

Évolution thermodynamique du vide : unification de l'univers $R_h=ct$, de l'holographie et de la gravité émergente

Stéphane Wojnow

Chercheur indépendant,

<https://orcid.org/0000-0001-8851-3895>

7 avenue Georges Dumas, 87000 Limoges, France

30 Janvier 2026, révisé 30 Mars 2026

Mail : wojnow.stephane@gmail.com

Mots clés : $R_h = ct$ Cosmologie ; Catastrophe du vide ; Principe holographique ; Constante cosmologique variable ; Gravité émergente ; Thermodynamique à l'échelle de Planck.

Abstract

Nous explorons la cohérence thermodynamique d'un univers évoluant avec une constante cosmologique variable, reliant l'échelle de Planck à l'époque actuelle. Partant de l'observation que la densité d'énergie de masse de Planck est égale à la densité d'énergie du vide de la théorie quantique des champs (QFT) au temps de Planck t_{pl} , nous démontrons que dans le modèle cosmologique $R_h = ct$, un univers « quasi-de Sitter », la densité d'énergie du vide évolue inversement proportionnellement au carré du temps t^{-2} , reflétant l'évolution de la densité de matière. Cette mise à l'échelle résout naturellement la « catastrophe du vide » et le problème de coïncidence. Nous intégrons les contraintes thermodynamiques dérivées par Haug et Tatum (2025), le principe holographique de Li et l'interprétation géométrique de la constante cosmologique Λ proposée par Özer, Taha et Hu. Enfin, nous discutons de la manière dont ces relations soutiennent un cadre de gravité émergente à la Verlinde, où Λ est identifié comme une propriété géométrique de l'horizon de Sitter plutôt que comme un fluide d'énergie noire distinct.

1. Introduction

La « catastrophe du vide », c'est-à-dire l'écart d'environ 120 ordres de grandeur entre la valeur observée de la constante cosmologique et la densité d'énergie du vide théorique prédite par la théorie quantique des champs (QFT), reste l'un des problèmes les plus importants de la physique. La cosmologie standard Λ CDM suppose une densité d'énergie noire constante, ce qui conduit au problème de la coïncidence. Cependant, d'autres modèles proposant une densité d'énergie du vide dynamique offrent une solution. Cet article examine l'évolution thermodynamique de l'univers depuis l'époque de Planck jusqu'à nos jours, en utilisant le modèle d'expansion linéaire $R_h = ct$. En synthétisant les travaux récents de Wojnow 2026 et Haug & Tatum 2025,

ainsi que les concepts fondamentaux de Melia, Li et Verlinde, nous plaidons en faveur d'une interprétation géométrique et thermodynamique de Λ qui reste cohérente tout au long de l'histoire cosmique.

2. Discussion

L'échelle de Planck et la catastrophe du vide

Il est bien établi qu'à la limite fondamentale de mesure, la densité d'énergie est définie par la relation $m_{pl}c^2/V_{pl} = F_{pl} \cdot l_{pl}^{-2} J/m^3$, où l_{pl}^{-2} correspond à la densité d'énergie du vide dans la QFT. Par conséquent, la densité d'énergie du vide dans un univers primordial de Sitter est identique à la densité d'énergie de la matière au temps de Planck t_{pl} . Comme l'a noté Wojnow 2021, cela suggère que Ω_Λ quantifie essentiellement la « catastrophe du vide » dans le cadre $R_h = ct$ à l'époque de Planck. En fixant les conditions initiales à t_{pl} où ces densités sont unifiées, nous établissons une base thermodynamique pour l'évolution cosmique qui ne nécessite pas de réglage fin, mais qui résulte plutôt des conditions géométriques limites de l'univers primitif.

Mise à l'échelle de la densité dans l'univers $R_h=ct$

À la suite des travaux de Melia, l'univers $R_h = ct$ décrit une expansion « quasi-de Sitter » où le rayon de Hubble R_h coïncide avec l'horizon des événements. Une conséquence de ce modèle est que la densité d'énergie totale ρ , évolue de manière proportionnelle à t^{-2} . Nous proposons que, dans ce cadre, la densité d'énergie du vide de la QFT ne soit pas constante, mais couplée à la géométrie de l'horizon, décroissant ainsi proportionnellement à l'inverse de t^2 . Cette évolution implique que la densité d'énergie du vide suit exactement la densité d'énergie de la matière $\rho_{vac} = \rho_m$, les rendant comparables à toutes les époques. Cette mise à l'échelle dynamique reflète le comportement du modèle standard, mais impose un équilibre thermodynamique strict, permettant d'utiliser directement la température du fond cosmologique micro-ondes (CMB) dans le formalisme thermodynamique $R_h = ct$.

Holographie et constante cosmologique géométrique

Cette échelle t^2 présente un lien profond avec le principe holographique de l'énergie noire de Li, qui postule que la densité d'énergie du vide est déterminée par la surface de l'horizon des événements futurs. Ce concept a été anticipé de manière efficace par Özer et Taha, par exemple dans la révision de 2011 de leurs travaux fondamentaux, qui ont proposé un modèle de « constante cosmologique variable ». Ils ont explicitement posé la relation $\Lambda = 3H^2$, créant un scénario dans lequel l'univers reste perpétuellement dans un état « quasi-de Sitter ». Dans cette perspective, l'échelle d'énergie du vide n'est pas un paramètre fluide arbitraire, mais est définie par l'échelle de l'horizon cosmique lui-même.

La Λ effective et l'interprétation géométrique

En développant la nature géométrique du vide, Mu-Lin Yan et al. 2012 et Wojnow 2026 ont formalisé cette relation, indiquant que la constante cosmologique effective est donnée par :

$$\Lambda_{eff} = \frac{3}{(ct)^2} = \frac{3}{Rh^2} = \frac{3H^2}{c^2} \quad (1)$$

où, (voir Haug, Tatum 2025):

$$Rh = 2 l_p \frac{T_p^2}{(8 \pi T_{CMB})^2} \quad (2)$$

plus précisément, pour correspondre à Λ CDM :

$$\Lambda = \Lambda_{eff} \Omega_\Lambda = \frac{3H^2}{c^2} \Omega_\Lambda \quad (3)$$

Ici, le rayon de l'espace de Sitter est identifié comme $R = ct_0$. Cette formulation est cruciale car elle réidentifie Λ non pas comme un mystérieux « fluide d'énergie noire » exerçant une pression négative, mais comme une propriété géométrique intrinsèque de l'espace de Sitter. Cela correspond à la contrainte $R_h = ct$, suggérant que ce que nous percevons comme une expansion accélérée ou sa source est une manifestation de la thermodynamique de l'horizon spatio-temporel.

Contraintes thermodynamiques indépendantes de de Sitter

La cohérence thermodynamique de cette approche est encore renforcée par l'analyse récente de Haug et Tatum 2025. En utilisant des équations de type Friedmann exprimées sous forme thermodynamique, ils ont dérivé des contraintes plus strictes sur la densité critique de l'univers. Ils sont notamment parvenus au même comportement de « constante cosmologique variable » indépendamment des hypothèses spécifiques de Sitter utilisées par Melia ou Wojnow. Leurs travaux confirment que lorsque l'univers est traité comme un système thermodynamique, la mise à l'échelle de Λ suit naturellement l'évolution $H(t)^2 = t^{-2} = 1/t^2$, ce qui soutient l'hypothèse d'expansion linéaire à partir d'une dérivation purement thermodynamique.

Gravité émergente et force entropique

Enfin, cette synthèse trouve un fondement théorique naturel dans la théorie de la gravité émergente d'Erik Verlinde. Si la gravité n'est pas une force fondamentale, mais un phénomène entropique découlant de la structure informationnelle de l'espace-temps, alors l'association de Λ avec la surface de l'horizon et la température est

inévitables. Selon Verlinde, la composante « énergie noire » est simplement le résultat de la contribution de la loi du volume à l'entropie de l'espace de de Sitter. Le modèle $R_h = ct$, avec son échelle holographique et ses définitions thermodynamiques de la densité où ρ_{vac} décroît avec la gravité de la surface de l'horizon, décrit essentiellement un univers régi par la gravité émergente, unifiant le vide à l'échelle de Planck avec le flux macroscopique de Hubble.

3. Conclusion

Nous avons présenté une image cohérente où la « catastrophe du vide » est résolue en traitant la constante cosmologique comme une variable, un scalaire géométrique proportionnel à H^2 . De l'égalité des forces à l'échelle de Planck $m_{pl}c^2/V_{pl} = F_{pl} \cdot l_{pl}^{-2} J/m^3$ à l'époque actuelle, la densité d'énergie du vide dans un univers $R_h = ct$ suit la densité de matière comme t^{-2} . Ce modèle est soutenu par le principe holographique, l'identification géométrique de Λ par Özer, Taha et Hu, et les dérivations thermodynamiques indépendantes de Haug et Tatum 2025. En fin de compte, cela suggère que l'univers est un système holographique de gravité émergente où Λ représente la courbure de l'horizon plutôt qu'un fluide exotique.

References

1. Haug, E.G., & Tatum, E.T. 2025. Friedmann type equations in thermodynamic form lead to much tighter constraints on the critical density of the universe. *Discover Space*, 1, 129. <https://doi.org/10.1007/s11038-025-09566-y>
2. Wojnow, S. 2026. A $R_h = ct$ Thermodynamic Cosmology Approach: Connecting the Effective Cosmological Constant and the Cosmic Microwave Background Temperature via the Haug–Tatum et al.–Wojnow Relation. *Preprint*. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35217.70245>
3. Melia, F. 2012. The Cosmic Horizon. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19906.x>
4. Li, M. 2004. A model of holographic dark energy. *Physics Letters B*, 6031-2. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2004.10.014>.
5. Özer, M., & Taha, M. O. 1987/2011. A model of the universe with time-dependent cosmological constant. *Nuclear Physics B*. [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(87\)90128-3](https://doi.org/10.1016/0550-3213(87)90128-3)
6. Verlinde, E. 2011. On the Origin of Gravity and the Laws of Newton. *Journal of High Energy Physics*. [https://doi.org/10.1007/JHEP04\(2011\)029](https://doi.org/10.1007/JHEP04(2011)029)
7. Mu-Lin Yan, Sen Hu, Wei Huang, Neng-Chao Xiao 2011, On determination of the geometric cosmological constant from the OPERA experiment of superluminal neutrinos. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1112.6217>
8. Wojnow S. 2021 Interpretation and Solution of the Cosmological Constant Problem. <https://vixra.org/pdf/2104.0179v3.pdf>