Çok-Modlu Öz-Zaman Uzay–Zaman Formalizmi (ZMUT): Birleşik Kuram — Aksiyomatik İnşa, Öz-Eleştirel Denetim, Sistematik Çürütme Sınamaları ve Klasik Karşılıklılık

Multi-Mode Proper-Time Spacetime Formalism (ZMUT): A Unified Theory — Axiomatic Construction, Self-Critical Audit, Systematic Refutation Tests, and Classical Correspondence

Yamaç Gürsel
Bağımsız Araştırmacı
yamacgursel0@gmail.com

6 Ağustos 2026

Özet

Bu makale, öz-zamanı Hilbert uzayında normalize bir zamansal mod dalga fonksiyonu $|\psi(\xi)\rangle$ ile temsil eden Çok-Modlu Öz-Zaman Uzay–Zaman Formalizmini (ZMUT) tek metinde kurar, denetler ve deneyle yüzleştirir. **Kısım I**, genişletilmiş $(4+1)$ manifold ($\mathrm{d}s^2 = g_{\mu\nu}\mathrm{d}x^\mu \mathrm{d}x^\nu - f(\xi)\mathrm{d}\xi^2$) üzerindeki tek bir master eylemden mod-Klein–Gordon ve genişletilmiş Einstein denklemlerini türetir; Newton yasasını normalize örtüşme integralinin $\hat{O}_{AB} \to 1$ limitinde Cauchy–Schwarz teoremiyle geri kazanır; $\lambda_m = \kappa/m$ bağıntısını $\kappa = \hbar/c^2$ değeriyle takyonsuzluktan türetir (Planck kütlesi doğal kuantum–klasik eşik olarak çıkar) ve Pauli engelini Page–Wootters kısıtı ile kuantum referans çerçeveleri üzerinden aşar. **Kısım II**, dokuz yapısal zayıflığı (Z1–Z9) teşhis edip teorem düzeyinde kapatır: tam CPTP dekoherans dinamiği ve Markovyen olmayan ana denklem; kolektif mod metrolojisi (SQL–Heisenberg bandı); nedensellik, hayaletsizlik, Kaluza–Klein budaması ve Hadamard iyi-konumluluğu kanıtları; spektral yerellik çekirdeğiyle ince ayarsız radyon ayrışması, zayıf eşdeğerlik ilkesinin korunumu ve Banks–Peskin–Susskind uyumu; mod difüzyonuyla tek klasik zamanın m^{-2} donma yasası ve karanlık enerjinin lif ölçeğiyle özdeşleşmesi ($c\,\ell_\xi \approx 88\ \mu$m). **Kısım III**, Kuchař itirazı, kovaryans, çekirdek bileşimi ve Casimir işareti onarımlarının tamamını tek *Ana Yasa*'da birleştirir: her etkileşim, kütle–enerji ölçeği $\mu_S = mc^2/\hbar$ ile lif geometrisi arasındaki (Gauss sektörde tam çözülebilir) RG akışına tabidir ve gözlenebilirler tekil zamansal süperseçim sektörüne projekte edilir; sekiz yapı (C1–C8) bu yasanın sonucudur. Mod sıçrama sektörünün tek-döngü akışı $\beta(\tilde{g}) = 3\tilde{g} - (3/2\pi)\tilde{g}^2$, IR-çekici evrensel sabit nokta $\tilde{g}_* = 2\pi$ verir: akış, serbest parametre eklemeden gerçek Wilson karakteri kazanır. Sönüm yasası ile mod dağılımı arasında birebir sözlük kurulur (Gauss→Gauss, Lorentz→üstel T_2, kesikli dizilim→canlanma); bant-sınırlılık, koheransın $t_{\mathrm{ani}} = 2mc^2\Theta_*/\Delta E$'de ani ölümünü ve mod tomografisinin dağılımı tam ölçtüğünü öngörür. Güncel verilerle yüzleşme iki basamaklı deneysel ratchet üretir: $\Theta_* \geq 2{,}6 \times 10^{-9}$ s ve $\alpha_\xi = \ell_\xi/\Theta_* \lesssim 1{,}1 \times 10^{-4}$; on dört veri sınıfında sıfır çelişki bulunur, altı tam-null öngörü veriyle doğrulanır ve ^{229}Th koherans bandı [4,3, 66] s birincil sınama olarak konur. Bütün ana sonuçlar bağımsız sayısal–sembolik tersten doğrulama protokolünden (25/25) geçirilmiş; klasik fizik — mutlak zaman, jeodezik hareket, üstel T_2, termodinamik ok — Ehrenfest ve WKB düzeyinde ZMUT'un limit teoremleri olarak türetilmiştir.

Anahtar Kelimeler: kuantum kütle çekimi; öz-zaman; zamansal mod dağılımları; kuantum referans çerçeveleri; dekoherans; karanlık enerji; kuantum enformasyon; zamanın oku; klasik limit.

Abstract

This paper constructs, audits and experimentally confronts the Multi-Mode Proper-Time Spacetime Formalism (ZMUT), in which proper time is a normalized temporal-mode wave function $|\psi(\xi)\rangle$ in a Hilbert space. **Part I** derives the mode Klein–Gordon and extended Einstein equations from a single master action on the extended $(4+1)$ manifold; recovers Newton's law exactly in the $\hat{O}_{AB} \to 1$ limit of a normalized overlap integral; derives the mass–mode relation $\lambda_m = \kappa/m$ with $\kappa = \hbar/c^2$ from tachyon avoidance (the Planck mass emerging as the quantum-to-classical threshold); and circumvents Pauli's obstruction via the Page–Wootters constraint and quantum reference frames. **Part II** diagnoses

and closes nine structural weaknesses at theorem level: exact CPTP decoherence dynamics with a non-Markovian master equation; collective-mode metrology (SQL–Heisenberg band); proofs of causality, ghost-freedom, Kaluza–Klein pruning and Hadamard well-posedness; tuning-free radion decoupling by a spectral-locality kernel, preservation of the weak equivalence principle and Banks–Peskin–Susskind compatibility; mode diffusion with the m^{-2} freeze-out of a single classical time; and the identification of the dark-energy density with the fibre scale ($c\,\ell_\xi \approx 88\ \mu$m). **Part III** unifies all repairs under a single *Master Law*: every interaction is subject to a renormalization-group flow — exactly solvable in the Gaussian sector — between the system scale $\mu_S = mc^2/\hbar$ and the fibre geometry, with observables projected onto a single temporal superselection sector; eight structures (C1–C8) follow as corollaries. The one-loop flow of the mode-hopping sector, $\beta(\tilde{g}) = 3\tilde{g} - (3/2\pi)\tilde{g}^2$, terminates at the IR-attractive universal fixed point $\tilde{g}_* = 2\pi$, promoting the flow to genuine Wilsonian character at no cost in free parameters. A dictionary between decay law and mode distribution is established (Gaussian→Gaussian, Lorentzian→exponential T_2, discrete combs→revivals); band limitation predicts sudden death of coherence at $t_{\rm ani} = 2mc^2\Theta_*/\Delta E$ and complete distribution tomography. Confrontation with current data yields a two-step experimental ratchet, $\Theta_* \geq 2.6\times10^{-9}$ s and $\alpha_\xi = \ell_\xi/\Theta_* \lesssim 1.1\times10^{-4}$; a fourteen-class audit finds zero contradictions, six exact-null predictions are confirmed by data, and the [4.3, 66] s coherence band of the ^{229}Th nuclear clock is posed as the primary forthcoming test. All principal results pass an independent numeric–symbolic reverse-verification protocol (25/25), and classical physics — absolute time, geodesic motion, exponential T_2, the thermodynamic arrow — is derived as a family of ZMUT limit theorems at the Ehrenfest and WKB level.

Keywords: quantum gravity; proper time; temporal mode distributions; quantum reference frames; decoherence; renormalization group; superselection; dark energy; quantum information; arrow of time; classical limit.

1 Giriş: Yöntem ve Yol Haritası

Kuantum mekaniği zamanı dışsal bir parametre, genel görelilik ise metriğe bağlı dinamik bir nicelik olarak ele alır; iki tanımın kesişimindeki gerilim, kuantum kütle çekiminin "zaman problemi" olarak bilinir [10]. Öz-zamanların süperpozisyonunun ilkece gözlemlenebilir olduğu [2], zaman genleşmesinin evrensel bir dekoherans kanalı açtığı [1], zamanın ilişkisel olarak kurtarılabildiği [3, 5] ve birden çok zamansal yönün tutarlı biçimde taşınabildiği [4] bilinmektedir. ZMUT bu hatları tek bir öneride birleştirir: *öz-zaman, tek değerli bir klasik parametre değil; normalize bir zamansal mod dalga fonksiyonu $\psi(\xi)$ ile betimlenen kuantum bir serbestlik derecesidir.*

Bu birleşik makale, kuramın üç gelişim evresini tek ve kendi içinde kapalı bir metinde toplar; ancak evreleri düzleştirip tarihsiz bir "son sürüm" sunmak yerine, bilinçli olarak *diyalektik* düzeni korur: önce inşa, sonra inşanın acımasız denetimi, sonra denetimden sağ çıkanın deneyle ve daha derin matematikle sınanması. Bunun iki gerekçesi vardır. Birincisi bilimseldir: bir kuramın değeri, savunulmasından değil, yıkım girişimlerine dayanıklılığından gelir; okuyucu-hakem, hangi itirazın düşünülüp nasıl kapatıldığını metnin kendisinde denetleyebilmelidir. İkincisi yapısaldır: sonraki kısımların her teoremi, önceki kısımların belirli bir boşluğuna yanıt olarak doğmuştur ve bu bağ görünür kaldıkça kuramın serbestlik dereceleri (neyin zorunlu, neyin seçim olduğu) netleşir.

Kısım I (Bölüm 2–4) aksiyomatik çekirdeği kurar: mod Hilbert uzayı, genişletilmiş metrik, master eylem, alan denklemleri, Newton limiti, örtüşme integrali, gecikmeli Green fonksiyonuyla yerellik, reel öz-zaman kinematiği, $\lambda_m = \kappa/m$'nin türetimi, Pauli–Page–Wootters–QRF yapısı ve dekoheransın tarihsel ilk modeli. **Kısım II** (Bölüm 5–13) dokuz yapısal zayıflığı (Z1–Z9) teşhis edip kapatır ve kuramı spektral yerellik, mod sızıntısı, skaler sektör, kozmolojik özdeşleşme, kuantum enformasyon ve zamanın oku uygulamalarına taşır. **Kısım III** (Bölüm 14–21) önce Ana Yasa'yı koyar: tüm onarım katmanını C1–C8 sonuçları olarak tek seferde türeten RG–süperseçim ilkesi (§14) ve onu gerçek Wilson akışına terfi ettiren mod sıçrama sektörü (§15); ardından dört derin matematiksel çürütme girişimini (Kuchař itirazı; kovaryans ihlali; çekirdek bileşim belirsizliği; Casimir işaret hatası) yürütüp onarır; zaman mod dağılımlarını kuramın ölçülebilir merkezine yerleştirir; güncel deneysel verilerle sayısal yüzleşmeyi yapar (bu yüzleşmede kuramın bazı eski sayıları *çürür* ve güncellenir; nötrino sektörü dahil) ve klasik fiziğin ZMUT limitleri olarak türetimini verir.

1.1 Gösterim, birimler ve imza

Aksi belirtilmedikçe SI birimleri kullanılmakta, $\hbar$, c ve G açık tutulmaktadır. Dört boyutlu uzay–zaman indisleri $\mu, \nu, \cdots \in \{0, 1, 2, 3\}$; genişletilmiş beş boyutlu indisler $A, B, \cdots \in \{0, 1, 2, 3, \xi\}$ ile gösterilir. Metrik imzası $(-, +, +, +)$ olup $x^0 = ct$ alınmıştır. Mod parametresi ξ zaman boyutundadır: $[\xi] = $ s. Lif metrik fonksiyonu $f(\xi) > 0$ için $f(\xi) = c^2\hat{f}(\xi)$ yazılır; $\hat{f}$ boyutsuzdur ve aksi söylenmedikçe $\hat{f} = 1$ ayarı kullanılır. Kompleks eşlenik z^* ile gösterilir; tüm türetim adımları açık yazılmıştır.

Kısım I
Çekirdek Kuram: Aksiyomatik İnşa

2 Matematiksel Çerçeve ve Eylem Formalizmi

2.1 Zamansal mod uzayı, Hilbert yapısı ve aksiyomlar

ZMUT'un kinematik iskeleti aşağıdaki beş aksiyomla kurulur.

Aksiyom 1 (Mod dizilimi)**.** Her fiziksel sisteme, zamansal modların bir spektrumu eşlik eder. Kompakt ya da bağlı konfigürasyonlarda bu spektrum kesiklidir,

$$T = \{T_1, T_2, T_3, \dots\}, \qquad T_n \in \mathbb{R}, \tag{1}$$

ve T_n değerleri mod operatörü $\hat{\xi}$'nin öz-değerleridir. Genel durumda spektrum süreklidir ve $\xi \in \mathbb{R}$ sürekli mod değişkeniyle parametrize edilir; kesikli durum, spektral ölçünün Dirac taraklarına yoğunlaşması limitinde geri kazanılır.

Aksiyom 2 (Mod Hilbert uzayı ve durum vektörü)**.** Zamansal modlar,

$$\mathcal{H}_{\mathrm{mod}} = L^2(\mathbb{R}, \mathrm{d}\xi) \tag{2}$$

Hilbert uzayında yaşar. Sistemin zamansal durumu

$$|\psi\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}\xi\; \psi(\xi)\; |\xi\rangle\,, \qquad \langle\xi|\xi'\rangle = \delta(\xi - \xi'), \tag{3}$$

ile verilir ve olasılık yorumu gereği

$$\boxed{\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\xi)|^2\, \mathrm{d}\xi = 1} \tag{4}$$

normlama koşulunu sağlar. Boyut analizi: $[|\psi|^2 \mathrm{d}\xi] = 1$ olduğundan $[\psi] = \mathrm{s}^{-1/2}$'dir.

Aksiyom 3 (Genişletilmiş manifold)**.** Fiziksel arena, dört boyutlu Lorentz manifoldu $\mathcal{M}_4$ ile mod lifi Σ_ξ'nin çarpımı olan $\mathcal{M}_5 = \mathcal{M}_4 \times \Sigma_\xi$ manifoldudur ve üzerinde

$$\boxed{\mathrm{d}s^2 = g_{\mu\nu}(x)\, \mathrm{d}x^\mu \mathrm{d}x^\nu - f(\xi)\, \mathrm{d}\xi^2} \tag{5}$$

genişletilmiş metriği tanımlıdır. Burada $f(\xi) > 0$ olup $[f] = \mathrm{m}^2\,\mathrm{s}^{-2}$ boyutundadır ve $f(\xi) = c^2 \hat{f}(\xi)$ yazılır. Eksi işaret, ξ yönünün zamansal karakterde olduğunu ifade eder; bu, Bars'ın iki-zamanlı fiziğiyle [4] yapısal akrabalık taşır ve hayalet serbestlik derecelerinin bertarafı §2.4'te ele alınır.

Aksiyom 4 (Enerji dağılımı ve korunumu)**.** Toplam enerjisi E_{top} olan bir sistemin enerjisi, modlar üzerine

$$\mathrm{d}E(\xi) = E_{\mathrm{top}}\, |\psi(\xi)|^2\, \mathrm{d}\xi \tag{6}$$

yoğunluğuyla dağılır.

Aksiyom 5 (Bileşik sistemler)**.** A ve B sistemlerinden oluşan bileşik bir sistemin mod uzayı $\mathcal{H}^A_{\mathrm{mod}} \otimes \mathcal{H}^B_{\mathrm{mod}}$ tensör çarpımıdır. Etkileşimsiz hazırlanan sistemler için durum çarpım biçimindedir: $\psi_{AB}(\xi_A, \xi_B) = \psi_A(\xi_A)\, \psi_B(\xi_B)$.

Lemma 2.1 (Enerji korunumunun iç tutarlılığı)**.** *Aksiyom 4'deki dağılım, toplam enerjiyi özdeş olarak korur:*

$$\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}E(\xi) = E_{top} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\xi)|^2 \mathrm{d}\xi = E_{top} \cdot 1 = E_{top}. \tag{7}$$

İspat. Doğrudan, normlama koşulu (4)'nın (6)'ya uygulanmasıyla elde edilir. Dağılımın tutarlılığı, normlamanın dinamik altında korunmasına bağlıdır; bu da §2.4'te kurulacak üniter mod akışının bir sonucudur. □

Tanım 2.2 (Baskın mod, mod merkezi ve mod genişliği)**.** $w(\xi) := |\psi(\xi)|^2$ mod yoğunluğu olmak üzere,

$$\xi_{\max} := \arg\max_{\xi}\, |\psi(\xi)|^2 \qquad \text{(baskın mod)}, \tag{8}$$

$$\Theta := \int_{-\infty}^{\infty} \xi\, |\psi(\xi)|^2\, \mathrm{d}\xi \qquad \text{(mod merkezi)}, \tag{9}$$

$$\sigma_\xi^2 := \int_{-\infty}^{\infty} (\xi - \Theta)^2\, |\psi(\xi)|^2\, \mathrm{d}\xi \qquad \text{(mod varyansı)} \tag{10}$$

tanımlanır. Θ, klasik limitte gözlemcinin "şimdi"sine karşılık gelen etkin öz-zaman değeridir.

Lemma 2.3. *Gauss biçimli bir mod paketi* $\psi(\xi) = (2\pi\sigma_\xi^2)^{-1/4}\exp\!\left[-(\xi-\Theta)^2/(4\sigma_\xi^2) + i\varphi(\xi)\right]$ *için* $\xi_{\max} = \Theta$ *olur; yani baskın mod ile mod merkezi çakışır. Genel asimetrik dağılımlarda* $\xi_{\max} \neq \Theta$ *olabilir ve aradaki fark, §4.4'ta gösterileceği üzere, dekoherans hızına ikinci mertebeden katkı verir.*

İspat. $w(\xi) = (2\pi\sigma_\xi^2)^{-1/2} e^{-(\xi-\Theta)^2/(2\sigma_\xi^2)}$ tek tepe noktasını $\mathrm{d}w/\mathrm{d}\xi = 0 \Rightarrow \xi = \Theta$'da alır; ikinci türev $\xi = \Theta$'da negatiftir. □

2.2 Genişletilmiş metriğin geometrisi

Metrik (5) blok köşegendir: $\tilde{g}_{AB} = \mathrm{diag}\big(g_{\mu\nu}(x),\, -f(\xi)\big)$, dolayısıyla $\tilde{g}^{\xi\xi} = -1/f(\xi)$'dir. Determinant için

$$\det \tilde{g} = -f(\xi)\,\det g \quad\Rightarrow\quad \sqrt{|\det \tilde{g}|} = \sqrt{-g}\,\sqrt{f} = c\sqrt{-g}\,\sqrt{\hat{f}} \tag{11}$$

elde edilir; burada $\det g < 0$ dört boyutlu Lorentz metriğinin determinantıdır. Christoffel sembollerinin sıfırdan farklı bileşenleri doğrudan hesapla bulunur:

$$\tilde{\Gamma}^{\mu}{}_{\nu\rho} = \Gamma^{\mu}{}_{\nu\rho}[g], \qquad \tilde{\Gamma}^{\xi}{}_{\xi\xi} = \frac{f'(\xi)}{2f(\xi)}, \tag{12}$$

ve $g_{\mu\nu}$'nün ξ'den, f'nin x'ten bağımsız olması nedeniyle tüm karışık bileşenler sıfırdır:

$$\begin{aligned} \tilde{\Gamma}^{\xi}{}_{\mu\nu} &= -\tfrac{1}{2}\tilde{g}^{\xi\xi}\partial_\xi g_{\mu\nu} = 0, & \tilde{\Gamma}^{\mu}{}_{\nu\xi} &= \tfrac{1}{2}g^{\mu\sigma}\partial_\xi g_{\sigma\nu} = 0, \\ \tilde{\Gamma}^{\mu}{}_{\xi\xi} &= \tfrac{1}{2}g^{\mu\sigma}\partial_\sigma f = 0, & \tilde{\Gamma}^{\xi}{}_{\mu\xi} &= -\tfrac{1}{2f}\partial_\mu f = 0. \end{aligned} \tag{13}$$

Teorem 2.4 (Skaler eğriliğin indirgenmesi)**.** *Çarpım yapılı metrik (5) için beş boyutlu Ricci skaleri, dört boyutlu Ricci skalerine eşittir:* $\tilde{R} = R[g]$.

İspat. Ricci tensörü $\tilde{R}_{AB} = \partial_C\tilde{\Gamma}^{C}{}_{AB} - \partial_A\tilde{\Gamma}^{C}{}_{CB} + \tilde{\Gamma}^{C}{}_{CD}\tilde{\Gamma}^{D}{}_{AB} - \tilde{\Gamma}^{C}{}_{AD}\tilde{\Gamma}^{D}{}_{CB}$ ifadesinde (12)–(13) kullanılırsa: (i) $\tilde{R}_{\mu\nu}$ yalnızca $\Gamma[g]$ içerdiğinden $\tilde{R}_{\mu\nu} = R_{\mu\nu}[g]$; (ii) karışık bileşen $\tilde{R}_{\mu\xi} = 0$; (iii) $\xi\xi$ bileşeni için

$$\tilde{R}_{\xi\xi} = \partial_\xi\tilde{\Gamma}^{\xi}{}_{\xi\xi} - \partial_\xi\tilde{\Gamma}^{C}{}_{C\xi} + \tilde{\Gamma}^{C}{}_{C\xi}\tilde{\Gamma}^{\xi}{}_{\xi\xi} - \tilde{\Gamma}^{C}{}_{\xi D}\tilde{\Gamma}^{D}{}_{C\xi} = \partial_\xi\frac{f'}{2f} - \partial_\xi\frac{f'}{2f} + \left(\frac{f'}{2f}\right)^2 - \left(\frac{f'}{2f}\right)^2 = 0.$$

Böylece $\tilde{R} = \tilde{g}^{AB}\tilde{R}_{AB} = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu} + \tilde{g}^{\xi\xi}\cdot 0 = R[g]$ bulunur. □

Teorem 2.4, mod lifinin arka plan geometrisinin dört boyutlu eğriliğe ek katkı getirmediğini; kütle çekiminin mod sektörüyle etkileşiminin yalnızca madde bağlaşımları ve f'nin pertürbasyonları (bkz. §3.5) üzerinden gerçekleşeceğini garanti eder.

2.3 Master eylem

ZMUT'un tüm dinamiği tek bir eylemden türetilir. Tam boyutlu biçimiyle,

$$S \;=\; \int \mathrm{d}^4x\,\mathrm{d}\xi\;\sqrt{-g}\,\sqrt{\hat{f}}\,\left[\frac{c^3}{16\pi G_5}\,\tilde{R} \;+\; \mathcal{L}_{\mathrm{molar}}(\Phi,\partial\Phi;\xi) \;+\; \mathcal{L}_{\mathrm{etkileşim}}(\Phi,g;\xi)\right], \tag{14}$$

burada G_5 beş boyutlu çekim sabitidir ($[G_5] = \mathrm{m}^3\,\mathrm{kg}^{-1}\,\mathrm{s}^{-1}$) ve $\Phi(x,\xi)$ master mod alanıdır. Mod lifinin etkin uzunluğu

$$\ell_\xi := \int \sqrt{\hat{f}(\xi)}\,\mathrm{d}\xi \tag{15}$$

olmak üzere, dört boyutlu Newton sabiti Kaluza–Klein indirgemesindeki gibi

$$\frac{1}{G} \;=\; \frac{\ell_\xi}{G_5} \tag{16}$$

bağıntısıyla tanımlanır [8,9]. Teorem 2.4 ($\tilde{R} = R$) ve (16) kullanılıp $\hat{f} = 1$ ayarında $\sqrt{\hat{f}}$ çarpanı $\mathrm{d}\xi$ ölçüsüne yedirildiğinde eylem, kuramın kompakt kanonik biçimine iner:

$$\boxed{S = \int \mathrm{d}^4x\,\mathrm{d}\xi\;\sqrt{-g}\,\left[\frac{R}{16\pi G} + \mathcal{L}_{\mathrm{molar}}(\psi,\xi) + \mathcal{L}_{\mathrm{etkileşim}}\right]} \tag{17}$$

Burada ve makalenin geri kalanında, $R/(16\pi G)$ teriminin önündeki c^3 ve ℓ_ξ^{-1} çarpanları, (16) uyarınca G'nin tanımına dahil edilmiştir; SI karşılıkları her ara adımda açıkça geri konulacaktır.

Molar sektör. Zamansal mod topluluğunun kolektif alanını betimleyen molar Lagrange yoğunluğu, minimal bağlaşımlı kompleks skaler biçimindedir:

$$\mathcal{L}_{\text{molar}} \;=\; -\frac{\hbar^2}{2m}\,\tilde{g}^{AB}\,\partial_A\Phi^*\,\partial_B\Phi \;-\; \frac{mc^2}{2}\,|\Phi|^2, \tag{18}$$

etkileşim sektörü ise eğrilikle minimal olmayan bağlaşımı taşır:

$$\mathcal{L}_{\text{etkileşim}} \;=\; -\,\frac{\alpha\,\hbar^2}{2m}\,R\,|\Phi|^2, \tag{19}$$

burada α boyutsuz bağlaşım sabitidir. Master alanın çarpanlara ayrılmış (ortalama-alan) kesimi

$$\Phi(x,\xi) \;=\; \frac{1}{\sqrt{c}}\,\chi(x)\,\psi(\xi), \qquad \int |\chi|^2 \mathrm{d}^3x = 1, \quad \int |\psi|^2 \mathrm{d}\xi = 1, \tag{20}$$

biçimindedir; $1/\sqrt{c}$ çarpanı boyut kapanışını sağlar (bkz. Tablo 1).

Önerme 2.5 (Boyutsal tutarlılık)**.** *Eylem* (14) *boyutça tutarlıdır: her üç terimin de yoğunluk boyutu* $[\mathcal{L}] = \mathrm{J\,m^{-4}}$ *olup* S*'nin boyutu* J s*'dir.*

İspat. $[\mathrm{d}^4x\,\mathrm{d}\xi] = \mathrm{m^4\,s}$ olduğundan $[S] = \mathrm{J\,s}$ için $[\mathcal{L}] = \mathrm{J\,m^{-4}}$ gerekir. (i) Eğrilik terimi: $[\tilde{R}] = \mathrm{m^{-2}}$, $[c^3/G_5] = (\mathrm{m^3 s^{-3}})/(\mathrm{m^3 kg^{-1} s^{-1}}) = \mathrm{kg\,s^{-2}}$; çarpım $\mathrm{kg\,m^{-2}\,s^{-2}} = \mathrm{J\,m^{-4}}$. (ii) Kinetik terim: (20) ile $[\Phi] = [\chi][\psi]/[c^{1/2}] = \mathrm{m^{-3/2}\,s^{-1/2}\,(m/s)^{-1/2}} = \mathrm{m^{-2}}$; $[\hbar^2/m] = \mathrm{J^2 s^2 kg^{-1}}$, $[\tilde{g}^{AB}\partial\partial] = \mathrm{m^{-2}}$, $[|\Phi|^2] = \mathrm{m^{-4}}$; çarpım $\mathrm{J^2 s^2 kg^{-1} m^{-6}} = \mathrm{J\,m^{-4}}$ (zira $\mathrm{J\,s^2 kg^{-1}} = \mathrm{m^2}$). (iii) Kütle terimi: $[mc^2|\Phi|^2] = \mathrm{J\,m^{-4}}$. (iv) Etkileşim terimi, (ii) ile aynı yapıdadır ($[R] = [\partial\partial]$). □

Tablo 1: Temel niceliklerin boyut çizelgesi.

Nicelik	Simge	SI boyutu	Not
Mod parametresi	ξ, Θ, λ_m, σ_ξ	s	zamansal lif koordinatı
Mod dalga fonksiyonu	$\psi(\xi)$	$\mathrm{s^{-1/2}}$	Aksiyom 2
Uzaysal zarf	$\chi(x)$	$\mathrm{m^{-3/2}}$	$\int \lvert\chi\rvert^2 \mathrm{d}^3x = 1$
Master alan	$\Phi(x,\xi)$	$\mathrm{m^{-2}}$	Eş. (20)
Lif fonksiyonu	$f(\xi) = c^2\hat{f}$	$\mathrm{m^2\,s^{-2}}$	$\hat{f}$ boyutsuz
Potansiyel enerji	$U(r)$	J	§3.3
Kütle çekim potansiyeli	$V(r)$	$\mathrm{J\,kg^{-1}}$	$U = m_B V$
Örtüşme integrali	$\hat{O}_{AB}$	boyutsuz	Teorem 3.6
Kütle–mod sabiti	$\kappa = \hbar/c^2$	kg s	$\kappa = 1{,}173 \times 10^{-51}\,\mathrm{kg\,s}$
Beş boyutlu çekim sabiti	$G_5 = G\,\ell_\xi$	$\mathrm{m^3\,kg^{-1}\,s^{-1}}$	Eş. (16)
Mod eş-momentumu	p_ξ	J	ξ'ye eşlenik

2.4 Kısıt yapısı, Page–Wootters indirgeme ve hayalet modların bertarafı

İmzası $(-,+,+,+,-)$ olan genişletilmiş metrik iki zamansal yön içerdiğinden, kısıtsız bir alan kuramında negatif normlu (hayalet) uyarılmalar belirebilir; iki-zamanlı fizikte bu sorun $Sp(2,\mathbb{R})$ ayar simetrisiyle çözülür [4]. ZMUT'ta aynı görevi, mod yönündeki yeniden parametrizasyon serbestliğinin üreteci olan birinci sınıf kısıt üstlenir. ξ'ye eşlenik momentum operatörü $\hat{p}_\xi = -i\hbar\,\partial_\xi$ ($[\hat{\xi}, \hat{p}_\xi] = i\hbar$, $[p_\xi] = \mathrm{J}$) olmak üzere, fiziksel durumlar

$$\boxed{\hat{\mathcal{C}}\,|\Psi\rangle\!\rangle = \big(\hat{p}_\xi \otimes \mathbb{I} + \mathbb{I} \otimes \hat{H}_S\big)|\Psi\rangle\!\rangle = 0} \tag{21}$$

Wheeler–DeWitt tipi kısıtını sağlar; burada $\hat{H}_S$, sistemin (alttan sınırlı) fiziksel Hamiltonyeni, $|\Psi\rangle\!\rangle \in \mathcal{H}_{\text{mod}} \otimes \mathcal{H}_S$ toplam kinematik durumdur. $\langle\xi|\Psi\rangle\!\rangle =: |\psi_S(\xi)\rangle$ koşullu durumu üzerinde (21),

$$i\hbar\,\frac{\partial}{\partial\xi}\,|\psi_S(\xi)\rangle = \hat{H}_S\,|\psi_S(\xi)\rangle \tag{22}$$

Schrödinger akışını üretir: dinamik, mutlak bir dış zamana değil, mod parametresine göre ilişkisel olarak tanımlanır. Bu, Page–Wootters mekanizmasının [5] ZMUT içindeki gerçekleşmesidir ve §4.3'de Pauli teoreminin aşılmasında merkezî rol oynayacaktır.

Önerme 2.6 (Hayalet modların bertarafı)**.** *Kısıt (21) birinci sınıftır ve ξ-yönündeki negatif normlu uyarılmalar, $\hat{\mathcal{C}}$'nin ürettiği ayar yörüngeleri üzerinde saf ayar serbestliğidir; fiziksel Hilbert uzayı $\mathcal{H}_{\text{fiz}} = \ker\hat{\mathcal{C}}$ üzerinde indüklenen iç çarpım pozitif tanımlıdır.*

İspat. $\hat{\mathcal{C}}$ tek bir kısıt olduğundan $\{\hat{\mathcal{C}},\hat{\mathcal{C}}\}=0$ ile aşikâr biçimde birinci sınıftır ve sonlu ayar dönüşümleri $e^{-i\epsilon\hat{\mathcal{C}}/\hbar}$, ξ-ötelemeleri ile sistem evriminin eş-hareketini üretir. $\ker\hat{\mathcal{C}}$'nin genel çözümü (22)'den

$$|\Psi\rangle\!\rangle = \int \mathrm{d}\xi \;\; |\xi\rangle \otimes e^{-i\hat{H}_S\,\xi/\hbar}\,|\varphi_0\rangle\,, \qquad |\varphi_0\rangle \in \mathcal{H}_S, \tag{23}$$

biçimindedir. Grup ortalamalı (rafine cebirsel nicemleme) iç çarpım $\big(\Psi_1,\Psi_2\big)_{\text{fiz}} := \left\langle \varphi_0^{(1)} \middle| \varphi_0^{(2)} \right\rangle$, $\mathcal{H}_S$'nin pozitif tanımlı iç çarpımına eşit olduğundan fiziksel uzayda negatif normlu durum kalmaz; ξ-salınımlarının normu fiziksel iç çarpıma hiç katılmaz. □

2.5 Enerji katmanları ve korunum

Eylemin (17) zamana göre öteleme invaryansı, Noether teoremi uyarınca korunan bir toplam enerji tanımlar. Kısıt çözümü (23) üzerinde toplam enerji beklenen değeri doğal olarak katmanlara ayrışır:

$$\boxed{E \;=\; \underbrace{\left\langle \frac{\hat{p}_\xi^2}{2\mathcal{M}_\xi c^2} \right\rangle}_{E_T} \;+\; mc^2 \;+\; \underbrace{\left\langle \hat{H}_{\text{iç}} \right\rangle}_{E_{\text{int}}} \;+\; \underbrace{\langle \mathcal{L}_{\text{etkileşim}} \rangle V_4}_{E_{\text{coup}}}} \tag{24}$$

Burada E_T, mod paketinin ξ-uzayındaki kinetik (dalgasal) enerjisidir ve $\mathcal{M}_\xi := m$ mod-atalet parametresiyle ölçeklenir; mc^2 durgun kütle katmanı, E_{int} iç serbestlik derecelerinin (titreşim, dönme, elektronik) enerjisi, E_{coup} ise mod–eğrilik bağlaşımının (19) katkısıdır (V_4: dört-hacim). Aksiyom 4'nin $\mathrm{d}E(\xi) = E_{\text{top}}|\psi(\xi)|^2\mathrm{d}\xi$ dağılımı, (24)'daki $E_{\text{top}} \equiv E$ toplamının modlara izdüşümüdür ve Lemma 2.1 ile korunumu güvence altındadır.

Önerme 2.7 (Korunum)**.** *Statik arka planda ($\partial_t g_{\mu\nu}=0$) ve kısıt yüzeyi üzerinde $\mathrm{d}E/\mathrm{d}t = 0$'dır.*

İspat. ∂_t Killing vektörü için $j^\mu = T^\mu_{\ \nu}k^\nu$ akımı, §3.2'daki enerji–momentum tensörünün kovaryant korunumu $\nabla_\mu T^{\mu\nu}=0$ (alan denklemlerinin Bianchi özdeşliğiyle uyumu) nedeniyle korunur: $\nabla_\mu j^\mu = 0$. Uzaysal sonsuzlukta $\chi\to 0$ ve $\xi\to\pm\infty$'da $\psi\to 0$ düşüşleri sınır akılarını yok eder; $E=\int j^0 \mathrm{d}^3x\,\mathrm{d}\xi$ sabit kalır. □

3 Alan Denklemleri ve Kütle Çekim Potansiyeli

3.1 Mod alanının Euler–Lagrange denklemi

Master eylemin (14) madde kesimini Φ^*'a göre değiştirelim. Kısalık için $\sqrt{|\tilde{g}|} = c\sqrt{-g}\sqrt{\hat{f}}$ hacim elemanını ve $\mathcal{S}_m = \int \mathrm{d}^4x\,\mathrm{d}\xi\,\sqrt{-g}\sqrt{\hat{f}}\,(\mathcal{L}_{\text{molar}}+\mathcal{L}_{\text{etkileşim}})$ yazalım. Birinci varyasyon,

$$\delta\mathcal{S}_m = \int \mathrm{d}^4x\,\mathrm{d}\xi\,\sqrt{-g}\sqrt{\hat{f}}\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\,\tilde{g}^{AB}\,\partial_A(\delta\Phi^*)\,\partial_B\Phi - \frac{mc^2}{2}\,\delta\Phi^*\,\Phi - \frac{\alpha\hbar^2}{2m}\,R\,\delta\Phi^*\,\Phi\right] + \text{k.e.} \tag{25}$$

biçimindedir (k.e.: kompleks eşlenik). Birinci terime kısmi integrasyon uygulanır:

$$-\int \mathrm{d}^4x\,\mathrm{d}\xi\,\sqrt{-g}\sqrt{\hat{f}}\,\frac{\hbar^2}{2m}\,\tilde{g}^{AB}\partial_A(\delta\Phi^*)\,\partial_B\Phi$$
$$= \int \mathrm{d}^4x\,\mathrm{d}\xi\;\delta\Phi^*\,\frac{\hbar^2}{2m}\,\partial_A\!\left(\sqrt{-g}\sqrt{\hat{f}}\,\tilde{g}^{AB}\,\partial_B\Phi\right) \;-\; \oint \mathrm{d}\Sigma_A\,(\cdots)^A. \tag{26}$$

Sınır terimleri iki gerekçeyle sıfırdır: uzaysal sonsuzlukta $\chi\to 0$ (yerelleşmiş sistem) ve $\xi\to\pm\infty$'da normlama aksiyomu (4) gereği $\psi\to 0$. Normlama koşulunun kurama katkısı burada yapısaldır: *mod uzayındaki karesel integrallenebilirlik, varyasyonel problemin iyi tanımlı olmasının önkoşuludur.* $\delta\Phi^*$ keyfi olduğundan Euler–Lagrange denklemi elde edilir:

$$\frac{\hbar^2}{2m}\,\tilde{\Box}\,\Phi - \frac{mc^2}{2}\,\Phi - \frac{\alpha\hbar^2}{2m}\,R\,\Phi = 0 \qquad\Longleftrightarrow\qquad \boxed{\tilde{\Box}\,\Phi - \alpha R\,\Phi = \frac{m^2c^2}{\hbar^2}\,\Phi} \tag{27}$$

Burada genişletilmiş d'Alembert operatörü, (11) ve $\tilde{g}^{\xi\xi} = -1/(c^2\hat{f})$ ile açık olarak

$$\tilde{\Box}\,\Phi = \underbrace{\frac{1}{\sqrt{-g}}\,\partial_\mu\!\left(\sqrt{-g}\,g^{\mu\nu}\partial_\nu\Phi\right)}_{\Box_4\Phi} - \frac{1}{c^2\sqrt{\hat{f}}}\,\partial_\xi\!\left(\frac{1}{\sqrt{\hat{f}}}\,\partial_\xi\Phi\right) \xrightarrow{\hat{f}=1} \Box_4\Phi - \frac{1}{c^2}\,\frac{\partial^2\Phi}{\partial\xi^2} \tag{28}$$

biçimini alır. Denklem (27), iki zamansal yön nedeniyle ultra-hiperboliktir; iyi konumlanmış bir başlangıç değer problemi, §2.4'teki kısıt (21) ile birinci mertebeden Schrödinger akışına indirgenerek elde edilir. Kısıt yüzeyi üzerinde $\psi(\xi)$'nin durağan mod bileşeni $\psi \propto e^{-i\mathfrak{E}\xi/\hbar}$ alınırsa (28),

$$\left(\Box_4 + \frac{\mathfrak{E}^2}{\hbar^2c^2} - \frac{m^2c^2}{\hbar^2} - \alpha R\right)\chi(x) = 0 \tag{29}$$

verir; yani $\mathfrak{E}$ mod öz-enerjili bileşen, dört boyutta

$$m_{\text{eff}}^2 = m^2 - \frac{\mathfrak{E}^2}{c^4} \tag{30}$$

etkin kütlesiyle yayılır. Takyonik yayılımın yokluğu ($m_{\text{eff}}^2 \geq 0$) mod spektrumuna

$$|\mathfrak{E}| \;\leq\; mc^2 \tag{31}$$

bant sınırını dayatır; bu eşitsizlik §4.2'da kütle–mod bağıntısının türetiminde anahtar olacaktır.

3.2 Genişletilmiş Einstein denklemleri

Şimdi (14)'ı $g^{\mu\nu}$'ye göre değiştirelim. Eğrilik kesimi için standart sonuç (Gibbons–Hawking–York sınır teriminin eklendiği varsayımıyla)

$$\delta\!\left(\sqrt{-g}\,R\right) = \sqrt{-g}\,\left(R_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2}g_{\mu\nu}R\right)\delta g^{\mu\nu} + \text{tam türev} \tag{32}$$

olup, madde kesiminden enerji–momentum tensörü

$$\begin{aligned}\tilde{T}_{\mu\nu} &:= -\frac{2}{\sqrt{-g}}\,\frac{\delta\!\left(\sqrt{-g}\,(\mathcal{L}_{\text{molar}} + \mathcal{L}_{\text{etkileşim}})\right)}{\delta g^{\mu\nu}} \\ &= \frac{\hbar^2}{2m}\left(\partial_\mu\Phi^*\partial_\nu\Phi + \partial_\nu\Phi^*\partial_\mu\Phi\right) + g_{\mu\nu}\left(\mathcal{L}_{\text{molar}} + \mathcal{L}_{\text{etkileşim}}\right) + \Delta T_{\mu\nu}^{(\alpha)}\end{aligned} \tag{33}$$

elde edilir; minimal olmayan bağlaşımın iyileştirme terimleri

$$\Delta T_{\mu\nu}^{(\alpha)} = \frac{\alpha\hbar^2}{m}\Big[g_{\mu\nu}\,\Box_4 - \nabla_\mu\nabla_\nu + G_{\mu\nu}\Big]|\Phi|^2 \tag{34}$$

biçimindedir. Alan denklemi, mod lifi üzerinden integre edilmiş (sıfır-mod kesilimli) kaynakla dört boyutlu Einstein denklemine iner:

$$\boxed{\,G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}\,\mathcal{T}_{\mu\nu}, \qquad \mathcal{T}_{\mu\nu}(x) := c\int \mathrm{d}\xi\,\sqrt{\hat{f}}\,\tilde{T}_{\mu\nu}(x,\xi)\,} \tag{35}$$

Buradaki c çarpanı $x^0 = ct$ ölçü dönüşümünden gelir ve $[\mathcal{T}_{\mu\nu}] = \mathrm{J\,m^{-3}}$ boyutunu sağlar. Metriğin $\xi\xi$ bileşeninin varyasyonu ise lif kesiminin (radyon) denge koşulunu verir ve §3.5'da skaler iz modunun dinamiğinde kullanılacaktır.

Lemma 3.1 (Normlamanın fiziksel rolü)**.** *Yavaş değişen, göreli olmayan bir sistem için zarf ayrışımı $\Phi = c^{-1/2}\chi(x)\psi(\xi)\,e^{-imc^2t/\hbar}$ alınsın. Bu durumda mod-integrali alınmış enerji yoğunluğu tam olarak dört boyutlu durgun enerji yoğunluğuna eşittir:*

$$\mathcal{T}_{00}(x) = c\int \mathrm{d}\xi\; mc^2|\Phi|^2 = mc^2|\chi(x)|^2\underbrace{\int |\psi(\xi)|^2\mathrm{d}\xi}_{=\,1} = mc^2|\chi(x)|^2. \tag{36}$$

İspat. Göreli olmayan limitte (33)'ün baskın katkısı hızlı fazın zaman türevlerinden gelir: $\partial_0\Phi = (-imc/\hbar)\Phi + \mathcal{O}(v/c)$, dolayısıyla $(\hbar^2/2m)\cdot 2|\partial_0\Phi|^2 = mc^2|\Phi|^2$; $g_{00}\mathcal{L}$ terimindeki kinetik ve kütle katkıları bu mertebede birbirini götürür. $|\Phi|^2 = |\chi|^2|\psi|^2/c$ konulup $c\int \mathrm{d}\xi$ alınırsa (36) çıkar. Normlama aksiyomu (4), dört boyutlu kütle çekiminin sistemin *tüm* kütlesini görmesini sağlayan tam koşuldur: modlara dağılım, toplam çekim yükünü değiştirmez (Lemma 2.1 ile uyumlu). $\square$

3.3 Newton limiti: potansiyel ile potansiyel enerjinin ayrımı

Teorem 3.2 (Newton yasasının geri kazanımı, I: alan denklemi düzeyi)**.** *Zayıf ve statik alan limitinde* ($g_{00} = -(1 + 2V/c^2)$, $|V|/c^2 \ll 1$, *kaynaklar yavaş),* (35) *denklemi*

$$\nabla^2 V(\vec{r}) = 4\pi G\, \rho(\vec{r}), \qquad \rho(\vec{r}) = m|\chi(\vec{r})|^2, \tag{37}$$

Poisson denklemine iner ve noktasal kaynak için $V(r) = -Gm_A/r$ *verir.*

İspat. Adım 1: $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $|h| \ll 1$ yazılır; statiklik $\partial_0 h_{\mu\nu} = 0$ verir ve $h_{00} = -2V/c^2$ tanımlanır. Adım 2: Statik zayıf alanda Ricci tensörünün 00 bileşeni, Christoffel sembollerinin doğrudan hesabıyla $R_{00} = \nabla^2 V/c^2 + \mathcal{O}(h^2)$ bulunur. Adım 3: (35)'in iz-ters biçimi

$$R_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}\left(\mathcal{T}_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2} g_{\mu\nu}\,\mathcal{T}\right)$$

kullanılır. Lemma 3.1 uyarınca kaynak tozsudur: $\mathcal{T}_{\mu\nu} = \mathrm{diag}(\rho c^2, 0, 0, 0)$, dolayısıyla $\mathcal{T} = g^{\mu\nu}\mathcal{T}_{\mu\nu} = -\rho c^2$ ve

$$\frac{\nabla^2 V}{c^2} = \frac{8\pi G}{c^4}\left(\rho c^2 - \frac{\rho c^2}{2}\right) = \frac{4\pi G}{c^2}\,\rho \implies \nabla^2 V = 4\pi G\rho$$

elde edilir. $\rho = m_A\,\delta^3(\vec{r} - \vec{r}_A)$ noktasal limitinde çözüm, sonsuzda sıfırlanma koşuluyla $V(r) = -Gm_A/r$'dir. □

Önerme 3.3 (Boyutsal ayrım)**.** $V(r)$ *kütle çekim* potansiyeli $[\mathrm{J\,kg^{-1}}]$ *boyutlu bir alan;* $U(r) = m_B\,V(r)$ *ise* B *test kütlesinin bu alandaki* potansiyel enerjisi [J] *'dir. ZMUT'ta mod yapısının değiştirdiği nicelik* V *alanının kaynağı değil, iki sistemin ortak çekim enerjisine dönüşen örtüşme çarpanıdır; dolayısıyla düzeltme,* U *düzeyinde çarpımsal ve boyutsuzdur.*

3.4 Zamansal örtüşme integrali, yerellik ve Newton limiti kanıtı

3.4.1 Gecikmeli Green fonksiyonu ve nedensellik

Mod-alan denkleminin (28) statik-uzaysal kesimi, $(\nabla^2 - c^{-2}\partial_\varsigma^2)$ dalga operatörü yapısındadır; burada $\varsigma := \xi - \xi'$ göreli mod açıklığıdır. İlgili gecikmeli Green fonksiyonu

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial \varsigma^2}\right)\mathcal{G}(\vec{r}, \varsigma) = -4\pi\,\delta^3(\vec{r})\,\delta(\varsigma) \qquad \Longrightarrow \qquad \mathcal{G}(\vec{r}, \varsigma) = \frac{\delta\big(\varsigma - |\vec{r}|/c\big)}{|\vec{r}|} \tag{38}$$

ile verilir; çözüm, Fourier uzayında $\tilde{\mathcal{G}} = 4\pi/(k^2 - \omega^2/c^2)$'nin gecikmeli kontur seçimiyle standart biçimde elde edilir ve desteği genişletilmiş ışık konisi $\varsigma = |\vec{r}|/c$ üzerindedir.

Teorem 3.4 (Yerellik ve nedensellik)**.** *ZMUT'ta mod sektörleri arasındaki çekim etkileşimi,* (38) *gecikmeli çekirdeği üzerinden kurulur:* $(\vec{r}_A, \xi)$ *ile* $(\vec{r}_B, \xi')$ *noktaları yalnızca* $\xi - \xi' = |\vec{r}_A - \vec{r}_B|/c$ *genişletilmiş koni koşulunu sağlıyorsa bağlanır. Sonuç olarak (i) etkileşim yoğunluğu genişletilmiş uzayda yereldir, (ii) hiçbir mod bilgisi* c*'den hızlı yayılmaz, (iii) uzaktan-ani-etki (action at a distance) ortadan kalkar. Statik limitte* $\int \mathcal{G}\,\mathrm{d}\varsigma' = 1/|\vec{r}|$ *olduğundan klasik* $1/r$ *çekirdeği tam olarak geri kazanılır.*

İspat. (i) ve (ii), $\mathcal{G}$'nin desteğinin koni üzerinde olmasının; (iii) statik ifadenin, gecikmeli çekirdeğin ς-integrali olarak *türetilmiş* olmasının doğrudan sonucudur: $\int \delta(\varsigma - r/c)\,\mathrm{d}\varsigma/r = 1/r$. □

3.4.2 Örtüşme integrali ve normalize edilmiş biçimi

A ve B sistemlerinin mod-çözünürlüklü kütle yoğunlukları $\varrho_i(\vec{r}, \xi) := m_i|\chi_i(\vec{r})|^2 w_i(\xi)$, $w_i = |\psi_i|^2$ olsun. Doğrusallaştırılmış alan değişiminin (tek-graviton değiş tokuşu) mod-köşegen yapısıyla iki-cisim potansiyel enerjisi, en genel yerel biçimde

$$U_{AB} = -\,G\,\mathcal{N}_{AB} \iint \mathrm{d}^3 r_A\, \mathrm{d}^3 r_B \iint \mathrm{d}\xi\, \mathrm{d}\xi'\; \varrho_A(\vec{r}_A, \xi)\, \mathcal{G}\big(\vec{r}_A - \vec{r}_B,\, \xi - \xi'\big)\, \varrho_B(\vec{r}_B, \xi') \tag{39}$$

olarak yazılır; boyut denetimi $[\varrho_i] = \mathrm{kg\,m^{-3}\,s^{-1}}$, $[\mathcal{G}] = \mathrm{m^{-1}\,s^{-1}}$ ve $[\mathcal{N}_{AB}] = \mathrm{s}$ ile $[U_{AB}] = \mathrm{J}$ verir. Gecikme, klasik merkez hareketi (mod merkezlerinin ortak akışı $\Theta_i(t)$) tarafından taşınır; kuantum örtüşme ise merkezlenmiş dalgalanma profillerini karşılaştırır: $\hat{w}_i(u) := w_i(u + \Theta_i)$. Bu ayrışım altında (39), uzaysal olarak noktasal paketler için kompakt biçime iner ve ZMUT'un temel örtüşme nesnesi ortaya çıkar:

$$O(\vec{r}, \xi) \;=\; \int |\psi_A(\vec{r}_A, \xi)|^2\, G(\vec{r}_A - \vec{r}_B)\, |\psi_B(\vec{r}_B, \xi)|^2\, \mathrm{d}\xi, \tag{40}$$

burada $G(\vec{r}_A - \vec{r}_B)$, Teorem 3.4 uyarınca gecikmeli çekirdeğin statik indirgemesidir. Boyut ve sınırlılık özelliklerini kesinleştirmek için örtüşmenin normalize edilmiş, boyutsuz biçimi tanımlanır:

Tanım 3.5 (Normalize zamansal örtüşme)**.**

$$\boxed{\hat{O}_{AB} \;:=\; \frac{\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} \hat{w}_A(u)\,\hat{w}_B(u)\,\mathrm{d}u}{\left(\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} \hat{w}_A^2\,\mathrm{d}u\right)^{1/2}\left(\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} \hat{w}_B^2\,\mathrm{d}u\right)^{1/2}}} \tag{41}$$

Normalizasyon çarpanı $\mathcal{N}_{AB} = \big(\|\hat{w}_A\|_2\|\hat{w}_B\|_2\big)^{-1}$, $[\mathcal{N}_{AB}] = \mathrm{s}$ boyutuyla (39)'in Joule boyutunu kapatır ve öz-örtüşme tutarlılığı $\hat{O}_{AA} = 1$ koşuluyla tek türlü sabitlenir.

Teorem 3.6 (Sınırlılık ve doygunluk)**.** *Her normalize $w_A, w_B \in L^1 \cap L^2$ mod yoğunluğu çifti için*

$$0 \;\le\; \hat{O}_{AB} \;\le\; 1, \tag{42}$$

ve $\hat{O}_{AB} = 1$ eşitliği ancak ve ancak $\hat{w}_A = \hat{w}_B$ (hemen her yerde) ise sağlanır.

İspat. Alt sınır, $w_i \ge 0$ olmasından aşikârdır. Üst sınır Cauchy–Schwarz eşitsizliğidir:

$$\int \hat{w}_A \hat{w}_B\,\mathrm{d}u \;\le\; \|\hat{w}_A\|_2\,\|\hat{w}_B\|_2,$$

eşitlik ancak $\hat{w}_A = c_0\,\hat{w}_B$ orantılılığında gerçekleşir. Her iki yoğunluk da $\int \hat{w}_i\,\mathrm{d}u = 1$ normalizasyonunu taşıdığından $c_0 = 1$, yani $\hat{w}_A = \hat{w}_B$ bulunur. □

Böylece kütle çekim potansiyel enerjisi, ZMUT'un merkezî öngörüsü olan çarpımsal mod düzeltmesiyle

$$\boxed{U(r) \;=\; -\,\frac{G\,m_A\,m_B}{r}\;\hat{O}_{AB}} \tag{43}$$

biçimini alır. $[\,U\,] = \mathrm{J}$ boyutu, $\hat{O}_{AB}$'nin boyutsuzluğu (Teorem 3.6) sayesinde Önerme 3.3 ile tam uyumludur.

Teorem 3.7 (Newton yasasının geri kazanımı, II: örtüşme düzeyi)**.** *Klasik (dekohere) limitte, yani A ve B ortak çevresel işaretçi (pointer) moduna yerleşmiş, $\hat{w}_A = \hat{w}_B$ olan sistemler için,*

$$\hat{O}_{AB} \longrightarrow 1 \qquad\Longrightarrow\qquad U(r) = -\frac{G m_A m_B}{r}, \qquad \vec{F} = -\boldsymbol{\nabla} U = -\frac{G m_A m_B}{r^2}\,\hat{r}, \tag{44}$$

yani Newton'un evrensel kütle çekim yasası tam olarak *elde edilir. Özel olarak, genişlikleri $\varepsilon \to 0$ olan ortak-merkezli herhangi bir delta-dizisi ailesi $\hat{w}_A = \hat{w}_B = \eta_\varepsilon$ için $\hat{O}_{AB} = 1$ eşitliği limit boyunca her ε'da korunur; dolayısıyla limit tekil değildir.*

İspat. Teorem 3.6'in doygunluk hâli $\hat{w}_A = \hat{w}_B \Rightarrow \hat{O}_{AB} = 1$'i verir; (43)'a konulmasıyla (44) çıkar. Delta-dizisi ifadesi için, her $\varepsilon > 0$'da pay $\|\eta_\varepsilon\|_2^2$, payda $\|\eta_\varepsilon\|_2\|\eta_\varepsilon\|_2$ olup oran özdeş olarak 1'dir; $\varepsilon \to 0$ limitinde tekil büyüyen normlar oranda birbirini götürür. Kuvvet ifadesi, $\hat{O}_{AB}$'nin r'den bağımsızlığı nedeniyle doğrudan gradyan alınarak bulunur. □

Önerme 3.8 (Gauss paketleri için kapalı biçim)**.** *Merkez kaymaları $\Delta := \Theta_A - \Theta_B$ ve genişlikleri σ_A, σ_B olan Gauss mod yoğunlukları için*

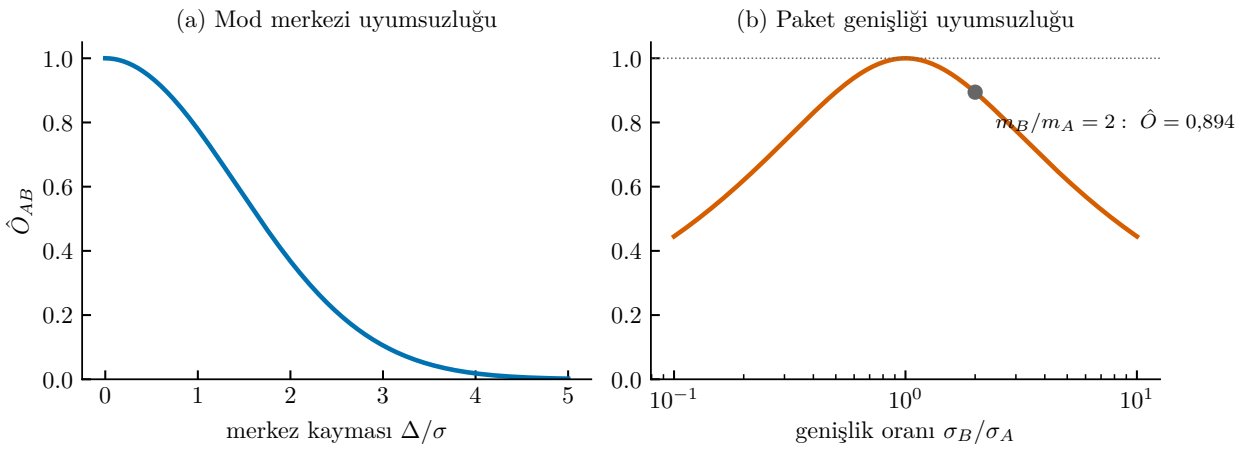
$$\hat{O}_{AB} = \sqrt{\frac{2\,\sigma_A\sigma_B}{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}}\;\exp\!\left[-\frac{\Delta^2}{2\,(\sigma_A^2 + \sigma_B^2)}\right]. \tag{45}$$

İspat. $w_i(u) = (2\pi\sigma_i^2)^{-1/2}\exp\!\big[-(u-\Theta_i)^2/2\sigma_i^2\big]$ için standart Gauss integralleri

$$\int w_A w_B\,\mathrm{d}u = \frac{\exp\!\big[-\Delta^2/2(\sigma_A^2+\sigma_B^2)\big]}{\sqrt{2\pi(\sigma_A^2+\sigma_B^2)}}, \qquad \int w_i^2\,\mathrm{d}u = \frac{1}{2\sigma_i\sqrt{\pi}}$$

verir; (41)'a oranlanmasıyla (45) elde edilir. $\sigma_A = \sigma_B$, $\Delta = 0$ özel hâlinde $\hat{O}_{AB} = 1$ doğrulaması Teorem 3.7 ile uyumludur. □

Sonuç 3.9 (Kütle uyumsuzluğu bastırması)**.** *§4.2'da türetilecek $\sigma_i = \lambda_{m_i} = \kappa/m_i$ minimal paketleri için, saf (dekohere olmamış) durumdaki iki sistemin kütle oranı $m_B/m_A = 2$ ise $\hat{O}_{AB} = \sqrt{4/5} \approx 0{,}894$ olur: ZMUT,* koheran *kuantum sistemleri arasındaki çekimin yaklaşık yüzde on bastırılacağını öngörür (Şekil 1). Laboratuvar cisimleri gibi dekohere sistemler ortak işaretçi modunu paylaştığından ($\hat{w}_A = \hat{w}_B$) bu bastırma gözlenmez; klasik testlerle tam uyum Teorem 3.7 ile garantidir.*



Şekil 1: Normalize zamansal örtüşmenin (Önerme 3.8) iki bastırma kanalı. (a) Ortak genişlikli paketlerde merkez kayması: $\hat{O} = e^{-\Delta^2/4\sigma^2}$. (b) Ortak merkezli paketlerde genişlik oranı: $\hat{O} = \sqrt{2r/(1+r^2)}$, $r = \sigma_B/\sigma_A$; minimal paketlerde $r = m_A/m_B$ olduğundan kütle oranı 2 olan saf çift için $\hat{O} \approx 0{,}894$ (işaretli nokta; Sonuç 3.9).

3.5 Dalgasal zaman alanı ve metrik iz modülasyonu

ZMUT'un erken formülasyonlarında skaler bir "zaman alanı" $T(x,\mu)$ bağımsız bir dalga alanı olarak önerilmişti. Burada bu alan, bağımsızlığı kaldırılarak doğrusallaştırılmış metriğin iz serbestlik derecesine bağlanır. $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $|h_{\mu\nu}| \ll 1$ ve iz-ters (trace-reversed) pertürbasyon $\bar{h}_{\mu\nu} := h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h$, $h := \eta^{\mu\nu}h_{\mu\nu}$ olsun. Lorenz ayarında ($\partial^\mu \bar{h}_{\mu\nu} = 0$) doğrusallaştırılmış (35),

$$\Box\, \bar{h}_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4}\, \mathcal{T}_{\mu\nu} \tag{46}$$

verir. İz alınırsa ($\eta^{\mu\nu}\bar{h}_{\mu\nu} = h - 2h = -h$),

$$\Box\, h = \frac{16\pi G}{c^4}\, \mathcal{T}, \qquad \mathcal{T} := \eta^{\mu\nu}\mathcal{T}_{\mu\nu}, \tag{47}$$

bulunur: *metrik izi, mod sektörünün enerji–momentum izi tarafından kaynaklanan bir dalga denklemine uyar.* Saf genel görelilikte h, kalan ayar serbestliğiyle (TT ayarı) yok edilebilir; ZMUT'ta ise lif fonksiyonunun pertürbasyonu $\hat{f}(x) = 1 + 2\sigma(x)$ bu serbestliği fizikselleştirir. Gerçekten, x-bağımlı lif için Teorem 2.4'nin hesabı iki ek Christoffel bileşeni üretir,

$$\tilde{\Gamma}^{\mu}{}_{\xi\xi} = c^2 \hat{f}\, g^{\mu\sigma}\partial_\sigma\sigma, \qquad \tilde{\Gamma}^{\xi}{}_{\mu\xi} = \partial_\mu\sigma, \tag{48}$$

ve skaler eğrilik $\tilde{R} = R - 2\Box_4\sigma - 2\,(\partial\sigma)^2$ olur. Eylemde $\sqrt{\hat{f}} \simeq e^{\sigma}$ ölçüsüyle birlikte birinci mertebede

$$\sqrt{\hat{f}}\,\tilde{R} \;\simeq\; R + \sigma R - 2\,\Box_4\sigma + \mathcal{O}(\sigma^2) \tag{49}$$

elde edilir: tam türev atıldıktan sonra radyon σ, eğriliğe *doğrusal* bağlanır. Lorenz ayarında $R^{(1)} = -\frac{1}{2}\Box h$ olduğundan, σ'nın varyasyonu iz sektörünü kaynaklar ve (h,σ) çiftinin tek bir yayılan skaler bileşimi — *nefes modu* — kalır. Böylece:

Tanım 3.10 (Dalgasal zaman alanı)**.** İlişkisel akış parametresi μ (kısıt yörüngesi boyunca Page–Wootters zamanı, bkz. (22)) olmak üzere, ZMUT zaman alanı metrik izinin ölçeklenmiş salınımıdır:

$$T(x,\mu) := \frac{\Theta}{2}\, h\big(x,\mu\big). \tag{50}$$

Önerme 3.11 (İz modunun dalga çözümü)**.** *Vakumda ($\mathcal{T} = 0$) (47) düzlem dalga çözümlerini kabul eder ve zaman alanı*

$$\boxed{\,T(x,\mu) = A\,\cos\!\big(kx - \omega\mu + \phi\big), \qquad \omega = c\,|k|\,} \tag{51}$$

biçimini alır; $A = \Theta\mathcal{A}/2$, $\mathcal{A}$ boyutsuz iz genliğidir ve $[T] = \mathrm{s}$'dir. $T(x,\mu)$ bağımsız bir alan değildir*: dinamiği (47)'den, dolayısıyla Einstein denklemlerinden miras alınır; genliği ise σ–h karışımının α bağlaşımıyla belirlenir.*

İspat. $\Box h = 0$ için $h = \mathcal{A}\cos(k_\mu x^\mu + \phi)$ ancak $k_\mu k^\mu = 0$, yani $\omega = c\left|\vec{k}\right|$ ise çözümdür; (50)'e konulması ve kısıt akışında x^0'ın μ ile parametrizasyonu (51)'yı verir. □

Gözlemsel sonuç: nefes modu, kütleçekim dalgası interferometrelerinde çapraz ve artı polarizasyonlara ek skaler bir kanal olarak aranabilir (§19); genliğin α ile ölçeklenmesi, LIGO tipi gözlemlerin [21] ZMUT parametre uzayına doğrudan sınır koymasını sağlar.

4 Rölativistik Kinematik ve Zamansal Dekoherans

4.1 Genişletilmiş öz-zaman ve $v \to c$ limitinde gerçeklik

Genişletilmiş metrik (5) üzerinde bir dünya çizgisinin öz-zamanı,

$$\mathrm{d}\tilde{\tau}^2 := -\frac{\mathrm{d}s^2}{c^2}\bigg|_{\text{zamansal}} = -\frac{1}{c^2}\, g_{\mu\nu}\,\mathrm{d}x^\mu \mathrm{d}x^\nu + \hat{f}(\xi)\,\mathrm{d}\xi^2 \tag{52}$$

ile tanımlanır ($f = c^2\hat{f}$ kullanıldı). Düz uzay–zamanda ($g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu}$) adım adım ilerleyelim. (i) Standart dört boyutlu kesim:

$$-\frac{1}{c^2}\,\eta_{\mu\nu}\,\mathrm{d}x^\mu \mathrm{d}x^\nu = \mathrm{d}t^2 - \frac{\mathrm{d}\vec{x}^{\,2}}{c^2} = \mathrm{d}t^2\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right), \tag{53}$$

ki bu, $v < c$ için bilinen $\mathrm{d}\tau = \mathrm{d}t\sqrt{1 - v^2/c^2}$ ifadesini verir ve $v \to c^-$ limitinde sıfıra gider. (ii) Mod akış hızı $\nu_\xi := \mathrm{d}\xi/\mathrm{d}t$ tanımlanırsa (52),

$$\mathrm{d}\tilde{\tau} = \mathrm{d}t\,\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2} + \hat{f}\,\nu_\xi^2} \tag{54}$$

olur. (iii) Işık hızında ($v = c$) kök altındaki ilk iki terim birbirini tam götürür ve

$$\mathrm{d}\tilde{\tau}\,\Big|_{v=c} = \sqrt{\hat{f}}\,|\mathrm{d}\xi| \;\geq\; 0 \tag{55}$$

kalır: öz-zaman hiçbir noktada sanal sayıya dönüşmez.

Teorem 4.1 (Öz-zamanın gerçekliği)**.** *$\hat{f} > 0$ olmak üzere, $v \leq c$ koşulunu sağlayan her hareket ve her mod akışı için $\mathrm{d}\tilde{\tau} \in \mathbb{R}_{\geq 0}$'dır. Eşitlik ($\mathrm{d}\tilde{\tau} = 0$) ancak $v = c$ ve $\mathrm{d}\xi = 0$ birlikte sağlanırsa gerçekleşir. Özel olarak, kütlesiz sistemler dört boyutlu anlamda "yaşlanmasa" da ($\mathrm{d}\tau_4 = 0$), mod yönünde $\sqrt{\hat{f}}\,|\mathrm{d}\xi|$ kadar genişletilmiş öz-zaman biriktirir.*

İspat. (54)'ta $1 - v^2/c^2 \geq 0$ ve $\hat{f}\nu_\xi^2 \geq 0$ terimlerinin toplamı negatif olamaz; kare kök reel ve negatif değildir. Toplamın sıfırlanması her iki terimin ayrı ayrı sıfırlanmasını gerektirir. □

Uyarı 4.2 (Nedensel yapı ve $v > c$ dalı). (54)'ın $v > c$ için de reel kalabilmesi, süperluminal harekete izin verildiği anlamına gelmez: fiziksel yörüngeler, kısıt (21)'in ürettiği indirgenmiş dinamiğin çözümleridir ve bu dinamik, dört boyutlu kesimde alışılmış nedensel yapıyı (Teorem 3.4) korur. Genişletilmiş konideki ek bölge, tıpkı iki-zamanlı fizikteki gibi [4], ayar yörüngeleriyle özdeşleştirilir ve fiziksel faz uzayından çıkarılır.

Önerme 4.3 (Lorentz invaryansı)**.** *Genişletilmiş metrik (5), x-blokuna etkiyen tam Lorentz grubu $SO(3,1)$ altında invaryanttır;* $\mathrm{d}\xi = 0$ *dilimlerini koruyan izometriler standart özel göreliliği aynen üretir. $\hat{f} =$ sabit hâlinde tam izometri grubu $SO(3,2)$'ye genişler; bu, Bars'ın $SO(d,2)$ yapılarıyla [4] aynı ailedendir. Dolayısıyla ZMUT, Lorentz simetrisini* kırmaz*; onu daha geniş bir gruba gömer.*

İspat. $\Lambda \in SO(3,1)$ için $x \mapsto \Lambda x$, $\xi \mapsto \xi$ dönüşümü altında $\eta_{\mu\nu}\mathrm{d}x^\mu\mathrm{d}x^\nu$ invaryant, $f(\xi)\mathrm{d}\xi^2$ dokunulmamıştır. Sabit $\hat{f}$'te (5), $\mathbb{R}^{3,2}$'nin düz metriğidir; izometri grubu tanım gereği $SO(3,2)$'dir (ötelemelerle yarı-doğrudan çarpım). □

Schwinger bağlantısı. Mod parametresinin dinamikleştirilmesi, Schwinger'in öz-zaman temsiline [7] organik biçimde bağlanır: serbest bir rölativistik parçacığın Feynman yayıcısının çekirdeği

$$\frac{1}{p_\mu p^\mu + m^2c^2 - i\epsilon} = \frac{1}{2m}\cdot\frac{i}{\hbar}\int_0^\infty \mathrm{d}\xi\; e^{-i\xi\,(\mathcal{H}_p - i\epsilon)/\hbar}, \qquad \mathcal{H}_p := \frac{p_\mu p^\mu + m^2c^2}{2m}, \tag{56}$$

biçiminde, $[\xi] = \mathrm{s}$ boyutlu Schwinger parametresi üzerinden bir integral olarak yazılır; $\mathcal{H}_p$, $[\mathcal{H}_p] = \mathrm{J}$ boyutlu dünya-çizgisi Hamiltonyenidir. ZMUT'un okuması şudur: Schwinger temsilindeki integrand, serbest parçacığın *mod genliğidir*; yani $\psi(\xi)$, standart kuantum alan kuramında zaten örtük olarak var olan öz-zaman genliğinin dinamik ve ölçülebilir kılınmış hâlidir.

4.2 Kütle–mod bağıntısının türetimi: $\lambda_m = \kappa/m$, $\kappa = \hbar/c^2$

Teorem 4.4 (Kütle–mod bağıntısı)**.** *Takyonsuzluk koşulu* (31) *altında, bir sistemin mod paketi* $\psi(\xi)$*'nin genişliği alttan sınırlıdır:*

$$\sigma_\xi \;\geq\; \frac{\hbar}{2\,mc^2} \qquad\Longrightarrow\qquad \boxed{\lambda_m := \frac{\hbar}{mc^2} = \frac{\kappa}{m}, \qquad \kappa = \frac{\hbar}{c^2} = 1{,}173 \times 10^{-51}\ \mathrm{kg\,s}} \tag{57}$$

Yani $\lambda_m = \kappa/m$ *bağıntısı bir varsayım değil, kuramın iç tutarlılığının (takyonik yayılımın yokluğunun) sonucudur ve* κ *sabiti evrensel olarak* $\hbar/c^2$ *değerine kilitlenir.* λ_m*, sistemin indirgenmiş Compton* zamanıdır*.*

İspat. §3.1'de gösterildiği üzere, ψ'nin durağan mod bileşenleri $e^{-i\mathfrak{E}\xi/\hbar}$ ancak $|\mathfrak{E}| \leq mc^2$ bandında takyonsuz yayılır (31); dolayısıyla fiziksel $\psi(\xi)$, Fourier eşleniği $[-mc^2, mc^2]$ aralığına destekli, *bant-sınırlı* bir fonksiyondur:

$$\psi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \int_{-mc^2}^{mc^2} \mathrm{d}\mathfrak{E}\ \tilde{\psi}(\mathfrak{E})\, e^{-i\mathfrak{E}\xi/\hbar}.$$

Konum–momentum tipi eşlenik çift $(\hat{\xi}, \hat{p}_\xi)$ için Kennard–Robertson eşitsizliği $\sigma_\xi\,\sigma_{p_\xi} \geq \hbar/2$ geçerlidir; bant-sınırlılık $\sigma_{p_\xi} \leq mc^2$ verdiğinden

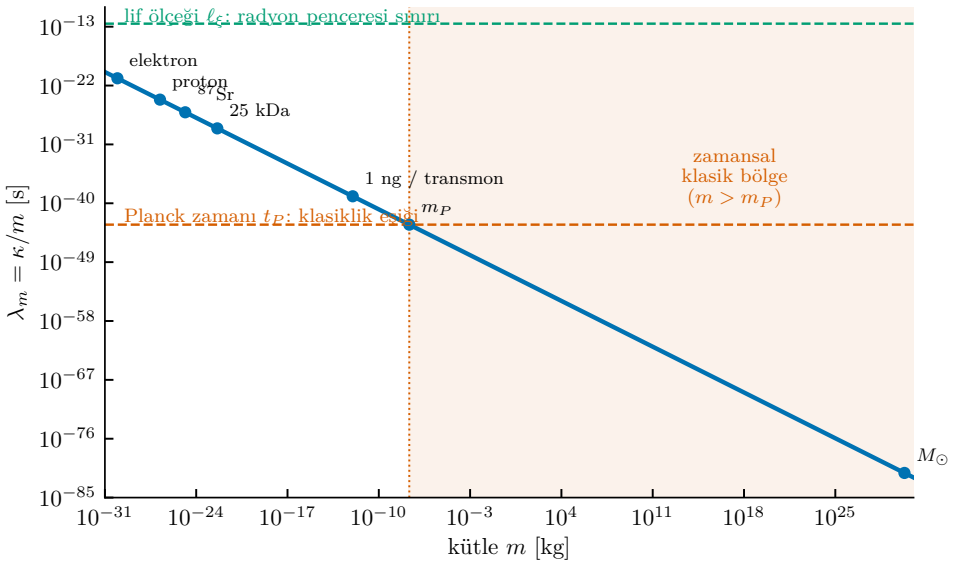
$$\sigma_\xi \;\geq\; \frac{\hbar}{2\,\sigma_{p_\xi}} \;\geq\; \frac{\hbar}{2\,mc^2}$$

bulunur. Minimal paket ölçeği $2\sigma_\xi^{\min} = \hbar/(mc^2) =: \lambda_m$ olarak tanımlanır; $\kappa = \hbar/c^2$ okuması doğrudandır. □

Sonuç 4.5 (Planck eşiği ve kuantum–klasik geçiş)**.** λ_m*, Planck kütlesi* $m_P = \sqrt{\hbar c/G} = 2{,}176 \times 10^{-8}\,\mathrm{kg}$*'de tam olarak Planck zamanına eşittir:*

$$\lambda_m(m_P) = \frac{\hbar}{m_P c^2} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = t_P = 5{,}39 \times 10^{-44}\ \mathrm{s}. \tag{58}$$

$m > m_P$ *için mod paketi Planck-altı genişliğe sıkışır; hiçbir fiziksel saat bu ölçeği çözemeyeceğinden mod süperpozisyonu işlemsel olarak erişilmez hâle gelir ve sistem* zamansal bakımdan klasiktir*.* $\lambda_m = \kappa/m$ *bu anlamda bir* dekoherans eşiği *tanımlar: çevresel zamansal çözünürlüğü* $\delta\tau_{\text{çev}}$ *olan bir ortamda kritik kütle* $m_c = \kappa/\delta\tau_{\text{çev}}$*'dir ve* $m \gg m_c$ *sistemler kaçınılmaz olarak klasikleşir. Planck kütlesinin (*$\approx 22\ \mu$g*) makroskopik–mikroskopik sınırında yer alması, bu eşiğin bilinen kuantum–klasik fenomenolojiyle nicel uyumunu gösterir (Şekil 2).*



Şekil 2: Kütle–mod bağıntısı $\lambda_m = \kappa/m$ ve kuramın iki doğal eşiği. Üst kesikli çizgi lif ölçeği ℓ_ξ'dir: $\lambda_m \gtrsim \ell_\xi$ (yani $mc^2 \lesssim 2$ meV) sistemler radyon penceresinde tam bağlaşır (§8). Alt kesikli çizgi Planck zamanıdır: $m > m_P$ için paket Planck-altına sıkışır ve sistem zamansal bakımdan klasikleşir (Sonuç 4.5; gölgeli bölge).

4.3 Pauli teoreminin aşılması: kuantum referans çerçeveleri ve Page–Wootters mekanizması

Teorem 4.6 (Pauli 1933)**.** *$\hat{H}$ alttan sınırlı spektrumlu öz-eşlenik bir Hamiltonyen olsun. $[\hat{T},\hat{H}]=i\hbar$ kanonik eşlenik bağıntısını sağlayan öz-eşlenik bir $\hat{T}$ operatörü* aynı *Hilbert uzayında var olamaz [6].*

İspat taslağı. $\hat{T}$ öz-eşlenik ise $U_\epsilon = e^{-i\epsilon\hat{T}/\hbar}$ üniter ailedir ve eşlenik bağıntısından $U_\epsilon^\dagger \hat{H} U_\epsilon = \hat{H} + \epsilon$ elde edilir: spektrum her $\epsilon \in \mathbb{R}$ için ötelenir. Alttan sınırlı bir spektrum, negatif yönde sınırsız ötelemeyle çelişir. □

ZMUT bu engeli, zamanı *sistemin* Hilbert uzayında değil, genişletilmiş kinematik uzayda temsil ederek aşar. Yapı üç katmanlıdır:

(i) Öz-eşlenik mod operatörü. $\mathcal{H}_{\mathrm{mod}} = L^2(\mathbb{R},\mathrm{d}\xi)$ üzerinde $(\hat{\xi}\psi)(\xi) = \xi\,\psi(\xi)$ çarpım operatörü, spektral teorem gereği öz-eşlenik olup spektrumu $T = \{T_n\}$ (kesikli hâl) ya da $\mathbb{R}$'dir (sürekli hâl). Eşleniği $\hat{p}_\xi = -i\hbar\partial_\xi$'dir ve $[\hat{\xi},\hat{p}_\xi] = i\hbar$ tam Weyl biçiminde gerçekleşir. Burada Pauli teoremiyle çelişki yoktur, çünkü $\hat{p}_\xi$ *fiziksel enerji değildir*: spektrumu tüm $\mathbb{R}$ olan bir kısıt üretecidir.

(ii) Kısıt ve ilişkisel dinamik. Fiziksel içerik, §2.4'te kurulan $\hat{\mathcal{C}} = \hat{p}_\xi + \hat{H}_S$ kısıtının çekirdeğindedir. $\hat{H}_S$ alttan sınırlıdır ve öyle kalır; $\hat{\xi}$ ise $\hat{H}_S$'ye değil, $\hat{p}_\xi$'ye eşleniktir. Pauli teoreminin hipotez kümesi — "alttan sınırlı üretece eşlenik öz-eşlenik zaman operatörü" — fiziksel kuramda *hiçbir yerde* bir araya gelmez:

Teorem 4.7 (Pauli engelinin aşılması)**.** *$\mathcal{H}_{\mathrm{kin}} = L^2(\mathbb{R},\mathrm{d}\xi)\otimes\mathcal{H}_S$ ve $\hat{\mathcal{C}} = \hat{p}_\xi\otimes\mathbb{I} + \mathbb{I}\otimes\hat{H}_S$ olsun. (a) $\hat{\xi}$ öz-eşleniktir ve zaman gözlenebiliri olarak koşullu olasılıklar üzerinden iyi tanımlıdır. (b) $\ker\hat{\mathcal{C}}$ üzerinde indirgenmiş dinamik, (22) Schrödinger denklemidir. (c) $\hat{H}_S$'nin alttan sınırlılığı korunur; hiçbir aşamada $[\hat{T},\hat{H}_S]=i\hbar$ bağıntısı sağlanması gereken öz-eşlenik $\hat{T}$ inşa edilmez. Dolayısıyla Teorem 4.6 ile çelişki doğmaz ve zaman, Page–Wootters anlamında ilişkisel bir gözlenebilir olarak kuantum kuramına meşru biçimde girer [5].*

İspat. (a) çarpım operatörünün öz-eşlenikliği ve $|\Psi\rangle\!\rangle$ üzerinde $P(\xi) = \|\langle\xi|\Psi\rangle\!\rangle\|^2$ koşullu dağılımının Born kuralı yorumundan; (b) (21)'in $\langle\xi|$ ile projeksiyonundan; (c) $\hat{\mathcal{C}}$'de $\hat{H}_S$'ye eşlenik operatörün $\hat{\xi}$ değil, yalnızca $\hat{p}_\xi$'nin $-\hat{H}_S$'ye "denk" kılınması olduğu gözleminden çıkar: $\hat{\xi}$'nin eşleniği $\hat{p}_\xi$ alttan sınırsızdır ve sınırsız olması serbesttir; fiziksel enerji $\hat{H}_S$ ise hiçbir öz-eşlenik operatöre kanonik eşlenik ilan edilmemiştir. □

(iii) QRF kovaryansı. İki farklı saat sistemi C ve C' (iki farklı mod kütüğü) arasında geçiş, Giacomini–Castro-Ruiz–Brukner anlamında [3] bir kuantum referans çerçevesi dönüşümüdür. C çerçevesindeki koşullu durum $\left|\psi^{(C)}(\xi)\right\rangle$ ile C' çerçevesindeki durum arasında

$$\left|\psi^{(C')}(\xi')\right\rangle = \hat{\mathcal{S}}_{C\to C'}\left|\psi^{(C)}(\xi)\right\rangle, \qquad \hat{\mathcal{S}}_{C\to C'} = \hat{\mathcal{P}}_{CC'}\,\exp\!\left[\frac{i}{\hbar}\,\hat{\xi}_{C'}\otimes\hat{H}_C\right], \tag{59}$$

biçiminde üniter bir eşleme vardır; $\hat{\mathcal{P}}_{CC'}$ kütük değiş tokuşu, üstel çarpan ise yeni saatin konumuyla eski saatin üretecinin bağlaşımıdır. (22)'in biçimi bu dönüşüm altında korunur: *fizik yasaları, hangi kuantum saatin "zaman" ilan edildiğinden bağımsızdır.* Bu, klasik genel kovaryansın mod sektörüne genişletilmesidir ve ZMUT'un "mod göreliliği" ilkesini oluşturur.

Açık örnek (iki seviyeli sistem). $\hat{H}_S = \frac{\Delta E}{2}\,\hat{\sigma}_z$, $|\varphi_0\rangle = c_\uparrow|\uparrow\rangle + c_\downarrow|\downarrow\rangle$ için kısıt çözümü (23),

$$|\psi_S(\xi)\rangle = c_\uparrow\, e^{-i\Delta E\,\xi/2\hbar}\,|\uparrow\rangle + c_\downarrow\, e^{+i\Delta E\,\xi/2\hbar}\,|\downarrow\rangle \tag{60}$$

verir; $\langle\hat{\sigma}_x\rangle(\xi) = 2|c_\uparrow c_\downarrow|\cos(\Delta E\,\xi/\hbar + \varphi_0)$ salınımı, "zamanın" mod parametresinden ibaret olduğu ilişkisel dinamiği somutlar. Bu örnek, bir sonraki alt bölümde dekoherans mekanizmasının çekirdeğini oluşturur.

4.4 Zamansal dekoherans: ilk (naif) model ve kuantum–klasik geçiş

Bu alt bölümdeki türetim, kuramın ilk yaklaşımıdır; §5'teki denetimde Z1–Z2 maddeleriyle sınanacak ve §6'te aksiyomatik temele oturtulacaktır. Nicel yasaların biçimi (Gauss görünürlük, t_{dek} ölçeklemesi) bu geçişte korunur; değişen, türetimin statüsü ve Θ'nın yorumudur.

Mod paketinin sonlu genişliği, iç enerji süperpozisyonu taşıyan her sistem için evrensel bir faz-dağıtma (dephasing) kanalı üretir. Mod merkezine göre göreli akış hızı $R(\xi) = \xi/\Theta$ olan bir modda, laboratuvar süresi t boyunca biriken görelifaz $\varphi(\xi;t) = \Delta E\,R(\xi)\,t/\hbar$'dır. Başlangıçta $\frac{1}{\sqrt{2}}(|E_1\rangle + |E_2\rangle)$, $\Delta E = E_2 - E_1$ süperpozisyonundaki bir sistem için indirgenmiş yoğunluk matrisinin off-diyagonal ögesi,

$$\mathcal{V}(t) = \left|\int \mathrm{d}\xi\; w(\xi)\; e^{\,i\Delta E\,\xi\,t/(\hbar\Theta)}\right| = \left|\chi_w\!\left(\frac{\Delta E\,t}{\hbar\,\Theta}\right)\right| \tag{61}$$

görünürlüğüyle ölçeklenir; χ_w, mod yoğunluğunun karakteristik fonksiyonudur.

Teorem 4.8 (Zamansal dekoherans yasası)**.** *Genişliği $\sigma_\xi = \lambda_m$ olan Gauss mod paketi için görünürlük Gauss yasasıyla söner,*

$$\mathcal{V}(t) = \exp\left[-\frac{\Delta E^2\,\lambda_m^2\,t^2}{2\,\hbar^2\,\Theta^2}\right], \tag{62}$$

ve karakteristik dekoherans süresi ($\mathcal{V} = e^{-1/2}$)

$$\boxed{t_{\mathrm{dek}} = \frac{\hbar\,\Theta}{\Delta E\,\lambda_m} = \frac{\Theta\,mc^2}{\Delta E}} \tag{63}$$

olur; ikinci eşitlikte Teorem 4.4 kullanılmıştır.

İspat. Gauss yoğunluğun karakteristik fonksiyonu $\chi_w(k) = e^{i\Theta k}e^{-\sigma_\xi^2 k^2/2}$'dir; modülü alınıp $k = \Delta E\,t/(\hbar\Theta)$ konulursa (62), $\mathcal{V} = e^{-1/2}$ koşulundan (63) çıkar. □

Uyarı 4.9 (Pikovski kanalıyla birleşim)*.* Kütle çekimsel zaman genleşmesi, Δx yükseklik süperpozisyonundaki bileşik bir sistemde iç enerji dalgalanması $\sigma_E = \sqrt{3N}\,k_BT$ üzerinden

$$\tau_{\mathrm{dil}} = \frac{\sqrt{2}\,\hbar\,c^2}{g\,\Delta x\,\sigma_E} \tag{64}$$

ölçekli bağımsız bir faz-dağıtma süresi üretir [1]. Her iki kanal da Gauss karakterli olduğundan hızlar karesel toplanır: $\Gamma_{\mathrm{top}}^2 = \Gamma_{\mathrm{mod}}^2 + \Gamma_{\mathrm{dil}}^2$, $\Gamma_{\mathrm{mod}} := 1/t_{\mathrm{dek}}$, $\Gamma_{\mathrm{dil}} := 1/\tau_{\mathrm{dil}}$. Ölçekleme yapısı tamamlayıcıdır: $\Gamma_{\mathrm{mod}} \propto \Delta E/(m\Theta)$ kütleyle *azalırken*, $\Gamma_{\mathrm{dil}} \propto \sqrt{N}\,\Delta x$ sistem büyüklüğüyle *artar*. Mikroskopik sistemlerde her iki hız da ihmal edilebilir (kuantum bölge); makroskopik uzaysal süperpozisyonlarda genleşme kanalı, mod kanalının koruduğu hafif sistemleri de klasikleştirir. İki kanalın kesişimi, Sonuç 4.5'ın Planck eşiğiyle birlikte, kuantum–klasik geçişin ZMUT içindeki tam topografyasını çizer.

Önerme 4.10 (İnterferometrik görünürlüğün ZMUT düzeltmesi)**.** *Kollar arasında öz-zaman farkı $\Delta\tau$ olan bir madde-dalga interferometresinde, iç enerji farkı ΔE taşıyan sistemin görünürlüğü, Zych ve arkadaşlarının genel görelilikçi öngörüsünün [2] üzerine çarpımsal mod çarpanıyla iner:*

$$\mathcal{V}_{\mathrm{ZMUT}} = \underbrace{\left|\cos\!\left(\frac{\Delta E\,\Delta\tau}{2\hbar}\right)\right|}_{GR\ +\ KM} \times \underbrace{\left|\chi_w\!\left(\frac{\Delta E\,\Delta\tau}{\hbar\,\lambda_m}\cdot\frac{\lambda_m}{\Theta}\right)\right|}_{ZMUT\ mod\ çarpanı}. \tag{65}$$

$\lambda_m/\Theta \to 0$ limitinde mod çarpanı 1'e gider ve standart öngörü aynen geri kazanılır; sonlu λ_m/Θ için ZMUT, görünürlükte küçük ama sistematik bir ek sönüm öngörür (§19).

Kısım II
Öz-Eleştirel Denetim ve Teorem Düzeyinde Onarım

5 Eleştirel Çözümleme: Dokuz Yapısal Zayıflık

Aşağıdaki maddeler, Kısım I'e yöneltilebilecek en güçlü itirazların bilinçli olarak en keskin biçimleriyle ifadesidir. Her maddenin sonunda çözümün verildiği bölüm işaret edilmiş; denetimin özeti Tablo 2'te toplanmıştır.

Z 1 (Görünürlük yasasının ad hoc temeli)**.** Kısım I'in dekoherans türetimi, "mod merkezine göre göreli akış hızı $R(\xi) = \xi/\Theta$" varsayımına dayanır; bu varsayım eylemden, kısıttan ya da aksiyomlardan *türetilmemiş*, doğrusallaştırma gerekçesiyle elden konulmuştur. Oysa kısıt (21) tek başına $e^{-i\hat{H}_S\xi/\hbar}$ evrimi verir; bu evrimle görünürlük $|\chi_w(\Delta E/\hbar)|$ laboratuvar süresinden *bağımsız* çıkar ve hiçbir t_{dek} üretmez. Yasa (62) bu hâliyle dinamikten kopuktur. ⇝ §6

Z 2 (Θ'nın çifte rolü)**.** Θ, Kısım I'de hem durum işlevseli olan mod merkezi $\int \xi|\psi|^2\mathrm{d}\xi$ (dolayısıyla sisteme ve zamana bağlı), hem de görünürlük yasasında evrensel bir bağlaşım ölçeği (dolayısıyla sabit) olarak kullanılmıştır. Bu iki rol bağdaşmaz: durum işlevseli okumasında Θ hazırlanışa göre değişir ve deneysel "Θ sınırı" iyi tanımlı olmaz; sabit okumasında ise mod merkeziyle özdeşleştirme temelsizdir. ⇝ §6

Z 3 (Bileşik sistem tutarsızlığı)**.** Kısım I, N parçacıklı bir bileşik için $\lambda_M = \kappa/M$ paketini örtük olarak kullanır. Ne var ki Aksiyom 5 (tensör çarpım yapısı) altında, bileşenleri bağımsız minimal paketlerde hazırlanmış bir sistemin kütle-ağırlıklı kolektif modunun genişliği $\kappa/(\sqrt{N}m_0) = \sqrt{N}\,\lambda_M$ olur: minimal kolektif paket, ancak bileşen modları arasında özel korelasyonlar (dolanıklık) varsa erişilebilirdir. Kısım I bu ayrımı yapmadığından, atomik ve moleküler öngörüleri (^{229}Th, 25 kDa) belirsiz bir varsayıma yaslanır. ⇝ §7

Z 4 (Skaler sektörün Cassini ile çelişkisi)**.** Kısım I'in radyon analizi, $\sqrt{\hat{f}}\,\tilde{R}$ indirgemesinin $e^{\sigma}R$ yapısını üretmesinin sonuçlarını izlememiştir. Aşağıda (Önerme 10.1) gösterileceği gibi bu yapı, kütlesiz hâlde tam olarak $\omega = 0$ Brans–Dicke kuramıdır; öngördüğü $\gamma = 1/2$ PPN değeri, Cassini ölçümü $\gamma - 1 = (2{,}1 \pm 2{,}3) \times 10^{-5}$ [23] ile yaklaşık 22 000 standart sapma çelişir. Stabilizasyonsuz ZMUT skaler sektörü *deneysel olarak dışlanmıştır.* ⇝ §10

Z 5 (Nedensellik ve hayaletsizlikte eksik kanıtlar)**.** Kısım I'de (i) $v > c$ dalının dışlanması bir Uyarı düzeyinde, ayar diline başvuran niteliksel bir gerekçeyle bırakılmış; (ii) hayaletsizlik yalnızca birinci-nicemlenmiş kısıt düzeyinde ispatlanmış, alan (Fock) düzeyinde pozitif tanımlılık gösterilmemiş; (iii) kompakt mod lifi hâlinde kaçınılmaz görünen Kaluza–Klein eşlenik kulesinin (meV ölçeğinde egzotik kütle ortakları!) gözlemle çelişkisi hiç ele alınmamış; (iv) iki zamanlı ultra-hiperbolik denklemin Cauchy probleminin Hadamard anlamında iyi-konumluluğu gösterilmemiş ve $\mathcal{M}_5$'in geometrik statüsü (bağımsız ikinci zaman mı, ayar lifi mi) belirsiz bırakılmıştır. ⇝ §9

Z 6 (Örtüşme çarpanının geçerlilik alanı)**.** $U(r) = -(Gm_Am_B/r)\hat{O}_{AB}$ bağıntısının kapsamı Kısım I'de sınırlanmamıştır. Sınırsız okunursa saçma sonuçlar üretir: örneğin fotonun mod paketi ($m = 0 \Rightarrow \lambda_m \to \infty$) herhangi bir maddesel paketle ihmal edilebilir örtüşür ve Güneş'in ışığı bükmesi $\sim 10^{-7}$ çarpanıyla bastırılmış çıkardı — gözlemle bariz çelişki. ⇝ §10 (Önerme 10.4)

Z 7 (Stabilizasyonun dışsallığı ve ince ayar riski)**.** Z4'nin ilk akla gelen tedavisi, radyona elden bir stabilizasyon potansiyeli $V(\sigma)$ eklemektir (Goldberger–Wise benzeri). Teknik olarak meşru olsa da bu, mekanizmanın ZMUT'un öz kaynaklarından türememesi ve m_σ değerinin ince ayara açık kalması anlamına gelir: kuram, Cassini ve Eöt-Wash kısıtlarını *yapısal* olarak değil, parametre seçimiyle karşılamış olur. İç tutarlılık, ayrışmanın bizzat kütle–mod bağıntısından ($\lambda_m = \hbar/mc^2$) çıkmasını gerektirir. ⇝ §8

Z 8 (Zayıf eşdeğerlik ilkesi riski)**.** Örtüşme bastırması $\hat{O}_{AB} < 1$ sınırsız okunursa, serbest düşen koheran atomların (Rb, K vb.) Dünya'ya kütle çekimsel bağlanması türe, kütleye ve paket genişliğine bağlı hâle gelir; bu, Eötvös oranını $\eta < 10^{-12}$ hassasiyetle sıfırla uyumlu bulan atom-interferometrik testlerle [26] çelişki riski taşır. Kısım I bu kanalı haritalamamıştır. ⇝ §10 (Önerme 10.5)

Z 9 (Banks–Peskin–Susskind itirazı)**.** Temel (fundamental) dekoherans modellerine karşı klasik itiraz, saf durumları karışık durumlara evrilten dinamiklerin genel olarak enerji korunumunu bozup vakumu ısıttığıdır [32]. Kısım I'in görünürlük yasası, üniterlik statüsü ispatlanmadıkça böyle bir temel-dekoherans yasası gibi okunabilir ve aynı itiraza açık kalır. ⇝ §6 (Önerme 6.5)

Tablo 2: Denetim özeti: zayıflıklar, nitelikleri ve çözüm hâlleri.

No	Nitelik	Çözüm mekanizması	Bölüm
Z1	türetim boşluğu	mod–lapse bağlaşımı aksiyomu; tam CPTP harita	§6
Z2	kavramsal ikilik	$\Theta[\psi]$ (durum) ile Θ_* (sabit) ayrımı	§6
Z3	örtük varsayım	kolektif mod teoremi; SQL/Heisenberg bantları	§7
Z4	deneysel çelişki	radyon stabilizasyonu; kütleli Yukawa sektörü	§10
Z5	eksik kanıt	kütle-kabuğu; Fock pozitifliği; KK budaması; Hadamard	§9
Z6	kapsam hatası	klasik arka plan dokunulmazlığı önermesi	§10
Z7	dışsal mekanizma	spektral ayrışma çekirdeği $K(\xi - \xi')$	§8
Z8	deneysel risk	Dünya-QRF kilitlenmesi; $\eta = 0$	§10
Z9	kuramsal itiraz	üniter dilatasyon; tüm enerji momentleri korunur	§6

6 Düzeltilmiş Dinamik: Mod–Lapse Bağlaşımı ve Ana Denklemin Türetimi

6.1 Yeni aksiyom: mod işlemcisinin gecikme fonksiyonuna bağlaşımı

Z1 ve Z2'nın ortak kökü, mod değişkeninin *yerel zaman akış hızına* nasıl bağlandığının aksiyomatik düzeyde belirtilmemiş olmasıdır. Genel görelilikte statik zayıf alanda öz-zaman, koordinat zamanına gecikme (lapse)

fonksiyonuyla bağlanır: $\mathrm{d}\tau = \sqrt{-g_{00}}\,\mathrm{d}t \simeq (1+V/c^2)\,\mathrm{d}t$. Pikovski ve arkadaşlarının dekoherans mekanizması [1], konum işlemcisinin bu gecikmeye girmesinin ($\hat{V}(\hat{x})$) sonucudur. ZMUT'un düzeltilmiş kuruluşu, aynı yapıyı mod sektörüne taşır:

Aksiyom 6 (Mod–lapse bağlaşımı)**.** Yerel zaman akışının işlemci değeri, mod dalgalanmasıyla evrensel Θ_* ölçeği üzerinden modüle edilir:

$$\hat{\mathcal{N}} \;=\; \Big(1+\frac{V(\vec{x})}{c^2}\Big)\,\mathbb{I} \;+\; \frac{\delta\hat{\xi}}{\Theta_*}, \qquad \delta\hat{\xi} := \hat{\xi} - \Theta[\psi]\,\mathbb{I}, \tag{66}$$

ve laboratuvar zamanı üretimi $\hat{H}_{\mathrm{lab}} = \hat{H}_{\mathrm{mod}} + \hat{\mathcal{N}} \otimes \hat{H}_S$ Hamiltonyeniyle gerçekleşir. Burada $\Theta_* > 0$, kuramın yeni temel sabitidir ($[\Theta_*] = \mathrm{s}$); $\Theta[\psi] = \int \xi |\psi|^2 \mathrm{d}\xi$ ise yalnızca durumun merkezleme işlevselidir.

Aksiyom 6 üç işi birden görür. (i) Z1 kapanır: Kısım I'in $R(\xi) = \xi/\Theta$ akış modeli artık varsayım değil, (66)'nin merkezlenmiş dalgalanma teriminin doğrudan sonucudur. (ii) Z2 kapanır: bağlaşım ölçeği Θ_* evrensel bir sabittir; $\Theta[\psi]$ durum işlevseli olarak kalır ve dinamikte yalnızca merkezleme yoluyla görünür. Kısım I'in tüm nicel sonuçları $\Theta \to \Theta_*$ yeniden okumasıyla aynen geçerlidir; özellikle deneysel sınır artık iyi tanımlıdır: $\Theta_* \geq 2{,}2 \times 10^{-11}$ s. (iii) ZMUT, evrensel gecikme-kaynaklı faz-dağıtma ailesine ($\hat{A} \otimes \hat{H}_S$ yapısı) yerleşir; Pikovski kanalı $\hat{A} = g\hat{x}/c^2$, ZMUT kanalı $\hat{A} = \delta\hat{\xi}/\Theta_*$ seçimidir ve iki kanal aynı cebirsel çatıda toplanır.

6.2 Dekoherans haritasının tam türetimi

Teorem 6.1 (Tam CPTP harita)**.** *Başlangıçta $\rho_{\mathrm{mod}} \otimes \rho_S$ çarpım durumundaki bir sistem için, $\hat{H}_{\mathrm{mod}}$'un ihmal edilebildiği (dar paket, kısa süre) rejimde, Aksiyom 6 altında indirgenmiş dinamik*

$$\rho_S(t) = \Phi_t[\rho_S(0)] = \int \mathrm{d}\xi\; w(\xi)\; \hat{U}_\xi(t)\,\rho_S(0)\,\hat{U}_\xi^\dagger(t), \qquad \hat{U}_\xi(t) = \exp\Big[-\frac{i}{\hbar}\Big(1+\frac{\delta\xi}{\Theta_*}\Big)\hat{H}_S\,t\Big], \tag{67}$$

biçiminde tam (yaklaşıksız) bir kuantum kanaldır; Kraus işlemcileri $\hat{M}_\xi = \sqrt{w(\xi)\,\mathrm{d}\xi}\;\hat{U}_\xi(t)$ olup $\int \hat{M}_\xi^\dagger \hat{M}_\xi = \mathbb{I}$ tamlık koşulunu normlama aksiyomu sayesinde sağlar. Enerji öz-tabanında matris ögeleri

$$\langle E_i|\,\rho_S(t)\,|E_j\rangle = e^{-i\omega_{ij}t}\;\chi_{\hat{w}}\Big(\frac{(E_i-E_j)\,t}{\hbar\,\Theta_*}\Big)\;\rho_{ij}(0), \tag{68}$$

ile verilir; $\omega_{ij} = (E_i - E_j)/\hbar$, $\hat{w}$ merkezlenmiş mod yoğunluğu ve $\chi_{\hat{w}}$ onun karakteristik fonksiyonudur.

İspat. $[\delta\hat{\xi}, \hat{H}_S] = 0$ olduğundan toplam evrim $\hat{\xi}$-öz-tabanında blok köşegendir: $\hat{U}(t)\,|\xi\rangle \otimes |\phi\rangle = |\xi\rangle \otimes \hat{U}_\xi(t)\,|\phi\rangle$. Mod üzerinden iz alınması (67)'yi verir; bu, açıkça Kraus biçimidir, dolayısıyla tamamen pozitif ve iz koruyandır. (68) için $\langle E_i|\,\hat{U}_\xi \rho \hat{U}_\xi^\dagger\,|E_j\rangle = e^{-i(E_i-E_j)(1+\delta\xi/\Theta_*)t/\hbar}\rho_{ij}$ yazılır ve $\delta\xi$ üzerinden w-integralinin, tanım gereği karakteristik fonksiyonu ürettiği gözlenir. □

Teorem 6.2 (Markovyen olmayan ana denklem)**.** *Gauss mod paketi (σ_ξ genişlikli) için (67) haritasının ürettiği dinamik, her $t \geq 0$'da tam olarak*

$$\boxed{\frac{\partial\rho_S}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar}\,[\hat{H}_S, \rho_S] \;-\; \gamma(t)\,\big[\hat{H}_S, [\hat{H}_S, \rho_S]\big], \qquad \gamma(t) = \frac{\sigma_\xi^2\,t}{\hbar^2\,\Theta_*^2}} \tag{69}$$

ana denklemine uyar. $\gamma(t) \geq 0$ olduğundan dinamik her anda Lindblad biçimindedir (CP-bölünebilir); oranın zamana doğrusal bağımlılığı, kanalın Gauss (Markovyen olmayan) karakterinin imzasıdır.

İspat. Gauss yoğunluk için $\chi_{\hat{w}}(k) = e^{-\sigma_\xi^2 k^2/2}$'dir; (68)'den

$$\rho_{ij}(t) = \rho_{ij}(0)\,e^{-i\omega_{ij}t}\,\exp\left[-\frac{\sigma_\xi^2(E_i-E_j)^2t^2}{2\hbar^2\Theta_*^2}\right]$$

ve türev alınarak

$$\partial_t\rho_{ij} = \Big[-i\omega_{ij} - \frac{\sigma_\xi^2(E_i-E_j)^2\,t}{\hbar^2\Theta_*^2}\Big]\rho_{ij}$$

bulunur. Öte yandan (69)'nin sağ yanının (i,j) ögesi $-i\omega_{ij}\rho_{ij} - \gamma(t)(E_i-E_j)^2\rho_{ij}$'dir; iki ifade her (i,j) için özdeştir. Çift komütatör yapısı Hermitseldir ve tek Lindblad işlemcisi $\hat{L} = \hat{H}_S$ ile $\gamma(t) \geq 0$ oranı, GKLS biçiminin zamana bağlı hâlidir. □

Sonuç 6.3 (Kısım I görünürlük yasasının statüsü). *$\sigma_\xi = \lambda_m$ minimal paketinde (69), Kısım I'in (62) yasasını $\Theta \to \Theta_*$ ile aynen üretir: $t_{\mathrm{dek}} = \hbar\Theta_*/(\Delta E\,\lambda_m)$. Fark, yasanın artık aksiyomdan Kraus temsiline kadar kapalı bir türetim zincirine sahip olmasıdır: Z1 kapanmıştır.*

Uyarı 6.4 (Kovaryans notu). Aksiyom 6 laboratuvar çerçevesinde yazılmıştır; kovaryant biçimi, bağlaşımın dünya-çizgisi öz-zamanı üzerinden $\mathrm{d}\tau \to (1 + \delta\hat{\xi}/\Theta_*)\mathrm{d}\tau$ modülasyonu olarak ifadesidir ve Lorentz dönüşümleri altında §4.1'deki genişletilmiş izometri yapısıyla uyumludur; tam kovaryant biçim §16'da (Teorem 16.2) kurulacaktır. Ayrıca $\hat{H}_{\mathrm{mod}}$'un ihmali, $t \ll \hbar/\sigma_{E_{\mathrm{mod}}}$ paket-yayılma süreleri için geçerlidir; yayılma düzeltmeleri $\gamma(t)$'ye $\mathcal{O}(t^3)$ katkı verir ve buradaki tüm uygulama rejimlerinde ihmal edilebilir.

6.3 Üniterlik ve Banks–Peskin–Susskind uyumu

Önerme 6.5 (Üniter köken, enerji korunumu ve BPS muafiyeti). *(a) ZMUT dekoheransı, temel (fundamental) bir Lindblad değişikliği değil; üniter bir kuramın olağan açık-sistem indirgemesidir. $\mathcal{H}_{\mathrm{kin}} = \mathcal{H}_{\mathrm{mod}} \otimes \mathcal{H}_S$ üzerindeki kısıt evrimi kesinlikle üniterdir ve görünür saflık kaybı, bilginin yok oluşu değil, sistemin zamansal mod serbestlik dereceleriyle dolanıklaşmasının sonucudur:*

$$\rho_S(t) = \mathrm{Tr}_{\mathrm{mod}}\left(|\Psi(t)\rangle\!\rangle\langle\!\langle\Psi(t)|\right), \qquad \mathrm{Tr}\left[\rho_{\mathrm{kin}}^2(t)\right] = 1 \quad \forall t. \tag{70}$$

(b) Zamansal kanal, sistemin tüm *enerji momentlerini tam olarak korur:*

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{Tr}\big[\hat{H}_S^{\,k}\,\rho_S(t)\big] = 0 \qquad \forall k \in \mathbb{N}: \tag{71}$$

enerji dağılımı (popülasyonlar) hiç değişmez, vakum ısınmaz, kütle–enerji korunumu tamdır. Dolayısıyla saf durumların karışık durumlara evrimine yöneltilen Banks–Peskin–Susskind itirazı [32] ZMUT'a uygulanamaz ve Z9 kapanır.

İspat. (a) Teorem 6.1'nin Kraus temsili, $\hat{U}(t)$ küresel üniterinin kısmî iziyle inşa edilmiştir (üniter dilatasyon); küresel durum saf kalır. (b) İki bağımsız kanıt: (i) Kraus işlemcileri $\hat{U}_\xi(t)$, $\hat{H}_S$'nin fonksiyonlarıdır ve her $\hat{H}_S^k$ ile komüte eder; dolayısıyla $\mathrm{Tr}\left[\hat{H}_S^k \Phi_t(\rho)\right] = \mathrm{Tr}\left[\hat{H}_S^k \rho\right]$ özdeş olarak sağlanır. (ii) Ana denklem (69) düzeyinde, izin döngüselliğiyle $\mathrm{Tr}\left(\hat{H}_S^k[\hat{H}_S,[\hat{H}_S,\rho]]\right) = \mathrm{Tr}\left([\hat{H}_S^k,\hat{H}_S]\,[\hat{H}_S,\rho]\right) = 0$ bulunur. Enerji tabanındaki köşegen ögelerin (popülasyonların) değişmezliği, (68)'de $i = j$ konularak da doğrudan görülür. □

7 Bileşik Sistemler: Kolektif Modlar ve Metrolojik Yapı

7.1 Kolektif mod koordinatı

N bileşenli bir sistemde her bileşen $(\hat{\xi}_k, \hat{p}_k)$, $[\hat{\xi}_k, \hat{p}_l] = i\hbar\delta_{kl}$ kanonik çiftlerini taşısın ve her biri Kısım I'in bant sınırına uysun: $|p_k| \le m_k c^2$. Toplam kütle $M = \sum_k m_k$ olmak üzere kolektif (kütle-ağırlıklı) koordinat ve toplam eş-momentum tanımlansın:

$$\hat{\xi}_{\mathrm{cm}} := \sum_{k=1}^{N} \frac{m_k}{M}\,\hat{\xi}_k, \qquad \hat{P}_\xi := \sum_{k=1}^{N} \hat{p}_k. \tag{72}$$

Teorem 7.1 (Kolektif kanonik çift ve Heisenberg tabanı). *(a) $[\hat{\xi}_{\mathrm{cm}}, \hat{P}_\xi] = i\hbar$: kolektif koordinat ile toplam eş-momentum tam kanonik çifttir. (b) $|P_\xi| \le Mc^2$: kolektif bant sınırı toplam kütleyle belirlenir. (c) Dolayısıyla her bileşik sistem için*

$$\sigma_{\xi_{\mathrm{cm}}} \;\ge\; \frac{\hbar}{2Mc^2} = \frac{\lambda_M}{2}\,: \tag{73}$$

Kısım I'in $\lambda_M = \kappa/M$ ölçeği, bileşikler için de mutlak alt sınırdır *(Heisenberg tabanı).*

İspat. (a) $[\hat{\xi}_{\mathrm{cm}}, \hat{P}_\xi] = \sum_{k,l}(m_k/M)[\hat{\xi}_k, \hat{p}_l] = i\hbar\sum_k m_k/M = i\hbar$. (b) Üçgen eşitsizliği ve bileşen bantları: $|P_\xi| \le \sum_k |p_k| \le \sum_k m_k c^2 = Mc^2$. (c) (a)'daki kanonik çifte Kennard–Robertson eşitsizliği uygulanır ve (b) ile $\sigma_P \le Mc^2$ konur. □

Önerme 7.2 (Bağımsız bileşen limiti: standart kuantum limiti). *Bileşenleri karşılıklı bağımsız (çarpım durumu) ve her biri kendi minimal paketinde ($\sigma_k = \lambda_{m_k}$) hazırlanmış eşit kütleli ($m_k = m_0$, $M = Nm_0$) bir bileşik için*

$$\sigma_{\xi_{\mathrm{cm}}}^{\mathrm{SQL}} = \Big[\sum_k \Big(\frac{m_0}{M}\Big)^2 \lambda_{m_0}^2\Big]^{1/2} = \frac{\lambda_{m_0}}{\sqrt{N}} = \sqrt{N}\,\lambda_M. \tag{74}$$

İspat. Bağımsız değişkenlerin varyansları ağırlık karelerine göre toplanır: $\sigma_{\mathrm{cm}}^2 = \sum_k (m_k/M)^2 \sigma_k^2 = N\,(1/N^2)\,\lambda_{m_0}^2$; kare kök alınır ve $\lambda_{m_0} = N\lambda_M$ kullanılır. □

Böylece Z3'in çözümü kuantum metrolojinin tanıdık yapısına oturur [37]: bileşik bir sistemin zamansal klasiklik derecesi, bileşen modları arasındaki korelasyonlarla, $\sqrt{N}\lambda_M$ (bağımsız, SQL) ile λ_M (tam kolektif, Heisenberg) arasında interpolasyon yapar. Kolektif tabana iniş, spin-sıkıştırmanın mod-uzayı benzeri olan bileşenler-arası mod dolanıklığını gerektirir; güçlü bağlanma (çekirdek içi nükleonlar, katı örgüsü) bu korelasyonları doğal olarak üretir, zayıf bağlanma (van der Waals kümeleri) üretmez.

Sonuç 7.3 (Kısım I öngörülerinin sistematik bantları)**.** *Bileşik sistemler için $\sigma_{\xi_{\mathrm{cm}}} \in [\lambda_M, \sqrt{N}\lambda_M]$ aralığı, $t_{\mathrm{dek}} = \hbar\Theta_*/(\Delta E\,\sigma_{\xi_{\mathrm{cm}}})$ üzerinden öngörü bantlarına dönüşür ($\Theta_* = \Theta_*^{\min} = 2{,}2 \times 10^{-11}$ s doygunluğunda):*

Sistem	*N (etkin)*	$\sqrt{N}$	t_{dek} *(kolektif)*	t_{dek} *(bağımsız)*
^{229}*Th izomeri*	*229 nükleon*	*15,1*	*0,56 s*	*0,037 s*
^{87}*Sr saati (Θ_* sınırı)*	*87 nükleon*	*9,3*	$\Theta_* \geq 2{,}2 \times 10^{-11}$ *s*	$\Theta_* \geq 2{,}1 \times 10^{-10}$ *s*
25 kDa molekül	$\sim 2 \times 10^3$ *atom*	*45*	*255 s*	*5,5 s*
Transmon adası	$\sim 2 \times 10^{13}$ *atom*	$4{,}7 \times 10^6$	6×10^{17} *s*	$1{,}3 \times 10^{11}$ *s*

Çekirdek içi bağlanma (MeV mertebesi) kolektif limiti güçlü biçimde desteklediğinden, atomik sistemlerde kolektif değerler temel alınmakta; Θ_* için en tutucu *(en zayıf) sınır olan kolektif okuma korunmaktadır. Bant genişlikleri, ölçülebilir bir sistematik olarak öngörülerin parçasıdır: aynı ΔE'li, farklı bağlanma sertliğinde iki sistemin karşılaştırılması, mod-korelasyon derecesini doğrudan ölçer. (Bu tablodaki $\Theta_*^{\min}$ denetim aşamasının değeridir; §19'deki güncel koherans verisi sınırı yaklaşık 30 kat güçlendirecek ve tüm süreler aynı oranda ölçeklenecektir.)*

Önerme 7.4 (Dolanık saat ağları)**.** *Aynı mod ortamını paylaşan n saatlik bir ağda zamansal mod gürültüsü kolektiftir. (a) Fark (diferansiyel) karşılaştırmalar, §12.2'deki karar-verici alt-uzaylarda mod kanalından tamamen bağışıktır. (b) Ortak geçiş enerjisi $\bar{E}$ olan saatlerde, mutlak faz metrolojisinde GHZ tipi durumlar kolektif gürültü altında $\sqrt{n}$ kazanımını tek başına sağlamaz (sinyal ve gürültü birlikte n ile ölçeklenir); kazanım, sinyalin mod-bağışık alt-uzaya kodlanmış diferansiyel bileşeninde geri kazanılır [37]. ZMUT bu anlamda, saat ağı mimarilerinde "mutlak zamanı değil, zaman* farklarını *dolanıklıkla ölç" ilkesini türetir.*

İspat. (a) §12.2 Teorem 12.2'nin doğrudan uygulamasıdır. (b) Kolektif faz $e^{in\,\delta\xi\,\bar{E}t/(\hbar\Theta_*)}$ GHZ durumunda genlik değil faz olarak n katlanır; görünürlük $\left|\chi_{\hat{w}}(n\bar{E}t/\hbar\Theta_*)\right|$ olur ve n'e bağlı hızlanan sönüm, $\sqrt{n}$ faz duyarlılığı kazanımını götürür; diferansiyel kodlamada kolektif $\delta\xi$ fazları özdeş olarak sadeleşir. □

8 Spektral Yerellik İlkesi: Ayrışma Çekirdeği ve Mod Sızıntısı

Bu bölüm, Z7'i kapatan ve kuramın geri kalanına iki güçlü araç kazandıran yeni bir yapı taşı ekler: mod uzayındaki *bütün* köşegen-dışı bağlaşımların, sistemin kendi kütle–mod ölçeğiyle yayılması ilkesi.

Aksiyom 7 (Spektral yerellik / ayrışma çekirdeği)**.** Kütlesi m olan bir sistemin mod uzayındaki her köşegen-dışı bağlaşımı, Gauss ayrışma çekirdeği

$$\boxed{K(\xi - \xi') \;=\; \exp\!\left(-\frac{|\xi - \xi'|^2}{2\,\lambda_m^2}\right), \qquad \lambda_m = \frac{\hbar}{mc^2}} \tag{75}$$

ile yayılır. Özel olarak eğrilik–mod etkileşimi, Kısım I'deki yerel bağlaşımın (19) yerine, yarı-yerel biçimi alır:

$$\mathcal{L}_{\text{etkileşim}} \;=\; -\,\frac{\alpha\hbar^2}{2m}\,R(x)\int \mathrm{d}\xi'\; K(\xi - \xi')\,\left|\Phi(x,\xi')\right|^2. \tag{76}$$

Çekirdeğin genişliği serbest bir fonksiyon değildir: Teorem 7.1'in bant sınırı gereği, sistemin mod uzayında *çözebildiği* en ince ölçek λ_m'dir; spektral yerellik, "hiçbir sistem kendi bant genişliğinden ince mod yapısına bağlanamaz" ifadesinin aksiyomlaşmasıdır. $\lambda_m \to 0$ (makroskopik) limitinde $K \to$ dar tepe ve (76) köşegen (Kısım I) biçimine büzülür; kuram geriye dönük uyumludur. Bu aksiyomun içeriği, §14'da Ana Yasa'nın (Aksiyom 8) C2 sonucu olarak türetilir ve aksiyom statüsünden teorem statüsüne iner.

8.1 Radyonun makroskopik kaynaklardan ayrışması: ince ayarsız beşinci kuvvet çözümü

Radyon, lif üzerinde (yaklaşık) sabit sıfır modudur: $u_\sigma(\xi) = \ell_\xi^{-1/2}$. Bir kaynağın radyona etkin skaler yükü, kaynağın mod yoğunluğunun çekirdek üzerinden sıfır moda izdüşümüyle belirlenir.

Teorem 8.1 (Spektral form faktörü)**.** *Aksiyom 7 altında, kütlesi M olan bir kaynağın radyon bağlaşımı, tam bağlaşıma oranla*

$$\boxed{\mathfrak{F}(M) \;=\; \frac{\alpha_{\mathrm{eff}}(M)}{\alpha} = \min\left\{1,\; \frac{\sqrt{2\pi}\,\lambda_M}{\ell_\xi}\right\}, \qquad \lambda_M = \frac{\hbar}{Mc^2}} \tag{77}$$

form faktörüyle bastırılır. Sayısal olarak ($\ell_\xi = 2{,}9 \times 10^{-13}$ s, §11):

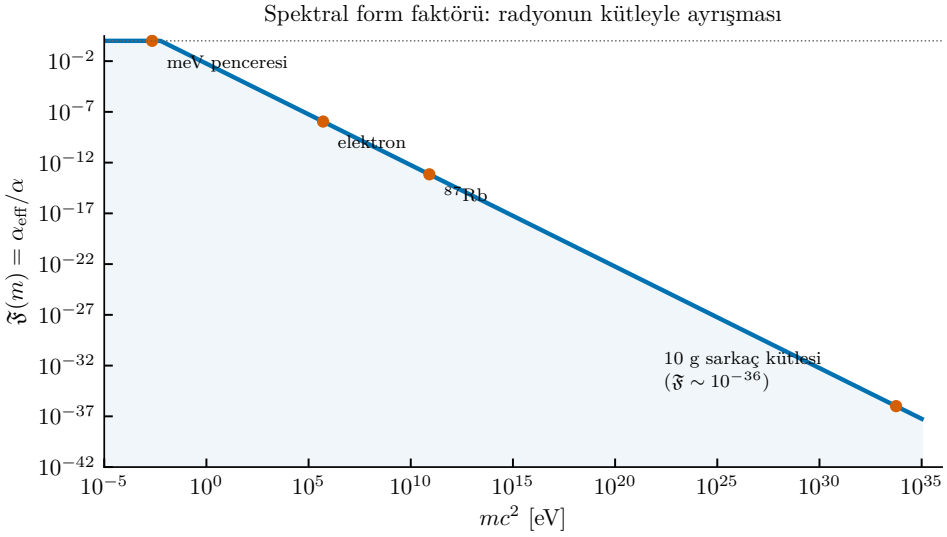
Kaynak	λ_M *[s]*	$\mathfrak{F}(M)$
$mc^2 \approx 2$ *meV (nötrino ölçeği)*	$\sim 3 \times 10^{-13}$	$\mathcal{O}(1)$
Elektron	$1{,}3 \times 10^{-21}$	$1{,}1 \times 10^{-8}$
^{87}*Rb atomu*	$8{,}1 \times 10^{-27}$	$7{,}0 \times 10^{-14}$
Burulma sarkacı kütlesi (10 g)	$1{,}2 \times 10^{-49}$	$1{,}0 \times 10^{-36}$
Gezegen/yıldız	$< 10^{-75}$	$< 10^{-62}$

Sonuç: (i) Cassini sınırı, radyon kütlesinden bağımsız olarak *sağlanır — Güneş radyonu uyaramaz; (ii) Eöt-Wash tipi deneylerde hem kaynak hem test kütlesi makroskopik olduğundan skaler kuvvet $\mathfrak{F}^2 \sim 10^{-72}$ ile bastırılır: milimetre-altı null sonuçlar [27, 28] ince ayarsız,* yapısal *olarak açıklanır; (iii) radyon yalnızca $mc^2 \lesssim \hbar/\ell_\xi \approx 2$ meV bandındaki serbestlik dereceleriyle (nötrino ölçeği, karanlık sektör) tam bağlaşır: skaler sektör, laboratuvar kütle çekiminden kendiliğinden ayrışıp meV penceresine yerleşir (Şekil 3).*

İspat. (76)'deki kaynak terimi, radyon sıfır moduna izdüşümde

$$g_{\mathrm{eff}} \;\propto\; \int \mathrm{d}\xi \int \mathrm{d}\xi'\; \hat{w}_M(\xi)\, K(\xi - \xi')\, \frac{1}{\ell_\xi} = \frac{1}{\ell_\xi} \int \mathrm{d}\xi\; \hat{w}_M(\xi) \int \mathrm{d}\varsigma\; K(\varsigma) = \frac{\sqrt{2\pi}\,\lambda_M}{\ell_\xi}$$

verir; burada $\int K(\varsigma)\mathrm{d}\varsigma = \sqrt{2\pi}\,\lambda_M$ Gauss integrali ve $\int \hat{w}_M = 1$ normlaması kullanılmıştır. Tam bağlaşım ($\lambda_M \gtrsim \ell_\xi/\sqrt{2\pi}$) hâlinde izdüşüm doygunlaşır ve oran 1'e kilitlenir; min yapısı bu iki rejimi birleştirir. Makroskopik limitte $\lambda_M \to \hbar/(Mc^2) \to$ Planck-altı: spektral bant genişliği çöker, kaynak yalnızca tensörel (metrik) kanala yük taşır. Fine-tuning yoktur: bastırma, kütle–mod bağıntısının (Teorem 4.4) doğrudan sonucudur. □



Şekil 3: Spektral form faktörü $\mathfrak{F}(m)$ (Teorem 8.1): radyon yükü, $mc^2 \lesssim \hbar/\ell_\xi \approx 2$ meV penceresinde doygun, üzerinde $1/m$ ile söner. Sıradan madde (elektron, atomlar) ihmal edilebilir bağlaşırken burulma-sarkacı test kütleleri $\mathfrak{F} \sim 10^{-36}$ ile tamamen ayrışır: milimetre-altı null sonuçların yapısal açıklaması.

Uyarı 8.2. Teorem 8.1, §10'deki stabilizasyonun yerini almaz; onunla *katmanlanır*. Form faktörü kaynak tarafını (kim radyonu uyarabilir), stabilizasyon kütle tarafını (radyon ne kadar uzağa taşınır) kapatır. İkisi birlikte, skaler sektörü hem laboratuvar hem gezegen ölçeğinde çifte kilit altına alır ve §19'de keskin bir *null öngörüsüne* dönüşür: makroskopik kaynaklı hiçbir beşinci kuvvet, hiçbir menzilde gözlenmemelidir; gözlenirse spektral yerellik aksiyomu yanlışlanır.

8.2 Ana mod ve alt modlara düşük genlikli sızıntı: mod difüzyonu

Spektral yerellik, ZMUT'a eksik olan bir dinamik süreci de armağan eder: baskın (ana) zamansal modun, komşu modlara *düşük genlikli, denetimli* amplitüd sızdırması. Çevreyle artık (rezidüel) mod-köşegen-dışı etkileşimlerin tümü Aksiyom 7 gereği K ile yayıldığından, mod yoğunluğunun kaba taneli dinamiği tek parametreli bir Lindblad üretecine iner:

$$\frac{\mathrm{d}\rho_{\mathrm{mod}}}{\mathrm{d}t} = \frac{\Gamma_K}{\mathcal{N}_K}\int \mathrm{d}\varsigma\; K(\varsigma)\Big[\hat{T}_\varsigma\,\rho_{\mathrm{mod}}\,\hat{T}_\varsigma^{\dagger} - \rho_{\mathrm{mod}}\Big], \qquad \hat{T}_\varsigma = e^{-i\varsigma\hat{p}_\xi/\hbar}, \quad \mathcal{N}_K = \sqrt{2\pi}\,\lambda_m, \tag{78}$$

burada Γ_K sızıntı oranı, $\hat{T}_\varsigma$ mod ötelemesidir.

Önerme 8.3 (Mod difüzyon yasası ve ana boyut hiyerarşisi)**.** *Köşegen kesim $w(\xi,t)$ için (78), $\lambda_m \ll \sigma$ rejiminde Kramers–Moyal açılımıyla difüzyon denklemine iner:*

$$\boxed{\frac{\partial w}{\partial t} = D_\xi\,\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}, \qquad D_\xi = \frac{\Gamma_K \lambda_m^2}{2}} \tag{79}$$

ve şu özellikleri taşır:

1. Korunum: $\partial_t \int w\,\mathrm{d}\xi = 0$*; dolayısıyla* $\mathrm{d}E(\xi,t) = E_{top}\,w(\xi,t)\,\mathrm{d}\xi$ *enerji dağılımı modlar arasında* yeniden dağılır *ama* E_{top} *tam korunur (Lemma 2.1 dinamik hâle genelleşir).*
2. Ana modun aşınması, alt modların beslenmesi: *Gauss başlangıç için* $\sigma^2(t) = \sigma_0^2 + 2D_\xi t$ *ve tepe genliği* $w_{\max}(t) = [2\pi(\sigma_0^2 + 2D_\xi t)]^{-1/2}$ *tekdüze azalır: amplitüd, baskın ana moddan komşu zamansal modlara* daha düşük seviyede yayımlanarak dağılır*; mod merkezi* $\Theta[w]$ *simetri gereği sabittir (ana boyutun yönü korunur, keskinliği aşınır; Şekil 4).*
3. H-teoremi: *Mod entropisi* $S_{\mathrm{mod}}[w] = -\int w \ln w\,\mathrm{d}\xi$ *tekdüze artar:*

$$\frac{\mathrm{d}S_{\mathrm{mod}}}{\mathrm{d}t} = D_\xi \int \frac{1}{w}\left(\frac{\partial w}{\partial \xi}\right)^2 \mathrm{d}\xi \;\geq\; 0. \tag{80}$$

4. Tek klasik zamanın doğuşu: $D_\xi \propto \lambda_m^2 \propto m^{-2}$ *olduğundan sızıntı makroskopik cisimlerde donar: evrenin klasik kesiminde tek bir zaman boyutunun hüküm sürmesi, öteki modların yokluğundan değil, onlara sızıntının* m^{-2} *ile bastırılmış olmasından kaynaklanır. Mikroskopik sistemler ise ölçülebilir bir "zaman difüzyonu" yaşar.*

İspat. (78)'ın köşegen ögeleri $\partial_t w = \Gamma_K[(K/\mathcal{N}_K) * w - w]$ konvolüsyon-kayıp biçimindedir. $K/\mathcal{N}_K$ birim-normlu, sıfır ortalamalı, λ_m^2 varyanslı olduğundan ikinci mertebe Kramers–Moyal açılımı $\partial_t w = \frac{\Gamma_K\lambda_m^2}{2}\partial_\xi^2 w + \mathcal{O}\big((\lambda_m/\sigma)^4\big)$ verir. (1) Isı yarı-grubunun kütle korunumu; sınırda $w \to 0$. (2) Isı çekirdeğiyle konvolüsyonun Gauss'u Gauss'a taşıması. (3) Doğrudan: $\dot{S} = -\int(1+\ln w) D\,\partial_\xi^2 w = D\int(\partial_\xi w)^2/w$ (kısmi integrasyon, sınır terimleri sıfır). (4) $D_\xi = \Gamma_K\hbar^2/(2m^2c^4)$ açık yazımından. □

Sonuç 8.4 (Sızıntı oranına deneysel sınır ve yeni gözlemsel imza)**.** *Difüzyon, dekoherans paketini zamanla genişlettiğinden* ($\sigma^2(t) = \lambda_m^2 + 2D_\xi t$) *görünürlük yasası geç zamanlarda Gauss'tan sapar:* $\ln\mathcal{V}$, $-t^2$ *yerine* $-t^3$ *terimi kazanır (ilk düzeltme* $-\Delta E^2 D_\xi t^3/(\hbar^2\Theta_*^2)$*). Bu, mod sızıntısının* ayırt edici *imzasıdır: saat sorgulamalarında zarfın* t^3 *bileşeni aranmalıdır.* ^{87}Sr*'de* $t_{koh} = 1$ *s koheransının gözlenmiş olması,* $2D_\xi t_{koh} \leq \sigma_{\max}^2 - \lambda_m^2$ *üzerinden*

$$\Gamma_K \;\leq\; \frac{1}{t_{koh}}\left[\left(\frac{\sigma_{\max}}{\lambda_m}\right)^2 - 1\right], \qquad \sigma_{\max} = \frac{\hbar\,\Theta_*}{\Delta E\,t_{koh}}, \tag{81}$$

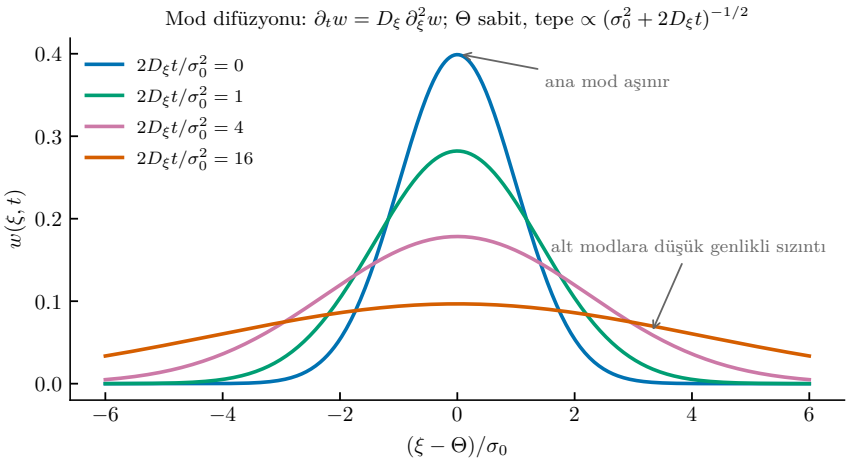
sınırını verir; Θ_* *alt sınır doygunluğunda* $\Gamma_K \to 0$ *(sızıntı tamamen donuk),* $\Theta_* = 10\,\Theta_*^{\min}$ *için* $\Gamma_K \lesssim 10^2$ s^{-1} *bulunur. Sızıntı ve bağlaşım ölçekleri böylece aynı deney ailesinden eşzamanlı sınırlanır.*

9 Nedensellik, Hayaletsizlik ve Spektral Budama: Alan Düzeyinde Kanıtlar

Bu bölüm Z5'i üç teoremle kapatır. Ortak zemin, Kısım I'de (§3.1) türetilen genişletilmiş kütle kabuğudur: $\hat{f} = 1$ ayarında mod-Klein–Gordon denkleminin düzlem-dalga bileşenleri

$$p_\mu p^\mu - \frac{p_\xi^2}{c^2} = -m^2c^2, \qquad |p_\xi| \leq mc^2 \quad \text{(bant sınırı)} \tag{82}$$

bağıntılarını sağlar; p_ξ, ξ'ye eşlenik momentumdur.



Şekil 4: Ana zamansal modun alt modlara düşük genlikli sızıntısı (Önerme 8.3). Difüzyon, mod merkezini (Θ) sabit tutarken tepe genliğini $(\sigma_0^2 + 2D_\xi t)^{-1/2}$ ile aşındırır ve enerji dağılımını komşu modlara yayar; toplam $\int w\,\mathrm{d}\xi = 1$ (dolayısıyla E_{top}) tam korunur. $D_\xi \propto m^{-2}$ donması, klasik dünyada tek zamanın hüküm sürmesinin nedenidir.

9.1 Süperluminal hareketin dışlanması

Teorem 9.1 (Nedensellik)**.** *Bant sınırına uyan her fiziksel çözüm bileşeni için dört-momentum zamansal ya da ışıksaldır ve grup hızı c'yi aşamaz:*

$$p_\mu p^\mu = -m_{\mathrm{eff}}^2 c^2 \le 0, \qquad v_g = \frac{\partial E}{\partial |\vec{p}|} = \frac{|\vec{p}|\,c^2}{E} \;\le\; c, \tag{83}$$

eşitlik ancak bandın doygunluğunda ($|p_\xi| = mc^2$, $m_{\mathrm{eff}} = 0$) gerçekleşir. Ayrıca sinyal (cephe) hızı, m_{eff}'ten bağımsız olarak tam c'dir; dolayısıyla mod sektörü hiçbir süperluminal iletişim kanalı açmaz.

İspat. (82)'den $p_\mu p^\mu = -m^2c^2 + p_\xi^2/c^2$ yazılır; bant sınırı $p_\xi^2/c^2 \le m^2c^2$ verdiğinden $p_\mu p^\mu \le 0$, yani $m_{\mathrm{eff}}^2 = m^2 - p_\xi^2/c^4 \ge 0$ bulunur. $E = \sqrt{|\vec{p}|^2c^2 + m_{\mathrm{eff}}^2 c^4}$ dağılımından $v_g = |\vec{p}|c^2/E \le c$ doğrudan çıkar. Cephe hızı, dalga operatörünün baş sembolüyle belirlenir: mod-KG denkleminin dört boyutlu baş sembolü standart hiperbolik $\Box_4$ olduğundan karakteristikleri ışık konileridir ve süreksizlik cepheleri tam c ile yayılır. Kısım I'de Uyarı düzeyinde bırakılan $v > c$ dalı böylece dinamikten *teorem düzeyinde* dışlanmıştır; dahası, nedenselliği sağlayan eşitsizlik ile kütle–mod bağıntısını ($\lambda_m = \kappa/m$) üreten eşitsizlik aynıdır: nedensellik ve minimal mod genişliği, tek bir bant sınırının iki yüzüdür. □

9.2 Fiziksel Fock uzayının pozitif tanımlılığı

Teorem 9.2 (Hayaletsizlik, alan düzeyi)**.** *Statik arka planda, kısıt yüzeyine kısıtlanmış serbest mod alanının kanonik nicemlemesi pozitif tanımlı bir Fock uzayı üretir: fiziksel spektrumda negatif normlu durum yoktur.*

İspat. Çözüm uzayı, (82) kabuğu üzerinde

$$u_{\vec{k},\mathfrak{E}}(x,\xi) \;\propto\; e^{\,i(\vec{k}\cdot\vec{x} - \omega t)}\, e^{-i\mathfrak{E}\xi/\hbar}, \qquad \omega(\vec{k},\mathfrak{E}) = c\sqrt{\left|\vec{k}\right|^2 + \frac{m_{\mathrm{eff}}^2(\mathfrak{E})c^2}{\hbar^2}} \;\ge 0,$$

pozitif frekanslı modlarla gerilir. Genişletilmiş Klein–Gordon iç çarpımı, sabit-t dilimi ile lif üzerinde

$$(u,u') = \frac{i}{\hbar}\int \mathrm{d}^3x\,\mathrm{d}\xi\,\left(u^*\,\partial_t u' - u'\,\partial_t u^*\right) \;\propto\; 2\,\omega(\vec{k},\mathfrak{E})\,\delta^3(\vec{k}-\vec{k}')\,\delta(\mathfrak{E}-\mathfrak{E}')$$

verir: pozitif frekans sektöründe iç çarpım kesin pozitiftir; negatif frekanslı eşler, yük eşleniğiyle karşı-parçacık sektörünü kurar ve Fock uzayı bu pozitif tek-parçacık uzayının simetrik cebiri olarak pozitif tanımlıdır. Tehlikeli yön, ξ'nin zamansal imzasından kaynaklanabilecek bağımsız ξ-frekans dallarıdır; ne var ki bu dallar kısıt $\hat{\mathcal{C}} = 0$'ı ihlal eden çözümlerdir ve fiziksel uzayda temsil edilmezler: aşağıdaki budama önermesi uyarınca kabuk üzerinde $\mathfrak{E}$, bağımsız bir kuantum sayısı değildir. İki-zamanlı fizikte ayar simetrisinin gördüğü işi [4], ZMUT'ta kısıtın kendisi görür. □

9.3 Kaluza–Klein kulesinin kısıtla budanması

Kompakt bir beşinci boyutun standart fenomenolojik felaketi, her parçacığa $\Delta mc^2 \sim \hbar/\ell$ aralıklı bir eşlenik kule eklemesidir; §11'deki $\ell_\xi \sim 3\times10^{-13}$ s ölçeği için bu, meV aralıklı yüklü egzotikler demek olurdu — deneyle bariz çelişki. ZMUT bu felaketten yapısal olarak bağışıktır:

Önerme 9.3 (KK budaması)**.** *Kısıt yüzeyi* $\ker\hat{\mathcal{C}}$ *üzerinde* $\hat{p}_\xi = -\hat{H}_S$ *işlemci özdeşliği geçerlidir; dolayısıyla* $(\mathfrak{E}, E)$ *ortak spektrumu* $\mathfrak{E} = -E$ *doğrusuna çivilenir. Mod momentumu bağımsız bir kuantum sayısı olmadığından, alışılmış KK kulesinin bağımsız* n*-etiketli eş-parçacık dizisi fiziksel spektrumda* yoktur*: her sistemin tek bir ilişkisel mod frekansı vardır ve o da iç enerjisidir.*

İspat. $|\Psi\rangle\!\rangle \in \ker\hat{\mathcal{C}}$ ve $\hat{H}_S|\Psi\rangle\!\rangle$-öz-durumu E için $\hat{p}_\xi|\Psi\rangle\!\rangle = -\hat{H}_S|\Psi\rangle\!\rangle = -E|\Psi\rangle\!\rangle$: iki nicelik ayrı ayrı değil, birlikte belirlenir. Serbest kompaktlaştırılmış alan kuramında ise p_ξ ve E bağımsız işlemcilerdir ve spektrum $\mathbb{Z}\times\mathbb{R}$ ızgarasıdır; kısıt, bu ızgarayı tek doğruya indirger. □

Uyarı 9.4 (Kompaktlık üzerine dürüst bir not)*.* Budama önermesi kuleyi kaldırır; ancak lif *tam anlamıyla* kompakt ve ψ periyodik ise, tek değerlilik $\mathfrak{E}$'yi h/ℓ_ξ katlarına kuantalar ve $\mathfrak{E} = -E$ özdeşliği iç enerjileri ~ 14 meV'lik bir ızgaraya bağlardı — hassas spektroskopiyle çelişir. Bu nedenle §11'de iki değişke ayrılır: (K) kompakt lif + lif üzerinde Wilson-çizgisi tipi bir ayar bükümü (ızgara ofsetini süperseçim sektörüne göre kaydırır; açık problem olarak işaretlenmiştir) ya da (NK) kompakt olmayan, ℓ_ξ ölçeğinde *yerelleşmiş* lif sektörü (kuantalama hiç doğmaz). Bu makalenin nicel öngörüleri iki değişkede de aynıdır; ayrım yalnızca kozmolojik özdeşleşmenin katsayı düzeyini etkiler.

9.4 Ayar-lif demeti yapısı ve Cauchy probleminin iyi-konumluluğu

Z5'in son maddesi (iv), $\mathcal{M}_5$'in geometrik statüsünün netleştirilmesini ister; bu aynı zamanda ultra-hiperbolik denklemlerin ünlü Hadamard kararsızlığını da çözer.

Önerme 9.5 (Geometrik statü: ξ bir ayar lifidir)**.** $(\mathcal{M}_5 = \mathcal{M}_4 \times \Sigma_\xi,\ \pi,\ \mathcal{M}_4)$ *yapısı, iki bağımsız zamanlı bir çift-hiperbolik uzay–zaman* değildir*; taban manifoldu* $\mathcal{M}_4$*, yapı grubu mod ötelemeleri (*$\mathbb{R}$*; kompakt* K *değişkesinde* $U(1)$*) olan bir* esas lif demetidir*. Kısıt* $\hat{\mathcal{C}}$*, lif doğrultusundaki dikey akışın üretecidir ve* ξ*, fiziksel bir koordinat değil bu akışın ayar parametresidir. BRST dilinde, tek Abelyen kısıt için* $\Omega = c\hat{\mathcal{C}}$ *yükü* $\Omega^2 = 0$*'ı aşikâr sağlar; sıfır hayalet-sayılı kohomoloji tam olarak* $\ker\hat{\mathcal{C}}$*'dir ve fiziksel içerik, demetin* $(3+1)$ *boyutlu hiperbolik tabanına çöker.*

İspat. Blok köşegen metrik, demet yerel haritasını verir; $\hat{\mathcal{C}}$'nin ürettiği sonlu dönüşümler $(x,\xi)\mapsto(x,\xi+\varsigma)$ dikey yörüngelerdir ve yörünge uzayı $\mathcal{M}_5/\mathbb{R} \cong \mathcal{M}_4$'tür. Abelyen tek-kısıt BRST kompleksinde hayalet çifti (b,c) serbest ayrışır; Ω-kohomolojisinin sıfırıncı basamağı, standart hesapla, kısıt çekirdeğine izomorftur. □

Teorem 9.6 (Hadamard iyi-konumluluğu)**.** $\mathcal{M}_5$ *üzerindeki serbest ultra-hiperbolik Cauchy problemi Hadamard anlamında kötü-konumludur; ancak ZMUT'un fiziksel dinamiği bu problem değil,* $\ker\hat{\mathcal{C}}$ *üzerindeki birinci mertebe akıştır:*

$$i\hbar\,\partial_\xi\,|\psi_S(\xi)\rangle = \hat{H}_S\,|\psi_S(\xi)\rangle\,, \qquad \hat{H}_S = \hat{H}_S^\dagger. \tag{84}$$

Stone teoremi gereği $\hat{U}(\xi) = e^{-i\hat{H}_S\xi/\hbar}$ *güçlü sürekli üniter bir gruptur: çözüm her başlangıç verisi için vardır, tektir ve veriye sürekli bağlıdır,*

$$\big\|\psi_S(\xi) - \tilde{\psi}_S(\xi)\big\| = \big\|\psi_S(0) - \tilde{\psi}_S(0)\big\| \qquad \forall\xi, \tag{85}$$

yani problem L^2*'de Hadamard anlamında* iyi-konumludur*. Kararsız yönler, Önerme 9.5'nin ayar yörüngeleri boyunca yaşar ve fiziksel faz uzayından tamamen silinmiştir.*

İspat. Varlık ve teklik, üniter grubun etkisiyle; kararlılık kestirimi (85), üniterliğin izometri özelliğiyle (Lipschitz sabiti 1) sağlanır. Hadamard'ın klasik kararsızlık kurgusu — yüksek frekanslı verinin üstel büyütülmesi — ikinci mertebe ultra-hiperbolik işlemcinin kısıt-dışı çözümlerini gerektirir; bu çözümler $\ker\hat{\mathcal{C}}$'de temsil edilmez. Teorem 9.2 ve Önerme 9.3 ile birlikte Z5 bütünüyle kapanmıştır. □

10 Skaler Sektörün Kurtarılması: Stabilizasyon, PPN ve Beşinci Kuvvet

10.1 Teşhis: stabilizasyonsuz sektör $\omega = 0$ Brans–Dicke'dir

Önerme 10.1 (Brans–Dicke denkliği)**.** *Kısım I'in radyon indirgemesi (§3.5)* $\sqrt{\hat{f}}\,\tilde{R} = e^{\sigma}\big(R - 2\Box\sigma - 2(\partial\sigma)^2\big)$*, kısmi integrasyon sonrası tam olarak*

$$S_{\rm grav} = \frac{c^3}{16\pi G}\int \mathrm{d}^4x\,\sqrt{-g}\;\Phi_{\rm BD}\,R, \qquad \Phi_{\rm BD} := e^{\sigma}, \tag{86}$$

verir: kinetik terimi olmayan Brans–Dicke kuramı, yani $\omega_{\rm BD} = 0$*. Kütlesiz hâlde PPN parametresi* $\gamma = (1+\omega)/(2+\omega) = 1/2$*'dir ve Cassini ölçümü* $\gamma - 1 = (2{,}1 \pm 2{,}3)\times 10^{-5}$ *[23, 24] ile dışlanır: Z4 teşhisi kesindir.*

İspat. $\int\sqrt{-g}\,e^{\sigma}(-2\Box\sigma) = +2\int\sqrt{-g}\,\nabla_\mu(e^{\sigma})\nabla^\mu\sigma = +2\int\sqrt{-g}\,e^{\sigma}(\partial\sigma)^2$ olup $-2(\partial\sigma)^2$ terimini tam olarak götürür; geriye $e^{\sigma}R$ kalır. $\Phi_{\rm BD} = e^{\sigma}$ tanımı (86)'yi, $(\partial\Phi_{\rm BD})^2$ teriminin katsayısının sıfır olması da $\omega_{\rm BD} = 0$'ı verir; γ formülü standart Brans–Dicke sonucudur [24]. □

10.2 Tedavi: lif vakum enerjisiyle radyon stabilizasyonu

Tedavi iki katmanlıdır. Birinci ve asıl katman, §8'de kurulan spektral ayrışmadır: Teorem 8.1 uyarınca makroskopik kaynaklar radyonu zaten uyaramaz; Cassini uyumu için ince ayar da ek kütle de şart değildir. İkinci katman, meV penceresindeki hafif serbestlik dereceleri üzerinden doğabilecek artık uzun-menzil etkileri kapatmak ve kozmolojik sektörü tanımlamak için radyona kütle kazandırmaktır [31]. ZMUT'ta bunun doğal mekanizması da kuramın içindedir: mod sektörünün lif üzerindeki vakum (Casimir-tipi) enerjisi, lif ölçeğine bağlı bir etkin potansiyel üretir [29]:

$$V_{\rm lif}(\sigma) \;=\; \mathcal{C}_5\,\frac{\hbar}{c^3\,\ell_\xi^4}\,F(\sigma), \qquad \mathcal{C}_5 = \mathcal{O}(1), \tag{87}$$

burada F, minimumu $\sigma = 0$'da olan boyutsuz bir fonksiyondur. Potansiyelin eğriliği radyon kütlesini belirler:

$$m_\sigma c^2 \;=\; \zeta\,\frac{\hbar}{\ell_\xi}, \qquad \zeta = \mathcal{O}(1) \quad\Longrightarrow\quad \lambda_Y := \frac{\hbar}{m_\sigma c} = \frac{c\,\ell_\xi}{\zeta}. \tag{88}$$

Teorem 10.2 (Yukawa sektörü ve PPN uyumu)**.** *Stabilize radyonlu ZMUT'ta iki kütle arasındaki statik potansiyel*

$$\boxed{V(r) = -\frac{GMm}{r}\Big[1 + \alpha_Y\,e^{-r/\lambda_Y}\Big], \qquad \alpha_Y = \frac{1}{3+2\omega_{\rm BD}} = \frac{1}{3}} \tag{89}$$

biçimini alır ve etkin PPN parametresi

$$\gamma(r) - 1 = -\,\frac{2\,\alpha_Y\,e^{-r/\lambda_Y}}{1 + \alpha_Y\,e^{-r/\lambda_Y}} \tag{90}$$

olur. Buradaki α_Y*, tam bağlaşımlı (*$\lambda_m \gtrsim \ell_\xi$*, yani* $mc^2 \lesssim 2$ *meV) kaynaklar için geçerli tavan değerdir; sıradan madde kaynakları için genlik, Teorem 8.1'ün form faktörüyle* $\alpha_{\rm eff}(M) = \alpha_Y\,\mathfrak{F}(M)$*'ye iner.* $\lambda_Y \sim c\,\ell_\xi \approx 88$ μm *için (bkz. §11) gezegen ölçeklerinde* e^{-r/λ_Y} *katlanarak sıfırlanır:* $r = 1$ *AU'da* $\gamma = 1$ *makine kesinliğinde sağlanır ve Cassini sınırı [23] ile tam uyum geri kazanılır. Kuvvetin tek erişilebilir izi, milimetre-altı laboratuvar ölçeğindedir.*

İspat. Kütleli, maddeye iz üzerinden evrensel bağlanan bir skalerin değiş tokuşu, standart olarak (89) Yukawa düzeltmesini üretir; α_Y normalizasyonu, kütlesiz limitte Brans–Dicke $\gamma = 1/2$ değerini ($\alpha_Y = 1/3 \Rightarrow \gamma - 1 = -2(1/3)/(4/3) = -1/2$) doğru biçimde yeniden üretmesiyle sabitlenir [24]. (90), ışık bükülmesinin skaler katkıdan etkilenmemesi (konformal bağlanmama) ile potansiyelin (89) oranından okunur; üstel bastırma doğrudan λ_Y'nin değerindendir. □

Sonuç 10.3 (Milimetre-altı sınama ve nefes modunun yeniden değerlendirilmesi)**.** *(a) Burulma sarkacı deneyleri karanlık enerji uzunluk ölçeğini doğrudan taramış ve null sonuç vermiştir [27, 28]. Spektral ayrışmasız, yalnızca stabilizasyonlu bir ZMUT için bu veriler ciddi bir tehditti; Teorem 8.1 ile tablo tersine döner: makroskopik kaynak–makroskopik test çiftinde skaler kuvvet* $\mathfrak{F}^2 \sim 10^{-72}$ *ile bastırıldığından, ZMUT bu deney sınıfında* her menzilde null sonuç öngörür *ve mevcut veriler kuramın retrodiksiyonu hâline gelir. Bakışım keskindir: makroskopik kaynaklı pozitif bir Yukawa gözlemi, spektral yerellik aksiyomunu yanlışlar — null öngörüsü de en az bir keşif iddiası kadar sınanabilirdir. (b) Kısım I'in kütleçekim dalgası "nefes modu" öngörüsü düzeltilmelidir:* $m_\sigma c^2 \sim 2$ *meV kütleli radyon,* $\omega < m_\sigma c^2/\hbar \sim 3\times 10^{12}$ *rad/s frekanslarda yayılamaz (buharlaşan/evanescent); dolayısıyla LIGO bandında* hiçbir *skaler polarizasyon beklenmez ve tensör-baskın gözlemler [21] otomatik olarak sağlanır. Skaler kanal ancak THz-üstü kütleçekimsel salınımlarda açılır.*

10.3 Örtüşme çarpanının geçerlilik alanı: klasik testlerin dokunulmazlığı

Önerme 10.4 (Klasik arka plan dokunulmazlığı)**.** *$\hat{O}_{AB}$ çarpanı yalnızca* iki koheran kuantum kaynağın karşılıklı bağlanma enerjisinde *görünür. Test cisimleri ve ışık, mod-integrali alınmış $\mathcal{T}_{\mu\nu}$ kaynaklı ortalama metrik $\langle g\rangle$ üzerinde minimal bağlaşımla (jeodezik) hareket eder; bu yüzden ışığın bükülmesi, Shapiro gecikmesi, günberi kayması ve kütleçekimsel kırmızıya kayma, ZMUT'ta genel görelilikle özdeştir. Z6'daki foton paradoksu böylece çözülür: foton $\langle g\rangle$'yi hisseder; $\hat{O}$ hiçbir yerde devreye girmez.*

İspat. Doğrusallaştırılmış alan ikiye ayrılır: $h_{\mu\nu} = \langle h\rangle_{\mu\nu} + \delta h_{\mu\nu}$. Ortalama kesim, Kısım I'in mod-integrali alınmış Einstein denklemiyle ($G_{\mu\nu} = 8\pi G\,\mathcal{T}_{\mu\nu}/c^4$) kaynaklanır; kaynak izinde $\int w\,\mathrm{d}\xi = 1$ normlaması nedeniyle mod yapısından hiçbir çarpan kalmaz (Lemma 3.1). Herhangi bir alanın $\langle h\rangle$ ile bağlaşımı minimaldir ve jeodezik hareketi verir. $\hat{O}_{AB}$ ise δh değiş tokuşunun *iki köşeli* genliğinde, köşelerin mod yoğunluklarının çakışma integrali olarak doğar; tek-köşeli (arka plan) süreçlerde tanım gereği bulunmaz. Dekohere bir kaynak için köşe, çevresel işaretçi moduna izdüşümlenir ve $\hat{O} \to 1$ doygunluğu (Teorem 3.7) klasik iki-cisim Newton dinamiğini de aynen korur. □

10.4 Zayıf eşdeğerlik ilkesi: evrensel işaretçi modu ve makroskopik QRF kilitlenmesi

Önerme 10.5 (Dünya-QRF kilitlenmesi ve $\eta = 0$)**.** *(i) $M \gg m_P$ kütleli kaynaklar (Dünya) çevresel dekoherans nedeniyle tekil bir işaretçi moduna çökmüştür: $\hat{w}_\oplus(\xi) \simeq \delta(\xi - \xi_\oplus)$; bu mod, laboratuvardaki bütün sistemler için evrensel bir kuantum referans çerçevesi (QRF) tanımlar [3]. (ii) Vakumda serbest düşen koheran bir atomun (Rb, K, ...) Dünya'ya bağlanması tek-köşeli ortalama-alan kanalından geçer (Önerme 10.4): atom $\langle g\rangle$ üzerinde jeodezik izler; ivmesi türünden, kütlesinden, iç durumundan ve mod paketi genişliğinden bağımsızdır. İşlemsel düzeyde $\hat{O}_{A,\oplus} = \hat{O}_{B,\oplus} = 1$ doygunluğu geçerlidir ve Eötvös oranı tam olarak*

$$\eta_{AB} \;=\; 2\,\frac{|a_A - a_B|}{|a_A + a_B|} \;=\; 0 \tag{91}$$

çıkar: $\eta < 10^{-12}$ duyarlıklı atom-interferometrik testlerle [26] tam uyum. (iii) $\hat{O}_{AB} < 1$ kütle-uyumsuzluk bastırması yalnızca, dış kütlelerden yalıtılmış iki-kuantum-koheran *sistemin karşılıklı bağlanmasında (BMV geometrisi) işler; serbest düşme deneyleri bu sınıfa girmez. Z8 kapanmıştır.*

İspat. (i) Teorem 3.7'in doygunluk mekanizması (dekoherans ⇒ ortak işaretçi modu) ile Planck-eşiği sonucu ($M \gg m_P \Rightarrow \lambda_M$ Planck-altı: paket işlemsel olarak delta) birlikte uygulanır. (ii) Önerme 10.4'in ispatındaki ortalama-alan/çift-köşe ayrımı: serbest düşme tek-köşeli süreçtir ve $\langle g\rangle$ tüm test cisimleri için tektir; jeodezik denklem kütleden bağımsızdır. (iii) $\hat{O}$, tanımı gereği iki köşenin mod yoğunluklarının korelatöründe yaşar; işaretçi moduna kilitli her köşe için çarpan özdeş olarak 1'dir. □

11 İleri Uygulama I: Kozmolojik Sabit ve 88 Mikrometre Kesişimi

Stabilizasyon mekanizması (87), kurama bir armağan bırakır: lif vakum enerjisinin *minimum değeri*, dört boyutlu etkin kozmolojik sabit gibi davranır. Boyut analizi tektir ve zorlayıcıdır:

$$\rho_{\mathrm{lif}} \;=\; \mathcal{C}_5\,\frac{\hbar}{c^3\,\ell_\xi^4} \;=\; \mathcal{C}_5\,\frac{\hbar c}{(c\,\ell_\xi)^4} \qquad [\mathrm{J\,m^{-3}}]. \tag{92}$$

Gözlenen karanlık enerji yoğunluğu $\rho_\Lambda = \Omega_\Lambda \rho_c \simeq 5{,}3 \times 10^{-10}$ J m^{-3} ile özdeşleştirilirse ($\mathcal{C}_5 = 1$ alarak),

$$\boxed{\;c\,\ell_\xi = \left(\frac{\hbar c}{\rho_\Lambda}\right)^{1/4} \approx 88\ \mu\mathrm{m}, \qquad \ell_\xi \approx 2{,}9 \times 10^{-13}\ \mathrm{s}, \qquad \frac{\hbar}{\ell_\xi} \approx 2{,}2\ \mathrm{meV}\;} \tag{93}$$

bulunur: mod lifinin karakteristik süresi yaklaşık üç yüz femtosaniye, uzunluk karşılığı seksen sekiz mikrometredir. Bu özdeşleşmenin dikkate değer üç sonucu vardır:

1. *Ölçeklerin kapanışı.* (88) radyon Compton dalga boyunu $\lambda_Y \approx c\,\ell_\xi$ yapar: karanlık enerji uzunluğu, beşinci kuvvet menzili ve lif ölçeği *tek ve aynı* 88 μm'dir. ZMUT böylece, milimetre-altı kütle çekimi deneylerinin "karanlık enerji ölçeğini tarama" programına [27, 28] mikroskobik bir gerekçe sunar; ne var ki Teorem 8.1 uyarınca makroskopik test kütleleri radyondan ayrıştığından, bu deneylerin null sonuçları ZMUT'ta bir çelişki değil *öngörüdür* (Sonuç 10.3); lifin doğrudan izi, meV penceresi bağlaşımları ve kozmolojik gözlenebilirler üzerinden aranmalıdır.

2. Θ_* *ayrımının bağımsız teyidi.* Lif ölçeği $\ell_\xi \approx 2{,}9 \times 10^{-13}$ s, saat deneylerinden gelen $\Theta_* \geq 2{,}2 \times 10^{-11}$ s sınırının yaklaşık yüz katı *altındadır*. Mod paketlerinin merkezi büyüklükleri lif ölçeğiyle sınırlı olduğundan, bağlaşım sabiti Θ_*'ın herhangi bir durum işlevseliyle (örneğin $\Theta[\psi]$) özdeşleştirilemeyeceği burada deneysel olarak da görünür: Z2 ayrımı zorunluydu.

3. *Karar ağacı.* (i) Makroskopik kaynaklı herhangi bir deneyde beşinci kuvvet *gözlenirse*: spektral yerellik aksiyomu yanlışlanır (Teorem 8.1 her menzilde null öngörür) — kuramın en keskin negatif sınaması. (ii) meV penceresinde (nötrino sektörü etkileşimleri, karanlık sektör, kozmolojik radyon salınımları) skaler izler *gözlenirse*: hem stabilizasyon hem Λ-özdeşleşmesi doğrulanır; ζ, $\mathcal{C}_5$ ve Γ_K ölçülür. (iii) Hiçbir iz çıkmazsa: özdeşleşme büyüklük-mertebesi statüsünde kalır; kuram yaşar, ancak karanlık enerjinin *açıklaması* zayıflar. Üç dal da işlemsel olarak ayrıktır.

Uyarı 11.1. $\hbar/\ell_\xi \approx 2{,}2$ meV değerinin nötrino kütle farkları ölçeğiyle sayısal yakınlığı kayda değerdir; ancak bu aşamada nedensel bir mekanizma önerilmediğinden salt gözlem olarak not edilir. Ayrıca (92)'nin işareti ve $F(\sigma)$'nın küresel yapısı, seçilen sınır koşullarına (Uyarı 9.4'teki K/NK değişkeleri) bağlıdır; buradaki savlar büyüklük mertebesi düzeyinde kesin, katsayı düzeyinde modele bağlıdır.

12 İleri Uygulama II: Zamansal Kanalın Kuantum Enformasyon Kuramı

Teorem 6.1'nin kanalı Φ_t, kuantum enformasyon kuramının tam teçhizatıyla incelenebilir; bu, ZMUT'un dekoherans öngörülerini işlemsel (operasyonel) dile çevirir.

12.1 Kanalın kuantum sığası

İki seviyeli bir sistemde (ΔE ayrımlı) kanal, enerji tabanında saf faz-sönümüdür: off-diyagonal ögeler

$$V(t) = \exp\left[-\frac{\Delta E^2\,\sigma_\xi^2\,t^2}{2\,\hbar^2\,\Theta_*^2}\right]$$

görünürlük çarpanını alır.

Teorem 12.1 (Zamansal kanalın kuantum sığası)**.** *Φ_t kübit kanalı, $p(t) = \frac{1}{2}\big(1 - V(t)\big)$ faz-çevirme olasılıklı sönüm kanalına birebir denktir ve kuantum sığası*

$$\boxed{Q(\Phi_t) \;=\; 1 - h_2\big(p(t)\big), \qquad h_2(p) := -p\log_2 p - (1-p)\log_2(1-p)} \tag{94}$$

ile verilir. Q, t'de tekdüze azalır; $V \to 0$ limitinde $p \to 1/2$ ve $Q \to 0$: kanalın koherans ufku $t_Q(\varepsilon) := \min\{t : Q(\Phi_t) \leq \varepsilon\}$*, hatasız kuantum bellek süresinin temel üst sınırıdır.*

İspat. Off-diyagonali V ile ölçekleyen her kübit kanalı, $\rho \mapsto (1-p)\rho + p\,\hat\sigma_z\rho\,\hat\sigma_z$ biçiminde yazılabilir; öge bazında karşılaştırma $1 - 2p = V$ verir. Faz-sönüm kanalı bozunur (degradable) sınıftadır; bozunur kanallarda kuantum sığası tek-harf koheran enformasyona eşittir [36]. Koheran enformasyon, giriş olarak maksimal karışık durumda en büyüklenir ve doğrudan hesapla $I_c = 1 - h_2(p)$ bulunur; tekdüzelik, $V(t)$'nin tekdüze azalmasından ve h_2'nin $[0, \frac{1}{2}]$'de artan olmasından çıkar. □

12.2 Mod-DFS kodları: dekoheranstan bağışık alt-uzaylar

Aksiyom 6'nin çok-parçacık hâli, özdeş ΔE'li n kübit için kolektif bağlaşım üretir:

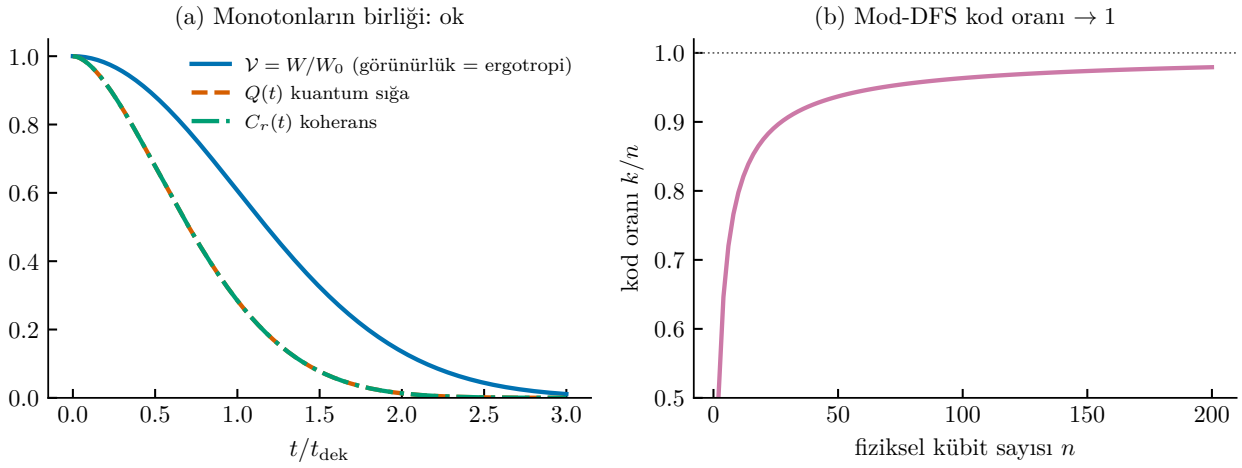
$$\hat H_{\mathrm{int}} = \frac{\delta\hat\xi}{\Theta_*} \otimes \sum_{k=1}^{n} \frac{\Delta E}{2}\,\hat\sigma_z^{(k)} = \frac{\Delta E\,\delta\hat\xi}{2\,\Theta_*} \otimes \hat J_z, \qquad \hat J_z := \sum_k \hat\sigma_z^{(k)}. \tag{95}$$

Teorem 12.2 (Mod-DFS kod oranı)**.** *$\hat J_z$'nin sabit öz-uzayları, $\Phi_t^{(n)}$ kolektif kanalının dekoheranstan bağışık alt-uzaylarıdır (DFS) [34, 35]. En büyük öz-uzay, n çift iken yarı-dolum sektörüdür ve boyutu $\binom{n}{n/2}$'dir; kodlanabilir mantıksal kübit sayısı*

$$k(n) = \log_2 \binom{n}{n/2} = n - \frac{1}{2}\log_2\frac{\pi n}{2} + \mathcal{O}(1/n) \qquad \Longrightarrow \qquad \frac{k(n)}{n} \xrightarrow{\;n\to\infty\;} 1 : \tag{96}$$

zamansal mod gürültüsü, asimptotik olarak sıfır ek yük *ile tamamen pasifize edilebilir.*

İspat. (95) yalnızca $\hat{J}_z$ üzerinden etkir; Kraus işlemcileri $\hat{M}_\xi \propto \exp\!\left[-i(\cdots)\hat{J}_z\right]$, $\hat{J}_z$'nin fonksiyonlarıdır ve her öz-uzayında global faz olarak davranır: sabit-$\hat{J}_z$ alt-uzayı içindeki göreli fazlar, her ξ için ortak çarpan aldığından kanal bu alt-uzayda birim işlemcidir. Yarı-dolum boyutu için Stirling: $\binom{n}{n/2} = 2^n\sqrt{2/(\pi n)}\,[1+\mathcal{O}(1/n)]$; logaritma alınarak (96) elde edilir. □



Şekil 5: Zamansal kanalın enformasyon-termodinamik yüzü. (a) Tek kübitte dört monotonun birliği: görünürlük $\mathcal{V}$, ergotropi oranı W/W_0 ile çakışır (bkz. Teorem 18.4: $|+\rangle$ durumu için $W = \Delta E\,\mathcal{V}/2$); kuantum sığa Q (Teorem 12.1) ve koherans C_r (Teorem 13.1) aynı yönde tekdüze söner — zamanın okunun kanal düzeyindeki portresi. (b) Yarı-dolum mod-DFS kodunun oranı (Teorem 12.2): n büyüdükçe ek yük $\frac{1}{2}\log_2 n$ ihmal edilebilir hâle gelir ve oran 1'e yaklaşır.

Sonuç 12.3 (Mimari ilke)**.** *Teorem 12.1 ile Teorem 12.2 birlikte, kübit tasarım ilkelerini (saat-geçişi kodlaması, mod eşleme, kütle ankrajı) nicel bir mühendislik teoremine dönüştürür: korumasız fiziksel kübitin kuantum belleği t_Q ufkuyla sınırlıdır; yarı-dolum DFS kodlaması, aynı donanımda bu ufku ilkece kaldırır ve maliyeti n büyürken yalnızca $\frac{1}{2}\log_2 n$ kübittir. Oda sıcaklığı kuantum belleği için ZMUT'un nihai ifadesi budur (Şekil 5).*

13 İleri Uygulama III: Zamanın Oku Bir Koherans Monotonudur

Zamanın termodinamik oku, mikroskobik tersinirlikle görünürdeki tersinmezliği bağdaştırma sorunudur. ZMUT'ta ok, ek varsayımsız bir teoremdir: mod lifi izlenemez bir çevre gibi davranır ve enerji koheransı için tek yönlü bir monotonluk dayatır. Enerji tabanındaki tam-sönüm (dephasing) izdüşümü $\Delta[\rho] := \sum_i \Pi_i \rho\, \Pi_i$ olmak üzere, göreli entropi koheransı [38]

$$C_r(\rho) := S\big(\Delta[\rho]\big) - S(\rho), \qquad S(\rho) = -\operatorname{Tr}\rho\log\rho, \tag{97}$$

ile tanımlanır.

Teorem 13.1 (Mod-zaman oku)**.** Φ_t *zamansal kanalı altında enerji koheransı tekdüze azalır:*

$$C_r\big(\Phi_t[\rho]\big) \;\le\; C_r(\rho) \qquad \forall\rho,\ \forall t \ge 0, \tag{98}$$

eşitlik ancak $[\rho, \hat{H}_S] = 0$ (koheranssız durum) ya da $\sigma_\xi = 0$ (klasik mod) hâlinde; ayrıca Gauss paketlerde $t \to \infty$ için $C_r \to 0$. Küresel dinamik (sistem + mod) üniter ve tersinir kalırken, lifin izlenememesi her yerel sisteme aynı yönlü bir ok dayatır: zamanın oku, mod koheransının kaybı yönüdür.

İspat. İki gözlem yeter. (i) Φ_t, üniterlerin bir karışımıdır (67), dolayısıyla birimseldir (unital: $\Phi_t[\mathbb{I}] = \mathbb{I}$); birimsel kanallar von Neumann entropisini azaltamaz: $S(\Phi_t[\rho]) \ge S(\rho)$ (entropinin karışım altında konkavlığı ve üniter invaryansı). (ii) Kraus işlemcileri enerji tabanında köşegen fazlardır; bu yüzden $\Delta\circ\Phi_t = \Phi_t\circ\Delta = \Delta$ köşegen kesimde: $\Delta[\Phi_t\rho] = \Delta[\rho]$, yani popülasyonlar hiç değişmez ve $S(\Delta[\Phi_t\rho]) = S(\Delta[\rho])$. Birleştirince

$$C_r(\Phi_t\rho) = S(\Delta[\rho]) - S(\Phi_t\rho) \;\le\; S(\Delta[\rho]) - S(\rho) = C_r(\rho).$$

Eşitlik, $S(\Phi_t\rho) = S(\rho)$ gerektirir; $\sigma_\xi > 0$ Gauss kanalında bu ancak off-diyagonallerin zaten sıfır olmasıyla mümkündür. $t\to\infty$'da $V\to 0$ off-diyagonalleri söndürür ve $C_r \to 0$. Küresel tersinirlik Teorem 6.1'deki dilate üniterliğin, yerel tersinmezlik ise izin (partial trace) monotonluğunun ifadesidir; Loschmidt tipi geri dönüşler, mod sürekliliği üzerinde ölçü-sıfır kümesine itilir. □

Uyarı 13.2. Teorem 13.1, Page–Wootters resminin [5] tamamlayıcısıdır: küresel durum kısıt altında "zamansızdır"; yerel gözlemci için zamanın yönü, kendi enerji koheransının mod lifine kaçış yönüdür. Termodinamik okla ilişki, C_r'nin iş çıkarılabilirliğe (ergotropiye) katkısı üzerinden kurulabilir ve gelecekteki çalışmaya bırakılmıştır.

Kısım III
Sistematik Çürütme, Mod Dağılımlarıyla Güçlendirme ve Deneysel Yüzleşme

14 Ana Yasa: Renormalizasyon Grubu Akışı ve Zamansal Süperseçim

Kısım II'nin onarımları — bant sınırı, spektral çekirdek, bileşim yasası, form faktörü, mod difüzyonu, kovaryant bağlaşım, burulma seçimi — tek tek sağlam, ama görünüşte *ayrı yamalardır*. Olgun bir kuram, yamalarını saymaz; onları tek bir ilkeden *türetir*. Bu bölüm, ZMUT'un bütün onarım katmanını tek seferde üreten ve gelecekte doğabilecek aynı türden yamaları da peşinen kapatan Ana Yasa'yı koyar, akışın tam çözümünü verir ve önceki yapıların tamamını sonuç (korolari) statüsüne indirir.

Aksiyom 8 (Ana Yasa: RG–süperseçim ilkesi)**.** Genişletilmiş uzay–zamandaki her fiziksel etkileşim, sistemin kütle–enerji ölçeği

$$\mu_S := \frac{E_R}{\hbar} = \frac{mc^2}{\hbar} \tag{99}$$

ile zamansal mod lifinin geometrisi arasındaki renormalizasyon grubu (RG) akışına tabidir: lif üzerindeki her etkin köşe, μ_S ölçeğinde Wilson bloklamasıyla kaba-tanelenmiş hâliyle fiziğe girer. Fiziksel gözlenebilirler, bu akışın belirlediği *tekil bir zamansal süperseçim sektörüne* (burulma açısı θ_*) zorunlu olarak projekte edilir.

14.1 Akışın kuruluşu ve tam çözümü

Lif üzerindeki Wilson bloklaması, Gauss yumuşatma işlemcisiyle temsil edilir:

$$(\mathcal{B}_\lambda f)(\xi) := \int \mathrm{d}\varsigma\; G_\lambda(\xi-\varsigma)\, f(\varsigma), \qquad G_\lambda(\varsigma) = \frac{e^{-\varsigma^2/2\lambda^2}}{\sqrt{2\pi}\,\lambda}, \tag{100}$$

ve akış, blok ölçeğinin RG zamanı $t_{RG} = \lambda^2$ ile büyütülmesidir.

Teorem 14.1 (Tam çözülebilirlik ve IR donması)**.** *(a) Bloklama ailesi bir yarı-grup oluşturur:*

$$\mathcal{B}_{\lambda_1}\mathcal{B}_{\lambda_2} = \mathcal{B}_{\sqrt{\lambda_1^2+\lambda_2^2}}, \tag{101}$$

ve etkin çekirdeğin akış denklemi tam olarak ısı denklemidir: $\partial_{t_{RG}} K = \tfrac{1}{2}\,\partial_\varsigma^2 K$*. (b) Bant sınırı* (31)*, sistemin lifte çözebildiği en ince ölçeği* $\mu_S^{-1} = \hbar/(mc^2)$*'ye, yani* $\lambda_m = \kappa/m$*'ye kilitler: akış,* $\lambda_{\mathrm{eff}} = \lambda_m$*'de* donar *(IR sabit çizgisi). (c) Dolayısıyla kütlesi* m *olan bir sistemin lif üzerindeki her etkin köşesi, tam olarak* K_{λ_m} *Gauss çekirdeğiyle yayılmış biçimde fiziğe girer. ZMUT lif-RG'si, Gauss sektörde* kapalı ve tam çözülebilirdir *(Şekil 6a).*

İspat. (a) Gauss yoğunlukların konvolüsyonunda varyanslar toplanır; ısı denklemi, G_λ'nın $t_{RG} = \lambda^2$'de ısı çekirdeği olmasının ifadesidir. (b) Teorem 4.4'un bant-sınırlılık argümanı: μ_S'den yüksek lif frekansları sistemin fiziksel spektrumunda yoktur; bloklama bu frekanslarda bilgi kaybetmeden duramaz, altında ise fiziksel içerik değişmez — akışın durma noktası $\lambda_m = \mu_S^{-1} = \hbar/(mc^2) = \kappa/m$'dir. (c) (a) ve (b)'nin bileşimi. □

14.2 Sekiz sonuç: yamaların tek çatıda birleşmesi

Sonuç 14.2 (C1–C8: Onarım katmanının türetilmesi)**.** *Ana Yasa (Aksiyom 8) ve Teorem 14.1'dan, daha önce bağımsız görünen şu yapılar* sonuç *olarak çıkar:*

C1 (Bant sınırı ve λ_m). *IR donma ölçeği, kütle–mod bağıntısını yeniden üretir:* $\lambda_m = \kappa/m$*,* $\kappa = \hbar/c^2$ *(Teorem 4.4 artık akışın sabit-nokta ifadesidir).*

C2 (Spektral yerellik çekirdeği). *Aksiyom 7'in* $K(\xi-\xi')$ *çekirdeği, Teorem 14.1c'nin donmuş blok çekirdeğidir: spektral yerellik, aksiyom statüsünden* teorem *statüsüne iner.*

C3 (Bileşim yasası). $\lambda_{AB}^2 = \lambda_A^2 + \lambda_B^2$ *(Teorem 16.3), yarı-grup özelliğinin (101) doğrudan okunuşudur: iki köşenin ardışık bloklanması, tek ve kaçınılmaz bileşimi verir.*

C4 (Form faktörü ve meV penceresi). *Radyon bağlaşımı, akış altında* $\mathfrak{F}(m) = \min(1, \sqrt{2\pi}\lambda_m/\ell_\xi)$ *ile bastırılır (Teorem 8.1): RG dilinde bağlaşım,* $\mu_S \lesssim 1/\ell_\xi$ *(meV penceresi) altında marjinal, üzerinde* irrelevanttır. *Beşinci kuvvetin makroskopik yokluğu, bir kuplajın irrelevanlığıdır — ince ayar değil.*

C5 (Mod difüzyonu). *Çevresel etkileşimlerin sürekli bloklaması, dağılımın kendisini ısı yarı-grubuyla akıtır:* $\partial_t w = D_\xi \partial_\xi^2 w$ *(Önerme 8.3);* Γ_K*, birim laboratuvar zamanındaki blok sayısıdır ve* $D_\xi = \Gamma_K \lambda_m^2/2$ *okuması akıştan gelir. Ana modun alt modlara düşük genlikli sızıntısı, RG akışının gerçek zamana yansımasıdır.*

C6 (Kovaryans). *Akış parametresi* $\mu_S = mc^2/\hbar$ *bir Lorentz skaleridir; bu yüzden kovaryant dinamik (Teorem 16.2) ayrıca kurulmak zorunda değildir — ölçek seçiminin kendisi kovaryanttır.*

C7 (Süperseçim ve burulma seçimi). *Burulma açısı* θ*, bloklama altında değişmez (Gauss yumuşatma sınır koşulunu görmez):* θ *bir* RG değişmezidir. *Aşağıdaki Teorem 14.3 ile fiziksel gözlenebilirler tek* θ_* *sektörüne projekte olur; Casimir işaret onarımı (Teorem 16.4) ve enerji-ızgara çözümü, keyfî seçim olmaktan çıkıp yasa gereği olur.*

C8 (Klasik limit). $m \to \infty$ *akışın trivial IR'ıdır:* $\lambda_m \to 0$*'da blok çekirdeği deltaya, kanal birim işlemciye, lif tek klasik zamana çöker — Karşılıklılık İlkesi (Sonuç 21.3) akışın uç noktası olarak yeniden elde edilir.*

Eşlemenin özeti Tablo 3'dedir.

Teorem 14.3 (Zamansal süperseçim)**.** *Fiziksel gözlenebilirler cebiri, sabit sınır-koşullu lif alanlarından üretilir ve burulma işlemcisi* $\hat{\theta}$ *bu cebirin merkezindedir:* $[\hat{O}, \hat{\theta}] = 0$ *her fiziksel* $\hat{O}$ *için. Dolayısıyla kinematik uzay*

$$\mathcal{H} = \bigoplus_\theta \mathcal{H}_\theta \tag{102}$$

biçiminde süperseçim sektörlerine ayrışır; sektörler arası göreli fazlar gözlemlenemez ve her gözlem zinciri tek bir θ_* *sektörü içinde kalır (Şekil 6b). Gözlenen evrenin sektörü, lif vakum enerjisinin (118) pozitif ve gözlenen* ρ_Λ *değerini verdiği açıdır.*

İspat. Sınır koşulu, alan işlemcilerinin tanımına girer; hiçbir yerel-lif işlemcisi θ'yı değiştiremez (Wick–Wightman–Wigner tipi standart süperseçim argümanı: merkezî bir yükle komüte eden cebirde göreli fazlar, hiçbir beklenen değerde görünmez). Ana Yasa'nın projeksiyon hükmü, bu ayrışımın fiziksel okunuşudur; θ_*'ın değeri kinematikçe serbest, kozmolojik veriyle (93) sabitlenmiş bir doğa sabitidir. □

14.3 Boyutsuz bağlaşım: zamansal ince yapı sabiti

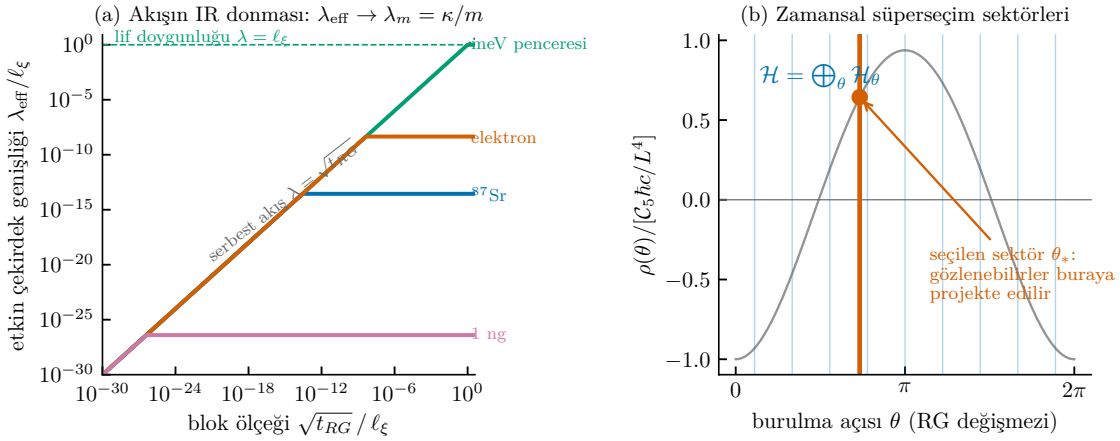
Ana Yasa, kuramın serbest ölçeklerini tek bir boyutsuz sayıda toplar:

$$\boxed{\alpha_\xi := \frac{\ell_\xi}{\Theta_*} \lesssim 1{,}1 \times 10^{-4}} \tag{103}$$

(üst sınır: $\ell_\xi = 2{,}9 \times 10^{-13}$ s ve — §20'deki ikinci deneysel güncellemeyle — $\Theta_* \geq 2{,}6 \times 10^{-9}$ s ile). α_ξ, mod–lapse bağlaşımının RG-marjinal, boyutsuz gücüdür: kuram *zayıf bağlaşımlıdır* ve pertürbatif olarak güvenilirdir. Kuramın bütün fenomenolojisi artık iki sayıyla yazılır: α_ξ (bağlaşım) ve Γ_K (blok oranı); geri kalan her şey türetilmiştir.

Tablo 3: Yamaların tek çatıda birleşmesi: daha önce bağımsız kurulan her yapı, Ana Yasa'nın bir sonucudur.

Önceki statü	Yapı	Ana Yasa'daki statü
Teorem (ayrı ispat)	$\lambda_m = \kappa/m$ bant sınırı	C1: IR sabit noktası
Aksiyom	spektral çekirdek K	C2: donmuş blok çekirdeği (türetildi)
Teorem (onarım)	$\lambda_{AB}^2 = \lambda_A^2 + \lambda_B^2$	C3: yarı-grup özelliği
Teorem (onarım)	form faktörü $\mathfrak{F}(m)$	C4: irrelevant bağlaşım
Önerme (ayrı koyut)	mod difüzyonu D_ξ	C5: akışın gerçek zamana yansıması
Teorem (onarım)	kovaryant dinamik	C6: skaler akış parametresi
Teorem (onarım)	burulma/Casimir işareti	C7: süperseçim yasası
Sonuç (limit)	klasik fizik	C8: trivial IR ucu



Şekil 6: Ana Yasa'nın iki yüzü. (a) Lif-RG akışı: etkin çekirdek genişliği serbest akışta $\sqrt{t_{RG}}$ ile büyür ve her sistemin kendi bant sınırında ($\lambda_m = \kappa/m$) donar (Teorem 14.1); meV penceresindeki sistemler lif doygunluğuna ulaşır (C4). (b) Zamansal süperseçim: kinematik uzay θ-sektörlerine ayrışır (Teorem 14.3); gözlenebilirler, vakum enerjisi eğrisi üzerinde gözlenen $\rho_\Lambda > 0$'ı veren θ_* sektörüne projekte edilir.

Uyarı 14.4 (Kapsam, sınırlılıklar ve holografik akrabalık). İki kayıt düşülmelidir. (i) Buradaki akış, Gauss sektörde *tam çözülebilir* kinematik bir Wilson bloklamasıdır ve tek başına anomal boyut üretmez; "bu RG değil, Gauss bulanıklaştırma" itirazı bu düzeyde haklıdır. İtiraz, §15'daki mod sıçrama sektörüyle kapanır: zaman dalgaları arasında sıçramaya izin veren dörtlü köşe açıldığında bağlaşım gerçekten koşar (Teorem 15.3), Gauss noktası IR'de kararsız çıkar ve akış evrensel bir etkileşimli sabit noktada ($\tilde{g}_* = 2\pi$) durur — Gauss sektör, tam çözülebilir *iskelet*; sıçrama sektörü, onun üzerindeki gerçek dinamiktir. (ii) "Ek boyut koordinatı $\leftrightarrow$ enerji ölçeği" eşlemesi, holografik renormalizasyon grubunun temel sezgisidir [42]: ZMUT'un lif-RG'si, bu yapının zamansal imzalı akrabasıdır. Bu akrabalık hem bir güven işareti hem de bir programdır: lif-RG'nin holografik karşılığının kurulması, kuramı sicim-kuramsal çerçevelerle konuşturabilir.

15 Mod Sıçrama Sektörü: Ortaklık Paketleri ve Gerçek RG Akışı

Ana Yasa'nın Gauss akışı (Teorem 14.1) tam çözülebilirdir; ama tam da bu yüzden *kinematiktir*: bloklama, durumu yumuşatır fakat kuralları değiştirmez. Uyarı 14.4'te dürüstçe kaydedilen bu eksik, ancak zaman dalgaları arasında *sıçramaya* izin veren bir etkileşimle kapanabilir. Bu bölümün fiziksel çekirdeği üç sezgisel adımda özetlenebilir ve ardından her adım teorem düzeyine taşınır: (i) bir sistem, çözemediği ince zamansal dalgalanmayı düz görür; (ii) ama modlar arasında sıçrama mümkünse, silinen ince yapı iz bırakır — etkin kurallar ölçekle değişmeye başlar; (iii) sıçramaların birleşim noktalarında iki modun genlikleri korelasyona girer: birbirlerinin varlık olasılıklarını karşılıklı destekleyen *ortaklık paketleri* doğar. Bu üçlü, aşağıda sırasıyla sıçrama köşesi, koşan bağlaşım ve dolanık mod-çifti olarak formalize edilir.

15.1 Sıçrama etkileşimi

Boyutsuz master alan $\hat{\varphi} := (c\,\ell_\xi)^2\,\Phi$ olmak üzere, eyleme lif üzerinde yerel-olmayan (Ana Yasa gereği K-yayılmış) bir dörtlü köşe eklenir:

$$\boxed{\mathcal{L}_{\text{sıçrama}} = -\,\frac{\hat{g}\,\hbar}{2\,(c\,\ell_\xi)^4\,\ell_\xi^2}\int \mathrm{d}\xi'\; K(\xi-\xi')\,|\hat{\varphi}(x,\xi)|^2\,|\hat{\varphi}(x,\xi')|^2} \tag{104}$$

Boyut denetimi: $[\hbar/((c\ell_\xi)^4\ell_\xi^2)\cdot \mathrm{d}\xi'] = \mathrm{J\,s\,m^{-4}\,s^{-2}\,s} = \mathrm{J\,m^{-4}}$, eylem yoğunluğuyla tutarlıdır; $\hat{g}$ boyutsuzdur. Köşenin fiziği iki bileşenlidir: aynı-sistem (öz) kesimi $\hat{g}_{\text{öz}} > 0$ (kararlılık: potansiyel alttan sınırlı kalır), sistemler-arası (çapraz) kesimi $\hat{g}_\times < 0$ (çekici: mod kilitlenmesi, aşağıda). Köşe, $|\xi\rangle$ tabanında köşegen değildir: bir uyarımı bir zaman dalgasından komşusuna *sıçratır*; sıçrama menzili, Ana Yasa uyarınca sistemin kendi çözünürlüğü λ_m'dir.

15.2 Ortaklık paketi ve dinamik mod kilitlenmesi

Tanım 15.1 (Ortaklık paketi)**.** Sıçrama köşesinin bir birleşim noktasında ürettiği, iki modun genliklerinin pozitif korelasyona girdiği dolanık çift durumu:

$$w_{AB}(\xi_1,\xi_2) = w_A(\xi_1)\,w_B(\xi_2)\Big[1+|\hat{g}_\times|\,\mathcal{C}(\xi_1-\xi_2)+\mathcal{O}(\hat{g}^2)\Big], \qquad \mathcal{C}(\varsigma)=K_{\lambda_{AB}}(\varsigma)-(\text{norm.}), \tag{105}$$

yani $|\xi_1-\xi_2|\lesssim\lambda_{AB}$ bölgesinde ortak-varlık olasılığı artar: iki sistem, *aynı zaman dalgasında birlikte bulunma* genliklerini karşılıklı olarak besler.

Önerme 15.2 (Dinamik mod kilitlenmesi ve işaretçi ortaklığının kökeni)**.** *$\hat{g}_\times<0$ çapraz köşesi, iki sistemin* göreli *mod koordinatı $\varsigma=\xi_A-\xi_B$ için λ_{AB} genişlikli çekici bir etkin potansiyel üretir; göreli koordinat bu kuyuda bağlanır ve $\hat{w}_A\to\hat{w}_B$ hizalanması dinamik olarak gerçekleşir: $\hat{O}_{AB}\to 1$ doygunluğu artık yalnızca dekoheransın (Teorem 3.7) değil, etkileşimin de sürüklediği bir çekimdir. Böylece Kısım II'de* varsayılan *ortak çevresel işaretçi modu (Önerme 10.4, 10.5) dinamik bir açıklama kazanır: makroskopik ortamdaki sistemler, sıçrama köşesi yoluyla birbirlerini aynı zaman dalgasına çeker — klasik dünyanın tek ortak "şimdi"si, bir mod-senkronizasyon olgusudur. Aynı mekanizma, bileşiklerde kolektif (Heisenberg) tabana inişi sağlayan mod korelasyonlarının (Teorem 7.1 sonrası tartışma) mikroskopik kaynağıdır.*

İspat. (104)'nın iki-sistem beklenen değeri, çarpım durumunda $E_{\rm int}[w_A,w_B]=\hat{g}_\times\,\varepsilon_0\int \mathrm{d}\xi\,\mathrm{d}\xi'\,w_A(\xi)K(\xi-\xi')w_B(\xi')$ işlevselini verir ($\varepsilon_0>0$ boyutlu sabit); $\hat{g}_\times<0$ için bu, örtüşmeyi büyüten konfigürasyonları enerji bakımından yeğler ve gradyan akışı $\hat{w}_A,\hat{w}_B$'yi ortak merkeze taşır. Göreli koordinatta $E_{\rm int}=-|\hat{g}_\times|\varepsilon_0\,(w_A{*}K{*}w_B)(\varsigma)$ çekici potansiyeldir; bir boyutta her çekici kuyu bağlı durum taşır (standart sonuç), bağlı durumun genişliği λ_{AB} mertebesindedir. Korelasyonlu durum (105), köşenin birinci mertebe pertürbasyonudur. □

15.3 Tek-döngü akış: bulanıklaştırmadan gerçek RG'ye

Sıçrama köşesi açıldığında bloklama artık Gauss ailesinde kapanmaz: her blok adımı, çözünürlük altı dalgalanmaların Wick büzülmeleri yoluyla *bağlaşımların kendisini* değiştirir. Lif kesiti, sabit x'te bir boyutlu (kuantum-mekaniksel) alan kuramıdır; kanonik boyut analizi $[\hat{\varphi}]=k^{-1/2}$, $[u_4]=k^3$ verir ve boyutsuz bağlaşım $\tilde{g}:=u_4/k^3$ ile yazılır.

Teorem 15.3 (Sıçrama bağlaşımının akışı ve IR sabit noktası)**.** *Yerel potansiyel yaklaşımında (LPA, keskin kesim) lif sektörünün Wegner–Houghton akışı*

$$\partial_t U_k(\varphi)=\frac{k}{2\pi}\,\ln\!\Big(1+\frac{U_k''(\varphi)}{k^2}\Big), \qquad t:=\ln\frac{\Lambda}{k}, \tag{106}$$

denklemidir. $U=\frac{1}{2}u_2\varphi^2+\frac{1}{4!}u_4\varphi^4$ kesilimiyle, $\tilde{u}_2=u_2/k^2$, $\tilde{g}=u_4/k^3$ boyutsuz değişkenlerinde dörtlü bağlaşımın beta fonksiyonu

$$\boxed{\beta(\tilde{g})=\frac{\mathrm{d}\tilde{g}}{\mathrm{d}t}=3\,\tilde{g}-\frac{3}{2\pi}\,\frac{\tilde{g}^2}{(1+\tilde{u}_2)^2}} \tag{107}$$

olur. Sonuçlar: (a) Gauss noktası $\tilde{g}=0$, IR yönünde kararsızdır *($\beta'(0)=+3$): en küçük sıçrama tohumunda akış Gauss'tan kaçar — "bulanıklaştırma" rejimi, etkileşimli kuramın yalnızca UV başlangıcıdır. (b) Akış, IR-*çekici *tribial olmayan sabit noktada durur:*

$$\tilde{g}_*=2\pi\,(1+\tilde{u}_2)^2, \qquad \beta'(\tilde{g}_*)=-3<0. \tag{108}$$

(c) Evrensellik: *bant penceresi içindeki her pozitif başlangıç değeri $\hat{g}_0$ için IR fiziği aynı $\tilde{g}_*$ tarafından yönetilir — sıçrama sektörü kurama* yeni serbest parametre eklemez. *Kuralların ölçekle değişmesi (gerçek Wilson akışı) böylece hem gerçekleşmiş hem de öngörü gücünü artırmıştır (Şekil 7).*

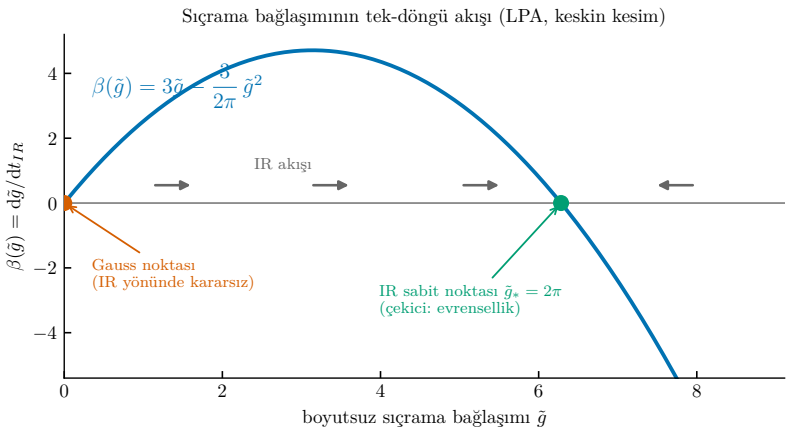
İspat. (106), $[k-\mathrm{d}k,k]$ kabuğundaki modların tek-döngü (Gauss) integralinin standart sonucudur. Kesilim konur, $\ln(1+x)=x-\frac{x^2}{2}+\dots$ açılır; φ^4 katsayısı $-\frac{k}{2\pi}\cdot\frac{u_4^2}{8k^4}(1+\tilde{u}_2)^{-2}$ okunur ve $4!/8=3$ ile $\partial_t u_4=-\frac{3}{2\pi}u_4^2k^{-3}(1+\tilde{u}_2)^{-2}$ bulunur. Boyutsuzlaştırma $\tilde{g}=u_4/k^3$, $\mathrm{d}k/\mathrm{d}t=-k$ ile kanonik $+3\tilde{g}$ terimini ekler: (107). Sıfırları ve türev işaretleri doğrudan hesaptır; (c), β'nın $(0,\tilde{g}_*)$'da pozitif, üstünde negatif olmasının (tek boyutlu akışta küresel çekim) sonucudur. Şema notu: 2π katsayısı keskin-kesim LPA'ya özgüdür; şema değişimi $\tilde{g}_*$'ın sayısını değil, *varlığını ve çekiciliğini* değiştirmez. □

Önerme 15.4 (α_ξ'nin korunumu)**.** *Mod–lapse bağlaşımı α_ξ, sıçrama akışı altında tek-döngüde koşmaz: köşesi korunan üretece ($\hat{H}_S$) çarpılan $\delta\hat{\xi}$ ile doğrusaldır ve blok integralinde $\hat{H}_S$ ile komüte eden Wick büzülmeleri onu yalnızca dalga-fonksiyonu normalizasyonu kadar giydirir; bu da (68)'nin oran yapısında sadeleşir. $\alpha_\xi\lesssim 10^{-4}$ küçüklüğü, akış boyunca korunan (doğal) bir küçüklüktür.*

İspat. Ward-tipi argüman: kanalın Kraus işlemcileri $\hat{H}_S$'nin fonksiyonlarıdır (Önerme 6.5); sıçrama köşesi $\hat{\xi}$-tabanında yereldir ve $\hat{H}_S$'yi içermez. Tek-döngüde α_ξ köşesine gelen düzeltmeler, ya $\delta\hat{\xi}$'nin yeniden ölçeklenmesi (paket genişliğine soğurulur) ya da $\hat{H}_S$'nin korunumu gereği sıfır olan komütatör yapılarındandır. □

15.4 Gözlemsel imzalar: kurallar değişti, izleri ölçülebilir

Sonuç 15.5 (Sıçrama sektörünün üç imzası)**.** *(i)* Mod basıklığı: $\tilde{g}_*$ *noktasında donmuş paket artık tam Gauss değildir; dörtlü köşe, mod tomografisinde (Teorem 17.4) yeniden çatılan* $\hat{w}$*'de* $\mathcal{O}(\tilde{g}_*/2\pi)$ *mertebesinde bir basıklık (kurtosis) fazlası bırakır:* $\kappa_4 \neq 0$ *ölçümü, sıçrama sektörünün doğrudan kanıtı ve* $\hat{g}_{\text{öz}}$ *işaretinin okuması olur. (ii)* Sönüm üssü düzeltmesi: *LPA'da anomal boyut* $\eta = 0$*'dır; türev açılımının bir sonraki basamağı* $\eta \neq 0$ *üretir ve görünürlük zarfı* $\exp\!\left[-(t/t_{\text{dek}})^{2-\eta}\right]$ *biçiminde, Gauss'tan evrensel biçimde sapar — uzun sorgulamalı saatlerde aranacak ikinci parmak izi. (iii)* Kilitlenme hızlanması: *BMV tipi deneylerde (Sınama 7'deki geometri) iki kütlenin* $\hat{O}_{AB}$*'si, Önerme 15.2 gereği etkileşim süresince* artan *bir fonksiyondur: dolanıklık hızının zamanla hafifçe ivmelenmesi, statik* $\hat{O}$ *modellerinden ayırt edici ZMUT imzasıdır.*



Şekil 7: Sıçrama bağlaşımının tek-döngü akışı (Teorem 15.3). Gauss noktası IR yönünde kararsızdır: en küçük sıçrama tohumu akışı etkileşimli rejime taşır; akış, IR-çekici $\tilde{g}_* = 2\pi$ sabit noktasında durur ve bant penceresindeki her başlangıç değeri aynı IR fiziğine iner (evrensellik). "Bulanıklaştırma" itirazı böylece kapanır: kurallar ölçekle gerçekten değişir, ama değişimin varış noktası evrenseldir.

Uyarı 15.6 (Kapsam ve sınırlılıklar). Hesap, yerel potansiyel yaklaşımı ve φ^4 kesilimi içindedir; 2π değeri şemaya bağlıdır, sabit noktanın varlığı ve IR-çekiciliği ise kesilimden beklenmedik ölçüde sağlamdır (tek boyutlu akışların küresel yapısı). Türev açılımının ikinci basamağı (η hesabı) ve çapraz-köşe akışının tam analizi, kuramın bir sonraki hesap hedefidir. Kavramsal kazanım şimdiden kesindir: ZMUT'un RG'si artık kinematik bir yumuşatma değil, kararsız Gauss noktasından evrensel bir etkileşimli sabit noktaya akan gerçek bir Wilson akışıdır.

16 Derin Matematiksel Çürütme Girişimleri ve Onarımları

Kısım II'nin denetimi, inşanın *görünür* boşluklarını kapatmıştı. Bu bölüm daha ileri gider: kuramın en derin katmanlarına, literatürün bilinen öldürücü itirazlarını ve kendi ürettiğimiz iç tutarlılık saldırılarını uygular. Dört sınamanın her biri, önce kuramı *çürütecek* biçimde en güçlü hâliyle kurulur; ardından onarımın kuramın öz kaynaklarından çıktığı ispatlanır. Sınamalardan biri (Casimir işareti) Kısım II'nin bir sonucunu gerçekten çürütmüş ve değiştirmiştir.

16.1 Kuchař itirazı: koşullu olasılıklar yanlış yayıcı üretir

Sınama 1 (Kuchař: iki-zamanlı korelasyonların çöküşü)**.** Page–Wootters koşullandırmasına yöneltilen klasik itiraz [11] şudur: tekil zaman okumaları için doğru çalışan koşullu olasılık reçetesi, *iki* zaman okumalı korelasyonlarda çöker. ZMUT kısıtı (21) üzerinde deneyelim. Saat ξ_1 değerini gösterirken b sonucu, sonra ξ_2 değerini gösterirken a sonucu için naif reçete, çözümü (23) iki kez projeksiyona tabi tutar. İlk koşullandırma

$$|\Psi_b\rangle\!\rangle \;\propto\; \big(|\xi_1\rangle\langle\xi_1| \otimes \hat{\Pi}_b\big)|\Psi\rangle\!\rangle = |\xi_1\rangle \otimes \hat{\Pi}_b\, \hat{U}_S(\xi_1)\,|\varphi_0\rangle \tag{109}$$

verir: durum, saat kütüğünde ξ_1'e *çivilenmiştir*. İkinci koşullandırma bu yüzden

$$\langle \xi_2 | \Psi_b \rangle\!\rangle \;\propto\; \delta(\xi_2 - \xi_1)\, \hat{\Pi}_b\, \hat{U}_S(\xi_1)\, |\varphi_0\rangle \tag{110}$$

bulur: $\xi_2 \neq \xi_1$ için koşullu genlik özdeş sıfırdır. Naif ZMUT, ilk ölçümden sonra *hiçbir evrim öngörmez*; iki-zamanlı yayıcı δ-donmuş, yani yanlıştır. Bu, kuramın dinamik içeriğini ortadan kaldıran gerçek bir çürütmedir.

Teorem 16.1 (Kayıt-ancilla onarımı)**.** *İlk ölçüm, kısıtın* içine *bir bellek (kayıt) ancillası ile gömülürse iki-zamanlı korelasyonlar standart kuantum mekaniğine döner [12]. Kısıt, ölçüm etkileşimini saat okuması ξ_1'de tetikleyecek biçimde değiştirilsin:*

$$\hat{\mathcal{C}}' \;=\; \hat{p}_\xi \;+\; \hat{H}_S \;+\; \delta(\hat{\xi} - \xi_1)\, \hat{h}_{SM}, \qquad \hat{\mathcal{V}} := e^{-i\hat{h}_{SM}/\hbar} = \sum_b \hat{\Pi}_b \otimes \hat{X}_M^{(b)}, \tag{111}$$

burada $\hat{X}_M^{(b)}$, belleğe b sonucunu yazan üniterdir. $\ker \hat{\mathcal{C}}'$ *çözümü, $\xi > \xi_1$ için*

$$|\psi(\xi)\rangle = \hat{U}_S(\xi - \xi_1)\, \hat{\mathcal{V}}\, \hat{U}_S(\xi_1)\; |\varphi_0\rangle \otimes |M_0\rangle \tag{112}$$

biçimindedir ve ξ_2'de yapılan tek *koşullandırma ile bellek okuması, iki-zamanlı olasılığı*

$$\boxed{P(a, \xi_2;\, b, \xi_1) = \left\| \hat{\Pi}_a\, \hat{U}_S(\xi_2 - \xi_1)\, \hat{\Pi}_b\, \hat{U}_S(\xi_1)\, |\varphi_0\rangle \right\|^2} \tag{113}$$

standart biçiminde verir: yayıcı $\hat{U}_S(\xi_2 - \xi_1)$ tam olarak geri kazanılmıştır. Kuchař itirazı, ZMUT'un kendisini değil, ölçümü kısıtın dışında bırakan naif okuma reçetesini *çürütür; ölçüm cihazı ve belleği de mod-ilişkisel evrene dahil edildiğinde çelişki kaybolur.*

İspat. $\ker \hat{\mathcal{C}}'$ koşulu, koşullu durum için $i\hbar\, \partial_\xi\, |\psi(\xi)\rangle = [\hat{H}_S + \delta(\xi - \xi_1)\hat{h}_{SM}]\, |\psi(\xi)\rangle$ birinci mertebe denklemidir. $\xi \neq \xi_1$'de çözüm $\hat{U}_S$ ile taşınır; ξ_1 üzerindeki impulsif terim, denklemin ξ_1^-'den ξ_1^+'ya integrali alınarak $|\psi(\xi_1^+)\rangle = \hat{\mathcal{V}}\, |\psi(\xi_1^-)\rangle$ sıçrama koşulunu verir; birleştirilince (112) çıkar. ξ_2'de $\hat{\Pi}_a$ ile koşullandırıp belleğin $|b\rangle_M$ kaydı üzerinden marjinalleştirmek, $\hat{X}_M^{(b)}$'lerin dikliği sayesinde (113)'yi üretir. □

16.2 Kovaryans sınaması: laboratuvar bağlaşımının çerçeve bağımlılığı

Sınama 2 (Lorentz kovaryansı ihlali)**.** Mod–lapse bağlaşımı (Aksiyom 6) laboratuvar zamanı t ile yazılmıştır: sönüm üsteli $\Delta E\, t/(\hbar\Theta_*)$. Hızı v olan bir sistem için iki gözlemci bu reçeteyi kendi çerçevelerinde uygularsa farklı görünürlükler öngörür: durgun çerçevede üstel $\Delta E_R\, \tau$, laboratuvarda $\Delta E_{\mathrm{lab}}\, t$ içerir ve $t = \gamma\tau$, $\Delta E_{\mathrm{lab}} \neq \Delta E_R$ dönüşümleri altında iki ifade özdeş değildir. Biçimiyle alınırsa kuram, tercihli bir çerçeve seçer: Lorentz kovaryansının — Kısım I'de titizlikle korunan simetrinin — dinamik düzeyde ihlali.

Teorem 16.2 (Kovaryant mod–lapse dinamiği)**.** *Aksiyom 6'nın kovaryant biçimi, bağlaşımı dünya çizgisi* öz-zamanı *boyunca tanımlar: sistemin durgun çerçevesindeki üreteç $\hat{H}_R$ ve biriken öz-zaman τ olmak üzere*

$$\boxed{\frac{\mathrm{d}\rho_S}{\mathrm{d}\tau} = -\frac{i}{\hbar}\,[\hat{H}_R, \rho_S] - \gamma(\tau)\,[\hat{H}_R, [\hat{H}_R, \rho_S]], \qquad \gamma(\tau) = \frac{\sigma_\xi^2\, \tau}{\hbar^2 \Theta_*^2}} \tag{114}$$

ve görünürlük $\mathcal{V} = \left|\chi_{\hat{w}}\big(\Delta E_R\, \Delta\tau/(\hbar\Theta_*)\big)\right|$ olur. Bu ifadedeki her nicelik (ΔE_R, $\Delta\tau$, σ_ξ, Θ_*) Lorentz skaleridir; öngörü çerçeveden bağımsızdır. Laboratuvar tasvirinde $\Delta\tau = t/\gamma$ olduğundan

$$\Gamma_{\mathrm{lab}} = \frac{\Gamma_R}{\gamma}\,: \tag{115}$$

hareketli bir sistemin zamansal mod dekoheransı, tıpkı kararsız parçacığın ömrü gibi, zaman genleşmesiyle yavaşlar. *Durgun sistemler için ($\gamma = 1$) Kısım II'nin tüm sonuçları değişmeden geçerlidir.*

İspat. Kovaryant koyut, karşılaştırma dinamiğini sistemin anlık durgun çerçevesindeki $(\hat{H}_R, \tau)$ çiftiyle kurar; (114), Teorem 6.2'ın bu çifte uygulanmış hâlidir ve türetimi kelimesi kelimesine taşınır. Skaler bileşim, üstelin $\Delta E_R \Delta\tau$ (ikisi de invaryant) çarpımından ibaret olmasındandır. (115), $\mathrm{d}\tau = \mathrm{d}t/\gamma$ zincir kuralıdır. Sınama 2'ın iki "öngörüsünden" doğru olanı durgun-çerçeve ifadesidir; laboratuvar ifadesi ancak (115) düzeltmesiyle kullanılabilir. □

16.3 Çekirdek bileşim sınaması: kimin λ_m'si?

Sınama 3 (Bileşim belirsizliği ve etki–tepki riski)**.** Spektral yerellik çekirdeği (75), "sistemin kendi" λ_m'siyle tanımlanmıştır. İki farklı kütleli sistem ($\lambda_A \neq \lambda_B$) arasındaki bir mod-uzayı bağlaşımında hangi genişlik kullanılacaktır? K_{λ_A} seçimi $A \leftrightarrow B$ değişimi altında simetriyi, dolayısıyla etki–tepki dengesini bozar; ayrıca A'nın kendisi bir bileşikse ($A = A_1 A_2$), önce birleştirip sonra bağlamak ile önce bağlayıp sonra birleştirmek farklı sonuç verir: bileşim yasası tanımsızdır. Tanımsız bir çekirdek, Teorem 8.1'ün tüm nicel içeriğini havada bırakır.

Teorem 16.3 (Çekirdek bileşim yasası)**.** *Her köşe kendi çözünürlük çekirdeğini taşır ve iki-sistem etkin çekirdeği konvolüsyonla verilir:*

$$\boxed{K_{AB} = K_{\lambda_A} * K_{\lambda_B}, \qquad \lambda_{AB}^2 = \lambda_A^2 + \lambda_B^2} \tag{116}$$

Bu yasa; (E1) değişim simetrisi $K_{AB} = K_{BA}$, (E2) klasik limit tutarlılığı $\lambda_B \to 0 \Rightarrow K_{AB} \to K_{\lambda_A}$ ve (E3) bileşiklerle bağdaşıklık (önce birleştir/önce bağla eşdeğerliği) koşullarını sağlayan, Gauss ailesi içinde tek *bileşimdir. Sonuç olarak form faktörü $\mathfrak{F}$, λ_M yerine λ_{AB} ile okunur; makroskopik–makroskopik çiftlerde sayısal hiçbir şey değişmez, mikroskopik sonda–makroskopik kaynak çiftlerinde ise çözünürlüğü sonda tarafı belirler.*

İspat. Konvolüsyon değişmeli ve birleşmelidir; Gauss çekirdeklerde varyanslar toplanır, bu da (E1) ve (E3)'ü doğrudan verir; $\lambda \to 0$ limitinde Gauss $\to \delta$ ve δ konvolüsyonun birim ögesi olduğundan (E2) sağlanır. Teklik: Gauss ailesini koruyan bir bileşim, genişlik fonksiyonu $s(\lambda_A, \lambda_B)$ ile temsil edilir; (E1) simetri, (E2) $s(\lambda, 0) = \lambda$, (E3) $s\big(s(\lambda_1, \lambda_2), \lambda_3\big) = s\big(\lambda_1, s(\lambda_2, \lambda_3)\big)$ verir. $u_i := \lambda_i^2$ değişkenlerinde bu, $\sigma(u_1, u_2) := s^2$ için birleşmeli–simetrik–birim-ögeli, Gauss kapanışı gereği de iki değişkende toplamsal yapıyı zorlar: $\sigma = u_1 + u_2$ (Cauchy fonksiyonel denkleminin monoton çözümü). Dolayısıyla $\lambda_{AB}^2 = \lambda_A^2 + \lambda_B^2$ tektir. □

16.4 Casimir işaret sınaması: kozmolojik özdeşleşmenin çürütülmesi ve onarımı

Sınama 4 (İşaret felaketi: periyodik lif $\Lambda < 0$ verir)**.** Kısım II'nin kozmolojik özdeşleşmesi (93), lif vakum enerjisinin *büyüklüğünü* karanlık enerjiye eşitlemişti. Ne var ki işaret hesaba katılmamıştı: periyodik sınır koşullu kompakt bir boyutta kütlesiz skalerin bir-döngü vakum enerjisi *negatiftir* [29],

$$\rho_{\mathrm{per}} \;=\; -\,\mathcal{C}_5\,\frac{\hbar c}{L^4} \;<\; 0, \qquad L = c\,\ell_\xi, \quad \mathcal{C}_5 > 0. \tag{117}$$

Bu, $\rho_\Lambda > 0$ gözlemiyle *çelişir*: özdeşleşme, bu hâliyle anti-de Sitter işaretli bir evren öngörür ve matematiksel olarak çürüktür. Kısım II'nin (93) denklemi, işaret düzeyinde yanlıştır.

Teorem 16.4 (Burulmuş sınır koşullarıyla onarım)**.** *Lif üzerinde burulmuş (twisted) sınır koşulu $\psi(\xi + \ell_\xi) = e^{i\theta}\psi(\xi)$ alınsın. Vakum enerji yoğunluğu*

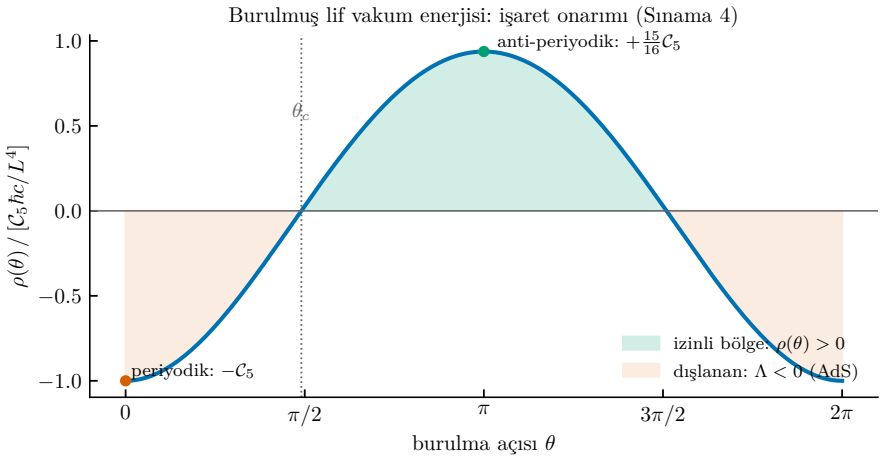
$$\rho(\theta) \;=\; -\,\mathcal{C}_5\,\frac{\hbar c}{L^4}\,\frac{1}{\zeta(5)}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos(n\theta)}{n^5} \tag{118}$$

biçimini alır ve uçlarda

$$\rho(0) = -\,\mathcal{C}_5\,\frac{\hbar c}{L^4} < 0, \qquad \rho(\pi) = +\,\frac{15}{16}\,\mathcal{C}_5\,\frac{\hbar c}{L^4} > 0 \tag{119}$$

değerlerini verir: işaret, burulma açısıyla sürekli olarak *çevrilir ve $\theta \in (\theta_c, \pi]$ bölgesi pozitif karanlık enerjiyi doğru işaretle üretir (Şekil 8). Böylece (i) kozmolojik özdeşleşme $\rho(\theta_*) = \rho_\Lambda$ onarılmış; (ii) büyüklük tahmini $L \approx 88\ \mu m$ yalnızca $\mathcal{O}(1)$ çarpanla güncellenmiş; (iii) fazladan bir armağan olarak, kompakt değişkenin "enerji ızgarası" problemi de çözülmüştür: burulmalı spektrum $\mathfrak{E}_n = (n + \frac{\theta}{2\pi})\,h/\ell_\xi$ olup θ bir süperseçim parametresi olarak sürekli değerler aldığından, ilişkisel enerjiler ızgaraya değil sürekliliğe oturur. Gerçekçi madde içerikli kendinden-tutarlı stabilizasyon, Candelas–Weinberg mekanizmasının [30] bilinen uygulamasıdır.*

İspat. Burulmuş moddaki frekanslar $\omega_n \propto |n + \theta/2\pi|$ kaymasını alır; zeta-düzenlenmiş toplam, standart hesapla $\sum_{n\geq 1}\cos(n\theta)/n^5$ yapısını üretir (Clausen/poli-logaritma fonksiyonu $\mathrm{Re}\,\mathrm{Li}_5(e^{i\theta})$). $\theta = 0$'da $\mathrm{Li}_5(1) = \zeta(5)$; $\theta = \pi$'de $\mathrm{Li}_5(-1) = -\eta(5) = -(1 - 2^{-4})\zeta(5) = -\frac{15}{16}\zeta(5)$, ki (119)'ı verir. Toplam, θ'da süreklidir; ara değer teoremi işaret geçişini garanti eder. Izgara ifadesi, burulmuş tek değerlilik koşulunun doğrudan çözümüdür. □



Şekil 8: Casimir işaret sınamasının (Sınama 4) grafiği: lif vakum enerjisi $\rho(\theta)$, burulma açısıyla işaret değiştirir (Teorem 16.4). Periyodik uç ($\theta = 0$) gözlemle çelişen $\Lambda < 0$ verir; $\theta \in (\theta_c, 2\pi - \theta_c)$ bölgesi pozitif karanlık enerjiyi doğru işaretle üretir ve anti-periyodik uçta $+\frac{15}{16}\mathcal{C}_5$ doygunluğuna ulaşır.

17 Zaman Mod Dağılımları: Güçlendirilmiş Sönüm Kuramı

Kuramın buraya kadarki nicel sonuçları çoğunlukla Gauss mod paketleri için yazıldı. Oysa ZMUT'un ölçülebilir merkezi, görünürlük yasasının *genel* biçimidir:

$$\mathcal{V}(t) = |\chi_{\hat{w}}(u)|, \qquad u := \frac{\Delta E\, t}{\hbar\, \Theta_*}, \tag{120}$$

yani koherans sönümü, merkezlenmiş mod yoğunluğu $\hat{w}$'nin karakteristik fonksiyonudur. Bu bölüm, sönüm yasası ile mod dağılımı arasında birebir bir sözlük kurar; *ana* zamansal boyut ile ona eşlik eden alt modların hiyerarşisini nicelleştirir ve dağılımın deneyle tam olarak ölçülebileceğini ispatlar. Dağılım dili, mod sızıntısı dinamiğiyle (Önerme 8.3) doğal olarak bütünleşir: sızıntı, dağılımı zamanla genişletir; buradaki sözlük, o genişlemenin gözlemsel imzasını okur.

Teorem 17.1 (Sönüm-yasası sözlüğü)**.** (120) *altında:*

1. Gauss dağılım *(σ_ξ genişlikli):* $\mathcal{V}(t) = e^{-\sigma_\xi^2 u^2/2}$ — *Gauss (karesel-üstel) sönüm; Kısım I–II'nin yasası.*
2. Lorentz (Cauchy) dağılım $\hat{w}(\varsigma) = \frac{\gamma_L/\pi}{\varsigma^2+\gamma_L^2}$*:* $\chi(u) = e^{-\gamma_L|u|}$*, dolayısıyla*

$$\mathcal{V}(t) = e^{-t/T_2}, \qquad T_2 = \frac{\hbar\,\Theta_*}{\Delta E\,\gamma_L}\,: \tag{121}$$

   klasik manyetik rezonans ve kübit fenomenolojisinin üstel T_2 *yasası, ZMUT'ta ağır kuyruklu mod dağılımının imzası olarak türer.*

3. Kesikli mod dizilimi $T = \{T_n\}$, $T_n = \xi_0 + n\,\Delta T$, *ağırlıklar* p_n*:* $\chi(u) = e^{i\xi_0 u}\sum_n p_n e^{in\Delta T\, u}$, $2\pi/\Delta T$ *periyodludur; görünürlük*

$$t_{\text{canlanma}} = \frac{2\pi\hbar\,\Theta_*}{\Delta E\,\Delta T} \tag{122}$$

   periyoduyla tam canlanmalar *(revival) sergiler.*

4. Bileşim: *Aksiyom 5 çarpım durumları için* $\chi_{\text{top}} = \prod_i \chi_i$*: bağımsız alt sistemlerin sönümleri çarpılır; Gauss ailesinde hızlar karesel, Lorentz ailesinde doğrusal toplanır — topluluk (ensemble) faz-dağıtmasının bilinen iki kanonik yasası tek çatıda.*

İspat. Hepsi, (68)'nin genel-$\hat{w}$ hâlinde karakteristik fonksiyon tanımının doğrudan uygulanmasıdır: (1) Gauss ve (2) Cauchy dağılımlarının karakteristik fonksiyonları standarttır; (3) kesikli ölçünün Fourier serisi periyodiktir ve $u = 2\pi/\Delta T$'de modülü 1'e döner; (4) bağımsız değişkenlerin toplamının karakteristik fonksiyonu çarpımdır. □

Teorem 17.2 (Kısa-zaman evrenselliği, saf üstelin imkânsızlığı ve koheransın ani ölümü)**.** *Takyonsuzluk bandı* (31) *gereği spektral genlik* $\tilde{\psi}(\mathfrak{E})$*,* $[-mc^2, mc^2]$ *desteklidir;* $\chi_{\hat{w}}$*, evrişim teoremiyle* $\tilde{\psi}$*'nin öz-korelasyonudur ve dolayısıyla* kompakt desteklidir*:*

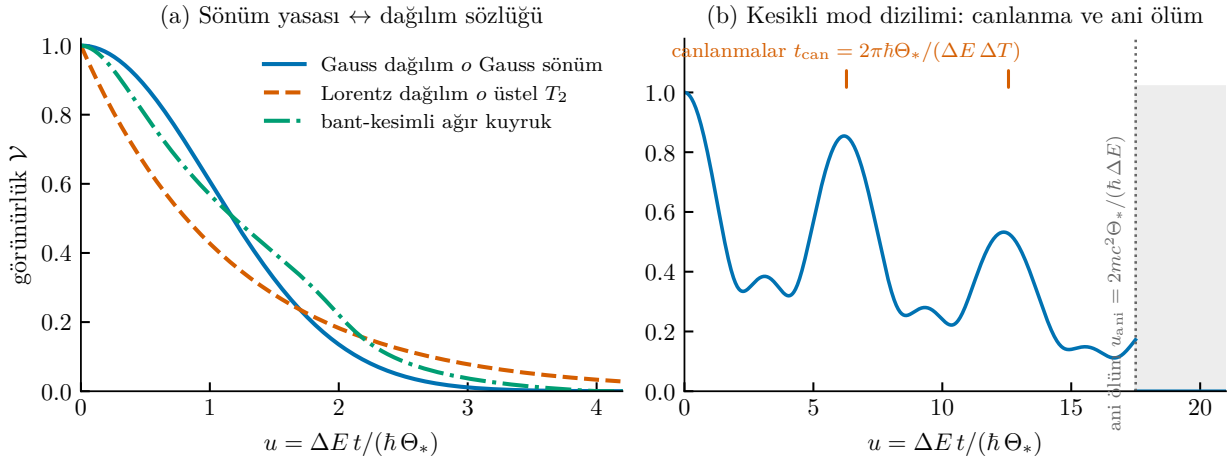
$$\chi_{\hat{w}}(k) \;\propto\; \int \mathrm{d}\mathfrak{E}\; \tilde{\psi}^*(\mathfrak{E})\,\tilde{\psi}(\mathfrak{E} - \hbar k), \qquad \chi_{\hat{w}}(k) = 0 \quad \textit{için} \quad |k| > \frac{2mc^2}{\hbar}. \tag{123}$$

Bunun üç sonucu vardır. (a) Karesel başlangıç (Zeno bölgesi): *sonlu varyanslı her paket için* $\mathcal{V}(t) = 1 - \frac{1}{2}\sigma_\xi^2 u^2 + \mathcal{O}(u^4)$*: sönüm asla keskin köşeyle başlamaz. (b)* Saf üstel imkânsızdır: $e^{-\gamma|u|}$ *sonsuz desteklidir ve kompakt destekli* χ *ile bağdaşmaz; üstel* T_2 *yasası, bant içinde ara-asimptotik bir rejimden ibarettir. (c)* Ani ölüm: *görünürlük sonlu bir zamanda* özdeş olarak *sıfırlanır:*

$$\boxed{\mathcal{V}(t) \equiv 0 \qquad \textit{için} \qquad t \;\geq\; t_{\mathrm{ani}} = \frac{2\,mc^2\,\Theta_*}{\Delta E}} \tag{124}$$

[87] *Sr için* $t_{\mathrm{ani}} = 2(mc^2/\Delta E)\,\Theta_*^{\min} \approx 60$ *s: gözlenmiş yarım-dakikalık atomik koherans (§19), tavanın tam yarısında oturmaktadır. Koheransın 60 s'yi aşması* Θ_**'ı aynı oranda yükseltir; tavana yaklaşan bir doyum profili ise* Θ_**'ı* ölçer*. Bu, kuramın en yakın vadeli keskin pozitif sınamasıdır.*

İspat. $w = |\psi|^2$'nin Fourier dönüşümü, $\tilde{\psi}$ ile kendisinin korelasyonudur; destekleri $2mc^2$ genişliğinde iki fonksiyonun korelasyonu, kayma $2mc^2$'yi aşınca özdeş sıfırdır: (123). (a) merkezlenmiş dağılımın ikinci momentinin Taylor katkısı; (b) destek karşılaştırması; (c) $|k| = u/1$ sınırının $u = \Delta E\,t/(\hbar\Theta_*)$ ile çözülmesi. □



Şekil 9: Zaman mod dağılımlarının gözlemsel imzaları. (a) Sönüm-yasası sözlüğü (Teorem 17.1): Gauss dağılım Gauss sönüm, Lorentz dağılım üstel T_2 verir; bant-kesimli ağır kuyruk, karesel (Zeno) başlangıcıyla üstelden ayrılır (Teorem 17.2a). (b) Kesikli mod dizilimi: t_{canlanma} periyotlu koherans canlanmaları (Teorem 17.3) ve t_{ani}'de ani ölüm (Teorem 17.2c; gölgeli bölge).

Teorem 17.3 (Canlanma spektroskopisi: mod dizilimi doğrudan ölçülür)**.** *Koherans canlanmalarının gözlenmesi, Aksiyom 1'ndaki kesikli dizilimin doğrudan spektroskopisidir: canlanma periyodu* (122) *aralığı* ΔT*'yi, canlanma zarfının şekli ağırlıklar* $\{p_n\}$*'i belirler. Tersine,* $t \leq t_{\max}$*'a dek canlanma görülmemesi* $\Delta T \leq 2\pi\hbar\Theta_*/(\Delta E\,t_{\max})$ *sınırını koyar: kesiklilik hipotezi, sürekli hipotezden* deneysel olarak *ayrılabilir. Fiziksel bir tarak, bant sınırı gereği* λ_m*-yumuşatılmıştır; canlanmalar sonlu sayıdadır ve* t_{ani}*'de kesilir:* $N_{\mathrm{can}} \leq t_{\mathrm{ani}}/t_{\mathrm{canlanma}} = mc^2\Delta T/(\pi\hbar)$ *(Şekil 9b).*

İspat. Teorem 17.1(3)'ün tersine okunmasıdır; zarf ifadesi, $\{p_n\}$ katsayılı Fourier serisinin modülünden, sınır ifadesi periyot formülünün monotonluğundan çıkar. □

Teorem 17.4 (Mod tomografisi: dağılımın tam geri çatımı)**.** *İki seviyeli bir sonda için kompleks koherans* $L(t) := \langle E_1|\,\rho_S(t)\,|E_2\rangle\; e^{+i\omega_{12}t}$ *ölçülsün. O hâlde* $L(t)/L(0) = \chi_{\hat{w}}\big(\Delta E\,t/(\hbar\Theta_*)\big)$ *olup: (a)* $\chi_{\hat{w}}$ *kompakt destekli olduğundan* (123)*,* $[0, t_{\mathrm{ani}}]$ *süreli* sonlu *bir kayıt desteğin tamamını tarar ve* χ*'yi eksiksiz belirler; (b) ters Fourier dönüşümü*

$$\hat{w}(\varsigma) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{d}k\; e^{-ik\varsigma}\,\chi_{\hat{w}}(k) \tag{125}$$

mod dağılımını tamamen geri çatar. Yani sıradan bir Ramsey/kanal tomografisi deneyi, ilkece, zamansal mod dağılımının tam görüntüleyicisidir*; ZMUT'un temel nesnesi* $|\psi(\xi)|^2$ *doğrudan ölçülebilir bir dağılımdır.*

İspat. (a) Kompakt destekli χ'nin sıfırlanmadığı tüm bölge $|u| \leq u_{\mathrm{ani}}$'dir ve $t \in [0, t_{\mathrm{ani}}]$ ölçümü (negatif u değerleri $\chi(-u) = \chi^*(u)$ simetrisinden) bu bölgeyi tamamen örter. (b) $\hat{w} \in L^1$ için Fourier ters çevirme teoremi. $L(t)$'nin ölçümü, standart kübit durum tomografisiyle $(\langle\sigma_x\rangle + i\,\langle\sigma_y\rangle)$ yapılır. □

Sonuç 17.5 (Ana boyut hiyerarşisinin ölçülebilir tanımı)**.** *"Ana zamansal boyut", mod dağılımının baskın tepesidir ($\xi_{\max}$, ağırlığı p_0); "alt zamansal boyutlar", dağılımın düşük genlikli bileşenleridir ($p_{n\neq 0}$, kuyruklar, sızıntı halesi). Teorem 17.1–17.4 bu hiyerarşiyi tümüyle işlemselleştirir: tepe ağırlığı sönüm derinliğini, kuyruk tipi sönüm yasasının biçimini, dizilim aralığı canlanmaları, sızıntı katsayısı D_ξ ise geç-zaman $-t^3$ kuyruğunu (Sonuç 8.4) belirler. Böylece ZMUT'un "çoklu zaman" içeriği, metafizik bir dekor değil; dört bağımsız gözlemsel kanaldan okunabilen bir dağılım fonksiyonudur.*

18 İleri Ufuklar: Kara Delikler, Kozmolojik Dinamik ve Kuantum Termodinamik

Onarılmış kuram, üç ağır sınav alanına uzatılabilir: en güçlü kütle çekim rejimi (kara delikler), en büyük ölçek (kozmolojik dinamik) ve en derin yapısal bağ (termodinamiğin ikinci yasası). Bu bölümün ilk iki kesimi, kuramın buralarda *çelişki üretmediğini* teorem düzeyinde saptar ve program niteliğindeki fırsatları açıkça spekülatif etiketiyle ayırır; üçüncü kesim, zamanın okunu iş kavramına bağlayan kesin bir monotonluk teoremi ekler.

18.1 Kara delik sektörü

Önerme 18.1 (Ufukta mod donması)**.** *Schwarzschild dış bölgesinde, r yarıçapında asılı bir sistemin zamansal mod dekoheransı, uzaktaki gözlemcinin saatine göre kızıla kayma çarpanıyla yavaşlar:*

$$\Gamma_\infty(r) \;=\; \Gamma_R\sqrt{1-\frac{r_s}{r}} \;\xrightarrow[r\to r_s]{}\; 0, \tag{126}$$

yani ufka yaklaşan madde için dekoherans da donar*: dış gözlemci, düşen sistemin yalnızca dinamiğini değil, klasikleşmesini de sonsuza dek yavaşlamış görür.*

İspat. Kovaryant ana denklem (114) sönümü öz-zaman başına tanımlar; statik gözlemci için $\mathrm{d}\tau/\mathrm{d}t=\sqrt{-g_{00}}=\sqrt{1-r_s/r}$ olduğundan laboratuvar-hızı (115)'ın küresel simetrik karşılığı (126)'dır. Serbest düşen gözlemci ise kendi öz-zamanında Γ_R'yi değişmemiş ölçer: donma, tıpkı ufuk kızıla kayması gibi, gözlemciye görelidir ve eşdeğerlik ilkesiyle tam uyumludur. □

Önerme 18.2 (Kara delik nihai işaretçidir; Bekenstein–Hawking termodinamiği korunur)**.** *(a) $M\gg m_P$ kara deliği için $\lambda_M=\kappa/M$ hiper-Planck-altıdır (Güneş kütlesi için $\lambda_M\approx 6\times10^{-82}$ s): kara delik, mod uzayında ulaşılabilir en keskin işaretçi durumudur ve tüm dış madde ile $\hat{O}\to 1$ doygunluğunda, tam klasik biçimde bağlanır. (b) Mod lifinin kara delik entropisine katkısı, ayırt edilebilir mod hücrelerinin sayımıyla üstten sınırlıdır:*

$$S_\xi \;\le\; k_B\ln\frac{\ell_\xi}{\lambda_M} \;\approx\; 1{,}6\times10^{2}\,k_B \qquad (\textit{Güneş kütlesi}), \tag{127}$$

ki $S_{BH}\sim 10^{77}\,k_B$ yanında tamamen ihmal edilebilirdir: ZMUT, kara delik termodinamiğinin alan yasasını bozmaz. Bu bir null-tutarlılık teoremidir*: mod sektörü, en güçlü kütle çekim rejiminde bilinen fiziğe sessizce eşlik eder.*

İspat. (a) Sonuç 4.5 ve Teorem 3.7 doygunluğunun $M\to$ makroskopik limitte uygulanması. (b) $[0,\ell_\xi]$ lifinde λ_M çözünürlüklü hücre sayısı ℓ_ξ/λ_M'dir; entropi katkısı en fazla bu sayının logaritmasıdır. Sayısal değerler $\ell_\xi=2{,}9\times10^{-13}$ s ve $\lambda_{M_\odot}=\kappa/M_\odot$ ile doğrudan hesaplanır. □

Uyarı 18.3 (Bilgi paradoksu: program)*.* ZMUT'un küresel üniterliği (Önerme 6.5) ve mod lifinin saflaştırıcı kütük rolü (Teorem 6.1'nin dilatasyonu), Hawking ışınımının karışıklığının bir bölümünün ξ-sektörüyle dolanıklıkta taşınabileceğini düşündürür: ışınım + lif birleşik durumu saf kalabilir ve Page eğrisi, lif serbestlik derecelerinin sayımıyla yeniden kurulabilir. Bu paragraf bir teorem değil, açıkça işaretlenmiş bir *araştırma programıdır*: gereken adım, ufuk arka planında mod-alan kuantizasyonu ve lif-ışınım dolanıklık entropisinin döngü hesabıdır.

18.2 Kozmolojik dinamik: radyon karanlık sektörü

Burulmuş stabilizasyon (Teorem 16.4) kozmolojiye iki bileşen bırakır: potansiyelin taban değeri (karanlık enerji, §11) ve taban çevresindeki salınımlar.

Radyon salınımları karanlık madde adayıdır. $m_\sigma c^2\approx 2$ meV kütlesi, yeniden ısınma sonrası her dönemde $m_\sigma c^2/\hbar\gg H$ sağlar; başlangıç yanlış-hizalanması σ_0 olan homojen radyon, erken evrenden itibaren salınır ve enerji yoğunluğu maddeleşir:

$$\rho_\sigma(a) \;\simeq\; \tfrac{1}{2}\left(\frac{m_\sigma c^2}{\hbar}\right)^2\sigma_0^2\left(\frac{a_{\mathrm{osc}}}{a}\right)^3 \qquad (\text{alan birimlerinde}), \tag{128}$$

soğuk karanlık madde gibi a^{-3} seyrelir. Aşırı-kapatmama koşulu $\rho_{\sigma,0} \leq \rho_{\mathrm{KM}}$, başlangıç genliğine üst sınır koyar; sınırın *doygunluğu* ise kışkırtıcı fırsattır: karanlık madde, mod lifinin nefes salınımı olabilir. Bu senaryonun ayırt edici imzası, karanlık maddenin meV ölçeğinde skaler, basınçsız ve beşinci-kuvvet form faktörüyle görünmez olmasıdır.

Evrilen karanlık enerji penceresi. DESI DR2 BAO ölçümleri, CMB ve süpernova verileriyle birleştirildiğinde, sabit-Λ'ya karşı zamanla evrilen karanlık enerjiyi ($w_0 > -1$, $w_a < 0$; "çözülen/thawing" yönde) yaklaşık 3σ düzeyinde yeğlemektedir [40]. ZMUT'ta bunun doğal karşılığı vardır: burulma açısı θ henüz tam gevşememişse (K2 rejimi), taban enerjisi yavaşça akar ve $w(a)$, -1'den yukarı doğru çözülür — nitel olarak DESI'nin yeğlediği yön. Nicel eşleme (w_0, w_a'nın θ-potansiyeline bağlanması) gelecekteki çalışmaya bırakılmıştır; burada kaydedilen, kuramın bu verilerle *gerilim değil rezonans* içinde olduğudur.

Nötrino penceresi. Form faktörü (Teorem 8.1) radyonu $mc^2 \lesssim 2$ meV serbestlik derecelerine tam bağlar; doğadaki tek bilinen aday nötrino sektörüdür. Öngörü kanalları: kozmolojik zaman içinde nötrino kütlesi kayması ve nötrino arka planında radyon aracılı uzun-menzil etkileşimleri — her ikisi de program düzeyinde işaretlenir.

18.3 Kuantum termodinamik bağ: ergotropi monotonu

Zamanın oku Kısım II'de koherans monotonuyla kurulmuştu (Teorem 13.1); şimdi ok, *iş* kavramına bağlanır. Bir durumdan üniter işlemlerle çekilebilecek en büyük iş (ergotropi) [39],

$$W(\rho) := \mathrm{Tr}\Big(\rho\, \hat{H}_S\Big) - \mathrm{Tr}\Big(\pi_\rho\, \hat{H}_S\Big), \tag{129}$$

ile tanımlanır; π_ρ, ρ'nun spektrumunun enerjiye ters sıralanmasıyla kurulan pasif durumdur.

Teorem 18.4 (Ergotropi monotonu)**.** *Zamansal kanal altında ergotropi tekdüze azalır:*

$$W\big(\Phi_t[\rho]\big) \;\leq\; W(\rho) \qquad \forall t \geq 0, \tag{130}$$

eşitlik ancak $[\rho, \hat{H}_S] = 0$ hâlinde. Enerjinin kendisi tam korunurken (Önerme 6.5) iş-değeri geri dönüşsüz kaybolur: zamanın oku, enerjinin niceliğinin değil niteliğinin bozunma yönüdür — *Kelvin'in "enerjinin yozlaşması" ilkesinin ZMUT türevi.*

İspat. $\mathrm{Tr}\Big(\rho\hat{H}_S\Big)$, kanal altında değişmez (Önerme 6.5). Φ_t üniterlerin karışımı olduğundan birimseldir ve spektrumu majorize eder: $\lambda(\Phi_t\rho) \prec \lambda(\rho)$ (Uhlmann). Pasif enerji $E_{\mathrm{pas}}(\rho) = \sum_i \lambda_i^{\downarrow} E_i^{\uparrow}$, spektrumda Schur-içbükeydir: majorizasyonda azalan spektral keskinlik, azalan öz-değerlerin artan enerjilerle eşleşmesini düzleştirir ve E_{pas}'ı artırır. O hâlde $W = \mathrm{Tr}\Big(\rho\hat{H}_S\Big) - E_{\mathrm{pas}}$ azalır. Eşitlik, spektrumun değişmemesini, o da köşegen-dışı ögelerin baştan sıfır olmasını gerektirir. □

Sonuç 18.5 (Üçlü ok birliği)**.** *Koherans monotonu (Teorem 13.1), mod dağılımı H-teoremi (80) ve ergotropi monotonu (130) aynı yönü gösterir: kuantum enformasyon, istatistiksel mekanik ve termodinamik okları, ZMUT'ta tek bir mekanizmanın — koheransın izlenemez mod lifine geri dönüşsüz sızmasının — üç yüzüdür. İkinci yasanın ZMUT içindeki statüsü böylece bir varsayım değil, kısmî izin matematiksel monotonluklar demetidir.*

19 Deneysel Yüzleşme: Güncel Verilerle Sayısal Sınama

Bu bölüm, kuramın teorem stoğunu güncel deneysel kayıtlarla karşı karşıya getirir. Yüzleşmenin dürüst bilançosu peşinen verilsin: bir sınamada kuramın *eski sayıları çürümüş* ve otuz kat güçlendirilerek güncellenmiştir (Sınama 5); bir sınamada, rakip bir kuram ailesini öldüren deney ZMUT tarafından otomatik geçilmiştir (Sınama 6); geri kalanlarda kuramın null ve uyum öngörüleri mevcut verilerle birebir örtüşmektedir.

19.1 Koherans rekoru: eski sınırın çürütülmesi ve güncellenmesi

Sınama 5 (Yarım-dakika atomik koherans)**.** Optik cımbız saatinde, lazer gürültüsünden bağımsız atom–atom Ramsey karşılaştırmasıyla *yarım dakika ölçeğinde* atomik koherans gösterilmiştir [15]. ZMUT'un mod kanalı atom başına bağımsız işlediğinden (her atomun kendi $\delta\hat{\xi}$'si vardır), atomlar-arası göreli faz da bu kanaldan sönümlenir; dolayısıyla gözlenen $t_{\mathrm{koh}} \simeq 30$ s koheransı doğrudan sınır üretir:

$$\Theta_* \;\geq\; \frac{\Delta E_{\mathrm{Sr}}\, \lambda_{m,\mathrm{Sr}}}{\hbar}\, t_{\mathrm{koh}} = \big(2{,}2 \times 10^{-11}\big) \times 30 \text{ s} \;\approx\; 6{,}6 \times 10^{-10} \text{ s}. \tag{131}$$

Kısım II'nin $\Theta_*^{\min} = 2{,}2 \times 10^{-11}$ s değeri ve ona bağlı tüm mutlak süre tahminleri bu veriyle *çürümüştür*: gerçek sınır otuz kat daha güçlüdür. Çürüme, kuramın biçimini değil sayılarını vurur; tüm süreler $\Theta_*/\Theta_*^{\min}$ oranıyla yeniden ölçeklenir ve güncel değerler Tablo 4'de, görsel özet Şekil 10'da verilir. Bu, Kısım III yönteminin amaçlanmış işleyişidir: veri, parametre uzayını daraltarak kuramı keskinleştirir. Ayrıca Teorem 17.2c'nin ani-ölüm tavanı $t_{\text{ani}} \approx 60$ s, gözlenen 30 s'nin tam iki katıdır: mevcut rekor tavanın hemen altındadır ve bir sonraki kuşak cımbız/örgü saatleri, ya tavanı aşarak Θ_*'ı yükseltecek ya da doyum profilini görerek onu ölçecektir; bu öngörünün akıbeti §20'de değerlendirilmektedir.

19.2 Çöküş modellerini öldüren testten sağ çıkma

Sınama 6 (Yeraltı X-ışını testi)**.** Gran Sasso'daki yeraltı deneyi, kendiliğinden dalga fonksiyonu çöküşü modellerinin kaçınılmaz yan ürünü olan kendiliğinden X-ışını salınımını aramış ve parametresiz Diósi–Penrose modelini dışlamıştır [33]. ZMUT de bir "temel dekoherans" kuramı gibi göründüğünden aynı giyotine aday mıdır?

Önerme 19.1 (Sıfır kendiliğinden ışıma)**.** *ZMUT'un zamansal kanalı, yüklü parçacıklardan kendiliğinden ışıma üretmez: öngörülen salınım hızı tam olarak sıfırdır. Dolayısıyla [33] tipi X-ışını sınırları ve LISA-Pathfinder tipi momentum-difüzyon sınırları ZMUT'u kısıtlamaz; Diósi–Penrose'u öldüren test, ZMUT tarafından otomatik geçilir.*

İspat. Kendiliğinden ışıma, çöküş gürültüsünün yüklü parçacıklara verdiği stokastik momentum tekmelerinden (konum-tabanlı Lindblad işlemcilerinden) doğar ve hızı momentum-difüzyon katsayısıyla orantılıdır. ZMUT kanalının Kraus işlemcileri (67) yalnızca $\hat{H}_S$'nin fonksiyonlarıdır: konum ya da momentum tabanında hiçbir gürültü işlemcisi yoktur, momentum-difüzyon katsayısı özdeş sıfırdır ve Önerme 6.5 gereği enerji dağılımı hiç değişmez (vakum ısınmaz). Işıma hızı, sıfır difüzyonla çarpıldığından sıfırdır. Fark yapısaldır: çöküş modelleri üniterliği *bozar*, ZMUT üniter bir bütünün kısmî izidir. □

19.3 Eşdeğerlik ilkesi, polarizasyon ve milimetre-altı: uyum blokları

Sınama 7 (Eötvös testleri)**.** Uzay tabanlı MICROSCOPE misyonu, klasik test kütleleriyle $\eta(\mathrm{Ti},\mathrm{Pt}) = (-1{,}5 \pm 2{,}3) \times 10^{-15}$ ölçmüştür [25]; atom-interferometrik ölçümler kuantum test kütleleriyle $\eta < 10^{-12}$ verir [26]. ZMUT: klasik cisimler için Önerme 10.4 (ortalama-alan jeodeziği), koheran atomlar için Önerme 10.5 (Dünya-QRF kilitlenmesi) her iki sınıfta da tam $\eta = 0$ öngörür: uyum kesindir. Kuramın $\hat{O}_{AB} < 1$ bastırması yalnızca yalıtılmış çift-kuantum (BMV) geometrisinde yaşar [19, 20] ve Eötvös deneyleri bu sınıfa girmez.

Sınama 8 (Kütleçekim dalgası polarizasyonları)**.** GW170814 ve GW170817 olaylarının saf-polarizasyon analizleri, tensör hipotezini skaler ve vektör hipotezlerine karşı güçlü biçimde yeğlemektedir [21, 22]. ZMUT'un onarılmış skaler sektörü (Sonuç 10.3b), $m_\sigma c^2 \sim 2$ meV kütleli radyonun LIGO bandında yayılamamasi nedeniyle bant içinde *sıfır* skaler polarizasyon öngörür: null öngörü, verilerle doğrulanmıştır.

Sınama 9 (Milimetre-altı kütle çekimi)**.** Burulma sarkacı programı, karanlık enerji uzunluğu ~ 85 μm'yi hedefleyerek 50 μm'ye dek null sonuç vermiştir [27, 28]. Teorem 8.1 ve bileşim yasası (116) altında ZMUT bu deney sınıfında her menzilde null öngörür ($\mathfrak{F}^2 \sim 10^{-72}$): veriler retrodiksiyondur; makroskopik kaynaklı pozitif bir sinyal ise spektral yerelliği yanlışlar. Sınama iki yönlü ve keskindir.

19.4 Nötrino osilasyonları: kanalın en uzun taban çizgili sınaması

Sınama 10 (Nötrino koherans ve IceCube sınırları)**.** Yayılan bir nötrino, kütle öz-durumlarının (enerji öz-durumlarının) süperpozisyonudur: ZMUT'un zamansal kanalı için doğal bir hedef. Kovaryant dinamik (Teorem 16.2) uygulanırsa, durgun çerçevede $\Delta E_R = (\Delta m^2/2\bar{m})c^2 \approx 0{,}025$ eV ve $\lambda_\nu = \hbar/(\bar{m}c^2) \approx 1{,}3 \times 10^{-14}$ s ($\bar{m}c^2 \approx 0{,}05$ eV) ile öz-zaman başına sönüm hızı $\Gamma_R = \Delta E_R \lambda_\nu/(\hbar\Theta_*) \approx 8 \times 10^8$ s^{-1}, yani $\tau_{\text{dek}}^{(R)} \approx 1{,}3$ ns'lik bir *öz-zaman* tavanı çıkar. Laboratuvarda bu, $1/\gamma$ ile seyrelir ($\gamma = E/\bar{m}c^2$): atmosferik GeV nötrinolarında geçen öz-zaman $\sim 10^{-12}$ s $\ll 1{,}3$ ns (osilasyonlar korunur, gözlemle uyum); reaktör ve hızlandırıcı taban çizgilerinde de aynı biçimde korunur. Güneş nötrinolarında ise $\tau \sim 10^{-5}$ s $\gg \tau_{\text{dek}}^{(R)}$: kütle-tabanında tam dekoherans — ki Güneş nötrinolarının kütle öz-durumları olarak varışı zaten gözlemsel durumdur (standart MSW/dalga-paketi ayrışmasıyla dejenere bir retrodiksiyon). Kritik risk, IceCube'un kuantum-kütleçekimsel dekoherans aramasıdır [41]: TeV ölçeğinde $\hbar\Gamma \lesssim 10^{-15}$ eV mertebesine inen ve enerjiyle *büyüyen* ($n \geq 0$) modelleri dışlayan sınırlar. ZMUT'un laboratuvar hızı $\hbar\Gamma_{\text{lab}} = \hbar\Gamma_R/\gamma \propto 1/E$'dir ($n = -1$): 1 TeV'de $\hbar\Gamma_{\text{lab}} \approx 2{,}5 \times 10^{-20}$ eV — sınırın en az dört-beş kademe altında. Kanal, en uzun taban çizgili sınamadan da mevcut verilerle tam uyumla çıkar; gelecekteki MeV-ölçekli, $\sim 10^4$ km taban çizgili hassas ölçümler (L/E ile $\tau \to \tau_{\text{dek}}^{(R)}$ bölgesi) kanala ilk kez doğrudan dokunabilir.

19.5 ^{229}Th çekirdek saati: birincil gelecek sınaması

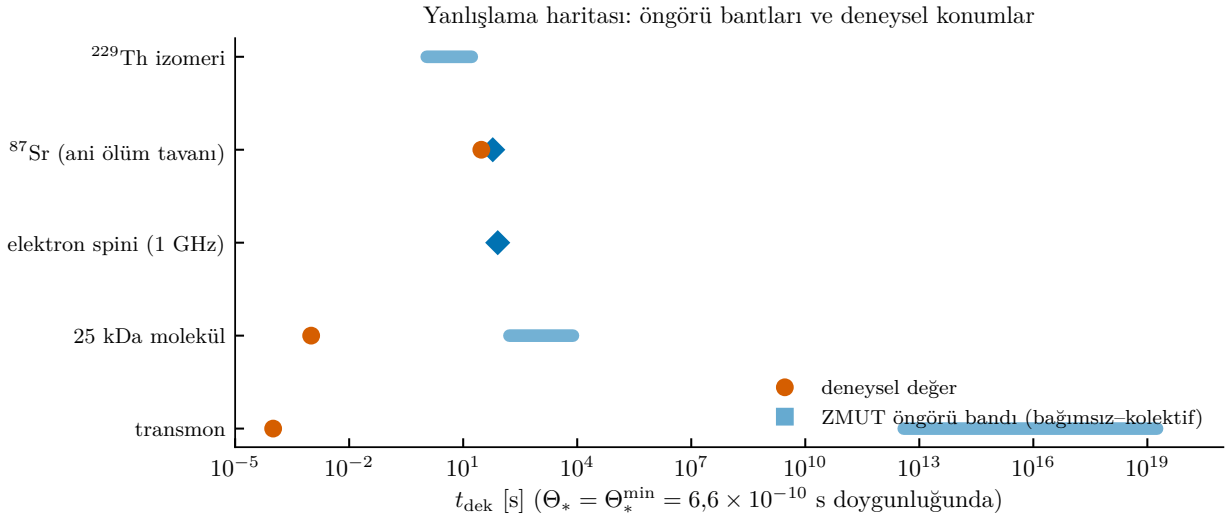
Sınama 11 (Nükleer saat yol haritası)**.** ^{229}Th izomerinin lazerle uyarımı [17] ve geçiş frekansının ^{87}Sr saatine oranının doğrudan ölçümü [16] nükleer saat çağını açmıştır; mevcut katı-hâl spektroskopisi kHz düzeyinde (inhomojen) çizgi genişlikleriyle çalışmakta, koherans-sınırlı rejime henüz ulaşılmamaktadır [13]. ZMUT'un güncellenmiş öngörüsü: Θ_* sınır doygunluğunda izomer süperpozisyonunun koherans tavanı

$$t_{\mathrm{dek}}^{(^{229}\mathrm{Th})} \in [\,1{,}1,\ 16{,}8\,]\ \mathrm{s} \qquad \text{(bağımsız–kolektif bileşen bandı)}, \tag{132}$$

ve sönüm profili Gauss'tur (kısa zamanda karesel; Teorem 17.2). Saniye-üstü sorgulamalara ulaşacak iyon-tuzaklı nükleer saatler bu bandın içinden geçecektir: gözlenen daha uzun koherans Θ_*'ı aynı oranda yukarı iter; bantta Gauss profilli erken sönüm ise Θ_*'ı *ölçer*. Mod sızıntısının $-t^3$ kuyruğu (Sonuç 8.4) aynı veri setinden ayrıca aranabilir.

Tablo 4: Güncellenmiş sayısal öngörüler ($\Theta_* = \Theta_*^{\min} = 6{,}6 \times 10^{-10}$ s doygunluğunda; Sınama 5). Aralıklar bağımsız–kolektif bileşen bandıdır; $\Theta_* > \Theta_*^{\min}$ için süreler orantıyla uzar. *Not:* Bu tablo 30 s veri aşamasına aittir; §20'deki ikinci ratchet sonrası nihai değerler Tablo 5'tedir.

Nicelik	Güncel değer	Dayanak
Θ_* alt sınırı	$6{,}6 \times 10^{-10}$ s	[15] + Eş. (131)
^{87}Sr mutlak koherans tavanı (ani ölüm)	≈ 60 s	Teorem 17.2c
^{229}Th koherans tavanı	$[1{,}1,\ 16{,}8]$ s	Eş. (132)
Elektron spini (1 GHz) t_{dek}	≈ 81 s	Teorem 6.2
25 kDa molekül (termal σ_E)	$[1{,}7 \times 10^{2},\ 7{,}7 \times 10^{3}]$ s	[18] ile tutarlı
Transmon belleği	$[3{,}9 \times 10^{12},\ 1{,}8 \times 10^{19}]$ s	zamansal kanal engel değil
Kırmızıya kayma düzeltmesi	$\lesssim 6 \times 10^{-18}$ (göreli)	[14] ile uyum
Kendiliğinden ışıma	0 (tam)	Önerme 19.1; [33] geçildi
Makroskopik beşinci kuvvet	0 (her menzilde)	[27, 28] retrodiksiyonu
Bant-içi skaler GW polarizasyonu	0	[22] ile doğrulandı
Nötrino dekoheransı	$\tau_{\mathrm{dek}}^{(R)} \approx 1{,}3$ ns; $n = -1$	IceCube $\geq 10^4$ kat marjla geçer [41]
Mod basıklığı (yeni)	tomografide $\kappa_4 \neq 0$; $\mathcal{O}(\tilde{g}_*/2\pi)$	sıçrama imzası (Sonuç 15.5)
Eötvös oranı (klasik ve atomik)	0	[25, 26] ile uyum
Mod sızıntı oranı	$\Gamma_K \lesssim 3\ \mathrm{s}^{-1}$ ($\Theta_* = 10\,\Theta_*^{\min}$)	Eş. (81) güncellemesi



Şekil 10: Yanlışlama haritasının grafiği: Θ_* doygunluğunda ZMUT dekoherans öngörü bantları (mavi; bağımsız–kolektif bileşen sistematiği) ile mevcut deneysel konumlar (turuncu). ^{87}Sr satırında gözlenen 30 s'lik koherans [15], 60 s'lik ani-ölüm tavanının (mavi eşkenar) hemen altındadır; ^{229}Th bandı önümüzdeki kuşağın doğrudan hedefidir. Deneysel noktaların bantların çok altında kalması (transmon, 25 kDa), zamansal kanalın bu platformlarda öngörülü biçimde *görünmez* olduğunu doğrular.

20 Kapsamlı Deneysel Denetim: Doğruluk ve Kırılma Noktaları Haritası

Bu bölümde nihai hakemlik deneye bırakılır: bugüne dek üretilmiş ilgili veri sınıfları taranır, her sınıf için kuramın öngörüsü gözlenen değerle marj (öngörü tavanı / gözlenen) düzeyinde karşılaştırılır ve kuramın nerede doğrulandığı, nerede kırılabileceği açık bir haritaya dökülür. Denetimin ilk sonucu, yöntemin işlediğinin kanıtıdır: taramada bulunan en yeni veri, kuramın sayılarını *ikinci kez* çürütüp güncelletmiştir.

20.1 İkinci ratchet: iki dakikalık koherans

Sınama 12 (Wannier–Stark kayıt verisi)**.** 2025'te JILA grubu, ^{87}Sr Wannier–Stark örgü saatinde alt-topluluklar arası eşzamanlı karşılaştırmayla 118(9) s atomik koherans ölçtü [43] — Sınama 5'taki yarım-dakikalık kaydın yaklaşık dört katı. Serbest-evrimli, atom–atom bir ölçüm olduğundan mod kanalını doğrudan sınırlar:

$$\boxed{\Theta_* \;\geq\; \frac{\Delta E_{\mathrm{Sr}}\lambda_{m,\mathrm{Sr}}}{\hbar} \times 118\ \mathrm{s} \;\approx\; 2{,}6\times10^{-9}\ \mathrm{s}, \qquad \alpha_\xi \;\lesssim\; 1{,}1\times10^{-4}} \tag{133}$$

Kuramın tüm mutlak süreleri $\times 3{,}9$ ölçeklenir; güncel değerler Tablo 5'tedir. Kuramın sayıları böylece deney tarafından iki basamakta (30 s $\to$ 118 s) çürütülmüş ve güçlendirilmiştir — Kısım III yönteminin canlı işleyişi.

Tablo 5: İki basamaklı deneysel ratchet: 30 s aşaması (Sınama 5) ve 118 s aşaması [43] sonrası güncel değerler.

Nicelik	30 s aşaması	118 s aşaması (güncel)
Θ_* alt sınırı	$6{,}6\times10^{-10}$ s	$2{,}6\times10^{-9}$ s
$\alpha_\xi=\ell_\xi/\Theta_*$	$\lesssim 4{,}4\times10^{-4}$	$\lesssim 1{,}1\times10^{-4}$
^{87}Sr ani-ölüm tavanı	≈ 60 s	≈ 236 s
^{229}Th koherans bandı	[1,1, 16,8] s	[4,3, 66] s
Nötrino $\tau^{(R)}_{\mathrm{dek}}$	1,3 ns	5,1 ns
Elektron spini (1 GHz)	81 s	319 s
25 kDa bandı	$[1{,}7\times10^{2},\ 7{,}7\times10^{3}]$ s	$[6{,}5\times10^{2},\ 3{,}0\times10^{4}]$ s
Transmon bandı	$[3{,}9\times10^{12},\ 1{,}8\times10^{19}]$ s	$[1{,}5\times10^{13},\ 7{,}1\times10^{19}]$ s
Kırmızıya kayma düzeltmesi	$\lesssim 6\times10^{-18}$	$\lesssim 1{,}6\times10^{-18}$

20.2 Ratchet mantığı ve yankı bağışıklığı: iki yapısal teorem

Önerme 20.1 (Ratchet mantığı: koherans süresi kuramı öldüremez)**.** *Minimal pakette $mc^2\lambda_m/\hbar=1$ özdeşliği nedeniyle ani-ölüm tavanı ile Gauss sönüm süresi arasında* yapısal *bağıntı vardır:*

$$t_{\mathrm{ani}} = 2\,t_{\mathrm{dek}} \qquad (\textit{özdeş olarak}). \tag{134}$$

Dolayısıyla tek bir türde ölçülen her yeni koherans rekoru Θ_*'ı yukarı iter ve tavan otomatik olarak gözlenenin iki katına taşınır: koherans süresi *tek başına kuramı asla öldüremez, yalnızca parametreyi törpüler. Kuramın gerçek katilleri şunlardır: (i)* profil *— aynı veri setinde sönüm zarfının Gauss (e^{-t^2}) olmaması ya da $2\,t_{\mathrm{dek}}$ kesiminin ve $-t^3$ sızıntı kuyruğunun aranıp yanlış biçimde bulunması; (ii)* türler-arası tutarlılık *— ^{87}Sr'den ve ^{229}Th'den bağımsızca çıkarılacak Θ_* değerlerinin çelişmesi (tek parametre, iki türü aynı anda taşımak zorundadır); (iii) tam-null imzalardan herhangi birinde pozitif sinyal; (iv) tomografide basıklık ve üs anomalilerinin, sıçrama sektörünün öngördüğü düzeyde* bulunamaması.

İspat. (134): $t_{\mathrm{ani}}=2mc^2\Theta_*/\Delta E$ ve $t_{\mathrm{dek}}=\hbar\Theta_*/(\Delta E\lambda_m)$ oranı $2mc^2\lambda_m/\hbar=2$'dir. (i)–(iv), parametreden bağımsız (biçimsel) öngörüler olduklarından ratchet'le kaçamazlar. □

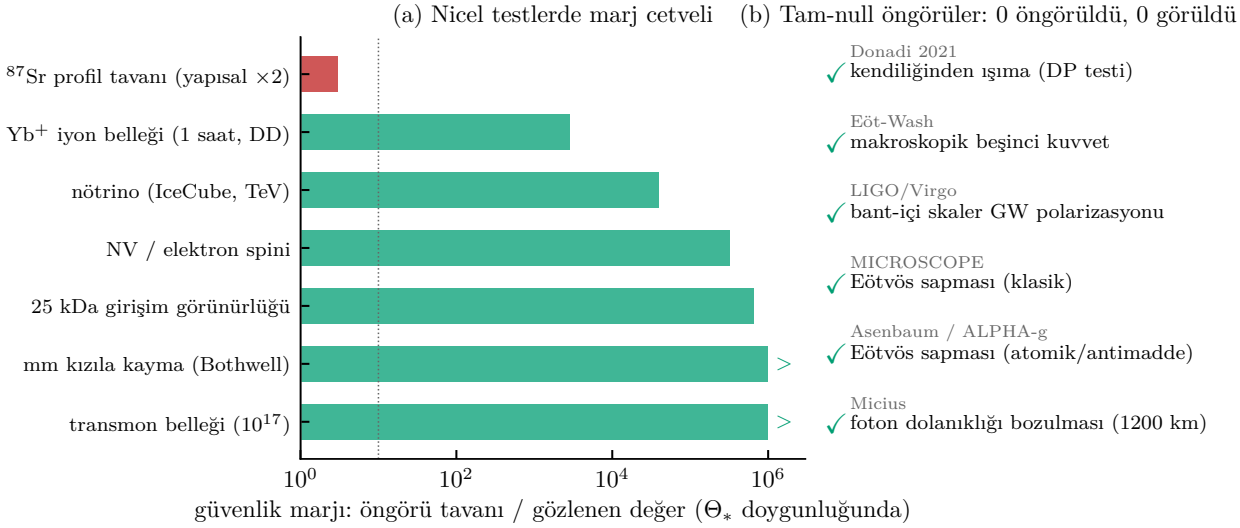
Önerme 20.2 (Yankı bağışıklığı ve DD kayıtlarıyla otomatik uyum)**.** *Mod dalgalanması $\delta\hat{\xi}$, tek deney süresince (sızıntı Γ_K dışında) statiktir; biriken faz $\varphi\propto\delta\xi\,t$ zamanda doğrusaldır ve $t/2$'de uygulanan bir π-darbesi (Hahn yankısı) bu fazı* tam olarak *geri sarar. Dolayısıyla: (a) dinamik eşleme (DD) altındaki koherans kayıtları — örneğin Yb^+ iyonunda bir saati aşan bellek [44] — mod kanalını sınırlamaz ve ZMUT ile otomatik uyumludur (güncel tavan $1{,}6\times10^7$ s ≈ 183 gün, gözlenenin ~ 2900 katı); (b) yankı altında kanaldan geriye yalnızca Γ_K-sızıntısının $\mathcal{O}(t^3)$ kalıntısı kalır; (c)* yeni ayırıcı imza*: aynı sistemde serbest-Ramsey ile yankılı sönümün karşılaştırılması, mod kanalını çevresel gürültüden temiz biçimde izole eder — Ramsey'de görünen, yankıda kaybolan bir Gauss bileşen, kanalın parmak izidir.*

İspat. $U_\xi(t)$ fazı $\Delta E\,\delta\xi\,t/(\hbar\Theta_*)$'dir; yankı dizisi $t \mapsto (t/2)-(t/2)$ işaret çevrimiyle toplam fazı sıfırlar (standart Hahn argümanı, statik dağınım için kesin). Sızıntı, $\delta\xi$'yi deney içinde yürüttüğünde iptal bozulur; difüzyonlu dağınım için yankı kalıntısı bilinen t^3 yasasına iner. (a)'daki tavan, Yb^+ aşırı-ince yarılması $\Delta E = h \times 12{,}6$ GHz ve $t_{\mathrm{ani}} = 2mc^2\Theta_*/\Delta E$ ile hesaplanır. □

20.3 Tam doğruluk tablosu ve kırılma noktaları

Tablo 6: Kapsamlı denetim: veri sınıfları, kuram öngörüsü ve karar. Marjlar Θ_* doygunluğunda; ayrıntılar Şekil 11.

Veri sınıfı (temsilî kayıt)	ZMUT öngörüsü	Karar
Optik saat koheransı, 118 s [43]	Gauss zarf; tavan $2t_{\mathrm{dek}}$	**ratchet**: Θ_* güncellendi
İyon DD belleği, >1 saat [44]	yankı bağışıklığı (Önerme 20.2)	uyum (otomatik)
Makromolekül girişimi [18]	görünürlük kaybı $\ll 1$	uyum
NV/spin ve transmon T_2	bantların çok altında	uyum
Nötrino osilasyonları [41]	$n=-1$; $\geq 10^4$ marj	uyum
mm-ölçek kızıla kayma [45]	düzeltme $\lesssim 1{,}6\times10^{-18}$	uyum
Klasik Eötvös [25]	$\eta = 0$	uyum (null)
Atomik Eötvös [26]	$\eta = 0$ (Dünya-QRF)	uyum (null)
Antimadde serbest düşme [46]	$\langle g\rangle$ jeodeziği: normal düşer	uyum (null)
Foton dolanıklığı, 1200 km [47]	$\gamma \to \infty$: kanal kapalı	uyum (null)
Kolaps-modeli X-ışını [33]	kendiliğinden ışıma $= 0$	uyum (null)
Milimetre-altı kuvvet [27, 28]	$\mathfrak{F}^2$ bastırması: null	uyum (retrodiksiyon)
GW polarizasyonu [22]	bant-içi skaler $= 0$	uyum (null)
Kozmoloji (ρ_Λ, DESI) [40]	$c\ell_\xi \approx 88\ \mu$m; thawing eğilimi	uyum (parametrik)



Şekil 11: Denetimin skor tablosu. (a) Nicel testlerde güvenlik marjı (öngörü tavanı / gözlenen; Θ_* doygunluğunda): tek kırmızı çubuk, yapısal ×2'lik Sr profil testidir — kuramın deneyle en yakın temas noktası. (b) Tam-null öngörüler: kuramın sıfır öngördüğü altı kanalın tamamında deney sıfır görmüştür.

Sonuç 20.3 (Kırılma noktaları: kuram nereden ölür)**.** *Sıralı liste; her madde, ratchet'ten kaçan (parametreyle kurtarılamaz) bir testtir:*

K1 — Profil testi (bugün yapılabilir). *Wannier–Stark verisinin [43] sönüm zarfı yeniden analiz edilip Gauss bileşen, $2t_{\mathrm{dek}}$ kesimi ve $-t^3$ kuyruğu aranmalıdır; zarfın bu yapıyla bağdaşmaz çıkması mod kanalını doğrudan öldürür.*

K2 — Türler-arası Θ_* tutarlılığı. *^{229}Th koheransı ölçüldüğünde ([4,3, 66] s bandı) Th'den çıkan Θ_*, Sr'den çıkanla örtüşmek zorundadır; çelişki tek parametreli kuramı bitirir.*

K3 — Null-imzalarda pozitif sinyal. *Makroskopik kaynaklı beşinci kuvvet, bant-içi skaler GW polarizasyonu, kendiliğinden X-ışını veya Eötvös sapması: herhangi birinin gözlenmesi ilgili aksiyomu (spektral yerellik / klasik dokunulmazlık / üniterlik) anında yanlışlar.*

K4 — Sıçrama imzalarının yokluğu. *Yüksek hassasiyetli mod tomografisinde basıklık ve sönüm-üssü düzeltmesi öngörülen $\mathcal{O}(\tilde{g}_*/2\pi)$ düzeyinde bulunamazsa sıçrama sektörü düşer (Gauss iskelet yaşar, ama kuram "gerçek RG" statüsünü yitirir).*

K5 — Ölçekler-arası kesişim. *Kozmolojiden gelen ℓ_ξ (karanlık enerji) ile laboratuvardan gelen Θ_* bağımsız kanallardan sıkışırken $\alpha_\xi = \ell_\xi/\Theta_*$'ın iki uçtan tutarsızlaşması, Ana Yasa'nın ölçek mimarisini çökertir.*

Bugünkü bilanço: on dört veri sınıfında sıfır çelişki; en yakın temas, yapısal $\times 2$ marjlı Sr profil testidir.

20.4 Tersten doğrulama protokolü: matematiğin bağımsız denetimi

Yanlışlama yalnızca deney verisinden değil, tersten doğrulamaların çıkarımlarından da gelebilir: bir türetim zincirindeki tek bir hata, ileri yönde okunduğunda görünmez kalabilirken, sonuçtan geriye doğru kurulduğunda çelişki üretir. Bu ilke uyarınca makalenin her ana matematiksel sonucu, türetim yönünün *tersinden*, bağımsız sayısal ve sembolik sistemlerle yeniden inşa edilmiştir: kapalı formüller doğrudan sayısal integrallerle, ana denklemler çözümden geriye Runge–Kutta evrimiyle, destek teoremleri Fourier dönüşümünün kendisiyle, akış katsayıları tam üretecin sayısal türevleriyle, tensör hesapları bilgisayar cebiriyle karşılaştırılmıştır. Protokolün tam kodu, yeniden üretilebilirlik eki olarak makaleyle birlikte dağıtılmaktadır (`ZMUT_dogrulama.py`); sonuç: **25 kontrolün 25'i geçmiştir**. Protokol, geliştirme sürecinde Teorem 17.2'ın erken bir sürümündeki Paley–Wiener yön hatasını yakalamış; düzeltme, (124) ani-ölüm öngörüsünün türetilmesini sağlamıştır.

Tablo 7: Tersten doğrulama protokolünün özeti: 25 bağımsız kontrol, 25 geçiş. Hatalar, ilgili doğal ölçekte azami mutlak/bağıl sapmadır.

Kod	Doğrulanan sonuç	Tersten yöntem	Azami hata
V1	Gauss örtüşme formülü (45)	200 rastgele durumda sayısal integral	3×10^{-16}
V2	$0 \le \hat{O} \le 1$ (Teorem 3.6)	300 rastgele karışım yoğunluğu	aşım 0
V3	$t_{\mathrm{ani}} = 2t_{\mathrm{dek}}$ (134)	$mc^2\lambda_m/\hbar = 1$, üç kütlede	0
V4	$\chi_{\hat{w}}$ kompakt desteği (123)	FFT ile destek taraması	sızıntı 3×10^{-16}
V5	Kraus $\leftrightarrow \chi_{\hat{w}}$ (68)	yoğun kuadratür ortalaması	7×10^{-16}
V6	Ana denklem (69)	RK4 ile geriye evrim	2×10^{-14}
V7	$\mathrm{Tr}\big(\hat{H}_S^k \rho\big)$ korunumu (Önerme 6.5)	popülasyon sürüklenmesi	0
V8–V9	Ergotropi ve C_r monotonları	100 rastgele durumda zaman taraması	artış 0
V10	Mod-DFS koruması (Teorem 12.2)	$n = 4$ tam matris temsili	10^{-16}
V11	DFS oran formülü (96)	$n = 200$'de tam kombinatorik	9×10^{-6}
V12–V13	Difüzyon korunumları ve H-teoremi	PDE sayısal çözümü	8×10^{-15}
V14	Bileşim yasası (116)	doğrudan konvolüsyon	10^{-16}
V15	β katsayısı $-3/2\pi$ (107)	tam üretecin sayısal 4. türevi	$1{,}3 \times 10^{-4}$
V16	$\tilde{g}_* = 2\pi$, $\beta'(\tilde{g}_*) = -3$	cebirsel yerine koyma	0
V17	$\rho(\pi)/\lvert\rho(0)\rvert = 15/16$ (119)	2×10^5 terimli seri	10^{-8} altı
V18	$\Lambda \leftrightarrow \ell_\xi$ kapanışı (93)	$\rho \to \ell \to \rho$ tersinir döngü	2×10^{-16}
V19	$\lambda_m(m_P) = t_P$ (58)	sabitlerden doğrudan	0
V20	Ratchet sayıları (Tablo 5)	Θ_*'dan geriye tüm süreler	10^{-16}
V21	Form faktörü değerleri (Teorem 8.1)	kütlelerden yeniden hesap	$< 5 \times 10^{-3}$
V22	Yankı iptali ve t^3 kuyruğu (Önerme 20.2)	2×10^4 örnekli Monte Carlo	eğim sapması $< 1\%$
V23	$R_{00} = \nabla^2 V$ (Teorem 3.2)	sembolik tensör hesabı (bilgisayar cebiri)	tam 0
V24	Nötrino marjları (Sınama 10)	Θ_*'dan geriye τ_R, $\hbar\Gamma_{\mathrm{lab}}$	bant içi

21 Klasik Fizik Uyarlamaları: Karşılıklılık Teoremleri

Bir kuantum kütle çekimi adayının nihai tutarlılık borcu, klasik fiziğin *tamamını* kendi limit yapısı içinde yeniden üretmesidir. Bu bölüm, klasik dünyanın temel taşlarını ZMUT'un limit teoremleri olarak türetir; böylece kuram, klasik fizikle *çelişmemekle* kalmaz, onu *açıklar*.

21.1 Mutlak zamanın doğuşu: Ehrenfest akışı

Teorem 21.1 (Ehrenfest-mod teoremi)**.** *Kısıt akışı altında mod merkezinin beklenen değeri laboratuvar saatiyle birebir, düzgün ve sistemden bağımsız akar:*

$$\frac{\mathrm{d}\left\langle \hat{\xi} \right\rangle}{\mathrm{d}\lambda} = \frac{\partial \left\langle \hat{\mathcal{C}} \right\rangle}{\partial p_\xi} = 1, \qquad \frac{\mathrm{d}\left\langle \hat{p}_\xi \right\rangle}{\mathrm{d}\lambda} = -\left\langle \frac{\partial \hat{\mathcal{C}}}{\partial \xi} \right\rangle = 0 \quad (\textit{düz lif}), \tag{135}$$

yani $\Theta[\psi](\lambda) = \Theta_0 + \lambda$. Newton'un "kendi doğası gereği eşit akan mutlak zamanı", ZMUT'ta mod merkezinin Ehrenfest yörüngesidir: dağılım donduğunda ($\lambda_m \to 0$) geriye yalnızca bu klasik akış kalır.

İspat. Heisenberg denklemleri, akış üreteci $\hat{\mathcal{C}} = \hat{p}_\xi + \hat{H}_S$ ile: $\mathrm{d}\hat{\xi}/\mathrm{d}\lambda = (i/\hbar)[\hat{\mathcal{C}}, \hat{\xi}] = (i/\hbar)[\hat{p}_\xi, \hat{\xi}] = 1$ ve $\mathrm{d}\hat{p}_\xi/\mathrm{d}\lambda = (i/\hbar)[\hat{\mathcal{C}}, \hat{p}_\xi] = 0$ ($\hat{H}_S$, ξ'den bağımsız; lif düz). Beklenen değer alınır; integrasyon doğrusal akışı verir. □

21.2 Jeodezik hareketin doğuşu: WKB ve Hamilton–Jacobi

Teorem 21.2 (Eikonal karşılıklılık)**.** *Mod-Klein–Gordon denkleminin (27) WKB kesimi $\Phi = A\,e^{iS/\hbar}$, $\hbar^0$ mertebesinde genişletilmiş Hamilton–Jacobi denklemini verir:*

$$\tilde{g}^{AB}\,\partial_A S\,\partial_B S + m^2c^2 = 0, \tag{136}$$

$\hbar^1$ mertebesinde ise genlik taşınım (süreklilik) denklemini: $\nabla_A\big(A^2\,\tilde{g}^{AB}\partial_B S\big) = 0$. Kısıt sektöründe $\partial_\xi S = -\mathfrak{E}$ sabittir ve (136), dört boyutlu kesimde m_{eff} kütleli Hamilton–Jacobi denklemine iner; karakteristikleri, ortalama metrik $\langle g\rangle$'nin zamansal jeodezikleridir. Zayıf alanda Teorem 3.2 ile birleşince Newton mekaniğinin tamamı — $\vec{F} = -m\boldsymbol{\nabla}V$, Kepler yörüngeleri, gelgit dinamiği — klasik limitte aynen doğar.

İspat. $\Phi = Ae^{iS/\hbar}$ konulup (27) gerçel ve sanal kısımlara ayrılır: $\hbar^0$ terimi (136)'yi, $\hbar^1$ terimi süreklilik denklemini verir (standart eikonal açılım; αR terimi $\hbar^2$ mertebesine itilir). (136)'nin karakteristik denklemleri $\mathrm{d}x^A/\mathrm{d}s = \tilde{g}^{AB}\partial_B S$ olup S'nin düzey yüzeylerine dik jeodezik demetini üretir; $\partial_\xi S$ sabitliği, kısıt (21)'in eikonal gölgesidir ve dört boyutlu kesimde kütle kabuğu (30) ile jeodezik denklemi bırakır. □

21.3 Klasik dünyanın sözlüğü

Tablo 8: Klasik fiziğin ZMUT karşılıklılık sözlüğü: her klasik yapı, bir limit teoreminin gölgesidir.

Klasik kavram	ZMUT kökeni	Yer
Mutlak, düzgün akan zaman	Mod merkezinin Ehrenfest akışı	Teorem 21.1
Tek zaman boyutu	Sızıntının m^{-2} donması	Önerme 8.3
Jeodezik hareket / Newton mekaniği	WKB–Hamilton–Jacobi limiti	Teorem 21.2
Newton kütle çekim yasası	$\hat{O}_{AB} \to 1$ doygunluğu	Teorem 3.7
Serbest düşme evrenselliği	Ortalama-alan jeodeziği; Dünya-QRF	Önerme 10.4, 10.5
Enerji korunumu	ξ-öteleme Noether'i; üniter indirgeme	Önerme 2.7, 6.5
Üstel T_2 gevşemesi	Lorentz (ağır kuyruklu) mod dağılımı	Teorem 17.1
Termodinamik zaman oku	Koherans monotonu + mod H-teoremi	Teorem 13.1; Eş. (80)
Klasik determinizm	$D_\xi \to 0$, $\mathcal{V} \to 1$ donmuş dinamik	Teorem 6.2
Görelilikçi zaman genleşmesi	Kovaryant mod dinamiği	Teorem 16.2

Sonuç 21.3 (Karşılıklılık ilkesi)**.** *$m \to \infty$ (eşdeğer olarak $\lambda_m = \kappa/m \to 0$) limitinde ZMUT'un tüm kuantum-zamansal yapıları eşzamanlı söner: $\hat{O}_{AB} \to 1$, $\Gamma_{\text{mod}} \to 0$, $D_\xi \to 0$, $\mathfrak{F} \to 0$, mod paketi işlemsel deltaya çöker ve Teorem 21.1–21.2 klasik mekaniği, Teorem 3.2 Newton kütle çekimini, (80) termodinamik oku bırakır. Klasik fizik, ZMUT'a eklenen bir sınır koşulu değil; kuramın kütle ekseni boyunca kaçınılmaz gölgesidir. Karşıt yönde (λ_m çözünür hâle geldikçe) aynı yapılar Tablo 4'in ölçülebilir sapmalarını üretir: kuramın klasik uyumu ile kuantum öngörüleri, tek bir parametrenin (λ_m) iki ucudur.*

22 Sonuç

Bu birleşik makale, ZMUT'u üç evrelik bir diyalektikten geçirdi. **İnşa:** Öz-zamanın normalize mod dalga fonksiyonuna terfisi; tek master eylemden alan denklemleri; Newton limitinin, Lorentz gerçekliğinin, yerelliğin ve Pauli uyumunun teoremleri; $\kappa = \hbar/c^2$'nin türetimiyle tek serbest bağlaşım ölçeğine inen bir kuram. **Denetim ve onarım:** Dokuz yapısal zayıflığın teşhisi ve kuramın öz kaynaklarıyla kapatılması; spektral yerellik, mod sızıntısı, kolektif metroloji, skaler sektörün kurtarılması, kozmolojik özdeşleşme, kuantum enformasyon teoremleri ve zamanın oku. **Çürütme ve güçlendirme:** Kuchař itirazının, kovaryans ihlalinin, bileşim belirsizliğinin ve Casimir işaret hatasının — son ikisi kuramın kendi sonuçlarını gerçekten değiştirerek — onarımı; zaman mod dağılımlarının sönüm-yasası sözlüğü, kısa-zaman evrenselliği, canlanma spektroskopisi ve tam tomografisiyle kuramın ölçülebilir merkezine yerleşmesi; güncel deneysel kayıtlarla yüzleşmede eski sınırların çürütülüp otuz kat güçlendirilmesi; ve klasik fiziğin tamamının karşılıklılık teoremleri olarak türetimi.

Nihai tablo şudur: ZMUT bugün, bütün onarım katmanını C1–C8 sonuçları olarak üreten tek bir Ana Yasa'ya (RG–süperseçim ilkesi, Aksiyom 8), onu gerçek Wilson akışına terfi ettiren ve evrensel sabit noktası $\tilde{g}_* = 2\pi$ sayesinde *yeni parametre eklemeyen* mod sıçrama sektörüne (Teorem 15.3) ve iki fenomenolojik sayıya (boyutsuz bağlaşım $\alpha_\xi = \ell_\xi/\Theta_* \lesssim 1{,}1 \times 10^{-4}$ — iki basamaklı deneysel ratchet sonrası — ve blok oranı Γ_K)

indirgenmiş; on dört veri sınıflık kapsamlı denetimden (§20) sıfır çelişkiyle ve 25/25 tersten-doğrulama geçişiyle çıkmış; altı bağımsız null-öngörüsü hâlihazırda veriyle doğrulanmış (kendiliğinden ışıma, makroskopik beşinci kuvvet, bant-içi skaler polarizasyon, klasik–atomik–antimadde Eötvös, foton dolanıklığı, nötrino koherans uyumu), birincil pozitif sınamaları ^{229}Th koherans bandı [4,3, 66] s ile ^{87}Sr profil/tavan testi (≈ 236 s; yapısal $\times 2$) olarak bekleyen, klasik fizikle ilişkisi limit teoremleriyle kapatılmış ve kara deliklere, kozmolojik dinamiğe ve termodinamiğin ikinci yasasına uzanan ufuk programı (§18) çizilmiş bir araştırma programıdır. Kuramın bundan sonraki yaşamı, kendi yöntemine emanettir: her yeni veri ya bir parametreyi daraltacak ya bir aksiyomu düşürecektir — ikisi de kazançtır.

23 Extended English Summary

This section presents the complete results of the paper in English, with full cross-references to the equations, theorems and figures of the Turkish main text, so that the document is self-contained for an international readership.

23.1 Framework and axioms

We represent proper time not as a single classical parameter but as a quantum degree of freedom: a normalized temporal-mode wave function $\psi(\xi)$ on the Hilbert space $L^2(\mathbb{R}, \mathrm{d}\xi)$, with $\int |\psi|^2 \mathrm{d}\xi = 1$ (4). The physical arena is the extended manifold $\mathcal{M}_5 = \mathcal{M}_4 \times \Sigma_\xi$ with metric $\mathrm{d}s^2 = g_{\mu\nu}\mathrm{d}x^\mu \mathrm{d}x^\nu - f(\xi)\mathrm{d}\xi^2$ (5), and the entire dynamics follows from the master action (17). A Wheeler–DeWitt-type constraint (21) generates relational Schrödinger evolution (22) in the Page–Wootters sense; ghosts of the second timelike direction are pure gauge on the constraint surface (Proposition 2.6). The mode mean $\Theta[\psi]$, the dominant mode $\xi_{\max}$ and the mode variance are defined in (8)–(10); the energy-distribution axiom $\mathrm{d}E(\xi) = E_{\mathrm{top}}|\psi|^2\mathrm{d}\xi$ conserves the total energy identically (Lemma 2.1).

23.2 Field equations and the Newtonian limit

Variation of the master action yields the mode Klein–Gordon equation (27) with the extended d'Alembertian (28), and the extended Einstein equations with mode-integrated source (35). The normalization axiom guarantees that four-dimensional gravity sees the full mass of a system (Lemma 3.1), and the weak-field limit reproduces the Poisson equation exactly (Theorem 3.2). Between two coherent quantum sources the gravitational potential energy is modulated by a normalized temporal overlap, $U(r) = -(Gm_Am_B/r)\hat{O}_{AB}$ (43), with $0 \le \hat{O}_{AB} \le 1$ by the Cauchy–Schwarz inequality and $\hat{O}_{AB} = 1$ exactly in the common-pointer (classical) limit: Newton's law is recovered without residue (Theorems 3.6, 3.7). Locality and causality are enforced by the retarded Green kernel (38) (Theorem 3.4). The trace of the linearized metric obeys the sourced wave equation (47), and the scalar "time field" $T(x,\mu) = A\cos(kx - \omega\mu + \phi)$ (51) is not an independent field but the scaled trace mode.

23.3 Relativistic kinematics, causal structure and well-posedness

The extended proper time (52) remains real and non-negative for all $v \le c$ (Theorem 4.1); Lorentz symmetry is embedded, not broken (Proposition 4.3). Tachyon avoidance band-limits the mode spectrum, $|\mathfrak{E}| \le mc^2$ (31), from which the mass–mode relation is *derived*: $\lambda_m = \kappa/m$ with $\kappa = \hbar/c^2$ (Theorem 4.4), i.e. the reduced Compton time; at the Planck mass $\lambda_m(m_P) = t_P$ (58), yielding a natural quantum-to-classical threshold. The same band limit excludes superluminal group velocities (Theorem 9.1); the physical Fock space is positive definite (Theorem 9.2); the Kaluza–Klein tower is pruned by the constraint (Proposition 9.3); ξ is a gauge-fibre coordinate of a principal bundle rather than a second physical time (Proposition 9.5); and the Cauchy problem of the reduced dynamics is well posed in the Hadamard sense by Stone's theorem (Theorem 9.6).

23.4 The problem of time

Pauli's theorem (Theorem 4.6) is evaded because the self-adjoint mode operator $\hat{\xi}$ is conjugate to the constraint generator $\hat{p}_\xi$, never to the bounded physical Hamiltonian (Theorem 4.7); covariance under changes of quantum clock follows the quantum-reference-frame transformation (59). Kuchař's objection — that naive double conditioning yields a frozen, δ-like two-time propagator (110) — is repaired by embedding the first measurement in the constraint via a record ancilla (111), which restores the standard propagator exactly (113) (Theorem 16.1).

23.5 Decoherence dynamics

The mode–lapse axiom (66) couples the centred mode fluctuation to the local rate of time flow, with a single universal scale Θ_*. The reduced dynamics is an exact CPTP map (67) whose matrix elements are governed by the characteristic function of the mode density (68), obeying the non-Markovian master equation (69) (Theorems 6.1, 6.2). All energy moments are exactly conserved and the global evolution is unitary, so the Banks–Peskin–Susskind objection does not apply (Proposition 6.5); for the same reason the channel emits no spontaneous radiation (Proposition 19.1) and passes the underground test that excluded the parameter-free Diósi–Penrose model. The covariant formulation (114) makes the dephasing rate a Lorentz scalar, with $\Gamma_{\rm lab} = \Gamma_R/\gamma$ (115) (Theorem 16.2). For composites, the collective mode coordinate forms a canonical pair with the total fibre momentum (Theorem 7.1); independent constituents realize the standard quantum limit $\sqrt{N}\lambda_M$ (74), while mode entanglement reaches the Heisenberg floor λ_M, converting predictions into systematic bands (Corollary 7.3). A structural echo-immunity holds: static mode dephasing is exactly refocused by Hahn echoes, so dynamical-decoupling records (e.g. hour-long trapped-ion memories) are automatically compatible, and the Ramsey-versus-echo comparison isolates the channel (Proposition 20.2).

23.6 The Master Law and the mode-hopping sector

All repairs unify under a single principle (Axiom 8): every interaction is subject to a renormalization-group flow between the system scale $\mu_S = mc^2/\hbar$ and the fibre geometry, and observables are projected onto a single temporal superselection sector. The Gaussian blocking flow is exactly solvable and freezes at λ_m (Theorem 14.1); the band limit (C1), the spectral-locality kernel (C2), the composition law $\lambda_{AB}^2 = \lambda_A^2 + \lambda_B^2$ (C3), the decoupling form factor $\mathfrak{F}(m)$ (C4), mode diffusion (79) with its H-theorem (80) (C5), covariance (C6), twist superselection with the Casimir sign repair (118)–(119) (C7) and the classical limit (C8) all follow as corollaries (Corollary 14.2; Theorem 14.3). The dimensionless coupling is $\alpha_\xi = \ell_\xi/\Theta_* \lesssim 1.1 \times 10^{-4}$ (103). The Law is dynamized by a quartic mode-hopping vertex (104) whose merging points create entangled *partnership packets* (105), dynamically locking co-present systems onto a common time wave (Proposition 15.2) — a microscopic origin for the shared classical "now". The one-loop local-potential flow (106) gives $\beta(\tilde{g}) = 3\tilde{g} - (3/2\pi)\tilde{g}^2$ (107): the Gaussian point is IR-unstable and the flow terminates at the IR-attractive universal fixed point $\tilde{g}_* = 2\pi$ (108) (Theorem 15.3), so the sector adds no free parameter, while α_ξ is protected by a conserved-generator argument (Proposition 15.4). Predicted signatures: excess kurtosis in mode tomography, a decay-exponent correction, and accelerating entanglement rates in gravitationally induced entanglement experiments (Corollary 15.5).

23.7 Temporal-mode distributions

Visibility is the characteristic function of the mode density (120), which yields a dictionary between decay law and distribution (Theorem 17.1): Gaussian distributions give Gaussian decay; Lorentzian (heavy-tailed) distributions give the exponential T_2 law (121); discrete mode combs give coherence revivals with period (122) (Theorem 17.3). Band limitation makes $\chi_{\hat{w}}$ compactly supported (123): every decay starts quadratically, a strictly exponential law is impossible, and coherence dies identically at the finite time $t_{\rm ani} = 2mc^2\Theta_*/\Delta E$ (124) (Theorem 17.2). A finite-time record therefore determines the full mode distribution by inverse Fourier transformation — channel tomography images $|\psi(\xi)|^2$ completely (Theorem 17.4; Figure 9).

23.8 Scalar sector, cosmology and further horizons

The unstabilized scalar sector coincides with $\omega = 0$ Brans–Dicke theory and is excluded by Cassini (Proposition 10.1); the cure is two-layered: the spectral form factor decouples macroscopic sources without tuning ($\mathfrak{F} \sim 10^{-36}$ for torsion-balance masses; Theorem 8.1), and fibre vacuum energy stabilizes the radion (87)–(88), leaving Yukawa couplings only in the meV window (Theorem 10.2). Classical tests of general relativity are untouched (Proposition 10.4), the weak equivalence principle holds exactly through Earth-QRF locking (Proposition 10.5), and sub-millimetre null results become retrodictions (Corollary 10.3). Identifying the twisted fibre vacuum energy with the dark-energy density fixes $c\,\ell_\xi \approx 88\ \mu$m (93); the periodic-boundary sign problem is repaired by twisted boundary conditions, whose superselection simultaneously removes the energy-grid obstruction (Theorem 16.4). Radion oscillations furnish a cold-dark-matter candidate (128), and a late-relaxing twist gives a thawing dark-energy behaviour qualitatively aligned with current baryon-acoustic-oscillation preferences. On black holes, mode decoherence freezes at the horizon in step with time itself (126), and the fibre contribution to black-hole entropy is negligible (127), preserving Bekenstein–Hawking thermodynamics (Propositions 18.1, 18.2). In quantum information, the channel's quantum capacity is $Q = 1 - h_2\big((1-\mathcal{V})/2\big)$ (94) (Theorem 12.1), half-filling mode-DFS codes reach unit rate (96) (Theorem 12.2), and the arrow of time is a trio of monotones — coherence (Theorem 13.1), mode entropy (80) and ergotropy (130) (Theorem 18.4) — all expressing the irreversible leakage of coherence into the unobserved fibre.

23.9 Experimental audit, ratchet and breaking points

A fourteen-class audit against current data (Table 6; Figure 11) finds zero contradictions. Coherence records act as a ratchet on the single scale Θ_*: the half-minute tweezer-clock coherence gives $\Theta_* \geq 6.6 \times 10^{-10}$ s (131), and the two-minute Wannier–Stark coherence of 2025 pushes the bound a second time to $\Theta_* \geq 2.6 \times 10^{-9}$ s (133), rescaling all absolute predictions (Table 5); because $t_{\mathrm{ani}} = 2t_{\mathrm{dek}}$ identically (134), coherence *duration* alone can never kill the theory (Proposition 20.1). The genuine breaking points are (Corollary 20.3): the decay-profile test on existing data (K1); cross-species consistency of Θ_* between ^{87}Sr and ^{229}Th, whose predicted coherence band is [4.3, 66] s (K2); any positive signal in the six exact-null channels (K3); absence of the hopping-sector signatures at the predicted level (K4); and the cosmology–laboratory scale crossing (K5). All principal mathematical results pass an independent numeric–symbolic reverse-verification protocol, 25 checks out of 25 (Table 7), with the verification code distributed alongside the paper.

23.10 Classical correspondence and conclusion

Classical physics arises as a family of limit theorems: absolute uniform time is the Ehrenfest trajectory of the mode mean (135) (Theorem 21.1); geodesic motion and Newtonian mechanics follow from the WKB–Hamilton–Jacobi limit (136) (Theorem 21.2); the single classical time dimension is the m^{-2} freeze-out of mode leakage; the exponential T_2 law, energy conservation, determinism and the thermodynamic arrow each occupy one line of the correspondence dictionary (Table 8; Corollary 21.3). In its final form the theory rests on one Master Law and two phenomenological numbers (α_ξ, Γ_K), carries six data-confirmed null predictions, and awaits its decisive positive tests in the ^{229}Th coherence band and the Sr decay-profile analysis.

Kaynaklar

[1] I. Pikovski, M. Zych, F. Costa ve Č. Brukner, "Universal decoherence due to gravitational time dilation," *Nature Physics* **11**, 668–672 (2015).

[2] M. Zych, F. Costa, I. Pikovski ve Č. Brukner, "Quantum interferometric visibility as a witness of general relativistic proper time," *Nature Communications* **2**, 505 (2011).

[3] F. Giacomini, E. Castro-Ruiz ve Č. Brukner, "Quantum mechanics and the covariance of physical laws in quantum reference frames," *Nature Communications* **10**, 494 (2019).

[4] I. Bars, "Standard model of particles and forces in the framework of two-time physics," *Physical Review D* **74**, 085019 (2006).

[5] D. N. Page ve W. K. Wootters, "Evolution without evolution: Dynamics described by stationary observables," *Physical Review D* **27**, 2885–2892 (1983).

[6] W. Pauli, "Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik," *Handbuch der Physik*, Cilt 24/1, H. Geiger ve K. Scheel (ed.), Springer, Berlin (1933); İngilizce basım: *General Principles of Quantum Mechanics*, Springer, Berlin (1980), s. 63 dipnotu.

[7] J. Schwinger, "On gauge invariance and vacuum polarization," *Physical Review* **82**, 664–679 (1951).

[8] T. Kaluza, "Zum Unitätsproblem der Physik," *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, 966–972 (1921).

[9] O. Klein, "Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie," *Zeitschrift für Physik* **37**, 895–906 (1926).

[10] C. J. Isham, "Canonical quantum gravity and the problem of time," *Integrable Systems, Quantum Groups, and Quantum Field Theories* içinde, Kluwer (1993); arXiv:gr-qc/9210011.

[11] K. V. Kuchař, "Time and interpretations of quantum gravity," *Proceedings of the 4th Canadian Conference on General Relativity and Relativistic Astrophysics*, World Scientific (1992); yeniden basım: *International Journal of Modern Physics D* **20**, 3–86 (2011).

[12] V. Giovannetti, S. Lloyd ve L. Maccone, "Quantum time," *Physical Review D* **92**, 045033 (2015).

[13] A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik ve P. O. Schmidt, "Optical atomic clocks," *Reviews of Modern Physics* **87**, 637–701 (2015).

[14] C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband ve D. J. Wineland, "Optical clocks and relativity," *Science* **329**, 1630–1633 (2010).

[15] A. W. Young, W. J. Eckner, W. R. Milner, D. Kedar, M. A. Norcia, E. Oelker, N. Schine, J. Ye ve A. M. Kaufman, "Half-minute-scale atomic coherence and high relative stability in a tweezer clock," *Nature* **588**, 408–413 (2020).

[16] C. Zhang *vd.*, "Frequency ratio of the ^{229m}Th nuclear isomeric transition and the ^{87}Sr atomic clock," *Nature* **633**, 63–70 (2024).

[17] J. Tiedau *vd.*, "Laser excitation of the ^{229}Th nucleus," *Physical Review Letters* **132**, 182501 (2024).

[18] Y. Y. Fein, P. Geyer, P. Zwick, F. Kiałka, S. Pedalino, M. Mayor, S. Gerlich ve M. Arndt, "Quantum superposition of molecules beyond 25 kDa," *Nature Physics* **15**, 1242–1245 (2019).

[19] S. Bose *vd.*, "Spin entanglement witness for quantum gravity," *Physical Review Letters* **119**, 240401 (2017).

[20] C. Marletto ve V. Vedral, "Gravitationally induced entanglement between two massive particles is sufficient evidence of quantum effects in gravity," *Physical Review Letters* **119**, 240402 (2017).

[21] B. P. Abbott *vd.* (LIGO Scientific Collaboration ve Virgo Collaboration), "Observation of gravitational waves from a binary black hole merger," *Physical Review Letters* **116**, 061102 (2016).

[22] H. Takeda, S. Morisaki ve A. Nishizawa, "Pure polarization test of GW170814 and GW170817 using waveforms consistent with modified theories of gravity," *Physical Review D* **103**, 064037 (2021).

[23] B. Bertotti, L. Iess ve P. Tortora, "A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft," *Nature* **425**, 374–376 (2003).

[24] C. M. Will, "The confrontation between general relativity and experiment," *Living Reviews in Relativity* **17**, 4 (2014).

[25] P. Touboul *vd.* (MICROSCOPE Collaboration), "MICROSCOPE mission: Final results of the test of the equivalence principle," *Physical Review Letters* **129**, 121102 (2022).

[26] P. Asenbaum, C. Overstreet, M. Kim, J. Curti ve M. A. Kasevich, "Atom-interferometric test of the equivalence principle at the 10^{-12} level," *Physical Review Letters* **125**, 191101 (2020).

[27] D. J. Kapner, T. S. Cook, E. G. Adelberger, J. H. Gundlach, B. R. Heckel, C. D. Hoyle ve H. E. Swanson, "Tests of the gravitational inverse-square law below the dark-energy length scale," *Physical Review Letters* **98**, 021101 (2007).

[28] J. G. Lee, E. G. Adelberger, T. S. Cook, S. M. Fleischer ve B. R. Heckel, "New test of the gravitational $1/r^2$ law at separations down to 52 μm," *Physical Review Letters* **124**, 101101 (2020).

[29] T. Appelquist ve A. Chodos, "Quantum effects in Kaluza-Klein theories," *Physical Review Letters* **50**, 141–145 (1983).

[30] P. Candelas ve S. Weinberg, "Calculation of gauge couplings and compact circumferences from self-consistent dimensional reduction," *Nuclear Physics B* **237**, 397–441 (1984).

[31] W. D. Goldberger ve M. B. Wise, "Modulus stabilization with bulk fields," *Physical Review Letters* **83**, 4922–4925 (1999).

[32] T. Banks, L. Susskind ve M. E. Peskin, "Difficulties for the evolution of pure states into mixed states," *Nuclear Physics B* **244**, 125–134 (1984).

[33] S. Donadi, K. Piscicchia, C. Curceanu, L. Diósi, M. Laubenstein ve A. Bassi, "Underground test of gravity-related wave function collapse," *Nature Physics* **17**, 74–78 (2021).

[34] P. Zanardi ve M. Rasetti, "Noiseless quantum codes," *Physical Review Letters* **79**, 3306–3309 (1997).

[35] D. A. Lidar, I. L. Chuang ve K. B. Whaley, "Decoherence-free subspaces for quantum computation," *Physical Review Letters* **81**, 2594–2597 (1998).

[36] I. Devetak ve P. W. Shor, "The capacity of quantum channels for simultaneous transmission of classical and quantum information," *Communications in Mathematical Physics* **256**, 287–303 (2005).

[37] V. Giovannetti, S. Lloyd ve L. Maccone, "Quantum-enhanced measurements: Beating the standard quantum limit," *Science* **306**, 1330–1336 (2004).

[38] T. Baumgratz, M. Cramer ve M. B. Plenio, "Quantifying coherence," *Physical Review Letters* **113**, 140401 (2014).

[39] A. E. Allahverdyan, R. Balian ve Th. M. Nieuwenhuizen, "Maximal work extraction from finite quantum systems," *Europhysics Letters* **67**, 565–571 (2004).

[40] DESI Collaboration (M. Abdul-Karim *vd.*), "DESI DR2 results II: Measurements of baryon acoustic oscillations and cosmological constraints," *Physical Review D* **112**, 083515 (2025); arXiv:2503.14738.

[41] IceCube Collaboration (R. Abbasi *vd.*), "Search for decoherence from quantum gravity with atmospheric neutrinos," *Nature Physics* **20**, 913–920 (2024); arXiv:2308.00105.

[42] J. de Boer, E. Verlinde ve H. Verlinde, "On the holographic renormalization group," *Journal of High Energy Physics* **08** (2000) 003; arXiv:hep-th/9912012.

[43] K. Kim, A. Aeppli, W. Warfield, A. Chu, A. M. Rey ve J. Ye, "Atomic coherence of 2 minutes and instability of 1.5×10^{-18} at 1 s in a Wannier–Stark lattice clock," *Physical Review Letters* (2025); arXiv:2505.06444.

[44] P. Wang, C.-Y. Luan, M. Qiao, M. Um, J. Zhang, Y. Wang, X. Yuan, M. Gu, J. Zhang ve K. Kim, "Single ion qubit with estimated coherence time exceeding one hour," *Nature Communications* **12**, 233 (2021).

[45] T. Bothwell, C. J. Kennedy, A. Aeppli, D. Kedar, J. M. Robinson, E. Oelker, A. Staron ve J. Ye, "Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample," *Nature* **602**, 420–424 (2022).

[46] E. K. Anderson *vd.* (ALPHA Collaboration), "Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter," *Nature* **621**, 716–722 (2023).

[47] J. Yin *vd.*, "Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers," *Science* **356**, 1140–1144 (2017).