arXiv:2601.00651v1 [quant-ph] 2 Jan 2026

对广义 K´arolyh´azy 引力诱导退相干模型的实验排除

NicolaBortolotti[1,2,3], Kristian Piscicchia[2,3,*], Matthias Laubenstein[4], Simone Manti[3], Antonino Marcian`o[5],Federico Nola[3,6,7],Catalina Curceanu[3,8].

[1]意大利罗马“萨皮恩扎”大学物理系，Piazzale Aldo Moro 5，00185，意大利罗马[2]恩里科·费米研究中心—物理学历史博物馆与“恩里科·费米”研究与研究中心，Via Panisperna 89 A，00184，意大利罗马[3]弗拉斯卡蒂国家实验室，意大利国家核物理研究院，Via Enrico Fermi 54，00044，意大利弗拉斯卡蒂[4]格兰萨索国家实验室，意大利国家核物理研究院，意大利[5]复旦大学场论与粒子物理中心及物理系，200433，中国上海[6]坎帕尼亚“路易吉·范维特利”大学数学与物理系，viale Abramo Lincoln 5，I-81100，意大利卡塞塔[7]意大利国家核物理研究院，Monte S. Angelo 大学综合园区，Via Cintia，I-80126，意大利那不勒斯[8]IFIN-HH，霍里亚·胡卢贝伊国家核物理与工程研究所，30 Reactorului，077125，罗马尼亚 M˘agurele

电子邮箱： kristian.piscicchia@cref.it

摘要

我们报告了对 K´arolyh´azy 最初提出的引力诱导退相干模型广义版本的新实验约束。利用 VIP 合作组在意大利国家核物理研究院格兰萨索国家实验室使用高纯锗探测器收集的数据，我们推导出该模型中表征度规涨落的空间相关长度 R_K 的改进下限。我们得到的下限为 $R_K > 4.64$ m （95% 置信水平），比此前的实验限值高出一个数量级以上。结合由宏观定位要求推导出的理论上限 $R_K < 1.98$ m，我们的结果排除了广义 K´arolyh´azy 模型。同样的结论也适用于与之相关的连续自发定位（CSL）模型的非马尔可夫表述。我们的发现显著收紧了对引力相关退相干情景的实验约束，并证明地下低本底实验能够探测量子力学基础性修正的灵敏度。

1 引言

本研究进一步完善了对广义引力相关自发退相干模型的实验约束。该模型最初由 K´arolyh´azy [2, 3]提出。 [1] 在这一框架中，量子力学与引力的相互作用导致时空长度测量的精度存在一个基本极限。这一极限表现为度规的随机涨落，进而

引发物质波退相干。同时，度规涨落会导致粒子发生空间扩散；若粒子带电，则会产生电磁辐射。

修订后的 K´arolyh´azy 模型保留了所有这些关键特征，同时放宽了原先关于度规涨落必须呈引力波形式的假设。因此，涨落不再受到唯一约束。在各种可能的实现方式中，一类重要模型是将涨落的时空相关函数分解为时间分量和空间分量：时间部分由时空不确定性确定，而空间部分则保持自由。

在非相对论极限下，标准薛定谔方程会受到随机牛顿势的修正。这一附加项为动力学引入了一个根本性的不可逆性来源，从而导致退相干。相应的主方程具有林德布拉德形式，其中质量密度充当跳跃算符。值得注意的是，同一个主方程也描述了质量正比的自发波函数坍缩模型 [4, 5, 6, 7, 8, 9]（综述可参见例如 [10, 11]）；这些模型在数十年前被提出，作为标准量子力学的可实验检验的替代理论，并能一致地解决测量问题。尽管 K´arolyh´azy 模型与自发坍缩框架会产生不同的波函数演化——前者是线性的，后者是非线性的——但它们对所有可能测量给出的预测完全相同，因此在实验上无法区分[1]。

在本研究中，我们关注度规涨落的空间关联函数呈高斯分布的情形。这一选择使我们的实验分析能够约束连续自发定位（CSL）模型的一种非马尔可夫版本；该模型是主要的坍缩模型方案之一。值得注意的是，K´arolyh´azy 时空不确定性确定了时间关联函数和坍缩率参数（通常记为 λ），因此只留下一个自由参数：空间相关长度 R_K （在标准 CSL 记法中对应于 $R_K = \sqrt{2}r_C$ ）。人们已投入大量精力检验 CSL 的马尔可夫形式，其中噪声在时间上完全不相关，而实验允许的参数空间范围也日益受到限制。因此，探索更符合物理现实、具有时间关联（有色噪声）的版本变得愈发迫切。

自发辐射测量 [12, 13, 14] 被广泛用于检验自发坍缩模型。利用 VIP实验在格兰萨索国家实验室（意大利国家核物理研究院）（LNGS）通过基于高纯锗探测器的装置获取的数据，我们得出了特征相关长度 R_K的一个改进下限。我们的下限比文献[1] 中报告的限值高出一个数量级以上。

文献 [1] 还提出了一个思想实验：通过要求一个宏观物体——具体而言，一个直径为 $10\ \mu$ 米的单层石墨烯圆盘（约为人眼可见的最小尺寸）——在$t = 0.01$ 秒的时间间隔内实现空间局域化（这是人眼能够感知的最小时间分辨率），从而给出 R_K 的上限。将我们的下限与这一理论上限结合起来表明，广义 K´arolyh´azy 模型的高斯版本无法同时满足这两个约束，因此被排除。同样的结论也适用于相关的非马尔可夫 CSL 模型。

总而言之，在本工作中，我们基于LNGS地下运行的VIP 锗探测器所获得的低本底数据，以及纳入详细材料依赖的发射率的贝叶斯谱分析，在实验上排除了剩余的参数窗口。我们得到的新下限排除了广义 K´arolyh´azy 模型 [1]以及相关的非马尔可夫 CSL 模型。

第 2 节回顾了 K´arolyh´azy 模型的原始形式和广义形式，并给出了通用材料的自发辐射率。第 3 节介绍了实验装置，并

[1]不过，人们预期，现有形式的坍缩模型只是有效描述，而更为基础的底层理论将会导致一些在实验上可加以区分的预测。

第4节报告数据分析和结果。

2 K´arolyh´azy 模型及其推广简述

K´arolyh´azy 模型的核心思想是，量子力学对长度测量的精度设定了一个基本极限。这一极限被解释为时空度规中固有的模糊性。因此，物质会经历时空涨落，其波函数在量子化时会发生退相干。

K´arolyh´azy 的模型始于这样一个观察：在平直时空中，遵循海森堡不确定性原理（HUP）的量子探针对类时长度 cT 进行测量时，其精度有限。通过施加 HUP，并要求系统质量足够小，以确保其施瓦西半径小于位置不确定度，可推导出最小分辨率如下

$$(\Delta s)^3 = l_p^2\, s, \tag{1}$$

其中， l_p 为普朗克长度。这一基本限制被解释为源于平直闵可夫斯基度规的随机涨落，其表达式为 $(g_{\mu\nu})_\beta(\mathbf{x}\ t) = \eta_{\mu\nu}(\mathbf{x}\ t) + (h_{\mu\nu})_\beta(\mathbf{x}\ t)$，其中度规的不同实现由 β 标记。因此，固有长度成为一个随机变量，其均值为 cT ，色散由式（1）确定。对随机度规取平均后，均值和色散刻画了噪声。在非相对论动力学和弱引力场的假设下，只有度规的 g_{00} 分量是相关的

$$(g_{00})_\beta(\mathbf{x}, t) = 1 + \gamma_\beta(\mathbf{x}, t), \tag{2}$$

其中， γ_β 表示噪声。假设 $\gamma_\beta(\mathbf{x}\ t)$满足波动方程 $\Box\gamma_\beta = 0$，并对其进行傅里叶展开，即可推导出该噪声的关联函数。K´arolyh´azy假设不同模式彼此独立，且关联仅取决于波矢模长的函数 $F(k)$，即

$$\mathbb{E}\left[c_\beta(\mathbf{k}) c_\beta^*(\mathbf{k}')\right] = \delta_{\mathbf{k}\mathbf{k}'}\, F(k). \tag{3}$$

由位置不确定性（1）可得到关联函数

$$F(k) = \frac{8\pi^2}{3\Gamma(1/3)}\, l_p^{4/3}\, k^{-5/3}, \tag{4}$$

其中假设高能截断位于 $k < 2\pi/\lambda_c$处， $\lambda_c = 10^{-15}\ \mathrm{m}$。

Ref. [15]对由K´arolyh´azy退相干机制引起的自发辐射 进行了开创性分析。时空朦胧性在非相对论性的牛顿极限下对应于与随机势 $V_\beta(\mathbf{x}\ t)$的相互作用，该随机势会扰动标准的薛定谔演化

$$V_\beta(x, t) = \frac{1}{2} m c^2 \gamma_\beta(x, t). \tag{5}$$

相应的随机加速度为

$$\mathbf{a}(\mathbf{x}, t) = -\frac{1}{2} c^2 \nabla \gamma_\beta(\mathbf{x}, t), \tag{6}$$

这会导致带电粒子发射电磁辐射——而标准量子力学中不存在这种效应。参考文献 [15] 表明，K´arolyh´azy 模型预测的自发辐射率高得不切实际，与实验观测不符。

文献 [1]提出了近期一种将K´arolyh´azy机制与自发辐射率实验测量结果相协调的尝试。该研究指出，当代自发波函数坍缩模型（如DP模型和CSL模型） [7, 6, 4, 8], 预言的自发辐射率要低得多。这一差异归因于K´arolyh´azy噪声关联函数的独特结构：与DP模型和CSL模型不同，它具有强烈的非马尔可夫性，且不将空间分量和时间分量因子化。

在同一项工作中，研究者提出了K´arolyh´azy模型的一种推广，放宽了 γ_β 满足波动方程这一假设。相反，研究假设度规涨落的关联函数 $\mathcal{C}^{(\gamma)}(\mathbf{x}\ t;\mathbf{x}',\ t') = \mathbb{E}[\gamma_\beta(\mathbf{x}\ t)\gamma_\beta(\mathbf{x}',\ t')]$, 在空间和时间平移下均保持不变，同时在时间反演下也保持不变（即具有 $\mathcal{C}^{(\gamma)}(\mathbf{x}-\mathbf{x}',\ |t-t'|)$的形式），并且空间部分和时间部分可以因子化

$$\mathcal{C}^{(\gamma)}(\mathbf{x}-\mathbf{x}',|t-t'|) = \mathcal{D}^{(\gamma)}(\mathbf{x}-\mathbf{x}')\mathcal{G}(|t-t'|). \tag{7}$$

该 时间分量由式 (1) 约束，在傅里叶空间中可得以下表达式

$$\mathcal{G}(\omega) = \frac{4}{\sqrt{3}}\frac{\Gamma\left(2/3\right)t_p^{4/3}\omega^{1/3}}{\mathcal{D}^{(\gamma)}(0)}, \tag{8}$$

其中 $t_p = l_p/c$ 为普朗克时间，而空间分量假设为高斯形式，其相关长度 R_K 在模型中成为一个自由参数。

以牛顿场 $\phi_\beta = c^2\gamma_\beta/2$表示时，关联函数的空间部分为 s

$$\mathcal{D}^{(\phi)}(r) = \frac{c^4 t_p}{4}e^{-r^2/R_K^2}. \tag{9}$$

值得注意的是，该模型在实验上等效于具有非马尔可夫噪声的连续自发定域模型（CSL），其中坍缩率参数由普朗克时间固定为

$$\lambda = \frac{t_p m_0^2 c^4}{4\hbar^2} = 27.5\ \mathrm{kHz}, \tag{10}$$

其中 m_0 为核子质量， R_K 则是唯一的自由参数。事实上，支配 CSL动力学的主方程可由随机薛定谔方程 [16] 推导得出，其中噪声场被认定为具有零均值和空间关联的随机牛顿势

$$\mathcal{D}_{\mathrm{CSL}}(r) = \frac{\hbar^2\lambda}{m_0^2}e^{-r^2/2r_C^2}, \tag{11}$$

其中， r_C 决定坍缩过程的局域化分辨率。比较式（11）与式（9），即可得到 λ的表达式（10）。

在 [1], 中，推导了广义 K´arolyh´azy 模型下自由粒子的自发发射率，得到

$$\frac{d\Gamma}{dE} = \frac{\Gamma(2/3)\alpha c^2 t_p^{4/3}}{\sqrt{3}\pi\hbar^{1/3}R_K^2E^{2/3}}, \tag{12}$$

其中 α 为精细结构常数。此结果与近期的实验分析[14], 进行比较，后者给出了相关长度的下限 $R_K \geq 0.11$ m。此外，正如所指出的

在引言中，我们通过理论论证得出 $R_K \leq 1.98$ m 的上限。这些结果见参考文献 [1], ，表明 K´arolyh´azy 模型与自发辐射测量结果相容，但仅在 R_K 的取值范围很窄时才成立，如图1所示。

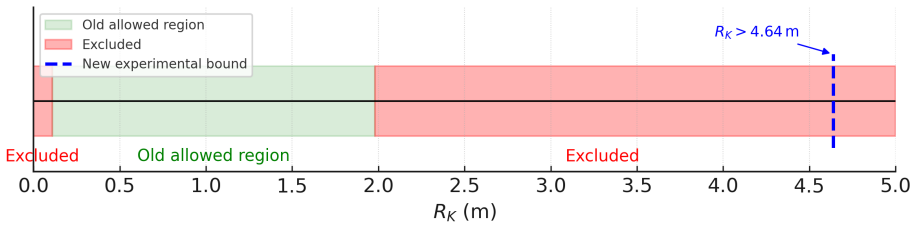


图1：根据分析 [1] ，广义 K´arolyh´azy 模型的相关长度参数此前允许的区域以绿色显示。本工作中得到的更新后界限 $R_K > 4.64$m 也一并显示。这个新的较低值落在禁区内，因此证伪了广义 K´arolyh´azy 机制。

为了提高数据解读的灵敏度，我们通过引入系统中原子所含质子和电子发射所产生的效应，对式（12）中的速率进行了推广。该速率表达式与连续自发定域模型在噪声由时间分量（8）表征时所预测的结果相同。对于白噪声连续自发定域模型，通用材料的发射速率已在 [13] 中推导得出（见式（5）；有色噪声速率则通过将该表达式乘以式（8）中给出的函数 $\mathcal{G}(\omega)$ 得到 [17] 。因此，使用坍缩速率参数的表达式（10），我们得到

$$\frac{d\Gamma}{dE} = N_{at}\,(N_p^2 + N_e)\frac{\Gamma(2/3)\alpha c^2 t_p^{4/3}}{\sqrt{3}\pi\hbar^{1/3}R_K^2 E^{2/3}}, \tag{13}$$

wher其中， N_{at} 表示原子数， N_p 和 N_e 分别表示质子数和电子数 ec-
。 .

3 实验装置

该实验装置在 LNGS 运行，旨在探测探测器中锗晶体自发辐射发射的微弱信号，以及实验装置周围材料发出的信号。LNGS 的低本底环境非常适合测量发生率极低的物理过程，其上方的岩层覆盖可将宇宙线缪子通量降低约六个数量级 [12]。

图 2 示意了该装置，其由一台直径和长度均为 8.0 cm 的同轴p型高纯锗探测器组成。探测器外部设有被动屏蔽结构，外层由纯铅制成，内层则由电解铜构成。探测器的锗有源体积为 375 cm^3。

样品腔的容积约为 15 L。屏蔽层和低温恒温器一起封装在厚度为 1 mm 的气密钢制外壳内。该外壳持续通入来自液氮储罐的蒸发氮气，以尽量减少与外界空气的接触，从而抑制氡 α 衰变产生的本底。

测得的发射谱对应约 62 天的数据采集期（从2014年8月至2015年8月），曝光量为 124 千克 · 天，如图 3 所示。

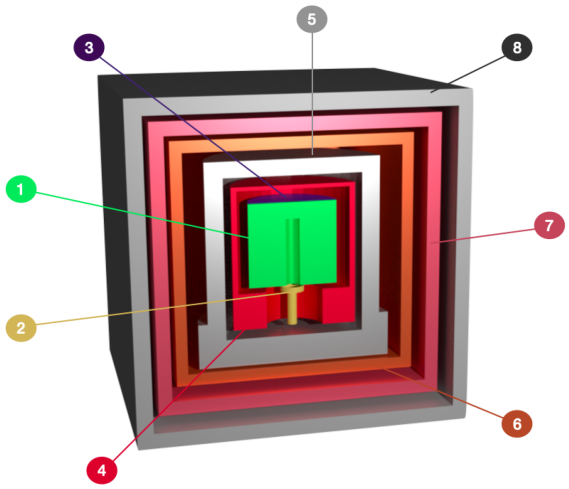


图2：锗探测器的示意图。从内向外依次为：(1) 锗晶体，(2) 电接触件，(3) 塑料绝缘体，(4、5、6) 铜杯、端杯和块体，(7) 内层铜屏蔽，以及 (8) 铅屏蔽。

分析所用的能量范围为（$1.3-1.6$）兆电子伏，该范围通过蒙特卡罗（MC）研究进行优化，旨在模拟已知发射过程产生的背景贡献。为全面表征实验装置、计算探测效率并模拟背景，将整个探测器纳入基于 GEANT4 软件库（参考文献 [19]）的经过验证的蒙特卡罗（MC）代码中（参考文献 [18]）。

背景的蒙特卡罗模拟以装置中每个组件检测到的各放射性核素的实测活度作为输入。模拟考虑了发射概率和衰变方案，并对探测器材料内部的光子传播与相互作用进行了逼真的建模，这些过程会对背景谱的连续部分产生贡献。模拟中还考虑了探测效率。背景谱以红色显示在图3中。在 ($1.3-1.6$) 兆电子伏的能量范围内，测量谱与模拟谱吻合良好，模拟结果涵盖了测量谱的 97% 以上。在较低能量区域，测量谱与模拟谱之间的偏差较大。这些差异主要是由于无法对残余宇宙射线，以及由大量铅屏蔽中的 ^{210}Pb 及其子体核素产生的韧致辐射进行完美建模。高于 1600 keV 时，能谱中的数据点变得稀疏，无法为第4节所述的逐箱贝叶斯分析提供额外的有用信息。

在考虑质子的主要贡献时，式（13）中理论自发发射率的计算所依据的所有假设在 ΔE 内均成立，因为电子在这一能量范围内会变得具有相对论性。

4 数据分析与结果

本分析旨在获得自发辐射产额（$Y = 1/R_K^2$）的概率密度函数（pdf），该产额可能对测量谱有所贡献。如下文所述，未观测到显著信号。鉴于 Y 是 R_K的单调函数，这两个随机变量的 pdf

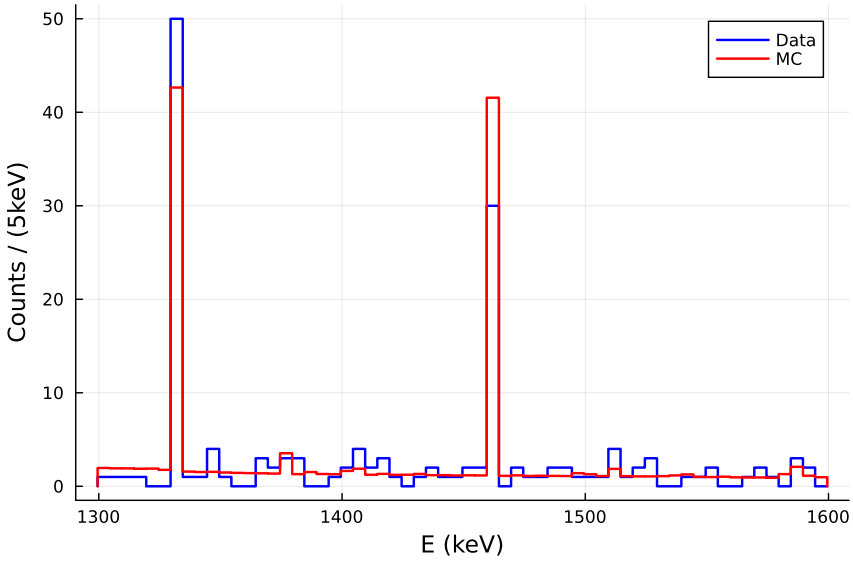


图 3：测量谱以蓝色分布表示，红色表示蒙特卡罗分布。

根据变量变换下的概率不变性相关联，因此 Y 的上限可转换为 R_K的下限。

后验分布 pdf 由贝叶斯定理给出

$$P(Y|data) = \frac{P(data|Y)\, P_0(Y))}{\int P(data|Y)\, P_0(Y) dY}\,,$$

似然函数取为泊松分布的乘积

$$P(data|Y) = \prod_{i=1}^{N} \frac{\lambda_i(Y)^{n_i}\, e^{-\lambda_i(Y)}}{n_i!}\,, \tag{14}$$

其中 n_i 为测量得到的箱内计数，期望值参数化为

$$\lambda_i(Y) = b_i^{MC} + \int_{\Delta E_i} f_S(E, Y)\, dE. \tag{15}$$

i号箱中的本底计数由蒙特卡罗模拟得到，表示为b_i^{MC}。 ΔE_i 是与第 i个箱对应的能量范围。 $f_S(E, Y)$是预期的信号分布形状。

表1：该表汇总了对效率谱进行最佳拟合后得到的参数，这些参数对应于对装置有显著贡献的各个组成部分。表中还列出了这些参数的统计误差。

$i=$	锗晶体	内层铜	铜块体 +板	铜屏蔽室	铅屏蔽
ξ_{i0}	$(4.82 \pm 0.03) \cdot 10^{-1}$	$(3.77 \pm 0.04) \cdot 10^{-2}$	$(2.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}$	$(-1.01 \pm 0.07) \cdot 10^{-5}$	$(-5.76 \pm 0.03) \cdot 10^{-4}$
ξ_{i1}	$(-4.42 \pm 0.03) \cdot 10^{-4}$	$(-2.48 \pm 0.03) \cdot 10^{-5}$	$(2.9 \pm 1.4) \cdot 10^{-7}$	$(7.8 \pm 0.1) \cdot 10^{-8}$	$(3.812 \pm 0.003) \cdot 10^{-6}$
ξ_{i2}	$(2.10 \pm 0.01) \cdot 10^{-7}$	$(1.03 \pm 0.01) \cdot 10^{-8}$	$(-3.1 \pm 0.5) \cdot 10^{-10}$	$(-2.07 \pm 0.06) \cdot 10^{-11}$	$(-2.728 \pm 0.001) \cdot 10^{-9}$
ξ_{i3}	$(-4.87 \pm 0.03) \cdot 10^{-11}$	$(-2.24 \pm 0.04) \cdot 10^{-12}$	$(5.7 \pm 1.6) \cdot 10^{-14}$	$(1.61 \pm 0.09) \cdot 10^{-15}$	$(9.036 \pm 0.004) \cdot 10^{-13}$
ξ_{i4}	$(4.32 \pm 0.07) \cdot 10^{-15}$	$(1.93 \pm 0.08) \cdot 10^{-16}$	$(-3.1 \pm 3.3) \cdot 10^{-18}$	-	$(-1.477 \pm 0.001) \cdot 10^{-16}$
ξ_{i5}	-	-	-	-	$(9.60 \pm 0.02) \cdot 10^{-21}$

4.1 Y的预期信号形状和先验

信号分布的形状通过对理论预期发射率加权得到，我们将其改写为

$$\begin{aligned} \frac{d\Gamma}{dE} &= Y \frac{N_{at} N_p^2 \beta_K}{E^{2/3}}, \\ \beta_K &:= \frac{\Gamma(2/3) \alpha c^2 t_p^{4/3}}{\sqrt{3} \pi \hbar^{1/3}}, \end{aligned} \tag{16}$$

将实验装置中各种材料（以 i标记）的探测效率函数对 i 求和，并乘以总采集时间（T_{exp}）

$$f_S(E, Y) = \frac{Y T_{\text{exp}} \beta_K}{E^{2/3}} \sum_i \alpha_i \epsilon_i(E). \tag{17}$$

效率函数通过对相应的蒙特卡罗模拟效率分布进行多项式拟合获得

$$\epsilon_i(E) = \sum_{j=0}^{d_i} \xi_{ij} E^j, \tag{18}$$

其中， ξ_{ij} 表示拟合参数矩阵， d_i 表示多项式展开的阶数。因子 α_i 取决于所分析的材料，定义如下：

$$\alpha_i = m_i \, n_i \, N_{pi}^2. \tag{19}$$

在公式（19）中， m_i 是装置组件的质量， n_i 是单位质量所含的原子数， N_{pi}是该材料中每种原子所含的质子数。通过对相应效率分布进行最佳多项式拟合得到的系数 ξ_{ij} 列于表1，并附有相应的统计误差。

考虑到对当前测量灵敏度的先验无知——当前测量可能给出比先前理论分析更强的下限 [1], ，也可能给出更弱的下限——我们选择对该物理参数采用均匀先验

$$[R_K^{\min}, R_K^{\max}] = [10^{-10}, 10^9] \, \text{m}. \tag{20}$$

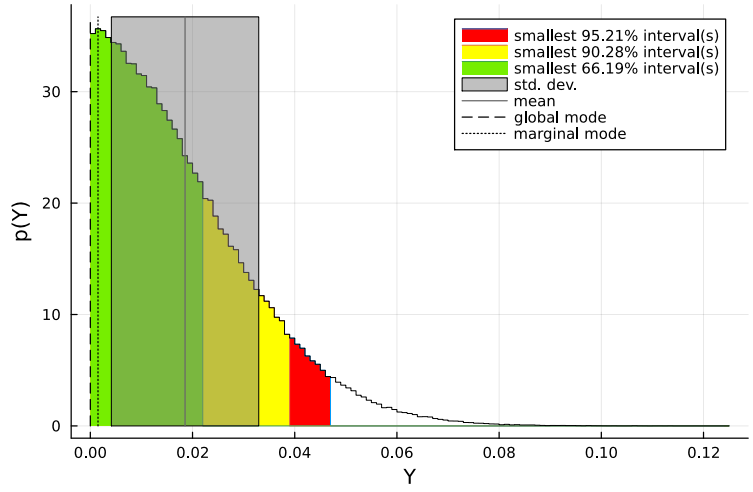


图4： $Y = 1/R_K^2$的后验概率密度函数。点线表示局部众数，虚线表示全局众数。绿色、黄色和红色区域分别表示对应于0.66、0.90和0.95概率的范围。

4.2 广义K´arolyh´azy模型的后验分布及相关长度的新界限

式（14）中的后验概率密度函数 如图4所示。随后，通过累积分布 $P(\mathcal{L})$，求解给定概率 Π下的以下积分方程，即可得到参数 Y 的上限 $\tilde{\mathcal{L}}$

$$\tilde{P}(\mathcal{L}) = \int_0^{\mathcal{L}} P(Y|data)\, dY = \Pi. \tag{21}$$

数值积分使用用于贝叶斯推断的高性能工具箱BAT完成[20]。后验分布通过马尔可夫链蒙特卡罗技术计算，采用4条链和 10^6 个样本。针对 R_K得到以下界限，对应的概率为$\Pi = 0.95$

$$R_K > 4.64\,\mathrm{m}, \tag{22}$$

这一新界限也显示在图1的排除区域中。考虑到理论下限 $R_K < 1.98$ m，我们可以排除 [1]中提出的广义K´arolyh´azy模型。

5 结论

在这项工作中，我们针对广义 K´arolyh´azy 引力诱导退相干模型所预言的自发辐射进行了高灵敏度搜寻。我们重点研究了度规张量中具有高斯空间相关性的噪声分量，并分析了在 LNGS 使用 VIP 锗探测器装置采集的数据。通过改进发射率的评估——明确纳入装置材料中质子和电子的贡献——并对测量谱进行详细的贝叶斯分析，我们得出了该模型空间相关长度的新下限： $R_K > 4.64$ m（95%置信水平）。

这一限制比此前的约束提高了一个数量级以上。结合理论要求——坍缩动力学必须能够有效地使宏观系统局域化，因此得到上限 $R_K < 1.98$ m——我们的结果排除了广义模型剩余的全部参数空间。因此我们得出结论：K´arolyh´azy 引力诱导退相干机制，即使采用其扩展高斯形式，也已被实验证伪。

尽管广义 K´arolyh´azy 框架并未引入波函数约化机制，但其可检验的实验预测与自发波函数坍缩模型的预测一致。具体而言，本文分析的模型在实验上等价于 CSL 的一个非马尔可夫版本。应用 K´arolyh´azy 时空不确定性，便可确定时间相关性（发生在与普朗克时间相当的时间尺度上）以及衰减率参数。因此，我们的实验分析也对该模型施加了限制，并将其排除。

更一般地说，我们的结果表明，为稀有事件搜索（如 VIP）开发的精密测量能够对量子理论的基础性修正（包括受量子引力启发的模型）进行决定性检验。随着探测器技术和背景抑制的不断进步，预计在不久的将来，我们将能够对更广泛类别的非马尔可夫坍缩模型、引力诱导退相干以及其他量子引力情景开展更加严格的检验。

致谢

本出版物得以完成，得益于约翰·坦普尔顿基金会提供的62099号资助。本出版物中表达的观点仅代表作者，并不一定反映约翰·坦普尔顿基金会的意见。我们感谢基础问题研究所和费策·富兰克林基金（硅谷社区基金会的捐赠者建议基金）提供的支持（资助编号：FQXi-RFP-CPW-2008 和 FQXi-MGA-2102），以及 H2020 FET TEQ 提供的支持（资助编号：766900）。我们感谢 INFN 研究所对本文所述研究的支持，尤其感谢 INFN 的大萨索地下实验室、INFN-LNGS 及其主任 Ezio Previtali、LNGS工作人员，以及低放射性实验室为自发辐射搜索所开展的实验工作。我们感谢奥地利科学基金会（FWF）通过资助项目 P25529-N20、项目 P 30635-N36 和 W1252-N27（粒子与相互作用博士生院）支持 VIP2项目。K.P. 感谢恩里科·费米研究中心 - 物理学历史博物馆与“恩里科·费米”研究与研究中心对其提供的支持（量子力学开放问题项目）。

参考文献

[1] Laria Figurato、Angelo Bassi 和 Sandro Donadi。论 K´arolyh´azy 模型的可检验性。《新物理学杂志》，26(1):013001，2024。[2] F Karolyhazy。《新丝绸》A42。宏观物体的引力与量子力学，390，1966。[3] F K´arolyh´azy、A Frenkel 和 B Luk´acs。论引力在波函数约化中可能发挥的作用。《空间与时间中的量子概念》，第109–128页，1986。[4] Gian Carlo Ghirardi、Alberto Rimini 和 Tullio Weber。微观与宏观系统的统一动力学。*Physical review D*，34(2):470，1986。

[5] Philip Pearle。将随机动力学态矢量约化与自发局域化相结合。*Physical Review A*，39(5):2277，1989。[6] Lajos Di´osi。宏观量子涨落普适约化的模型。*PhysicalReview A*，40(3):1165，1989。[7] Lajos Diosi。量子力学引力破坏的普适主方程。*Physics letters A*，120(8):377–381，1987。[8] GianCarlo Ghirardi、Renata Grassi 和 Alberto Rimini。涉及引力的连续自发约化模型。*Physical Review A*，42(3):1057，1990。[9] Gian Carlo Ghirardi、Philip Pearle 和 Alberto Rimini。希尔伯特空间中的马尔可夫过程与全同粒子系统的连续自发局域化。*Physical Review A*，42(1):78，1990。[10] Angelo Bassi 和 GianCarlo Ghirardi。动力学约化模型。*Physics Reports*，379(5- 6):257–426，2003。[11] Angelo Bassi、Kinjalk Lochan、Seema Satin、Tejinder P Singh 和 Hendrik Ulbricht。波函数坍缩模型、基础理论与实验检验。*Reviews of Modern Physics*，85(2):471，2013。[12] Sandro Donadi、Kristian Piscicchia、Catalina Curceanu、Lajos Di´osi、Matthias Laubenstein 和 Angelo Bassi。引力相关波函数坍缩的地下实验。*Nature Physics*，17(1):74–78，2021。[13] Sandro Donadi、Kristian Piscicchia、Raffaele Del Grande、Catalina Curceanu、Matthias Lauben- stein 和 Angelo Bassi。基于原子噪声诱导辐射发射得出的新连续自发定域模型界限。*The European Physical Journal C*，81(8):1–10，2021。[14] I. J. Arnquist、F. T. Avignone、A. S. Barabash、C. J. Barton、K. H. Bhimani、E. Blalock、B. Bos、M. Busch、M. Buuck、T. S. Caldwell、Y-D. Chan、C. D. Christofferson、P.-H. Chu、M. L. Clark、C. Cuesta、J. A. Detwiler、Yu. Efremenko、H. Ejiri、S. R. Elliott、G. K. Giovanetti、M. P. Green、J. Gruszko、I. S. Guinn、V. E. Guiseppe、C. R. Haufe、R. Henning、D. Hervas Aguilar、E. W. Hoppe、A. Hostiuc、I. Kim、R. T. Kouzes、T. E. Lannen V.、A. Li、A. M. Lopez、J. M. L´opez-Casta˜no、E. L. Martin、R. D. Martin、R. Massarczyk、S. J. Meijer、T. K. Oli、G. Othman、L. S. Paudel、W. Pettus、A. W. P. Poon、D. C. Radford、A. L. Reine、K. Rielage、N. W. Ruof、D. Tedeschi、R. L. Varner、S. Vasilyev、J. F. Wilkerson、C. Wiseman、W. Xu、C.-H. Yu 和 B. X. Zhu。搜索 Majorana Demonstrator 中波函数坍缩产生的自发辐射。*Phys. Rev. Lett.*，129:080401，2022年8月。[15] L Di´osi 和 B Luk´acs。计算 K´arolyh´azy 模糊时空产生的X射线信号。*PhysicsLetters A*，181(5):366–368，1993。[16] Nicola Bortolotti、Catalina Curceanu、Lajos Di´osi、Simone Manti 和 Kristian Piscicchia。量子坍缩模型中时空不确定性对时钟精度的基本极限。*Phys. Rev. Res.*，7:043166，2025年11月。[17] Kristian Piscicchia、Sandro Donadi、Simone Manti、Angelo Bassi、Maaneli Derakhshani、Lajos Di´osi 和 Catalina Curceanu。原子系统的X射线发射可区分占主导地位的动力学波函数坍缩模型。*Physical Review Letters*，132(25):250203，2024。

[18] Melissa Boswell、Yuen-Dat Chan、Jason A Detwiler、Padraic Finnerty、Reyco Henning、Victor M Gehman、Rob A Johnson、David V Jordan、Kareem Kazkaz、Markus Knapp 等。MAGE——面向低本底锗实验的 GEANT4 蒙特卡罗应用框架。《*IEEE*核科学汇刊》，58(3):1212–1220，2011。[19] Sea Agostinelli、John Allison、K al Amako、John Apostolakis、Henrique Araujo、Pedro Arce、Makoto Asai、D Axen、Swagato Banerjee、GJNI Barrand 等。GEANT4——一种模拟工具包。《核仪器与方法物理研究*A*辑：加速器、能谱仪、探测器及相关设备》，506(3):250–303，2003。[20] Oliver Schulz、Frederik Beaujean、Allen Caldwell、Cornelius Grunwald、Vasyl Hafych、Kevin Kr¨oninger、Salvatore La Cagnina、Lars R¨ohrig 和 Lolian Shtembari。BAT.jl：一种基于 Julia 的贝叶斯推断工具。《*SN*计算机科学》，2(3):1–17，2021。