

# *interdisciplinarité*

---

## *l'univers né du vide*

**H. Andrillat**

*Professeur d'astronomie à*

*l'Université des Sciences Techniques du Languedoc*

Objet de curiosité ou de méditation, l'univers a fasciné les esprits depuis la plus haute antiquité, ; mais ce n'est que récemment qu'une véritable définition scientifique a pu en être donnée. Certes l'univers peut être considéré comme l'ensemble de tout ce qui existe, mais une définition aussi banale reste sans potentialité scientifique. En introduisant la notion de courbure de l'espace, Einstein découvrait du même coup la vraie définition de l'univers : l'univers est la géométrie de son espace.

### **Les concepts d'espace et de temps**

Localement, à l'échelle humaine, les phénomènes physiques peuvent être convenablement décrits à l'aide de nos concepts intuitifs d'espace et de temps, induits en notre esprit par nos perceptions premières. L'espace est alors tridimensionnel et doté de la propriété euclidienne que la plus courte distance entre deux de ses points est la longueur du segment de droite qui les joint. Dans cette véritable scène de théâtre qui représente le 3-espace euclidien, les phénomènes de la physique se déroulent suivant le temps de la mécanique, mesure du mouvement de la particule libre, conformément au principe de Galilée.

Ces notions suffisent à bien représenter de nombreux phénomènes physiques, la mécanique du solide notamment. Mais que nous cherchions à explorer d'autres domaines de la physique, à l'échelle microscopique de la particule élémentaire par exemple ou à l'échelle cosmique de l'uni-

vers dans son ensemble, ces notions intuitives d'espace et de temps, trop étroites, ne permettront plus de décrire correctement les phénomènes et d'interpréter les lois profondes de la physique, comme la loi de gravitation, la loi  $E=mc^2$  ou la loi de Hubble sur la récession des galaxies.

*A jamais figés en notre esprit par notre expérience première du monde, nos concepts intuitifs ne peuvent souffrir aucune généralisation. Aussi, notre seule chance est-elle de généraliser leur représentation mathématique.* Toute la théorie de la relativité est l'histoire de cette généralisation qui s'est effectuée en trois étapes.

### Les trois étapes de la relativité

La première étape de la relativité a consisté à réunir l'espace et le temps en un même 4-espace, l'espace-temps où le principe d'Einstein d'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide par rapport à tous les systèmes de référence inertiels impose une dépendance du temps à l'espace, une relativité du temps.

C'est cette théorie qui permit à Einstein d'établir la relation d'équivalence de la masse et de l'énergie,  $E=mc^2$ .

C'est la valeur très grande de la vitesse de la lumière à l'échelle locale qui induit en notre pensée le concept naïf d'un temps absolu, séparé de l'espace. La transmission de l'information de notre environnement immédiat est si rapide que nous avons l'impression d'une prise de conscience instantanée de cet environnement. A l'échelle de l'univers au contraire, la vitesse de la lumière apparaît dérisoirement petite. Nous ne pouvons voir un objet astronomique lointain que dans un état de passé reculé. L'univers instantané est inobservable. A l'échelle de l'univers, le temps n'est plus séparé de l'espace.

La seconde étape introduite par Einstein sous le vocable de *relativité générale* consiste à renoncer au caractère euclidien de l'espace et à lui attribuer une courbure. Cette généralisation permet une interprétation plus approfondie de la gravitation : il serait raisonnable de considérer une planète, qui se meut dans le vide interstellaire, comme une particule libre de l'espace. Le principe de Galilée lui imposerait alors un mouvement rectiligne et uniforme, en contradiction avec les observations qui nous révèlent un mouvement orbital de la planète suivant une trajectoire elliptique. En imaginant la force qui porte son nom, Newton renonçait au caractère libre de la planète, la soumettant à une attraction par le soleil, qui, à chaque instant, devait la dévier de sa trajectoire rectiligne inertielle. En introduisant la notion de courbure de l'espace, Einstein restitue le caractère libre de la planète.

La droite est la géodésique (courbe de longueur minimale) de l'espace euclidien.

La géodésique d'un espace courbe est courbe. La particule libre décrira, selon ce principe de Galilée généralisé, une *géodésique* de l'espace. Cette courbe pourra fort bien se refermer sur elle-même en une orbite elliptique par exemple. La forme qu'on donne à cette généralisation du principe de Galilée est connue sous le nom de *loi des géodésiques*.

La troisième étape de généralisation des concepts d'espace et de temps conduit à un espace-temps à courbure variable avec le temps.

On sait qu'après la ligne droite, ligne du premier degré, viennent les coniques, courbes du second degré, l'ellipse, l'hyperbole ou la parabole. Einstein établit pareillement que l'espace physique avec ses trois dimensions, au lieu d'être l'espace euclidien, plat, du premier degré, tel qu'il nous semble dans le cadre de nos expériences locales, serait en fait un espace du second degré, elliptique, parabolique ou hyperbolique, le premier fermé sur lui-même comme l'ellipse, les autres ouverts comme l'hyperbole ou la parabole. Ainsi suivant la géométrie (à découvrir) de l'espace, l'univers serait fini ou infini, cette question de la finitude ou de l'infinitude de l'univers devenant un problème d'ordre scientifique.

### **La loi de Hubble**

En 1924, à la mise en service au Mont Wilson aux U.S.A. du plus grand télescope de l'époque, le télescope de 2,50 m de diamètre, l'astronome américain Edwin Hubble découvrit, ce sont ses propres termes, le royaume des galaxies. Notre galaxie aurait pu constituer à elle seule l'univers. Ce fut en fait par millions que les galaxies apparurent sur les clichés du Mont Wilson. On les dénombrerait aujourd'hui par milliards sur les clichés des plus grands télescopes actuels. Par leur étude détaillée, Hubble découvrit la première et grande loi de l'univers à grande échelle, loi qui porte son nom : la loi de la récession générale des galaxies. Les galaxies semblent s'éloigner toutes les unes des autres dans l'espace, d'autant plus vite qu'elles sont plus distantes. Cette loi constitue le résultat le plus important de la cosmologie moderne. On avait cru jusque-là l'univers statique, immuable. Il était au contraire évolutif, il avait une histoire.

L'interprétation de la loi de Hubble par le modèle d'Einstein était simple : il suffisait de supposer que le rayon de courbure de l'espace courbe croissait au cours du temps cosmique. C'était l'expansion de l'univers.

### **L'application cosmologique de la relativité générale**

#### *L'interprétation de la loi de Hubble*

Si l'on interprète la loi de Hubble par un effet Doppler-Fizeau, la vitesse radiale des galaxies est donnée par :

$$V_r = cz = H.d$$

( $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$  : décalage spectral ;  $V_r$  : vitesse radiale ;  $H$  : constante de Hubble ;  $d$  : distance de la galaxie) et une insurmontable difficulté se présente pour expliquer l'énorme énergie cinétique,  $\frac{1}{2}mV^2$ , des galaxies les plus lointaines.

L'interprétation relativiste élude cette difficulté. Elle pose, comme un véritable choix philosophique, l'immobilité (on dira la comobilité) des galaxies, particules libres de l'espace, avec le système de coordonnées (référentiel).

Il en résulte aussi que toutes les galaxies ont le même temps propre  $t$ , qui est aussi le temps de l'observateur.

On l'appelle le *temps cosmique*.

Soit alors une galaxie  $G$  observée depuis la nôtre  $G_0$  et soient  $t_e$  et  $t_0$  respectivement les instants d'émission des photons par  $G$  et de leur réception par  $G_0$ . On établit alors la relation simple :

$$\frac{dt_0}{R(t_0)} = \frac{dt_e}{R(t_e)}$$

qui lie la durée  $dt_e$  d'un phénomène en  $G$  qui a débuté à l'instant  $t_e$  à la durée de son observation en  $G_0$ ,  $dt_0$ , quand les photons en ont apporté l'information à l'observateur.

$R(t_0)$  et  $R(t_e)$  sont les valeurs du rayon de courbure (variable) de l'espace correspondant aux instants  $t_0$  et  $t_e$ .

En particulier, si  $dt_e$  est la période d'un rayonnement émis par  $G$ ,  $dt_0$  sera la période du rayonnement reçu. Ainsi le rayonnement de longueur d'onde  $\lambda$  émis par  $G$  sera observé avec un décalage  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = z$ , et reçu sur la longueur d'onde  $\lambda + \Delta\lambda$  donné par :

$$\frac{\lambda + \Delta\lambda}{\lambda} = 1 + z = \frac{dt_0}{dt_e} = \frac{R(t_0)}{R(t_e)}$$

Ce *décalage spectral* est dit *cosmologique*. Il est dû au seul effet de distance de la source, qui fait qu'entre l'instant  $t_e$  d'émission des photons et l'instant  $t_0$  de leur réception, le facteur de courbure  $R(t)$  a varié. Le décalage est donc un redshift\* ( $z > 0$ ), comme le montrent les observations, si la fonction  $R(t)$  est croissante. Si l'on convient de définir l'univers comme la géométrie de son espace, le décalage spectral cosmologique est expliqué par l'expansion de l'univers.

\* Décalage vers le rouge.

Développons  $R\{t_0\}$  en termes de  $t_0 - t_e$  et, pour des galaxies relativement proches, limitons le développement au terme d'ordre 1. Il vient, en désignant par  $\dot{R}(t)$  la dérivée première de  $R(t)$  :

$$1+z = \frac{R\{t_e\} + \{t_0 - t_e\} \cdot \dot{R}\{t_e\}}{R\{t_e\}} = 1 + \{t_0 - t_e\} \cdot \frac{\dot{R}\{t_e\}}{R\{t_e\}}$$

ou

$$cz = \frac{\dot{R}\{t_e\}}{R\{t_e\}} \cdot c \cdot \{t_0 - t_e\} = H \cdot d$$

C'est la loi de Hubble :  $c\{t_0 - t_e\}$  est la distance  $d$ , puisque  $t_0 - t_e$  est le temps de parcours des photons. La "constante" de Hubble,  $H$ , apparaît comme une fonction du temps cosmique  $t$ , égale à  $\frac{\dot{R}(t)}{R(t)}$ .

Elle ne serait une vraie constante que si la fonction  $R(t)$  était une fonction exponentielle (modèle stationnaire de Hoyle par exemple).

### Les modèles d'univers

La loi d'observation essentielle de la cosmologie, la loi de Hubble, étant ainsi interprétée, il convient de rechercher le modèle susceptible de représenter l'univers physique de façon réaliste. Deux éléments sont à déterminer : la géométrie de l'espace (univers fini ou infini) et la fonction  $R(t)$  qui conditionne l'évolution historique de l'univers.

C'est Tolman qui, en 1935, présenta l'étude exhaustive de tous les modèles possibles. Aujourd'hui, les progrès théoriques comme les nouveaux résultats d'observations astronomiques ont conduit au choix des modèles de Friedmann, dont chacun des trois types géométriques est représenté sur la figure 1.

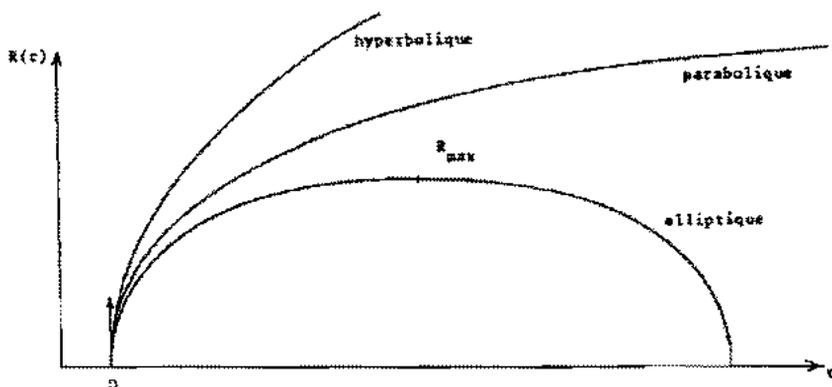


figure 1 : les modèles de Friedmann

On ne sait pas encore à quel type de géométrie l'univers réel appartient. Mais le problème est cerné et simplifié, car si l'on connaît la fonction  $R(t)$ , on connaît la géométrie et inversement. On remarquera que la finitude ou l'infinitude de l'univers est spatio-temporelle. L'univers a, à la fois, un espace et une durée infinis (modèles parabolique ou hyperbolique) ou un espace et une durée finis (entre deux singularités successives  $R=0$ ). C'est alors le modèle elleptique.

La décélération de l'expansion se traduit par le fait que la concavité des courbes représentatives de  $R(t)$  est tournée vers le bas (dérivée seconde,  $\ddot{R}$ , négative). On définit le paramètre de décélération  $q$  par la relation :

$$q = - \frac{\ddot{R}R}{\dot{R}^2} = - \frac{\ddot{R}}{\dot{R}} \cdot \frac{R}{\dot{R}} = - \frac{\ddot{R}}{\dot{R}} \cdot \frac{1}{H^2}$$

où  $H$  est la constante de Hubble. On montre alors une relation importante entre la densité matérielle  $\rho$  de l'espace et le paramètre de décélération  $q$ .

C'est la relation :

$$q = \frac{4\pi G}{3H^2} \rho \quad (G \text{ est la constante de gravitation})$$

Deux approches observationnelles concourent à déterminer le modèle d'univers.

- La détermination directe de la fonction  $R(t)$ , par exemple par les diagrammes "décalage spectral-distance", c'est-à-dire "décalage spectral-magnitude ou indice de couleur".

- Par la détermination de la densité  $\rho$  (dénombrement de galaxies jusqu'à une distance connue). On démontre en effet que le paramètre de décélération,  $q$ , a la valeur critique  $\frac{1}{2}$  pour le modèle parabolique et et l'on a :

$$q > \frac{1}{2} \text{ pour les modèles elliptiques}$$

$$q < \frac{1}{2} \text{ pour les modèles hyperboliques}$$

Les meilleurs déterminations actuelles de Sandage et Tolman (Mont Palomar) qui évitent, de par leurs méthodes, les erreurs systématiques de sélection, conduiraient à un modèle hyperbolique ( $q=0,02$ ) et à une valeur de la constante de Hubble égale à :

$$H = 50 \text{ km/sec/Mpc}$$

Mpc : symbole du mégaparsec =  $10^6$  parsecs

1 parsec vaut  $3,08 \cdot 10^{13}$  km ou 3,26 années lumière

Une valeur de  $q$  supérieure à  $\frac{1}{2}$  aurait permis de conclure à un modèle elliptique et à la finitude de l'univers, mais une valeur inférieure à la valeur critique n'autorise aucune conclusion car on a pu "oublier" beaucoup de matière dans la détermination de  $\rho$  : trous noirs, matière intergalactique, nuages chauds, sources de rayons X, invisibles depuis le sol. Ainsi un grand espoir est fondé sur les observations cosmologiques en satellites dans les années à venir.

Si l'univers est elliptique, est-il un univers pulsant entre les singularités  $R=0$  successives ? La géométrie du trou noir a un tel comportement. L'univers serait-il alors un trou noir dans un univers d'ordre supérieur ?

Enfin, quel que soit le modèle, l'univers semble issu d'une singularité  $R=0$ . En ce point, on a  $\frac{dR}{dt} = \infty$  (tangente verticale aux courbes). On parle d'explosion primordiale de l'univers ou big bang, origine dans le temps de la phase d'expansion actuelle de l'espace mais qui n'est pas nécessairement une origine absolue de l'univers, la singularité pouvant être précédée par une phase de contraction (courbes symétriques des courbes représentées).

### L'univers primordial

Abandonnant ces questions plus métaphysiques que physiques mais qui permettent de poser les problèmes métaphysiques avec plus de précision, on peut revenir à un point de vue scientifique s'attachant à décrire la physique de l'univers primordial. On établit la relation très simple :  $R(t) \cdot T = Cte$  où  $T$  est la température de rayonnement de l'univers.

L'approche de la singularité [ $R \rightarrow 0$ ] conduit donc à des températures infinies. Toute la physique des hautes énergies se trouve alors réalisée.

L'univers physique aurait ainsi surgi au cours d'une fantastique explosion énergétique, le big bang. Plus tard, une partie de cette énergie originelle se serait condensée en matière, selon la célèbre relation d'Einstein  $E=mc^2$ , constituant ainsi l'univers matériel.

L'état physique de très haute énergie du big bang correspond à des températures prodigieusement élevées mais au cours de son expansion spatiale, l'univers se refroidit. Aujourd'hui sa température est à peine de quelques degrés au-dessus du zéro absolu. La découverte de la composante de rayonnement de l'univers, qui a précisément une température de 2,7 degrés absolus, faite en 1965 par les radioastronomes Penzias et Wilson, est après celle de sa composante matérielle par Hubble, la seconde grande découverte de la cosmologie moderne.

L'étude des propriétés du rayonnement, dit de 3 degrés, n'a fait que confirmer la thèse du big bang. Pourquoi la composante de rayonnement de l'univers obéit-elle à la loi de distribution énergétique de Planck dans l'univers actuel qui est parfaitement transparent aux photons ? La réponse est que le rayonnement a acquis le caractère thermique de la loi de Planck dans l'univers dense, à une époque où il y avait interaction entre les photons et les électrons de la matière ionisée et l'on montre que la loi d'expansion conserve la forme de la loi de Planck au cours du temps, donc même après le passage de la matière à l'état neutre, lorsque l'univers est devenu transparent aux photons.

### La physique des particules élémentaires

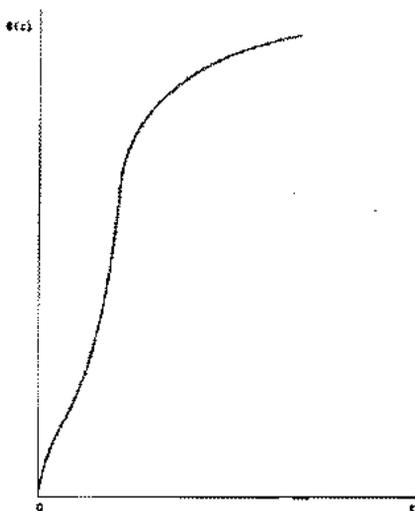
Nous assistons d'autre part aujourd'hui à un tournant crucial de l'histoire des sciences : la symbiose de la cosmologie et de la physique des particules élémentaires, en quelque sorte de la science de l'infiniment petit avec la science de l'infiniment grand. La raison en est que toute observation lointaine dans l'univers est une observation de son passé, puisque la lumière chemine avec une vitesse finie. Si donc nous pouvions porter nos investigations assez loin dans l'espace, après avoir d'abord traversé des régions certes de plus en plus vastes, elles convergeraient vers le big bang qui est un état microscopique et quantique de l'univers.

Ainsi, à la question : "quelle était la physique de l'univers aux formidables énergies du big bang ?" c'est à la physique des particules élémentaires de répondre. Elle nous apprend que, dans notre univers actuel très refroidi, les particules fondamentales se réduisent à trois types principaux parfaitement *distincts* : les électrons, les neutrinos, les quarks, tandis qu'aux très hautes énergies et températures du big bang, ces particules *s'unifient*, ainsi que les forces qui interagissent entre elles. Lors du big bang on assiste sans doute à la réalisation concrète de la *grande unification* des interactions fortes, faibles et électromagnétiques et peut-être même à celle de la super unification de la gravitation avec les trois autres. A ces énergies, la désintégration du proton n'est plus un fait rare mais le taux de désintégration n'est pas exactement le même pour les protons et pour les antiprotons. Il est sans doute légèrement plus élevé pour ces derniers qui s'annihilent donc tous par paires avec un nombre égal de protons, quand l'univers se sera refroidi à la température de seuil de cette particule,  $10^{13}$ K. Il subsistera ainsi seulement un faible résidu de protons (et de neutrons), constituant finalement la *composante matérielle* de l'univers, [galaxies, matière interstellaire, étoiles, planètes, êtres vivants], formée *d'un seul type de matière*.

Les mécanismes de rupture de la symétrie de grande unification s'accompagnent de la production en très grand nombre de bosons particuliers, les bosons de Higgs aux masses élevées, qui confèrent une

densité d'énergie énorme au vide quantique. Cette densité modifie l'allure de l'expansion qui devient exponentielle pendant la très courte durée [  $\sim 10^{-32}$  sec ] de la rupture de l'état physique de grande unification. Cette phase d'expansion exponentielle est appelée *phase inflationnaire* (figure 2). Elle explique notamment, par l'énorme valeur du rayon de courbure ainsi atteinte dans les tout premiers instants de l'univers, la quasi platitude de l'espace universel actuel, ainsi que l'existence initiale de relations causales entre des régions actuellement très éloignées dans l'espace, dont les propriétés physiques ont pu être ainsi homogénéisées, comme le révèlent notamment les observations relatives au rayonnement de 3K.

figure 2



La phase exponentielle de l'expansion de l'univers, dite *phase inflationnaire*, située entre deux phases d'expansion de type-Friedmann.

La dernière aboutit à l'univers actuel. Le rayon de courbure  $R(t)$  y varie peu désormais.

Son énorme valeur [  $\sim 10^{28}$  cm ] a été acquise en fait lors de la phase d'expansion exponentielle, impossible à représenter à l'échelle sur la figure :  $R(t)$  y varie d'un facteur  $10^{30}$  en  $10^{-32}$  sec.

### Au-delà de la relativité générale

Ainsi les grands faits d'observation cosmologique (la loi de Hubble, l'absence d'antimatière à grande échelle dans l'univers, le caractère thermique de la composante énergétique) sont correctement interprétés dans

le cadre de la théorie de la relativité générale. Par contre, il semble difficile d'établir une théorie d'unification de la gravitation avec les autres forces fondamentales, puisque la gravitation y apparaît comme une propriété de l'espace-temps lui-même, sa courbure, alors qu'il n'est que le cadre, la scène de théâtre où se produisent les autres interactions, indépendantes de lui.

L'approche d'une théorie quantique de la gravitation et par suite d'une cosmologie quantique semble échouer pour cette raison, dans le cadre des fameuses théories de jauge qui ont si bien réussi pour les interactions non gravitationnelles (par exemple : la théorie de Weinberg, Salam, et Ward de l'unification électrofaible, couronnée par la découverte des bosons de jauge correspondant,  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , au CERN, en 1983).

On s'explique ainsi les tentatives orientées vers d'autres méthodes, notamment les théories de Kaluza-Klein qui reposent sur des espaces multidimensionnels (par exemple l'espace-temps à 11 dimensions de la théorie de *supergravité*). Ces théories posent le problème de la *compactification* des dimensions supplémentaires, indécélables expérimentalement et qui doivent donc être "enroulées" sur elles-mêmes avec des rayons de l'ordre de la longueur de Planck ( $\sim 10^{-33}$  cm).

Tout récemment la théorie des *supercordes* est apparue comme une approche prometteuse de la gravitation quantique. Une particule élémentaire n'a plus dans cette théorie un aspect ponctuel. C'est une petite corde dont la longueur est peut-être de l'ordre de grandeur de la longueur de Planck. En fait les particules-cordes sont, d'après le principe même de la mécanique ondulatoire, les particules associées aux ondes correspondant aux différents modes vibratoires de la corde. L'espace de toutes les configurations possibles d'une supercorde est ainsi beaucoup plus général que l'espace-temps de la relativité générale. Il le contient et c'est cette généralisation de l'espace qui devrait permettre de traiter toutes les interactions fondamentales sur le même plan et de les modéliser par une même méthode qui permettrait peut-être alors d'établir la théorie d'unification recherchée. La gravitation a dû jouer un rôle essentiel dans l'univers primordial. Cette force n'apparaît aujourd'hui que sous son aspect de force attractive, mais vraisemblablement, tout comme la force électromagnétique qui peut être aussi bien attractive que répulsive, une gravitation négative, répulsive, aurait existé dans les tout premiers instants du big bang, cause vraisemblable de l'explosion primordiale, du big bang lui-même. On peut même penser que cette énergie gravitationnelle négative pourrait compenser très exactement toute l'énergie positive existant dans l'univers sous forme de matière ou de rayonnement. Ainsi le *bilan énergétique total de l'univers sur l'espace-temps serait nul* et l'univers pourrait être né du vide.

## Vide et existence

Le vide quantique est le siège de créations permanentes de paires de particules et d'antiparticules, dites virtuelles parce qu'elles s'annihilent aussitôt. Ces créations matérielles sont autant de fluctuations énergétiques du vide. L'univers pourrait avoir résulté d'une gigantesque fluctuation du vide quantique.

En mathématique, un ensemble a des éléments mais l'esprit de généralisation a conduit à la notion de l'ensemble vide, dont on démontre qu'il n'est pas absurde. Il faut presque le regretter : l'ensemble vide absurde, c'eût été la nécessité de l'existence prouvée. Il n'en est rien et la question "pourquoi quelque chose plutôt que rien ?" ne semble pas pouvoir recevoir de réponse rationnelle.

En physique, l'existence est un constat ; en mathématiques, elle doit être posée par un axiome. C'est l'axiome, dit de l'ensemble vide, qui pose l'existence de ce dernier. Et toute la mathématique, tout l'univers mathématique, est alors construit à partir de l'ensemble vide, tel l'univers physique né du vide quantique.

Le sens profond de l'axiome d'existence de l'ensemble vide est que, si rien n'existe, le vide existe. Alors tout l'univers existe.

Toujours est-il que la cosmologie moderne nous découvre une fascinante vision de l'univers : l'univers né du vide comme un tout, unifié ; puis, cette fulgurante succession des ruptures de symétries qui vont l'ouvrir à la diversité, dont la forme la plus évoluée semble bien être celle de la vie et de la vie pesante.

Bien d'autres découvertes observationnelles et théoriques étonneront encore les générations de demain mais il y a fort à parier que la relativité générale restera la base solide de ces développements et qu'elle rayonnera encore longtemps comme une œuvre de grande intelligence du monde qui nous entoure, une extraordinaire poésie mathématique de l'univers.

## Appendice

### La constante cosmologique

L'histoire de la cosmologie suit celle d'une constante introduite dans les équations d'Einstein pour leur assurer toute leur généralité et appelée constante cosmologique. On la désigne par  $\Lambda$ . Mathématiquement c'est une constante arbitraire.

Or, dans la théorie de la relativité générale, il faut prendre la constante cosmologique égale à zéro pour traiter le problème de la gravitation et retrouver les équations classiques de la théorie de Newton comme une première approximation de la théorie relativiste, alors qu'il fallait lui attribuer une valeur, certes faible, mais non nulle pour décrire le premier

modèle d'univers proposé par Einstein en 1916 : un univers statique, fini, sphérique. C'était là une difficulté agaçante pour Einstein.

La constante  $\Lambda$  s'interprétait alors, dans son modèle d'univers, comme directement reliée à la *densité massique* moyenne de l'univers par la relation :

$$\Lambda = \frac{4\pi G}{c^2} \rho$$

Que de conceptions nouvelles en peu d'années : d'abord le modèle sphérique d'univers proposé par Einstein, univers certes encore imaginé comme statique, immuable à grande échelle mais *fini*, doté d'un espace refermé sur lui-même. Déduite d'une théorie aussi solide que la relativité générale, cette possibilité d'existence d'un univers fini représentait à l'époque, par rapport à l'idée communément admise d'un univers infini, une révolution conceptuelle aussi grande que le fut, au 16<sup>e</sup> siècle, la révolution copernicienne. Puis ce fut avec Hubble l'abandon de l'idée d'un univers statique immuable au profit d'un univers évolutif, la plus grande découverte de la cosmologie moderne.

Certains modèles théoriques d'univers non statiques, évolutifs, exigeaient une constante cosmologique dans les équations mais d'autres existaient, qui s'accommodaient d'une valeur *nulle* de cette dernière notamment les modèles de Friedmann. On pouvait trouver des modèles d'univers à constante cosmologique nulle. La difficulté signalée plus haut disparaissait donc avec la découverte de Hubble qui marquaient définitivement le caractère évolutif de l'univers.

Depuis peu, les nouvelles théories inflationnaires de l'univers rendent compte de l'énorme *densité massique* du vide quantique au moment de la rupture de symétrie de grande unification par la production en grand nombre des bosons de Higgs. Pendant la très courte durée de leur intervention,  $10^{-32}$  sec [qui sera celle de la phase d'expansion exponentielle], cette densité est *constante* et son introduction dans les équations (jusque-là à constante cosmologique nulle) est équivalente à celle d'une constante cosmologique de très forte valeur. Les équations prennent alors pour solution la loi exponentielle d'expansion. Après la rupture de symétrie, tout rentre dans l'ordre ! Le vide qui n'est plus peuplé de bosons de Higgs reprend une densité nulle et les équations, à nouveau sans constante cosmologique, admettent une solution de type Friedmann, cependant que la constante cosmologique s'interprète donc dans les modèles évolutifs d'univers, à nouveau comme une densité massique (comme dans le modèle initial, statique d'Einstein), à savoir la *densité du vide quantique*. On s'explique ainsi que pour une description de l'univers dans son *état actuel* comme pour l'interprétation des phénomènes gravitationnels observés aujourd'hui, il faille la prendre égale à *zéro*, le vide quantique ayant désormais, après toutes les brisures de symétrie, une densité nulle.