Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 9 (1927)

Artikel: Cosmologie et thermodynamique
Autor: Schidlof, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-740867

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

COSMOLOGIE ET THERMODYNAMIQUE

PAR

A. SCHIDLOF[1]

SOMMAIRE.

1. Les deux lois de Clausius et l'univers quasi-statique d'Einstein.
2. Particularités d'une cosmologie quasi-statique. Sur un défaut épistémologique de certaines cosmologies.
3. Contradiction existant entre la seconde loi de Clausius et les conclusions tirées de la mécanique statistique. Retour d'un système à son ancien état au bout d'une très longue période. L'entropie moyenne de l'univers quasi-statique est constante.
4. Principe de relativité du sens du temps cosmique.
5. Cosmologiquement on a le droit d'attribuer au temps un sens conventionnel. Il en résulte que les deux sens de l'évolution peuvent se trouver réalisés dans l'univers soit successivement soit même simultanément.
6. L'hypothèse de l'évolution simultanée en sens opposé de deux systèmes très éloignés l'un de l'autre ne peut entraîner aucune difficulté d'ordre logique ou physique.
7. Quelques remarques sur les notions du temps réversible et irréversible.

1. Peut-on assimiler l'univers à un système soumis aux principes de la thermodynamique ? Beaucoup de savants, H. Poincaré [2] et M. Planck [3] entre autres, ont répondu négativement à cette question. En effet, si l'on suppose l'espace indéfini et le contenu matériel de l'univers illimité, le principe

[1] Conférence faite à la Société de physique et d'histoire naturelle à l'occasion de l'assemblée générale annuelle du 20 janvier 1927.

[2] H. POINCARÉ, *Thermodynamique*, Paris, Gauthier-Villars, 1908, et *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1908.

[3] M. PLANCK, *Thermodynamik*, Leipzig, Veit u. Cie, 1911.

de la conservation de l'énergie perd toute signification précise; de plus, il est impossible, dans ce cas, de définir l'entropie de l'univers, de sorte que les deux principes de la thermodynamique s'évanouissent à la fois.

La conclusion négative est moins évidente si l'on attribue à l'univers une étendue *finie* et si l'on suppose qu'il renferme une quantité *finie* de matière. Tout au moins W. Thomson [1] a prétendu que l'univers est destiné à périr par le froid, et R. Clausius [2], confirmant cette prédiction, a postulé l'existence de l'entropie de l'univers. Il a même cru pouvoir énoncer les deux principes de la thermodynamique sous la forme suivante:

1° L'énergie de l'univers est constante.

2° L'entropie de l'univers tend vers un maximum.

Plus récemment, A. Einstein [3] a donné une cosmologie selon laquelle l'espace est sphérique ou elliptique [4], la répartition de la matière *grosso modo* uniforme et la vitesse des corps, en moyenne, relativement petite. J'appellerai *quasi-statique* une conception cosmologique attribuant à l'univers le caractère d'un système physique bien défini dont l'état ne subit que des variations lentes et progressives, et je me propose de rechercher si les deux principes thermodynamiques énoncés par Clausius s'appliquent effectivement à l'univers quasi-statique.

2. Notre intérêt se concentre sur l'univers quasi-statique parce qu'ayant le caractère d'un système physique bien défini il laisse subsister, semble-t-il, la possibilité d'y appliquer les deux lois énoncées par Clausius. N'importe quelle autre conception cosmologique qui a été proposée est incompatible tout au moins avec la seconde loi de Clausius.

Il est, en particulier, impossible d'attribuer à l'entropie de

[1] W. Thomson, *Phil. Mag.* (IV), 4, p. 304 (1852).

[2] R. Clausius, *Abhandl. über die mechan. Wärmetheorie*, Braunschweig, Vieweg u. Sohn, 1867.

[3] A. Einstein, *Ueber die spez. und die allgem. Relativitätstheorie. Gemeinverständlich*, Braunschweig, Vieweg u. Sohn, 1918.

[4] En ce qui concerne la différence entre l'espace « sphérique », dans lequel il existe des « antipôles », et l'espace « elliptique » qui n'en a point, voir A. Einstein, *l.c.*, p. 76 et H. Weyl, *Raum. Zeit. Materie*, 5e édit., p. 289.

l'univers une valeur instantanée déterminée si l'espace est infini et s'il renferme des quantités de matière illimitées. De même, on ne peut pas définir l'entropie de l'univers si l'espace est euclidien et le contenu matériel fini, car alors la lumière émise par les étoiles ainsi que les astres eux-mêmes s'échappent incessamment dans tous les sens sans retour possible. Cette remarque s'applique aussi à l'espace-temps hyperbolique de de Sitter.

Le caractère exceptionnel de la théorie cosmologique d'Einstein est dû à la structure « cylindrique » attribuée à l'espace-temps, c'est-à-dire à la faible vitesse moyenne de la matière. Grâce à cette supposition, il y existe un « temps moyen d'univers » ou, comme nous dirons, un « *temps cosmique* ». Il est donc permis de supposer que l'entropie de l'univers quasi-statique présente à chaque instant une valeur bien déterminée. De plus, la matière et le rayonnement enfermés dans l'espace sphérique ou elliptique constituent un système isolé de dimensions finies. Les deux lois de Clausius pourraient donc s'y appliquer et, par suite, à mesure que le temps cosmique s'écoule, l'entropie de l'univers devrait augmenter et tendre vers un maximum défini.

Epistémologiquement, les théories attribuant à l'univers un contenu matériel et énergétique *fini* présentent un grave défaut. Elles font prévoir, pour une raison ou pour une autre, la transformation progressive de l'univers dans un sens défini. Que le monde soit destiné à périr par le froid, comme le suppose W. Thomson, ou par l'éparpillement et l'apauvrissement progressif de la matière et de l'énergie, l'existence de l'univers dans son état actuel apparaît comme un fait insolite et incompréhensible.

La supposition que l'univers est encore trop jeune pour avoir déjà atteint un état définitif n'a rien de satisfaisant. L'univers quasi-statique échapperait cependant à cette objection si on pouvait éviter d'y appliquer le second principe de la thermodynamique.

3. Or, dans les cas de l'univers quasi-statique, un argument théorique péremptoire nous affranchit de la contradiction spécieuse due à la seconde loi de Clausius. Quelle que soit la

conception cosmologique adoptée, la matière de l'univers obéit à certaines lois qui satisfont nécessairement aux principes généraux de la mécanique statistique établis par L. Boltzmann [1] et par J.-W. Gibbs [2]. On peut prévoir théoriquement l'allure générale des événements qui se passent dans un système isolé, abandonné à lui-même, dont l'énergie reste constante. Comme on le conçoit aisément, il y aura alors une évolution progressive du système vers des états intérieurs de plus en plus probables. Toutefois, la marche inverse n'est nullement impossible, elle est seulement très improbable et, par suite, *macroscopiquement*, inobservable.

La réalité de l'évolution inverse vers des états moins probables a été d'ailleurs démontrée expérimentalement par l'observation *microscopique* du mouvement brownien. Tout ceci est en accord avec le second principe de la thermodynamique.

Cependant, s'il s'agit de cosmologie, nous ne pouvons pas nous contenter de cette constatation et nous devons rechercher ce qui se passe au bout d'un temps extrêmement long et même indéfini, car l'univers existe d'éternité en éternité. Nous trouvons alors, contrairement à la prévision de Thomson et à la seconde loi de Clausius, que *tout système isolé dont l'énergie intérieure reste constante, quelle que soit sa complexité, doit repasser au bout d'un temps énorme par un état très voisin de son état initial.*

Par conséquent, si le système s'est trouvé au début dans un état très différent de l'état d'équilibre thermodynamique et s'il est resté à l'abri de toute action extérieure, il doit revenir spontanément à un état très différent d'un état d'équilibre au bout d'une durée très grande mais finie. Je crois préférable de ne pas parler d'un état d'équilibre thermodynamique lorsqu'il s'agit de l'univers dans son ensemble. Rendons-nous compte de notre ignorance complète quant à la signification cosmologique de ce terme, et évitons la confusion qui pourrait résulter de notre connaissance, d'ailleurs fort imparfaite, des transfor-

[1] L. Boltzmann, *Vorles. über Gastheorie*, Leipzig, J.-A. Barth, 1923.

[2] J.-W. Gibbs, *Element. Grundlagen der statist. Mechanik*, Leipzig, J.-A. Barth, 1905.

mations thermodynamiques qui ont lieu *à l'intérieur* de l'univers. L'entropie d'un système thermodynamique est une variable *extérieure*. En parlant de l'entropie de l'univers nous nous plaçons mentalement *en dehors de l'univers*.

Quoique, en principe, il soit possible de calculer l'entropie de l'univers quasi-statique selon le théorème d'addition, nous sommes, en fait, incapables d'effectuer ce calcul, même avec une approximation grossière, parce que nous ne savons presque rien sur la constitution intérieure des astres et que nous ignorons les quantités de matière et d'énergie contenues dans l'univers. La mécanique statistique seule est capable de nous fournir quelque renseignement sur l'entropie de l'univers. Elle nous apprend que la probabilité de l'état intérieur moyen de l'univers, observé du dehors pendant des durées cosmologiques [1], doit être *invariable*. Or, selon le théorème de Boltzmann, l'entropie d'un système est proportionnelle au logarithme de la probabilité de l'état intérieur moyen du système. *Il en résulte que l'entropie de l'univers quasi-statique est constante.* C'est cette loi qui remplace la seconde loi de Clausius.

4. Le résultat auquel nous sommes parvenu n'a rien de surprenant. Au fond, l'invariabilité de l'entropie est contenue dans l'hypothèse même d'un état quasi-statique de l'univers. Si l'état de l'univers était très différent d'un état d'équilibre, il ne saurait être quasi-statique. La cosmologie quasi-statique est peut-être une représentation fort imparfaite de l'état de l'univers. On peut aussi supposer, soit pour une raison, soit pour une autre, que l'état instantané de l'univers est très différent d'un état d'équilibre, mais on doit alors, ne l'oublions pas, renoncer complètement à la notion de l'entropie de l'univers.

On a donc seulement le choix entre les deux alternatives suivantes: ou bien l'entropie de l'univers n'existe pas, ou bien, si elle existe, elle est sensiblement invariable. La nécessité d'avoir à considérer l'âge de l'univers pour des raisons thermodynamiques est ainsi évitée.

[1] J'appelle durée « cosmologique » une durée qui est énorme même en comparaison de la durée de l'évolution d'un système stellaire.

Ce fâcheux anthropomorphisme avait provoqué immédiatement une vive réaction de la part des philosophes, de F. Nietzsche [1] entre autres. Cependant, les physiciens eux aussi, quoique moins soucieux de perfection logique, ont commencé, vers la fin du XIXe siècle, à expurger leur science des anthropomorphismes dont elle fourmillait. En particulier, L. Boltzmann [2] a fait remarquer que les notions de passé et d'avenir ne peuvent pas plus s'appliquer à l'univers que celles de bas et de haut.

Concernant l'univers quasi-statique on peut déduire du principe de Boltzmann l'axiome suivant que j'appellerai *l'axiome de la relativité du sens du temps cosmique: Il est impossible d'attribuer au temps cosmique un sens défini.* Cet axiome ne s'applique pas nécessairement à toute cosmologie car il existe des théories qui n'admettent pas l'hypothèse du temps cosmique. Cependant, toute théorie qui fait prévoir l'évolution de l'univers dans un sens déterminé, qui, en d'autres termes, nous conduirait à attribuer à l'univers dans son ensemble un certain âge, est à abandonner.

5. On éprouve peut-être quelque répugnance à accepter la conception d'un temps cosmique qui ne s'écoule pas dans un sens déterminé parce que, dans nos habitudes mentales invétérées, l'irréversibilité est une propriété essentielle du temps. Il est cependant nécessaire de faire abstraction de l'irréversibilité empirique du temps si l'on envisage le problème cosmologique.

En effet, dans chaque portion de l'univers se passent continuellement des transformations, appelées irréversibles, qui produisent une augmentation progressive de l'entropie de cette portion de l'univers. En vertu du théorème d'addition de l'entropie on peut en conclure que l'entropie de l'univers doit augmenter continuellement, ce qui serait en contradiction avec l'indétermination du sens de la variation de l'entropie cosmique.

La contradiction disparaît si, au point de vue cosmologique,

[1] F. NIETZSCHE, *Der Wille zur Macht.*
[2] L. BOLTZMANN, *l. c.*

nous nous accordons le droit de fixer *conventionnellement* le sens positif du temps, car alors les deux sens possibles de l'évolution ont exactement la même signification. Il ne s'agit pas là d'un simple artifice de raisonnement. On peut supposer que les deux sens possibles de l'évolution se trouvent réalisés, soit successivement, à des époques séparées par des durées cosmologiques, dans la même portion de l'univers, soit simultanément dans deux endroits très éloignés l'un de l'autre. L. Boltzmann [1] tout au moins n'a pas hésité à émettre cette supposition.

Il est évident que, pour un observateur des transformations naturelles, les deux sens du temps ne sont pas équivalents. Physiquement et psychiquement, nous sommes obligés de compter le temps dans le sens des entropies croissantes, et la même nécessité s'imposerait à un observateur vivant dans l'un des systèmes hypothétiques de Boltzmann, faisant également partie de notre univers dont l'évolution suivrait, par rapport à nous, la marche inverse. Le temps de cet observateur ou, si l'on fait abstraction de l'existence de tout observateur, le temps irréversible du système en question s'écoulerait donc, par rapport à nous, en sens contraire de notre propre temps. Cependant, aucune objection d'ordre logique ou physique n'est à craindre, car il n'y a pas de relation psychique possible entre les deux observateurs et nulle relation physique entre les deux systèmes.

6. Nous pouvons même risquer la supposition que les deux systèmes pour lesquels le temps s'écoule en sens inverse fassent *simultanément* partie de notre univers, pourvu qu'ils soient séparés l'un de l'autre par des distances cosmologiques.

En effet, un observateur qui se trouve dans un système dont l'évolution se fait, par rapport à nous, dans le sens des entropies décroissantes doit recevoir des objets qui l'entourent la même impression que nous recevons de notre ambiance. Pour qu'il en soit ainsi, il est nécessaire que les sources lumineuses du système de l'observateur lui envoient leur lumière; mais, puisque, par rapport à nous, le signe de l'accroissement du temps est renversé, cette lumière se propage pour nous en sens con-

[1] L. Boltzmann, *l. c.*

traire. Elle *s'approche* donc de la source lumineuse, au lieu de s'en éloigner. Ceci est d'ailleurs exigé aussi par le sens supposé de l'évolution du système qui, autrement, ne pourrait pas produire, par rapport à nous, une *diminution* progressive de l'entropie. Nous en concluons qu'un système d'étoiles dont l'évolution suit la « marche inverse » doit être invisible pour nous, et puisqu'il ne peut produire à l'endroit où nous nous trouvons aucun autre effet physique perceptible, l'existence des systèmes stellaires évoluant en sens contraire de notre propre monde, ne se heurte à aucune objection empirique, même si l'on suppose cette existence *simultanée* avec notre propre existence.

D'autre part, la marche inverse des transformations naturelles ne peut pas continuer indéfiniment dans un système fini. Tôt ou tard il y aura établissement de l'évolution normale et, le système considéré devenant visible, nous assisterons au début d'une cosmogonie. Un tel événement, étant donnée la durée énorme de l'évolution des étoiles, doit être très rare, et, à supposer même qu'il soit observable, il peut recevoir des interprétations variées. Cependant, la coexistence dans toutes les parties de l'univers des stades les plus divers de l'évolution stellaire semble indiquer que les cosmogonies des différentes étoiles ont débuté à des époques très différentes.

En résumé, l'existence simultanée dans l'univers des deux sens de l'évolution n'est sujette à aucune objection d'ordre logique ou physique. Quoique invérifiable dans l'état actuel de nos connaissances, cette hypothèse ne doit pas être considérée comme un vain jeu de l'imagination, car nous ignorons si le problème cosmologique peut recevoir une solution satisfaisante dans le cas où l'on refuse d'admettre que les deux sens opposés de l'évolution interviennent effectivement dans l'univers.

7. A d'autres égards aussi la notion du temps réversible, quoiqu'elle nous éloigne de la conception usuelle de la réalité expérimentale, me semble instructive.

Ordinairement, on établit une distinction entre les transformations réversibles et irréversibles et on dit que les transformations naturelles sont irréversibles. Or, on peut tout aussi bien attribuer la propriété d'irréversibilité au temps, et faire

intervenir dans le raisonnement théorique, à côté du temps « naturel » irréversible, le temps abstrait réversible. Souvent on examine des problèmes où le choix du sens du temps est en réalité arbitraire. Si l'on introduit alors dans les considérations un sens conventionnel du temps et si l'on utilise, pour mettre en évidence l'analogie avec la réalité physique, des termes tels que « passé » ou « avenir » on obscurcit la signification du raisonnement au lieu de l'éclaircir.

Psychiquement l'irréversibilité du temps s'impose avec une telle évidence que les psychologues et les philosophes ont cru superflu d'établir la distinction que je propose de faire; mais il n'en est pas de même pour les mathématiciens et les physiciens qui se posent parfois le problème d'examiner ce qui se passe, lorsqu'on renverse le sens du temps. Cette question est d'autant plus justifiée qu'au point de vue purement mécanique, et en physique lorsqu'on se borne à la considération de certains phénomènes élémentaires abstraits, on ne retrouve plus la propriété d'irréversibilité qui s'impose avec une telle évidence dans d'autres branches scientifiques. Tout au contraire, dans les sciences naturelles, ainsi qu'en physique, si l'on y considère la réalité expérimentale soumise au second principe de la thermodynamique, les notions de passé et d'avenir ont une portée réelle et ne sont plus de simples étiquettes interchangeables à volonté. Voici un exemple de l'utilité de la distinction que je viens d'établir:

Théoriquement une onde lumineuse peut se propager soit en s'éloignant de son centre, soit en se contractant vers celui-ci. Cependant le premier phénomène seul intervient dans les échanges naturels d'énergie qui ont lieu autour de nous. On en tient compte en utilisant seulement une partie des intégrales de l'équation de propagation des ondes, celles qui correspondent au sens « naturel » de la propagation. Or, parmi les solutions de l'équation de propagation, il y en a toujours deux qui ont exactement la même signification pourvu qu'on change le signe du temps en passant d'une solution à l'autre.

Dans le domaine des transformations irréversibles les deux solutions se trouvent réalisées à la fois; mais l'une se rapporte à la marche normale des transformations naturelles, tandis que

l'autre s'applique à la marche inverse. Il n'en est pas de même si l'on se place au point de vue de la réversibilité parfaite, par exemple lorsqu'on étudie la réflexion d'une onde lumineuse par un miroir parfait. Les deux intégrales ont alors des significations différentes et leur superposition fournit une solution nouvelle.

Une discussion approfondie de la notion du temps réversible ne rentre pas dans le cadre de ces considérations. Ma remarque avait uniquement pour but de montrer que l'irréversibilité n'est pas une propriété *essentielle* du temps, et qu'il peut être avantageux d'introduire dans le raisonnement théorique un temps abstrait réversible, à condition d'éviter toute confusion entre ce temps abstrait et le temps naturel qui est irréversible.