XMM	Feine Linien → DM-Zerfall/Plasma	3.5-keV-Linie	Instrumentlinien, Atomphysik, Temperaturstruktur, Hintergrund	Cluster-Stacking ⁵⁰ ; Hitomi-Constraint ⁵³
EDGES ⁸⁸ / HERA	Globales 21-cm Signal / 21-cm-Powerspektrum	EDGES-Anomalie, frühe Heiz-/ Kopplungsphysik	Foreground-Subtraktion, Beam-Modell, RFI, Kopplung/Mutual Coupling	EDGES Nature 2018 ⁴⁵ ; Kritik ⁴⁶ ; HERA Phase II first limits ⁸⁹
FRB-Surveys: CHIME/ASKAP	Dispersion Measure, Lokalisierungen, Populationsstatistik	FRB-Ursprung; Baryonen-Zensus	Auswahlfunktionen, Lokalisierungsbias, Plasma-Modelle	CHIME-Katalog ⁵⁶ ; Baryonen-Zensus ⁵⁷

Modelle und Theorieklassen, die Λ CDM herausfordern oder ergänzen

Die Erklärungskandidaten lassen sich in „**Neue Physik**“, „**Modell-Extensions**“ und „**Systematik-/Astrophysik-Hypothesen**“ gliedern. In der Praxis müssen erfolgreiche Modelle **mehrere Datensätze gleichzeitig** erklären, ohne anderswo neue Spannungen zu erzeugen (insbesondere zwischen CMB, BAO, Lensing und Galaxien-Clustering). ⁹⁰

Vergleichstabelle: Modellklassen vs Ziele, Vorhersagen, Stress-Tests

Modellklasse	Primäres Ziel (welche Anomalien?)	Kernidee / Mechanismus	Typische „Make-or-break“-Tests	Zentrale Schwierigkeiten / Risiken
Frühe Dunkle Energie (EDE)	H_0 -Spannung	Temporäre Zusatzenergie vor/ um Rekombination → kleinerer Schallhorizont r_d → höheres inferred H_0	Präzise CMB+LSS Fits; Matter-Power auf kleinen Skalen; BAO+Lensing Konsistenz	Kann σ_8/S_8 erhöhen und dadurch LSS-Spannungen verschärfen; Bedarf feiner Abstimmung je nach Implementierung ⁹¹
Dynamische Dunkle Energie (w_0-w_a)	DESI+SN/CMB Präferenzen	$w(z)$ von -1 abweichend, zeitvariabel	Unabhängige Supernova-Kalibration; BAO in vielen z -Bins; Stage-IV Lensing/ Clustering	Kombinationen können empfindlich auf Systematiken/ Datensatzwahl sein; Gefahr „Kombinationsartefakt“ ⁶
Zusätzliche relativistische Freiheitsgrade / Neutrino-Physik	H_0 (partiell), ggf. r_d	Erhöht frühe Expansionsrate	CMB Damping tail, BBN-Konsistenz, BAO-Kompression	In Planck+BAO stark eingeschränkt; oft nicht ausreichend allein ⁹²
Interagierende dunkle Sektoren (DM–DE, DM self-interactions)	S_8 -Spannung, small-scale Strukturanomalien	Dämpft Wachstum/ ändert Halo-Kerne/ Shapes	Cluster-Lensing/ Shapes; Satellitenkinematik; CMB-Lensing Kreuzkorrelationen	Degeneriert mit baryonischer Physik; erfordert konsistente, testbare Mikrophysik ⁹³
Fuzzy/ ultraleichte Axion-DM	Small-scale Probleme (cusp-core, Satelliten)	Wellencharakter → Suppression kleiner Skalen	Lyman- α Forest, Halo-Kernprofile, Lensing-Substruktur	Lyman- α setzt starke Grenzen; Modellraum eingeschränkt ⁹⁴
Modifizierte Gravitation (MOND, relativistische MOND-Theorien)	Galaxien-Rotationen / RAR; evtl. großskalige Konsistenz	Änderung effektiver Dynamik/ Gravitation bei sehr kleinen Beschleunigungen	Lensing in Clustern, CMB+Matter Power, Wide Binaries, GW-Propagation	Cluster & kosmologische Tests historisch schwierig; es existieren moderne relativistische Ansätze, die explizit CMB/LSS adressieren ⁹⁵

Modellklasse	Primäres Ziel (welche Anomalien?)	Kernidee / Mechanismus	Typische „Make-or- break“-Tests	Zentrale Schwierigkeiten / Risiken
Kosmologische Inhomogenitäten („local void“)	H_0 -Spannung (lokal)	Lokale Unterdichte → lokal höheres H_0	SN- Raumverteilung, N- body Kosmische Varianz, Bulk flows	Quantitativ meist „nicht leer genug“ in Λ CDM; Lösung erfordert extrem tiefe/ weite Voids oder modifizierte Strukturentstehung 96
Systematiken / unbekannte Astrophysik	praktisch alle Spannungen	Kalibrierung, Foregrounds, Auswahlfunktionen, baryonische Feedbacks	Cross-Survey Replikation, Blind Analysen, Simulations- basierte End-to- End Tests	Schwer zu falsifizieren; erfordert oft neue Instrumente/ Datendesigns; dennoch historisch häufig die Erklärung (Pioneer) 97

Methodische Bewertung: Signifikanz, Reproduzierbarkeit, Bias-Quellen

Statistik und „Signifikanz“ in der Praxis

Bei kosmologischen Spannungen ist „ σ “ selten eine einfache p-Wert-Aussage: Parameter-Spannungen hängen von (i) Modellraum (Λ CDM vs Extension), (ii) Datensatzkombinationen, (iii) Prioren und (iv) Kovarianzen ab. Die DESI-BAO-Arbeit illustriert dies explizit: Unter flachem Λ CDM sind die BAO-Daten allein konsistent; die stärkeren Abweichungen treten in bestimmten Kombinationen mit Supernova-Samples und w_0 - w_a -Parametrisierung auf. 32

Bei großwinkligen CMB-Anomalien ist die Signifikanz zusätzlich durch **A-posteriori-Definition** und Look-Elsewhere-Effekte entwertbar: Planck bestätigt das Fortbestehen mehrerer „Anomalien“, betont aber zugleich die Schwierigkeit einer eindeutigen Interpretation im Rahmen hypothesengetriebener Statistik. 36

Reproduzierbarkeit und „Cross-Calibration“

- **H_0 :** Reproduzierbarkeit ist hier nicht „gleiche Methode, gleicher Wert“, sondern „unabhängige Methoden konvergieren“. Aktuell ist das Bild gemischt: Time-delay Cosmography liegt in einzelnen Analysen nahe bei ~ 73 , TRGB näher bei ~ 70 , BAO/CMB näher bei ~ 68 . 98 Standard-Sirens sind als konzeptuell unabhängiger Schiedsrichter vielversprechend, aber noch nicht in der Präzisionsregime, die H_0 allein entscheiden würde (wobei die Entwicklung dynamisch ist). 99
- **S_8 :** Cosmic-Shear-Ergebnisse verschiedener Surveys liegen untereinander relativ konsistent im Bereich $S_8 \sim 0.76$ – 0.78 , und unter Planck-inferiertem $S_8 \sim 0.83$; die resultierende Spannung ist real, aber stark abhängig von Modellierung (IA, Baryonen, Photo-z). 100

Plausible Bias-/Systematikpfade (ausgewählte Beispiele)

- **CMB-Lensing A_L**: Dass A_L mit Frequenz (insb. 217 GHz), Maskierung und ekliptischer Breite variiert, ist ein starkes Indiz dafür, dass zumindest ein Teil der Anomalie aus nicht-randomisierten Effekten (Scan-Strategie, Foregrounds) stammt. ³⁴
- **Cosmic Shear**: Intrinsic Alignments sind seit langem als dominanter astrophysikalischer Störterm bekannt; falsche oder zu starre IA-Modelle können S₈ verschieben. ¹⁰¹
- **EDGES (global 21-cm)**: Kritiken zeigen, dass Foreground-Parameter in einigen Fits „unphysikalisch“ werden können und dass alternative Signalformen ebenfalls passen, was die Eindeutigkeit der Detektion in Frage stellt. ⁴⁶ Bayesian Kalibrationsrahmen versuchen explizit, Receiver-Kalibration, Foregrounds und Signal gemeinsam zu inferieren. ⁴⁷
- **Radio-Dipol**: Lokale Radioquellen, Katalogtiefe, Maskierung und Flux-Kalibration sind entscheidend; neuere bayesische Ansätze betonen, dass lokale Kontamination den Dipol reduziert, aber oft nicht vollständig. ¹⁰²
- **Pioneer**: Die thermische Erklärung basiert auf detaillierten Thermalmodellen, die Telemetrie als Randbedingungen nutzen – ein Lehrbeispiel für „unsichtbare“ Engineering-Systematiken. ¹⁰³

Forschungsstand, Kontroversen und priorisierte Tests

Was gilt als „heiß“ und entscheidungsreif?

H₀ und S₈ bleiben die entscheidungsreifesten Spannungen, weil sie auf großen, unabhängigen Datenprogrammen basieren und weil konkrete, testbare Modellklassen existieren. ¹⁰⁴ Bei **DESI-„evolving DE“** ist der Status 2026: spannend, aber stark kombinationsgetrieben; die Robustheit gegenüber unabhängigen Supernova-Kalibrationen und Stage-IV-Konsistenztests ist der Engpass. ⁶

Bei **kosmischer Birefringenz** ist die Kernkontroverse, ob die verbleibende Rotation tatsächlich kosmologisch ist oder aus residuärer Kalibration stammt; der entscheidende Pfad ist multi-frequente, instrumentübergreifende Polarisierung mit sauberer absoluter Winkelkalibration. ⁹

Konkrete, kurzfristig-realistische Experimente/Beobachtungen (priorisiert)

Entscheidende Tests für H₀: 1) **Standard Sirens skalieren**: Größere Stichproben aus LVK-Läufen + bessere Galaxienkataloge und Modellierung der Peculiar Velocities, um Richtung <2–3% H₀-Präzision zu gehen. ¹⁰⁵

2) **Distanzleiter-Redundanz erhöhen**: Cepheid-Kalibration mit Gaia fortschreiben und parallel TRGB/JAGB/weitere Indikatoren in denselben SN-Hostgalaxien konsistent verankern, um „shared systematics“ zu minimieren. ¹⁰⁶

3) **Time-delay Cosmography industrialisieren**: Größere, homogenere Linsensamples (künftige Wide surveys) plus standardisierte Modellierungsbenchmarks, um Modellierungsstreuung transparent zu machen. ¹⁰⁷

Entscheidende Tests für S₈ / Wachstum: - **Stage-IV Weak Lensing + Clustering**: Euclid ¹⁰⁸ ist mit mission-spezifischer PSF-Stabilität und riesiger Statistik ein Schlüssel; die erste große Datenfreigabe (19.03.2025) ist ein Startpunkt, und größere Releases (u. a. 2026) sollen den Hebel massiv erhöhen. ¹⁰⁹
- **CMB-Lensing als Brücke**: ACT DR6 liefert hoch-signifikante Lensingmessungen; Cross-Correlationen CMB-Lensing × Galaxienlensing können Systematiken entkoppeln. ¹¹⁰

Entscheidende Tests für „EDGES/21-cm“: - **Unabhängige Replikation + Power-Spectrum Limits**: Die Kontroverse ist nur mit unabhängigen global-signal Experimenten und robusten 21-cm-Powerspektrenentscheidungen zu lösen. HERA Phase II berichtet erste Limits und identifiziert Mutual

Coupling als dominantes Systematikthema – genau die Art Detail, die eine EDGES-ähnliche Behauptung entweder stützt oder entkräftet. ¹¹¹

- **SKA-Low als Langfristhebel:** Der Baufortschritt und Science-Timeline der SKA-Observatorien ist relevant, weil SKA-Low prinzipiell das 21-cm-Feld in eine präzise Ära bringen kann. ¹¹²

Entscheidende Tests für 3.5-keV und ähnliche Spektralsignaturen: - **Hochauflösende X-ray Spektroskopie:** Hitomi zeigte bereits, wie stark hochauflösende Linienphysik die Interpretation kippen kann. ⁵³ Die Nachfolgeinstrumentierung wird nun zentral: XRISM ¹¹³ hat First-Light/Operations-Updates und eine begleitende Missionsbeschreibung; damit werden systematikärmere Linien-Constraints realistischer. ¹¹⁴ Für die 2030er ist Athena ¹¹⁵ als Sprung in Sensitivität/Auflösung geplant. ¹¹⁶

Kurzfazit: welche „Anomalien“ sind am ehesten echte neue Physik?

- **Am ehesten „fundamental“ (falls nicht systematisch):** H_0 -Spannung, weil sie eine frühe-vs-späte-Universe Inkonsistenz in einer Kernskala anzeigt, und weil plausible neue Physik (z. B. EDE) existiert, die jedoch harte Konsistenztests bestehen muss. ¹¹⁷
- **Am ehesten „systematikgetrieben“:** Planck A_L , weil Frequenz-/Masken-/Ekliptikabhängigkeiten stark auf nichtkosmische Effekte zeigen. ³⁴
- **Am ehesten „noch unentschieden“:** EDGES und 3.5-keV-Linie – beide sind prinzipiell neue Physik, aber beide sind mess- und modellierungsanfällig und werden durch kommende Instrumente voraussichtlich entscheidbar. ¹¹⁸

¹ ² ¹⁴ ¹⁵ ¹⁸ ⁵⁹ ⁷⁰ ⁹² Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters

https://arxiv.org/abs/1807.06209?utm_source=chatgpt.com

³ ¹⁹ ²⁰ ¹⁰⁴ [2112.04510] A Comprehensive Measurement of the Local ...

https://arxiv.org/abs/2112.04510?utm_source=chatgpt.com

⁴ ²⁸ ⁷¹ ¹⁰⁰ KiDS-1000 Cosmology: Cosmic shear constraints and comparison between two point statistics

https://arxiv.org/abs/2007.15633?utm_source=chatgpt.com

⁵ ³⁷ ⁴⁰ ⁸⁶ ¹⁰² Bayesian approach to the cosmic dipole in radio galaxy surveys

https://academic.oup.com/mnras/article/531/4/4545/7688468?utm_source=chatgpt.com

⁶ ³² ⁷³ DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations

https://arxiv.org/abs/2404.03002?utm_source=chatgpt.com

⁷ ¹³ ³⁶ ⁶¹ ⁸⁸ Planck 2018 results. VII. Isotropy and Statistics of the CMB

https://arxiv.org/abs/1906.02552?utm_source=chatgpt.com

⁸ ¹⁶ ³⁴ Revisiting the A_L Lensing Anomaly in Planck 2018 Temperature Data

https://arxiv.org/abs/2310.03127?utm_source=chatgpt.com

⁹ ⁴¹ ⁴⁴ ⁷⁸ New Extraction of the Cosmic Birefringence from the Planck ...

https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.125.221301?utm_source=chatgpt.com

¹⁰ ⁴⁵ ⁴⁸ ⁸¹ ¹¹⁸ An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky- ...

https://www.nature.com/articles/nature25792?utm_source=chatgpt.com

¹¹ ⁵⁰ ⁶⁷ Detection of an Unidentified Emission Line in the Stacked ...

https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014ApJ...789...13B/abstract?utm_source=chatgpt.com

- 12 58 97 115 Support for the Thermal Origin of the Pioneer Anomaly
https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.108.241101?utm_source=chatgpt.com
- 17 56 74 [2106.04352] The First CHIME/FRB Fast Radio Burst Catalog
https://arxiv.org/abs/2106.04352?utm_source=chatgpt.com
- 21 22 The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch
https://arxiv.org/abs/1907.05922?utm_source=chatgpt.com
- 23 84 98 [1907.04869] H0LiCOW XIII. A 2.4% measurement of H_0 from lensed quasars: 5.3σ tension between early and late-Universe probes
<https://arxiv.org/abs/1907.04869>
- 24 TDCOSMO - I. An exploration of systematic uncertainties in ...
https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2020/07/aa37351-19/aa37351-19.html?utm_source=chatgpt.com
- 25 A gravitational-wave standard siren measurement of the ...
https://www.nature.com/articles/nature24471?utm_source=chatgpt.com
- 26 87 99 A dark standard siren measurement of the Hubble constant following LIGO/Virgo/KAGRA O4a and previous runs
https://arxiv.org/abs/2404.16092?utm_source=chatgpt.com
- 27 105 The LSC-Virgo-KAGRA Observational Science White Paper ...
https://dcc.ligo.org/public/0190/T2300406/001/wp-obs-2024_v1.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 29 76 Dark Energy Survey Year 3 Results: Cosmology from Cosmic Shear and Robustness to Modeling Uncertainty
https://arxiv.org/abs/2105.13544?utm_source=chatgpt.com
- 30 [2304.00701] Hyper Suprime-Cam Year 3 Results: Cosmology from Cosmic Shear Power Spectra
<https://arxiv.org/abs/2304.00701>
- 31 52 77 101 The intrinsic alignment of galaxies and its impact on weak ...
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0370157314003974?utm_source=chatgpt.com
- 33 Interpreting DESI's evidence for evolving dark energy
https://arxiv.org/pdf/2404.08056?utm_source=chatgpt.com
- 35 arXiv:1712.08758v3 [astro-ph.CO] 16 Jul 2018
https://arxiv.org/pdf/1712.08758?utm_source=chatgpt.com
- 38 The cosmic radio dipole: Bayesian estimators on new and ...
https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2023/07/aa46210-23/aa46210-23.html?utm_source=chatgpt.com
- 39 Colloquium: The cosmic dipole anomaly | Rev. Mod. Phys.
https://link.aps.org/doi/10.1103/9ygx-z2yq?utm_source=chatgpt.com
- 42 Frequency-dependent constraints on cosmic birefringence ...
https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2022/06/aa43269-22/aa43269-22.html?utm_source=chatgpt.com
- 43 Cosmic Birefringence from the Atacama Cosmology ...
https://arxiv.org/html/2509.13654v1?utm_source=chatgpt.com
- 46 [1805.01421] Concerns about Modelling of the EDGES Data
https://arxiv.org/abs/1805.01421?utm_source=chatgpt.com
- 47 A Bayesian calibration framework for EDGES - Oxford Academic
https://academic.oup.com/mnras/article/517/2/2264/6701648?utm_source=chatgpt.com

- 49 75 106 Cosmic Distances Calibrated to 1% Precision with Gaia EDR3 ...
https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021ApJ...908L...6R/abstract?utm_source=chatgpt.com
- 51 Unidentified Line in X-Ray Spectra of the Andromeda Galaxy ...
https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.113.251301?utm_source=chatgpt.com
- 53 Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus ...
https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017ApJ...837L..15A/abstract?utm_source=chatgpt.com
- 54 108 114 X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission - Oxford Academic
https://academic.oup.com/pasj/article/77/Supplement_1/S1/8111461?utm_source=chatgpt.com
- 55 A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin
https://www.science.org/doi/10.1126/science.1147532?utm_source=chatgpt.com
- 57 A census of baryons in the Universe from localized fast ...
https://www.nature.com/articles/s41586-020-2300-2?utm_source=chatgpt.com
- 60 63 Independent Study Team Report
https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/09/uap-independent-study-team-final-report.pdf?utm_source=chatgpt.com
- 62 AARO Historical Record Report Volume 1
https://media.defense.gov/2024/Mar/08/2003409233/-1/-1/0/DOPSR-CLEARED-508-COMPLIANT-HRRV1-08-MAR-2024-FINAL.PDF?utm_source=chatgpt.com
- 64 Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV
https://adsabs.harvard.edu/full/1978ApJ...225L.107R?utm_source=chatgpt.com
- 65 95 A modification of the Newtonian dynamics as a possible ...
https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1983ApJ...270..365M/abstract?utm_source=chatgpt.com
- 66 Catching a bullet: direct evidence for the existence of dark matter
https://arxiv.org/abs/astro-ph/0611496?utm_source=chatgpt.com
- 68 85 91 117 Early Dark Energy can Resolve the Hubble Tension
https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.221301?utm_source=chatgpt.com
- 69 80 109 Euclid opens data treasure trove, offers glimpse of deep ...
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Euclid/Euclid_opens_data_treasure_trove_offers_glimpse_of_deep_fields?utm_source=chatgpt.com
- 72 113 [2304.05203] The Atacama Cosmology Telescope: DR6 ...
https://arxiv.org/abs/2304.05203?utm_source=chatgpt.com
- 79 [2405.13491] Euclid. I. Overview of the Euclid mission
https://arxiv.org/abs/2405.13491?utm_source=chatgpt.com
- 82 JWST early Universe observations and Λ CDM cosmology
https://arxiv.org/abs/2309.13100?utm_source=chatgpt.com
- 83 No Tension: JWST Galaxies at $z > 10$ Consistent with ...
https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023OJAp....6E..47M/abstract?utm_source=chatgpt.com
- 89 111 First Results from HERA Phase II
https://arxiv.org/abs/2511.21289?utm_source=chatgpt.com
- 90 Early Dark Energy Does Not Restore Cosmological Concordance
https://arxiv.org/abs/2003.07355?utm_source=chatgpt.com
- 93 Astrophysical tests of dark matter self-interactions
https://link.aps.org/doi/10.1103/m2vm-59y3?utm_source=chatgpt.com

- 94 **Small-scale structure of fuzzy and axion-like dark matter**
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014664102030034X?utm_source=chatgpt.com
- 96 **Not empty enough: a local void cannot solve the H_0 tension**
https://arxiv.org/abs/2309.05749?utm_source=chatgpt.com
- 103 **Support for the thermal origin of the Pioneer anomaly**
https://arxiv.org/abs/1204.2507?utm_source=chatgpt.com
- 107 **Time-Delay Cosmography: Measuring the Hubble Constant ...**
https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11182856/?utm_source=chatgpt.com
- 110 **A Measurement of the DR6 CMB Lensing Power Spectrum ...**
https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024ApJ...962..112Q/abstract?utm_source=chatgpt.com
- 112 **The construction journey | SKAO**
https://www.skao.int/en/explore/construction-journey?utm_source=chatgpt.com
- 116 **Status and milestones**
https://www.the-athena-x-ray-observatory.eu/en/mission/status-and-milestones?utm_source=chatgpt.com