

# Singularités gravitationnelles

Nicolae Sfetcu

08.08.2019

Sfetcu, Nicolae, « Singularités gravitationnelles », SetThings (8 août 2019), URL = <https://www.setthings.com/fr/singularites-gravitationnelles/>

Email: [nicolae@sfetcu.com](mailto:nicolae@sfetcu.com)



Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>.

Une traduction partielle de :

Sfetcu, Nicolae, " The singularities as ontological limits of the general relativity ", SetThings (June 1, 2018), MultiMedia Publishing (ed.), DOI: 10.13140/RG.2.2.14521.06241/1, ISBN: 978-606-033-136-0, URL = <https://www.setthings.com/en/e-books/the-singularities-as-ontological-limits-of-the-general-relativity/>

Dans la théorie classique de la gravité de Newton, il y a la possibilité fondamentale d'une singularité. Aucun signal ne peut se propager à l'intérieur d'une singularité, mais son influence gravitationnelle est présente en permanence à l'extérieur et ne dépend que de la quantité totale de masse, du moment cinétique et de la charge électrique de la singularité. Les singularités peuvent être détectées par l'influence de leur forte gravité dans le voisinage immédiat.

Dans la théorie classique de la gravitation de Newton, un argument énergétique nous dit qu'il existe une vitesse de fuite à la surface de tout objet.

Dans la théorie newtonienne, la gravité est décrite par le potentiel. De même, dans la relativité générale (RG), la solution externe symétrique (indépendante du temps), appelée espace-temps de Schwarzschild, ne dépend que de la masse de l'objet interne. Le rayon de Schwarzschild dans la relativité générale est le rayon maximum d'une surface en dessous de laquelle la lumière ne peut

## Nicolae Sfetcu : Singularités comme limites ontologiques de la relativité générale

s'échapper à l'extérieur. Ce « rayon de l'horizon » est, par coïncidence, identique au rayon critique des objets dans les « singularités » newtoniennes.

Les singularités gravitationnelles dans la relativité générale sont des emplacements dans l'espace-temps où le champ gravitationnel devient infini. Les courbes scalaires invariantes de l'espace-temps incluent une mesure de la densité de la matière. Certains physiciens et philosophes estiment que, du fait que la densité de la matière tend vers l'infini dans la singularité, les lois de l'espace-temps ne sont plus valables là-bas.

Le Big Bang (BB) est une singularité gravitationnelle acceptée presque unanimement en astrophysique et en cosmologie, en tant que premier état de l'univers. (Wald 1984) Les lois connues de la physique ne sont pas valables dans ce cas non plus. (S. Hawking 2012)

La relativité générale prédit que tout objet s'effondrant au-delà d'un certain point (pour les étoiles, le rayon de Schwarzschild) forme un trou noir (TN) avec une singularité, avec une limite d'action définie par un horizon d'événements (HE). (Curiel and Bokulich 2018) Les théorèmes de singularité de Penrose-Hawking stipulent que, dans ce cas, les géodésiques aboutissent dans la singularité. (Moulay 2012)

La théorie de la gravitation quantique à boucles suggère que les singularités ne peuvent pas exister (Gambini, Olmedo, and Pullin 2013) car, du fait des effets de la gravité quantique, il existe une distance minimale au-delà de laquelle la force de gravité n'augmente plus.

La solution de Schwarzschild aux équations du RG décrit un TN non tournant, non chargé. Dans les systèmes de coordonnées appropriés, une partie de la métrique devient infinie à l'origine. Dans un TN en rotation (TN Kerr), la singularité apparaît sur un anneau, qui pourrait théoriquement devenir un « trou de ver ». (Wald 1984)

Un type particulier de singularité est la « singularité vide » qui, bien qu'interdit par l'hypothèse de la censure cosmique, en 1991, les physiciens Stuart Shapiro et Saul Teukolsky ont simulé sur

## Nicolae Sfetcu : Singularités comme limites ontologiques de la relativité générale

ordinateur un plan de rotation de la poussière cosmique permettant à RG de permettre des singularités « vides ». (Goswami, Joshi, and Singh 2005) En fait, l'hypothèse de la censure cosmique stipule qu'il peut exister des singularités réalistes (sans symétries parfaites, matière avec des propriétés réalistes), mais qu'elles sont cachées derrière l'horizon et donc invisibles<sup>1</sup>. (Wald 1984)

Stephen Hawking a suggéré que TN puisse émettre de l'énergie, préservant ainsi l'entropie et résolvant les problèmes d'incompatibilité avec la deuxième loi de la thermodynamique. Cela signifie que les TN ont une vie cosmique limitée.

Paul Townsend affirme que les singularités sont une caractéristique générique de la GR et sont inévitables si un organisme a dépassé un certain stade (Townsend 1997) et, aussi, au début d'une vaste catégorie d'univers en expansion. (S. W. Hawking 1966) La structure générique de ces entités (par exemple, la conjecture BKL) est actuellement à l'étude. (Berger 2002)

En ce qui concerne la définition des singularités, le désaccord est clair : bien que cela modifie la géométrie locale, il semble difficile d'en parler comme d'une chose qui se trouve à un certain endroit dans l'espace-temps, c'est pourquoi certains physiciens et philosophes proposent de parler de l'« espace-temps singulier » au lieu de « singularités ». Les définitions les plus importantes font référence soit à des chemins incomplets, soit à l'idée de « points manquants » dans l'espace-temps, soit à une idée combinant les deux concepts ci-dessus, respectivement d'une structure singulière à comportement « pathologique » (déformation de l'espace-temps qui se manifeste lui-même comme un champ gravitationnel). (Curiel and Bokulich 2018)

---

<sup>1</sup> Les restrictions des singularités du futur excluent les singularités initiales, telles que le Big Bang, qui sont en principe visibles pour les observateurs à un moment cosmique ultérieur. La conjecture de la censure cosmique a été présentée pour la première fois par Penrose dans un article datant de 1969. (Penrose 1969)

## Trous noirs

Les trous noirs (TN) soulèvent des problèmes conceptuels. Bien que ce soient des régions de l'espace-temps, les TN sont aussi des entités thermodynamiques, avec une température et une entropie ; et l'évolution des TN est apparemment en conflit avec la physique quantique standard car elle exclut une entropie croissante. (Curiel and Bokulich 2018)

Au centre d'un TN dans la GR, il y a une singularité gravitationnelle, une région dans laquelle la courbure de l'espace-temps devient infinie. La singularité contient toute la masse de TN, ce qui donne une densité infinie. (Carroll and Carroll 2004) Dans le cas d'un trou noir chargé (Reissner-Nordström) ou rotatif (Kerr), il est possible d'éviter la singularité, mais apparaît la possibilité hypothétique de sortir du TN dans un espace-temps différent, le TN agissant comme un trou de ver, et donc la possibilité de voyager dans un autre univers ou dans le temps. Droz considère cette possibilité uniquement comme théorique, car toute perturbation la détruirait. (Droz, Israel, and Morsink 1996) La possibilité de l'existence des courbes de temps fermées autour de la singularité Kerr conduit à des problèmes de causalité tels que le paradoxe du grand-père. (Sfetcu 2018)

Selon Kerr, à l'heure actuelle la plupart des chercheurs dans le domaine estiment qu'il n'y a pas d'obstacle à la formation d'un HE d'un TN. (Kerr 2007) Penrose a démontré l'inévitabilité des singularités dans certaines conditions. (Penrose 1965) La solution de Kerr, le théorème de calvitie et les lois de la thermodynamique du TN ont montré que les propriétés physiques du TN étaient simples et intelligibles. (S. W. Hawking and Penrose 1970)

Le TN de masse stellaire est formé par l'effondrement gravitationnel des étoiles lourdes. Une autre théorie est celle du début du TN après l'effondrement des étoiles dans l'univers primitif, et que des TN supermassifs pourraient s'être formés à partir de l'effondrement direct des nuages de gaz dans l'univers primitif. (Pacucci et al. 2016)

## Nicolae Sfetcu : Singularités comme limites ontologiques de la relativité générale

Le 14 septembre 2015, l'observateur de LIGO a observé l'existence d'ondes gravitationnelles (LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration 2016) issues de la fusion de deux TN, ce qui constitue la preuve la plus concrète de l'existence des TN jusqu'à présent. Le 15 juin 2016, une deuxième détection d'un événement d'onde gravitationnelle provenant de la collision des TN a été annoncée. (Overbye 2018) En avril 2018, LIGO a observé six événements d'ondes gravitationnelles résultant de la fusion des TN.

### Horizon des événements

La caractéristique déterminante d'un TN est l'apparition d'un horizon des événements (HE) - une limite dans l'espace à travers laquelle la matière et la lumière ne peuvent passer que dans une direction, vers l'intérieur de la masse du trou noir. (Arnowitt, Deser, and Misner 1962)

La surface du HE est au rayon de Schwarzschild pour un corps non-rotatif proportionnel à sa masse. La masse minimale requise pour qu'une étoile s'effondre au-delà du HE est la limite Tolman-Oppenheimer-Volkoff, qui est d'environ trois masses solaires. Les astronomes ne peuvent détecter que les disques d'accrétion autour des trous noirs, où la matière se déplace à une vitesse telle que le frottement crée un rayonnement de haute énergie pouvant être détecté. De plus, une partie du matériau de ces disques d'accrétion est forcée de s'écouler le long de l'axe de rotation du TN, créant des jets visibles lorsqu'ils interagissent avec la matière.

Le concept de masse dans la GR est un problème, car la théorie ne fournit pas une définition unique du terme, mais plusieurs définitions différentes (énergie de Hawking, énergie de Geroch, impulsion d'énergie quasi-locale Penrose, etc.) applicable dans différentes circonstances. Fondamentalement, il est impossible de trouver une définition générale de la masse totale du système (ou de l'énergie) dans la GR, car « l'énergie du champ gravitationnel » ne fait pas partie du tenseur impulsion-énergie. On espère que dans l'avenir on utilisera une masse quasi locale bien définie pour donner une formulation plus précise de l'inégalité de Penrose pour les trous noirs (reliant la masse de

TN à l'horizon) et pour trouver une version quasi locale des lois de la mécanique des trous noirs. (Szabados 2004)

### **Big Bang**

La théorie de Big Bang (BB) en cosmologie explique la formation de l'univers (Overbye 2017) et son expansion à partir d'un état initial de densité et de température très élevées. BB explique un large éventail de phénomènes, notamment l'abondance d'éléments légers, le fond diffus cosmologique, la structure à grande échelle et la loi de Hubble. (Wright 2009) Fondamentalement, BB est une singularité initiale, (Roos 2008) la « naissance » de l'univers.

Le problème est que, bien que ces résultats établissent l'existence d'une singularité initiale, ils ne fournissent pas beaucoup d'informations sur sa structure. Il existe des résultats partiels pour les classes restreintes de solutions, par exemple les simulations numériques, mais l'image résultante de la singularité initiale contraste avec celle des modèles FLRW. De plus, il peut y avoir des singularités non scalaires. (Ellis and King 1974)

À propos du moment zéro du Big Bang, John Heil demande : « Qu'est-ce que n'est pas rien, exactement ? Qu'est-ce qui ne serait pas rien ? » (Heil 2013, 174) Heil suggère que la réponse dépend de notre compréhension du Big Bang. Bruce Reichenbach (Reichenbach 2017) déclare que si nous inversons la direction de notre vision et regardons dans le temps, nous découvrons que l'univers atteint un état de compression où la densité et la force gravitationnelle sont infinies. Cette singularité unique est le début de l'univers - matière, énergie, espace, temps et toutes lois physiques. Dès que le Big Bang aura initié les lois de la physique elle-même, aucune explication scientifique ou physique de cette singularité ne peut être attendue. Compte tenu de la GR, le Big Bang n'est pas un événement. Un événement se déroule dans un contexte spatio-temporel. Mais le Big Bang n'a pas ce contexte. Par conséquent, le Big Bang ne peut être considéré comme un événement physique qui se produit à un moment donné. Grünbaum soutient cette position en affirmant que les événements ne peuvent

## Nicolae Sfetcu : Singularités comme limites ontologiques de la relativité générale

résulter que d'autres événements : « Puisque la singularité du Big Bang est techniquement un non-événement et que  $t = 0$  n'est pas un moment *bona fide* de son apparition, la singularité ne peut être l'effet d'aucune cause causes en cas de causalité de l'événement ou de causalité de l'agent ... la singularité  $t = 0$  ne peut avoir de cause. » (Grunbaum 1994)

Silk propose d'éliminer l'objection de Grünbaum en élargissant la notion d'« événement » en éliminant l'exigence qu'elle soit relationnelle, dans un contexte spatio-temporel. (Silk 2001, 456) Dans le Big Bang, l'univers espace-temps commence et continue d'exister dans un temps mesurable après la singularité initiale. Ainsi, le Big Bang peut être considéré soit comme l'événement du début de l'univers, soit comme un état dans lequel « deux points quelconques de l'univers observable étaient arbitrairement proches l'un de l'autre ».

Basé sur la logique de Grünbaum que la singularité du Big Bang ne soit pas un événement, Bruce Reichenbach explique que, dans la mesure où les événements n'apparaissent que d'autres événements, les événements postérieurs au Big Bang ne peuvent en être l'effet, ce qui ne donne lieu à aucun événement, ce qui est absurde. (Reichenbach 2017)

### **Y a-t-il des singularités ?**

Il n'existe pas une définition largement acceptée de la singularité. La physique devrait dicter quelle définition de la singularité utiliser, bien que plusieurs définitions puissent coexister sans problèmes.

Erik Curiel et Peter Bokulich soulèvent la question de savoir ce que signifierait attribuer « existence » à une structure singulière dans l'une des possibilités disponibles. (Curiel and Bokulich 2018) Ils analysent la possibilité de l'existence des chemins incomplets dans un espace-temps relativiste maximal en un point de l'espace, où le chemin pourrait être prolongé en le traversant. Cependant, ils tiennent compte du fait que s'il y a un échec dans nos conceptions d'une singularité spatiale, l'échec

## Nicolae Sfetcu : Singularités comme limites ontologiques de la relativité générale

ne se produit pas dans l'espace cosmique du monde actuel, mais plutôt dans la description théorique de l'espace-temps.

Les ondes gravitationnelles sont des perturbations de la courbure espace-temps générées par les masses accélérées, prédites par Einstein (propagation à la vitesse de la lumière des modifications des courbes espace-temps dues aux objets en mouvement accéléré). (Einstein 1918) Au fur et à mesure du passage de l'onde, les distances entre objets augmentent et diminuent à une fréquence correspondant à celle de l'onde. Les ondes gravitationnelles transportent de l'énergie sous forme de rayonnement gravitationnel. Les systèmes d'étoiles à neutrons binaires sont supposés être une source puissante d'ondes gravitationnelles pendant leur fusion, en raison de la très forte accélération de leurs masses. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration et al. 2017)

Les ondes gravitationnelles nous permettent d'observer la fusion des TN et éventuellement d'autres objets exotiques dans l'univers lointain. (Krauss, Dodelson, and Meyer 2010)

Dans la géométrie espace-temps, les modèles FLRW avec la matière ordinaire ont une singularité dans un temps fini dans le passé. Les théorèmes de singularité (S. W. Hawking and Ellis 2008) établissent que l'existence d'une singularité initiale est robuste : au lieu d'être spécifiques à FLRW ou à d'autres modèles très symétriques, les singularités sont génériques dans des modèles qui vérifient des hypothèses physiques plausibles. (Smeenk and Ellis 2017)

Les théorèmes de singularité établis dans les années 1960 (S. W. Hawking and Ellis 2008) montrent que l'univers est fini dans le passé dans une vaste classe de modèles cosmologiques. Les particularités du passé, indiquées par l'existence de certaines géodésies non extensibles de longueur limitée, doivent être présentes dans les modèles comportant un certain nombre de caractéristiques plausibles. Intuitivement, en extrapolant vers l'arrière à partir de la présente, une géodésique non extensible atteint, à une distance finie, un bord au-delà duquel elle ne peut pas être étendue. Il n'y a pas de « temps cosmique » défini de manière unique, mais la longueur maximale de ces courbes reflète



l'époque finie de l'univers. Les théorèmes de singularité s'appliquent plausiblement à l'univers observé, dans le domaine de la relativité générale. (Smeenk and Ellis 2017)

### Bibliographie

- Arnowitt, Richard, Stanley Deser, and Charles W. Misner. 1962. "The Dynamics of General Relativity." *General Relativity and Gravitation* 40 (9): 1997–2027. <https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1>.
- Berger, Beverly K. 2002. "Numerical Approaches to Spacetime Singularities." <https://doi.org/10.12942/lrr-2002-1>.
- Carroll, Sean, and Sean M. Carroll. 2004. *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. Addison Wesley.
- Curiel, Erik, and Peter Bokulich. 2018. "Singularities and Black Holes." In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Summer 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2018/entries/spacetime-singularities/>.
- Droz, S., W. Israel, and S. M. Morsink. 1996. "Black Holes: The inside Story." *Physics World* 9: 34–37. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1996PhyW....9...34D>.
- Einstein, Albert. 1918. *Über Gravitationswellen*. Akademie der Wissenschaften.
- Ellis, G. F. R., and A. R. King. 1974. "Was the Big Bang a Whimper?" *Communications in Mathematical Physics* 38 (2): 119–56. <https://doi.org/10.1007/BF01651508>.
- Gambini, Rodolfo, Javier Olmedo, and Jorge Pullin. 2013. "Quantum Black Holes in Loop Quantum Gravity." <https://doi.org/10.1088/0264-9381/31/9/095009>.
- Goswami, Rituparno, Pankaj S. Joshi, and Parampreet Singh. 2005. "Quantum Evaporation of a Naked Singularity." <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.031302>.
- Grunbaum, Adolf. 1994. "Some Comments on William Craig's 'Creation and Big Bang Cosmology'." *Philosophia Naturalis* 31 (2): 225–236.
- Hawking, S. W. 1966. "The Occurrence of Singularities in Cosmology." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 294 (1439): 511–21. <http://www.jstor.org/stable/2415489>.
- Hawking, S. W., and G. F. R. Ellis. 2008. *The Large Scale Structure of Space-Time*. 21. printing. Cambridge Monographs on Mathematical Physics. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Hawking, S. W., and R. Penrose. 1970. "The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 314 (1519): 529–48. <http://www.jstor.org/stable/2416467>.
- Hawking, Stephen. 2012. "The Beginning of Time." Stephen Hawking. 2012. <http://www.hawking.org.uk/the-beginning-of-time.html>.
- Heil, John. 2013. "Contingency." *Goldschmidt* 2013.
- Kerr, Roy P. 2007. "Discovering the Kerr and Kerr-Schild Metrics." *ArXiv E-Prints* 0706: arXiv:0706.1109. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007arXiv0706.1109K>.
- Krauss, Lawrence M., Scott Dodelson, and Stephan Meyer. 2010. "Primordial Gravitational Waves and Cosmology." *Science (New York, N.Y.)* 328 (5981): 989–92. <https://doi.org/10.1126/science.1179541>.
- LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, et al. 2017. "GW170817: Observation of

- Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral.” *Physical Review Letters* 119 (16): 161101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101>.
- LIGO Scientific Collaboration, and the Virgo Collaboration. 2016. “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger.” *Physical Review Letters* 116 (6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
- Moulay, Emmanuel. 2012. *The Universe and Photons*. FQXi Foundational Questions Institute. [http://www.fqxi.org/data/essay-contest-files/Moulay\\_Photon\\_2.pdf](http://www.fqxi.org/data/essay-contest-files/Moulay_Photon_2.pdf).
- Overbye, Dennis. 2017. “Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast?” *The New York Times*, 2017, sec. Science. <https://www.nytimes.com/2017/02/20/science/hubble-constant-universe-expanding-speed.html>.
- . 2018. “Scientists Hear a Second Chirp From Colliding Black Holes.” *The New York Times*, 2018, sec. Science. <https://www.nytimes.com/2016/06/16/science/ligo-gravitational-waves-einstein.html>.
- Pacucci, Fabio, Andrea Ferrara, Andrea Grazian, Fabrizio Fiore, Emanuele Giallongo, and Simonetta Puccetti. 2016. “First Identification of Direct Collapse Black Hole Candidates in the Early Universe in CANDELS/GOODS-S.” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459 (2): 1432–39. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw725>.
- Penrose, Roger. 1965. “Gravitational Collapse and Space-Time Singularities.” *Physical Review Letters* 14: 57–59. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.14.57>.
- Reichenbach, Bruce. 2017. “Cosmological Argument.” In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmological-argument/>.
- Roos, Matts. 2008. “Expansion of the Universe - Standard Big Bang Model.” *ArXiv E-Prints* 0802: arXiv:0802.2005. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008arXiv0802.2005R>.
- Sfetcu, Nicolae. 2018. “Buclele Cauzale În Călătoria În Timp.” <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21222.52802>.
- Silk, Joseph. 2001. *The Big Bang, Third Edition*. Subsequent edition. New York, NY: W H Freeman & Co.
- Smeenk, Christopher, and George Ellis. 2017. “Philosophy of Cosmology.” In *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edited by Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmology/>.
- Szabados, László B. 2004. “Quasi-Local Energy-Momentum and Angular Momentum in GR: A Review Article.” *Living Reviews in Relativity* 7: 4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2004-4>.
- Townsend, P. K. 1997. “Black Holes.” <https://arxiv.org/abs/gr-qc/9707012>.
- Wald, Robert M. 1984. “General Relativity, Wald.” 1984. <http://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/G/bo5952261.html>.
- Wright, E. L. 2009. “Frequently Asked Questions in Cosmology.” 2009. [http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology\\_faq.html#BBevidence](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html#BBevidence).