Philosophia Scientiae

Travaux d'histoire et de philosophie des sciences

15-2 | 2011

La syllogistique de Łukasiewicz

La constante cosmologique et le déploiement de l'espace

Bertrand Berche

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/659>

DOI : 10.4000/philosophiascientiae.659

ISSN : 1775-4283

Éditeur

Éditions Kimé

Édition imprimée

Date de publication : 1 septembre 2011

Pagination : 123-135

ISBN : 978-2-84174-557-9

ISSN : 1281-2463

Référence électronique

Bertrand Berche, « La constante cosmologique et le déploiement de l'espace », *Philosophia Scientiae* [En ligne], 15-2 | 2011, mis en ligne le 01 septembre 2014, consulté le 03 novembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/659> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.659>

Tous droits réservés

La constante cosmologique et le déploiement de l'espace

Bertrand Berche

Institut Jean Lamour, UMR CNRS 7196,
Université Henri Poincaré, Nancy 1 (France)

Résumé : On discute dans cette note le rôle joué par la constante cosmologique dans le modèle cosmologique standard et quelques scénarios alternatifs proposés dans la cosmologie moderne depuis la découverte de l'accélération de l'expansion cosmique.

Abstract: In this contribution we discuss the role of the cosmological constant in the standard cosmological model as well as some alternative scenarii proposed in modern cosmology since the discovery of the acceleration of the Universe expansion.

Avant toute chose, je souhaite exprimer une pensée particulière pour une amie très chère, Catherine Dufour, disparue récemment. Notre collègue était une physicienne reconnue et s'était engagée ces dernières années, en plus de ses activités dans le domaine du magnétisme, dans une formation en philosophie. Son rôle déterminant a permis d'entretenir des liens entre philosophes ou historiens des sciences d'une part et physiciens ou mathématiciens d'autre part. L'idée originale d'un atelier de réflexion épistémologique, qui s'est tenu à Nancy en 2008, 2009 et 2010, lui revient entièrement. Et elle a notamment suscité la présente contribution. Cathy, je rédige ici ces quelques lignes en reconnaissance de ce que tu nous as apporté, dans ce domaine, mais aussi bien au-delà.

1 Introduction

Cosmological constant et *dark energy* sont deux expressions qui recouvrent des notions intimement liées. Leur emploi n'est toutefois ni

totallement équivalent ni exempt d'un certain parti pris dans un débat qui passionne la communauté des cosmologistes et des physiciens des hautes énergies depuis maintenant un peu plus de dix ans¹. Dans cette courte note, on se propose de revisiter les grandes étapes qui ont jalonné la brève histoire de la constante cosmologique, de son introduction il y a près d'un siècle à son reniement qui a rapidement suivi, de sa réapparition triomphale sur la scène cosmologique à la fin du XX^e siècle au fameux *problème cosmologique* qu'elle suscite aujourd'hui, pour finir en s'interrogeant, *et s'il n'y avait aucun problème avec la constante cosmologique ?*

Lorsqu'Einstein a incorporé la gravitation dans un contexte relativiste, il a été conduit à revoir complètement la conception de l'espace-temps. Celui de la relativité restreinte — l'espace-temps de Minkowski — était déjà considérablement différent de l'espace-temps classique — newtonien — avec l'imbrication du temps et de l'espace en un concept unique et la fin du temps absolu qui s'écoule uniformément, extérieur à toute autre notion. Avec la gravitation relativiste et la théorie de la *relativité générale*, l'espace-temps se *courbe* sous l'effet de la matière et de l'énergie, et les équations qui relient la structure de l'espace-temps à son contenu de matière et de rayonnement sont connues sous le nom d'équations de champ d'Einstein [Einstein 1916]. Une étape ultime sera franchie avec la cosmologie relativiste, dont on peut dater les prémices à l'article d'Einstein de 1917 [Einstein 1917]. L'espace-temps était déjà en puissance un concept dynamique dans la relativité générale car sa structure évoluait au gré des distributions d'énergie de l'univers. Il devient degré de liberté dynamique — le facteur d'échelle, $a(t)$ — qui se déploie dans les modèles cosmologiques relativistes.

2 1917-1998 : l'époque classique de la cosmologie relativiste

Dans son article de 1917, Einstein applique sa jeune théorie de la relativité générale à l'univers dans son ensemble. À l'époque, la notion de galaxie n'a pas encore vu le jour, et on comprend que l'état des connaissances sur l'univers à grande échelle soit trop sommaire pour permettre à

1. Les recherches d'articles sur le serveur arXiv (<http://fr.arxiv.org>) avec des titres contenant les termes "Cosmological constant" ou "Dark energy" fournissent toutes deux plus de mille entrées.

l'inventeur de la théorie relativiste de la gravitation de fonder *sa cosmologie* sur des bases observationnelles fiables. Einstein est ainsi conduit à l'hypothèse d'un univers homogène, isotrope et *statique*. Si les deux premières hypothèses ont encore cours aujourd'hui et forment la base même du *principe cosmologique*, la dernière hypothèse sera fatale au modèle développé par Einstein. On s'interroge parfois sur la pertinence de cette troisième hypothèse, car elle est clairement mise en défaut par les observations actuelles, alors que l'isotropie a un support observationnel depuis la découverte en 1964 du fond de rayonnement cosmique (ou CBR pour *Cosmic Background Radiation*) [Penzias & Wilson 1965]. Replacées dans leur perspective historique, ces trois hypothèses sont cependant également audacieuses, car l'univers observé en 1917 est tout sauf isotrope et homogène. Il est cependant nécessaire d'invoquer des arguments de symétrie très forts pour pallier le manque d'information.

Revenons sur l'hypothèse statique. La gravitation est une interaction attractive². Une conséquence inévitable est que pour compenser les effets de la gravitation afin de rendre l'univers statique, il faut *inventer* un ingrédient supplémentaire, ce que fait Einstein dans cet article de 1917 avec la constante cosmologique λ (aujourd'hui Λ). Les équations du champ de gravitation prennent alors une forme légèrement modifiée par rapport à celles de 1915, par l'adjonction du terme $-\Lambda g_{\mu\nu}$ au premier membre,

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu},$$

mais leur forme préserve la conservation du tenseur $T_{\mu\nu}$ représentant le contenu matériel, $T_{\mu\nu;\mu} = 0$. La constante cosmologique, placée ici au premier membre des équations d'Einstein, s'oppose aux effets attractifs du champ de gravitation (lorsqu'elle est choisie positive³). Il est notable qu'Einstein ne se soit pas rendu compte que le modèle d'univers statique qu'il venait de proposer souffrait d'un défaut rédhibitoire : il était instable.

2. Ce n'est pas toujours vrai d'ailleurs, puisqu'un champ scalaire peut se coupler à la gravitation pour en faire une interaction répulsive — comme dans la phase d'inflation — pour peu qu'il soit soumis à un potentiel ayant des propriétés *ad hoc*, mais ça l'est pour les formes ordinaires de matière et de rayonnement.

3. On notera à ce sujet un modèle d'univers assez pathologique, proposé par K. Gödel [Gödel 1949]. Il s'agit d'un univers en rotation et pour compenser la force centrifuge (répulsive), Gödel a suggéré qu'une constante cosmologique négative, agissant cette fois dans le même sens que la gravitation ordinaire, pouvait assurer la stabilité d'ensemble.

La suite de l'histoire de cette constante cosmologique est connue. Après la découverte de l'expansion de l'univers (Friedmann [Friedmann 1924] et Lemaître [Lemaître 1927] sur la base d'arguments théoriques, Hubble [Hubble 1929] sur celle d'observations astronomiques) et donc l'abandon de l'hypothèse statique, Einstein aurait, dans une lettre à Weyl, regretté d'avoir introduit le *terme cosmologique*. Les cosmologistes en revanche y étaient attachés, comme Hoyle [Hoyle 1948] ou Bondi et Gold [Bondi & Gold 1948] et leur modèle d'univers en expansion stationnaire, comme Lemaître et son univers hésitant, ou comme Eddington [Eddington 1933] qui observait à juste titre qu'en l'absence de constante cosmologique, il fallait donner à l'univers un âge inférieur à celui de certains des objets (étoiles) qui le constituent pour accommoder les propriétés dynamiques observées aujourd'hui. Malgré ces objections et le soutien des cosmologistes [Eddington 1933, 22]⁴, [Tolman 1936, 191]⁵, la constante cosmologique tombe progressivement dans une forme d'oubli, reléguée au rang de curiosité historique. D'éminents physiciens, auteurs influents, comme Landau [Landau & Lifshitz 1951, 382]⁶ ou Pauli [Pauli 1958, 220]⁷ et Feynman [Feynman 1995, 149]⁸ bien plus tard, ne voyaient pas la nécessité de ce terme (selon Ginzburg, « *Landau hated the idea of the Λ term* », [Ginzburg 2001, 170]).

4. "We have no reason to think that λ is not so small as to be entirely beyond observation... I would as soon think of reverting to Newtonian theory as of dropping the cosmical constant."

5. "For regions of great size, it can be shown that effects could result from a very small value of Λ . Hence, for cosmological considerations we shall retain the possibility that the quantity Λ , customarily known as the cosmological constant, may not necessarily be exactly equal to zero."

6. "If one ascribes a small value to the 'cosmological constant' Λ , the presence of this term will not significantly affect gravitational waves over not too large regions of space-time, but it will lead to the appearance of new types of 'cosmological solutions' which could describe the universe as a whole. At the present time however, there are no cogent and convincing reasons, observational or theoretical, for such a change in the form of the fundamental equation of the theory. We emphasize that we are talking about changes that have a profound physical significance: introducing into the Lagrange density a constant term which is generally independent of the state of the field would mean that we ascribe to space-time a curvature which cannot be eliminated in principle and is not associated with either matter or gravitational waves. All the remaining presentation in this section is therefore based on the Einstein equations in their classical form without the 'cosmological constant'."

7. "Einstein... completely rejected the cosmological term as superfluous and no longer justified. I fully accept this new standpoint of Einstein's."

8. "I agree with Einstein's second guessing and think $\Lambda = 0$ is most likely."

3 1998 : de nouveaux horizons

La constante cosmologique réapparaît dans la littérature scientifique au milieu des années 1980 [Peebles 1984], [Turner, Steigman & Lawrence 1984] pour accommoder le modèle FLRW (Friedmann [Friedmann 1924], Lemaître [Lemaître 1927], Robertson [Robertson 1935], Walker [Walker 1937]) aux observations disponibles à l'époque, mais c'est véritablement l'année 1998 qui marque un tournant dans la cosmologie moderne. C'est cette année que les premiers résultats des campagnes d'observations des supernovæ IA (SN Ia) sont publiés [Riess 1998], [Perlmutter 1999]. Il s'agit d'objets stellaires extrêmement brillants, donc observables à très grande distance dans l'univers, et dont l'évolution physique est bien comprise, de sorte que ces étoiles qui *explorent* ont une luminosité absolue connue avec une précision remarquable : ce sont des *chandelles*. Ces propriétés en ont fait des candidats idéaux pour les campagnes astronomiques d'observations d'objets très éloignés et donc très anciens. Cela permet d'atteindre la dynamique de l'univers en expansion avec une précision jusque là inégalée, repoussant la courbe que Hubble avait produite en son temps à des *redshifts* inconnus jusqu'alors. Si elle n'est pas une surprise pour les cosmologistes [Krauss & Turner 1995], la nouvelle connaît un retentissement considérable : l'expansion de l'univers s'accélère ! C'est presque à un changement de paradigme que l'on assiste. Jusque là, les courbes de luminosité apparente *versus* redshift (ou distance *vs* vitesse) étaient caractérisées par des paramètres comme la *constante* de Hubble H_0 ou le paramètre de décélération q_0 , ainsi dénommé car il devait caractériser un univers en expansion dont le taux d'expansion décroît au cours du temps. Les résultats du *Supernova Cosmology Project* et du *High-Z supernovae search team* en 1998, confirmés et affinés depuis, ont montré que le paramètre de décélération mesuré aujourd'hui est négatif. Premier candidat à être cause de l'accélération observée, la constante cosmologique fait un retour triomphal dans la littérature scientifique. Cette même année apparaît cependant, introduit par Huterer et Turner [Huterer & Turner 1999], le terme d'énergie sombre (*dark energy*) pour décrire une série de concepts alternatifs à la constante cosmologique. Probablement influencés par les travaux du début des années 1980 sur l'inflation, ces concepts alternatifs reposent sur l'observation que les théories des champs se couplent facilement à la gravitation de manière répulsive et sont donc à même de produire une accélération de l'expansion cosmique. L'intrusion des théories des champs (la physique des particules élémentaires) en cosmologie remonte à Pauli, lorsqu'il a observé que le

terme de constante cosmologique avait la structure de l'énergie du vide dans les théories quantiques des champs, $T_{\mu\nu} = \rho_\Lambda c^2 \eta_{\mu\nu}$ (si $p_\Lambda = -\rho_\Lambda c^2$) dans le référentiel comobile, $\eta_{\mu\nu}$ étant la métrique de Minkowski. De nombreuses difficultés sont liées à cette observation, car la valeur mesurée pour la constante cosmologique (ou pour la densité d'énergie qui lui est associée) est sans aucune mesure avec la valeur attendue lorsqu'elle est interprétée comme une énergie du vide. On assiste à un désaccord monumental (la première valeur est typiquement 10^{120} fois plus petite que la seconde), connu sous l'euphémisme de *problème de la constante cosmologique*. Une fois cette difficulté admise, la notion de constante cosmologique telle qu'introduite par Einstein est remise en question et l'on cherche à élaborer des modèles cosmologiques alternatifs.

4 Les années 2000 : la constante cosmologique comme source d'inventivité scientifique

Pour bien comprendre la diversité des pistes explorées pour rendre compte de l'accélération de l'expansion de l'univers, il est bon de préciser les éléments essentiels qui fondent un modèle cosmologique. On entend par cosmologie le fait d'appliquer une théorie de la gravitation à une échelle suffisante pour pouvoir idéaliser le contenu de l'univers et le représenter par un "fluide cosmique" dont les propriétés, couplées à la gravitation, déterminent la géométrie de cet univers. Un tel modèle suppose de travailler à très grande échelle, typiquement $10^{24} - 10^{26}$ m. Il suppose également une théorie de la gravitation, c'est-à-dire essentiellement une géométrie $G_{\mu\nu}$ dans les théories métriques. Il suppose encore des données (sinon des hypothèses) sur le contenu matériel et énergétique de l'univers, c'est-à-dire la forme du tenseur $T_{\mu\nu}$. Il suppose enfin des hypothèses de symétrie qui contraignent le tenseur métrique $g_{\mu\nu}$ de manière à permettre d'exprimer à la fois $G_{\mu\nu}$ et $T_{\mu\nu}$.

Le modèle cosmologique standard est fondé sur le principe cosmologique qui suppose un espace-temps homogène et isotrope et restreint la métrique à celle proposée par Friedmann, Robertson et Walker,

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left(\frac{d\sigma^2}{1 - k\sigma^2} + \sigma^2 d\Omega^2 \right),$$

avec $\sigma = r/a(t)$ la coordonnée comobile et $a(t)$ le facteur d'échelle de l'univers, $k = 0, \pm 1$ sa courbure. En dehors du paramètre k , la dynamique d'un univers obéissant au principe cosmologique repose sur le seul degré de liberté de cette métrique, le facteur d'échelle $a(t)$. La théorie de la gravitation appliquée dans ce modèle est celle d'Einstein, appelée aussi relativité générale et dont il a été question plus haut, soit

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R^\alpha_\alpha,$$

où le tenseur de Ricci $R_{\mu\nu}$ comprend des dérivées premières et secondes des $g_{\mu\nu}$. Enfin, pour ce qui concerne le contenu matériel de l'univers, il s'agit d'un "fluide cosmique"

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p/c^2)v_\mu v_\nu - pg_{\mu\nu},$$

avec diverses composantes w obéissant à des équations d'état de la forme

$$p_w = w\rho_w c^2.$$

Avec l'ensemble de ces *ingrédients*, la dynamique de l'univers, régie par les équations d'Einstein,

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R^\alpha_\alpha = \frac{8\pi G}{c^4} \sum_w \left((\rho_w + p_w/c^2)v_\mu v_\nu - p_w g_{\mu\nu} \right),$$

conduit aux équations de Friedmann, équations différentielles pour le facteur d'échelle $a(t)$. Ce qui valide l'utilisation de la relativité générale comme théorie de la gravitation dans l'esprit du modèle cosmologique standard, c'est la capacité de la relativité générale à décrire l'ensemble des phénomènes gravitationnels à des échelles *ordinaires*, notamment ses succès dans les *trois tests classiques* à l'échelle du système solaire.

On effectue ensuite un inventaire des composants essentiels de l'univers sur la base des observations accessibles, pour répertorier les diverses formes de matière-énergie. Pour rendre le modèle compatible avec les mesures, on distingue essentiellement trois composantes, la matière froide $p_M = 0$, le rayonnement $p_R = \frac{1}{3}\rho_R c^2$ et la constante cosmologique $p_\Lambda = -\rho_\Lambda c^2$. Notons que le point de vue adopté ici consiste à placer le terme de constante cosmologique au *second membre* des équations d'Einstein et à le traiter comme un fluide cosmique de densité $\rho_\Lambda = \Lambda c^2/8\pi G$.

Les mesures les plus significatives sont issues de trois types de campagnes d'observations : celles qui sont basées sur les supernovæ de type

La déjà évoquées, celles qui analysent les fluctuations du fonds diffus cosmologique, et enfin celles qui se penchent sur les distributions de matière à très grande échelle. Ces observations sont convergentes et conduisent à une proportion très importante de formes de matière-énergie (dite sombre) qui sont encore très mal connues à l'heure actuelle, mais dont la présence est indispensable dans le cadre du modèle cosmologique standard pour expliquer les paramètres *cinématiques* (constante de Hubble, paramètre de décélération, ...) observés⁹.

Parmi les alternatives au modèle cosmologique standard, on peut essentiellement répertorier trois voies d'investigation (pour une classification plus fine, on pourra se reporter à Nobbenhuis [Nobbenhuis 2004, 2006] et pour un exposé détaillé des aspects scientifiques, à Amendola et Tsujikawa [Amendola & Tsujikawa 2010]).

Une première piste, évoquée plus haut, consiste à chercher de nouvelles formes d'énergie-matière (d'où le terme de *dark energy*) qui puissent rendre compte de l'accélération de l'expansion, tout en conservant la relativité générale comme théorie de la gravitation. La *quintessence* est probablement la plus populaire des théories explorées dans cette direction. Il s'agit d'un champ scalaire $\mathcal{L}_{\text{mat}} = \frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi - V(\phi)$ soumis à un potentiel $V(\phi)$ dans l'approximation de *roulement lent*, c'est-à-dire que comme dans le cas de la phase d'inflation¹⁰, l'énergie potentielle très *plate* domine largement l'énergie cinétique, permettant un couplage répulsif à la gravitation, avec une équation d'état de la forme¹¹

$$w_\phi = \frac{\dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\dot{\phi}^2 + V(\phi)}.$$

La terminologie, quintessence, évoque la cinquième force et serait associée à une interaction répulsive à très grande distance, portée par une particule de masse exceptionnellement petite à l'échelle des particules élémentaires connues.

9. Notons que les cosmologistes ont envisagé bien d'autres formes d'énergie. Mentionnons à côté du rayonnement ($w = 1/3$), de la matière ($w = 0$) et de la constante cosmologique ($w = -1$), des formes plus exotiques comme l'énergie ultralégère (*ultra-light*, $w > 1/3$), les cordes cosmiques (*cosmic strings*, $w = -1/3$), les parois de domaines (*domain walls*, $w = -2/3$) ou l'énergie fantôme (*phantom energy*, $w < -1$) [Nemiroff & Bijunath 2008].

10. L'inflation est une phase d'expansion exponentielle de l'univers qui a régi la dynamique dans la période de l'univers primordial, contrairement à la quintessence dont le rôle dominant se dessine à l'époque actuelle.

11. Le champ ϕ est ici supposé homogène et $\dot{\phi}$ représente la dérivée temporelle.

Une autre voie prometteuse également consiste à modifier la théorie de la gravitation sur laquelle est fondé le modèle cosmologique. Rappelons que la relativité générale se déduit de l'action d'Einstein-Hilbert (en l'absence de matière-énergie),

$$S_{EH} = - \int d^4x \sqrt{-g} R^\alpha_\alpha,$$

de sorte que par variation de l'action, $\frac{\delta S_{EH}}{\delta g^{\mu\nu}} = 0$ entraîne $G_{\mu\nu} = 0$. La relativité générale, basée sur l'action S_{EH} , est la plus simple des théories métriques de la gravitation. De nombreuses généralisations en ont été proposées, telles que les théories $f(R)$

$$S_{f(R)} = - \int d^4x \sqrt{-g} f(R^\alpha_\alpha),$$

ou celles qui incluent davantage de champs, comme la théorie scalaire-tenseur de Brans et Dicke

$$S_{BD} = - \int d^4x \sqrt{-g} (\phi R^\alpha_\alpha - w \phi^{-1} \phi_{;\mu} \phi^{;\mu}),$$

pour ne citer que ces deux exemples.

Une solution probablement moins étudiée et pourtant très simple et économique consiste à contourner le principe cosmologique, sans remettre en question ni la théorie de la gravitation, ni le contenu *ordinaire* de matière-énergie. Il s'agit de supposer que notre univers observable est dans une zone où la densité de matière et d'énergie est plus faible qu'en moyenne dans l'univers, de sorte que la gravitation y est localement moins élevée, expliquant en même temps le fort éloignement des SN Ia [Tomita 2001].

D'autres théories sont susceptibles d'apporter des éléments de solution, comme les axions, particules qui se couplent aux photons et peuvent ainsi expliquer une atténuation de la luminosité apparente des SN Ia plus importante que celle attendue, mais ces approches se heurtent à des difficultés pour l'interprétation des résultats d'observations du CBR ou des grandes structures.

5 Conclusions ?

Le modèle cosmologique standard souffre d'un grand nombre de défauts, communément appelés les problèmes cosmologiques, comme le problème de la constante cosmologique, de la matière noire, de l'horizon, des

reliques, des coïncidences, etc. La résolution de ces problèmes passe par des théories ingénieuses, mais hautement spéculatives comme l'inflation, par l'espoir que des campagnes d'observations futures mettront en évidence de nouvelles formes de matière comme les WIMPS (weakly interacting massive particles) ou d'énergie comme la quintessence, ou pourquoi pas, par une remise en question des fondements comme la gravitation ou le principe cosmologique.

Le problème de la constante cosmologique apparaît clairement comme une source d'inventivité, et c'est peut-être là sa plus grande richesse : la fécondité ! Il est clair que l'énergie du vide n'est pas une piste acceptable, puisque sa valeur est beaucoup trop importante pour produire l'accélération observée. Cela soulève une seconde difficulté, puisqu'il faut trouver une explication à cette valeur trop élevée.

Et si le mot de la fin revenait à la constante cosmologique [Bianchi & Rovelli 2010], [Bianchi & Rovelli 2010a] ? A pourrait être une constante fondamentale de la physique dont la nature a fixé la valeur, et s'il persiste un désaccord avec les théories quantiques des champs, peut-être est-il dû à une connaissance encore trop imparfaite de ces dernières !

Bibliographie

AMENDOLA, LUCA & TSUJIKAWA, SHINJI

2010 *Dark Energy*, Cambridge : Cambridge University Press.

BIANCHI, EUGENIO & ROVELLI, CARLO

2010 Is dark energy really a mystery ? No it isn't, *Nature*, 466, 321.

URL http://www.astro.uu.nl/~vinkj/LSS/Nature_2010_Bianchi.pdf.

2010a Why all these prejudices against a constant ?.

URL [arXiv:1002.3966\[astro-ph.CO\]](http://arXiv:1002.3966[astro-ph.CO]).

BONDI, HERMANN & GOLD, THOMAS

1948 The steady-state theory of the expanding universe, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 108, 252–270.

URL http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-iarticle_query?1948MNRAS.108..252B.

EDDINGTON, ARTHUR

1933 *The expanding universe*, Cambridge : Cambridge University Press, 2002.

EINSTEIN, ALBERT

- 1916 Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie (the foundation of the general theory of relativity), *Annalen der Physik IV*, 49, 284–339, version française disponible dans Balibar, Françoise, 1993 *Albert Einstein, Œuvres choisies 2, Relativités I, Relativité générale, cosmologie et théories unitaires*, Paris : Seuil CNRS, 179.

URL [http://www.alberteinstein.info/gallery/pdf/CP6Doc30_pp284-339.pdf\(original\)](http://www.alberteinstein.info/gallery/pdf/CP6Doc30_pp284-339.pdf(original)) -- [http://www.alberteinstein.info/gallery/pdf/CP6Doc30_English_pp146-200.pdf\(anglais\)](http://www.alberteinstein.info/gallery/pdf/CP6Doc30_English_pp146-200.pdf(anglais)).

- 1917 Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie (Cosmological Considerations in the General Theory of Relativity, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-math. Klasse*, VI, 142–152, version anglaise disponible dans : Einstein, Albert, 1952 *The principle of relativity*, New-York : Dover, 177. Version française disponible dans Balibar, Françoise, 1993 *Albert Einstein, Œuvres choisies 3, Relativités II, Relativité générale, cosmologie et théories unitaires*, Paris : Seuil CNRS, 88.

URL <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1917SPAW.....142E>.

FEYNMAN, RICHARD

- 1995 *Feynman lectures on gravitation*, Boulder : Westview Press, 2003.

FRIEDMANN, ALEKSANDR

- 1924 Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes (On the possibility of a world with constant negative curvature of space), *Z. Phys.*, 21, 326–332, version française disponible dans : Luminet, Jean-Pierre and Grib, Andrey, 1997 *Essais de cosmologie*, Paris : Seuil, 278.

URL <http://www.springerlink.com/content/n152711192238714/>.

GINZBURG, VITALY

- 2001 *The physics of a lifetime*, Berlin : Springer.

GÖDEL, KURT

- 1949 An example of a new type of cosmological solution of einstein's field equations of gravitation, *Rev. Mod. Phys.*, 21, 447–450.

URL <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1949RvMP...21..447G>.

HOYLE, FRED

- 1948 A new model for the expanding universe, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 108, 372–382.

URL http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-iarticle_query?1948MNRAS.108..372H.

HUBBLE, EDWIN

- 1929 A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 15, 168–173.

URL <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1929PNAS...15...168H>.

HUTERER, DRAGAN & TURNER, MICHAEL

- 1999 Prospects for probing the dark energy via supernovae distance measurements, *Phys. Rev. D*, 60, 081301.

URL <http://prd.aps.org/abstract/PRD/v60/i8/e081301>.

KRAUSS, LAWRENCE & TURNER, MICHAEL

- 1995 The cosmological constant is back, *Gen. Rel. Grav.*, 27, 1137.

URL arXiv:astro-ph/9504003.

LANDAU, LEV DAVIDOVITCH & LIFSHITZ, EVGUENI

- 1951 *The classical theory of fields*, Amsterdam : Butterworth Heinemann, 1975^e éd.

LEMAÎTRE, GEORGES

- 1927 Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques (A homogeneous universe of constant mass and growing radius accounting for the radial velocity of extragalactic nebulae), *Ann. Soc. Sci. Bruxelles Ser. 1*, 47, 49–59, disponible dans Luminet, Jean-Pierre and Grib, Andrey 1997 *Essais de cosmologie*, Paris : Seuil, 286.

URL <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1927ASSB...47...49L>.

NEMIROFF, ROBERT & BIJUNATH, PATLA

- 2008 Adventures in friedmann cosmology : A detailed expansion of the cosmological friedmann equations, *Am. J. Phys.*, 76, 265.

URL http://ajp.aapt.org/resource/1/ajpias/v76/i3/p265_s1?isAuthorized=no.

NOBBENHUIS, STEFAN

- 2004 Categorizing different approaches to the cosmological constant problem.

URL arXiv:gr-qc/0411093.

- 2006 The cosmological constant problem, an inspiration for new physics.

URL arXiv:gr-qc/0609011.

PAULI, WOLFGANG

- 1958 *Theory of relativity*, New York : Dover.

PEEBLES, PHILLIP JAMES EDWIN

- 1984 Tests of cosmological models constrained by inflation, *Astrophys. J.*, 284, 439–444.

URL <http://adsabs.harvard.edu/full/1984ApJ...284..439P>.

PENZIAS, ARNO ALLAN & WILSON, ROBERT WOODROW

- 1965 A measurement of excess antenna temperature at 4080-mc/s, *Astrophys. J.*, 142, 419–421.

URL <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1965ApJ...142..419P>.

PERLMUTTER, SAUL ET AL.

- 1999 Measurements of ω and λ from 42 high-redshift supernovæ, *Astrophys. J.*, 517, 565–586.

URL <http://www.slac.stanford.edu/spires/find/hep/www?key=4109902>.

RIESS, ADAM G. ET AL.

- 1998 Observational evidence from supernovæ for an accelerating universe and a cosmological constant, *Astron. J.*, 116, 1009.

URL <http://www.adsabs.harvard.edu/abs/1998AJ....116.1009R>.

ROBERTSON, HOWARD PERCY

- 1935 inematics and world structure, *Astrophys. J.*, 82, 284–301.

URL <http://cdsads.u-strasbg.fr/abs/1935ApJ....82..284R>.

TOLMAN, RICHARD

- 1936 *Relativity, thermodynamics and cosmology*, New-York : Dover, 1987.

TOMITA, KENJI

- 2001 A local void and the accelerating universe, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 326, 287.

URL arXiv:astro-ph/0011484.

TURNER, MICHAEL STEIGMAN, GARY & LAWRENCE, KRAUSS

- 1984 Reconciling theoretical prejudices with observational data, *Phys. Rev. Lett.*, 52, 2090–2093.

URL http://prl.aps.org/abstract/PRL/v52/i23/p2090_1.

WALKER, ARTHUR GEOFFREY

- 1937 On milne's theory of world-structure, *Proc. London Math. Soc.* 2, 42, 90–127.

URL <http://plms.oxfordjournals.org/content/s2-42/1/90>.