

## **Edgard Gunzig : créer l'Univers à partir de rien**

Professeur de physique théorique à l'Université libre de Bruxelles., Edgard Gunzig a été couronné trois fois par la Gravity Research Foundation américaine. Il organise chaque année un colloque international de relativité générale et cosmologie à Peyresq (Alpes-de-Haute-Provence). Il est l'éditeur et coauteur de "*Le vide, univers du tout et du rien*", paru en 1998 aux éditions Complexe.

*La cosmologie bute sur le Big Bang, l'instant initial décrit par une singularité mathématique. Des modèles émergents font appel à une fluctuation du vide quantique qui engendrerait une expansion inflationniste de l'espace-temps et la création exponentielle de particules.*

**La Recherche: Vous travaillez sur un scénario original pour la naissance de l'Univers, basé sur les fluctuations du vide quantique. Quel est l'apport fondamental de ce modèle ?**

**Edgard Gunzig :** L'un de ses atouts les plus séduisants, c'est qu'il fait l'économie du Big Bang. Le Big Bang est en réalité un aveu d'impuissance de la théorie de la relativité générale. Celle-ci ne fait que gérer les relations qui existent entre l'espace-temps et la matière, entre contenant et contenu – ce qui constitue déjà une prouesse magistrale. Mais en ce qui concerne l'origine de la matière, elle ne dit rien. La matière est considérée comme une donnée immuable. Et puisque nous sommes dans un Univers en expansion, toutes les tentatives de raconter l'histoire de l'Univers à l'envers, de remonter aux sources, se heurtent au même problème : une quantité de matière donnée se retrouve confinée dans un volume de plus en plus petit, qui tend vers zéro dans un passé fini. On bute donc sur une singularité initiale, c'est-à-dire un moment où toutes les grandeurs (température, densité, pression, courbure...) deviennent infinies simultanément. Dans un tel cas de figure, la théorie n'a plus rien à dire, elle n'est même plus valide. Le Big Bang se situe irrémédiablement en dehors de la théorie. C'est une situation pour le moins inconfortable.

**Mais le Big Bang ne fait-il pas l'objet d'un large consensus parmi les scientifiques?**

Certainement, mais il s'agit là du Big Bang pris dans un autre sens. Il y a en effet une confusion fréquente entre deux significations de ce terme. La première, celle qui est au centre de notre discussion, désigne la singularité mathématique, parfois représentée de manière imagée par un événement cataclysmique primordial, qui traduit l'apparition de l'Univers. Dans la seconde, le Big Bang désigne une classe de théories - les modèles cosmologiques standard de Big Bang - qui décrivent une phase primordiale extrêmement chaude et dense, considérée comme le début physique de l'univers. L'histoire cosmologique qui en découle est une histoire thermique qui amène la structuration progressive de l'Univers. La description de cette structuration, en particulier la prédiction remarquablement précise des abondances relatives des éléments légers (deutérium, hélium, lithium) représente un succès incontestable de ces "théories de Big Bang". Le moment initial, lui, reste beaucoup plus énigmatique.

**Faut-il faire une croix sur la relativité générale pour éviter la singularité du Big Bang ?**

Ce serait jeter le bébé avec l'eau du bain ! Non, il faut l'enrichir, la faire évoluer. Une possibilité consiste à y injecter la théorie quantique des champs, c'est-à-dire à traiter selon les lois de la mécanique quantique le contenu de l'Univers. En un sens, c'est inévitable, puisque tout ce qui existe est quantique par essence. Mais habituellement, dans l'étude des phénomènes macroscopiques, on peut l'oublier. Ce niveau de description est trop dissimulé pour jouer un rôle lorsqu'on parle des océans ou du système solaire par exemple. Cependant, pour les conditions qui prévalent tout au début de l'univers, lorsque la température est extraordinairement élevée,

nous devons nécessairement tenir compte du comportement quantique de la matière.

### **Trouve-t-on là une façon de rapprocher l'infiniment grand et l'infiniment petit ?**

Absolument, oui. Nous sommes d'ailleurs en train de vivre une situation fascinante et inédite en physique, car ces deux domaines ont longtemps été disjoints et traités indépendamment l'un de l'autre. Mais aujourd'hui, l'intimité de leurs liens est devenue telle que nous pouvons explorer le Cosmos au travers d'expériences menées dans les accélérateurs de particules, et vice versa. Ce que les physiciens sont en train de tenter à l'heure actuelle, c'est de fusionner la relativité générale et la physique des particules (théorie quantique des champs et théorie des interactions fondamentales) pour obtenir un cadre explicatif plus général. Mais la route est longue et semée d'embûches. Je vous parlerai tout à l'heure de la "*catastrophe du vide*", qui constitue une crise jusqu'à présent insurmontable. Mais sur certains points, en particulier la cosmogénèse\*, de grands progrès ont été réalisés. Pour l'instant, les deux théories ont un peu l'allure de sœurs siamoises soudées par endroits et farouchement rebelles ailleurs.

### **Etes-vous convaincu de la possibilité d'unifier entièrement la relativité générale et la physique des particules ?**

Tous les physiciens font ce pari. Aidés en cela par l'existence de nombreux précédents. Depuis plus d'un siècle, la physique procède par fusions successives de théories. Quand, en 1864, James Clerk Maxwell a compris qu'électricité et magnétisme étaient deux aspects d'un seul et même phénomène, il a créé l'électromagnétisme en unifiant, dans une seule théorie, ces deux descriptions limitées. Plus tard, pour que la mécanique classique et l'électromagnétisme présentent une invariance commune par rapport à tous les observateurs inertiels\*, Albert Einstein n'a pas hésité à franchir un pas énorme. Il a modifié la mécanique classique, créant ainsi en 1905 la relativité restreinte. Au passage, il a fait voler en éclats certaines de nos catégories mentales les plus solides comme le temps et l'espace. Plus tard encore (1916), il étend la toute jeune relativité restreinte en y incluant la gravitation. Celle-ci n'est alors plus considérée comme une force, elle exprime une propriété géométrique : la courbure de l'espace-temps. Les corps ne font que suivre des trajectoires privilégiées (les géodésiques), pré-imprimées dans l'espace-temps courbe par la présence de masses. Ainsi, l'espace-temps devient un protagoniste actif de la physique, qui interagit avec son contenu. Ce n'est plus le cadre fixe que l'on concevait auparavant. C'est la relativité générale... mais pas encore assez générale puisque que nous cherchons aujourd'hui à enrichir !

### **Comment donc la théorie quantique des champs permet-elle de sortir de l'impasse du Big Bang constatée par la relativité générale?**

Je préciserai d'abord que la relativité générale en soi comporte la possibilité d'éviter le Big Bang. Einstein avait d'ailleurs calibré ses équations, c'est-à-dire ajouté un terme à la main (la fameuse constante cosmologique) pour s'assurer que l'Univers soit statique, ainsi que tout le monde le pensait à l'époque. Mais, d'un point de vue mathématique, l'Univers statique d'Einstein était comme un crayon en équilibre sur sa pointe, la moindre déviation l'aurait mis par terre. Le coup de grâce lui a été donné au moment de la découverte par Edwin Hubble de la fuite des galaxies. Si l'univers, comme le montraient ces observations, était en expansion, alors il fallait supprimer la constante cosmologique. Toutes les solutions aux équations de la relativité générale produisaient un scénario dynamique, c'est-à-dire un Univers soit en expansion soit en contraction. On butait donc inmanquablement sur une singularité mathématique de type Big Bang.

J'ajouterai ensuite que cet état de choses ne représente pas nécessairement une impasse pour tout le monde. Les auteurs spiritualistes voient d'un bon œil l'évanouissement du discours scientifique au moment de la création. Mais, pour la plupart des scientifiques, ce trou explicatif est fondamentalement inacceptable. Et il s'avère qu'une piste très prometteuse réside dans la conjonction de la relativité générale et de la théorie quantique des champs, car cette conjonction ouvre la possibilité mathématique et physique d'une création *ex nihilo*. Encore faut-il préciser que le vide primordial n'est pas n'importe quel vide, il s'agit du vide quantique.

## **Qu'appelle-t-on le vide quantique ?**

Pour l'expliquer, il faut partir du paradigme de la théorie quantique : pour des raisons qui sont inhérentes à la conceptualisation du monde microscopique, les objets (particules, ondes ou champs) ne peuvent jamais être au repos absolu. Ils restent toujours dans un état de vibration résiduelle. L'état le plus figé qui soit compatible avec les exigences de la théorie est un état dans lequel subsistent des mouvements qui sont impossibles à éradiquer, non pas pour des raisons techniques mais pour des raisons fondamentales. Cela se manifeste dans le formalisme mathématique par un ensemble d'ingrédients comme les relations d'incertitude. On ne connaît jamais avec une précision absolue l'ensemble des grandeurs qui caractérisent un objet : vitesse et position par exemple. Plus on connaît de l'une, moins on connaît de l'autre. Ce sont des résultats qui choquent l'intuition. Pourquoi ? Parce que nous réfléchissons dans les termes qui nous sont familiers. Notre langage est le reflet de notre vécu et nos catégories conceptuelles sont enracinées dans l'expérience sensible. Or, si nous appliquons ces catégories au monde microscopique, nous lui imposons une description qui ne lui convient pas. Il y a donc un viol, et le prix à payer ce sont les relations d'incertitude. Ce sont elles qui font que toute chose est nécessairement fluctuante. Ainsi, pour revenir au vide, c'est l'état le plus figé qui soit et pourtant il fluctue. Il contient une certaine énergie non nulle associée à cette fluctuation. C'est l'énergie du vide, donc l'état d'énergie le plus bas que peut posséder le système.

## **Le vide que vous décrivez semble loin d'être vide !**

C'est que la notion de vide est totalement tributaire du cadre théorique à travers lequel on l'approche. En philosophie, on peut concevoir le vide comme absence de toute chose, mais il s'agit d'une vue de l'esprit. En physique, le vide est l'absence de certaines choses, celles que l'on a définies dans la théorie. En théorie des champs classique, par exemple, un champ électromagnétique peut être supprimé, annulé. Le vide, c'est l'absence de champ. En théorie quantique, au contraire, un champ est inamovible. On ne peut pas s'en débarrasser. Le vide ne peut donc être qu'un certain état du champ. Et si le champ acquiert de la sorte un statut ontologique, les particules, en revanche, perdent le leur : elles apparaissent, disparaissent, se transforment. La raison de ces comportements bizarres est que les particules sont l'émanation du champ. Elles ont perdu leur situation de "fondamentaux de l'univers" pour devenir la simple manifestation des fluctuations (ou excitations) du champ quantique.

## **Pourriez-vous décrire ce qu'est un champ quantique ?**

Je sais que tout cela paraît très abstrait. Je pense à une image : les particules sont au champ quantique ce que les sons peuvent être à une corde musicale. Sans voir la corde, nous percevons les sons. Ceux-ci traduisent le fait que la corde est excitée, dans un certain état vibratoire. De la même façon, sans voir le champ, nous détectons des particules qui révèlent ses différents états d'excitation. Les particules sont comme les harmoniques différentes que l'on peut produire avec une même corde selon la façon dont on l'excite. A ceci près que le champ quantique ne connaît pas de position de repos. Il présente toujours une vibration résiduelle : le vide quantique.

## **En somme, le champ est un chant ?**

Il faut être prudent avec les images. Ce qu'il faut retenir, c'est que les particules révèlent les états du champ qui, lui, est inamovible. Un champ quantique reste un champ quantique, éventuellement sans la moindre particule s'il se trouve dans son état vide (sauf dans des cas très particuliers de symétries spontanément brisées). L'apparition de particules révèle la transition de ce vide vers des états excités du champ quantique, tout comme les changements de son de la corde expriment les modifications de l'état vibratoire de la corde.

## **L'Univers pourrait-il avoir été engendré par de telles excitations du vide quantique ?**

Quelle possibilité alléchante, en effet ! Malheureusement, elle semble vouée à l'échec. En effet, la création de particules que je viens d'évoquer suppose un apport d'énergie extérieure au champ quantique. Celui-ci ne peut pas s'exciter tout seul. Il est bien le lieu naturel des phénomènes de création et d'annihilation de matière, mais il ne peut les engendrer que si on lui en donne les moyens, c'est-à-dire si on lui fournit de l'énergie. Moyennant cette condition, il agit comme un transformateur qui réalise l'équivalence masse-énergie de la relativité restreinte ( $E=mc^2$ ). Hélas, il n'y a pas d'extérieur à l'univers, puisqu'il contient tout par définition, donc tout extérieur imaginable. A fortiori, il n'y a pas de source d'énergie extérieure pour doper le champ quantique et lui faire "cracher" des particules. Or, et c'est là le coup de théâtre, la relativité générale apporte une réponse qui découle du statut dynamique de l'espace-temps : l'expansion de l'espace induit l'excitation du champ, et donc la création de particules. Un peu comme la corde musicale dont l'état vibratoire se modifie si on augmente sa longueur. L'expansion de l'Univers apparaît comme un réservoir d'énergie interne. Elle joue le rôle qu'aurait joué une source extérieure d'énergie. C'est donc un système tout à fait particulier, dans lequel il n'y a pas d'extérieur, mais auquel de l'énergie est apportée "comme si" elle venait de l'extérieur. Le processus ne consomme globalement aucune énergie, puisque celle-ci est simplement transvasée du contenant géométrique vers le contenu matériel, le champ quantique. De plus, il s'agit d'un phénomène boule de neige, dans lequel la présence des particules produites amplifie l'expansion, qui à son tour amplifie la production de particules, etc. Et le vrai prodige, c'est que ce processus peut s'enclencher quel que soit l'état quantique du champ au départ, même si c'est l'état de vide. La préexistence de particules matérielles n'est pas requise pour amorcer la création d'autres particules.

### **Ce scénario n'évoque-t-il pas l'homme qui se soulève en tirant sur ses chaussures ?**

Parfaitement. La physique actuelle, c'est un peu *Alice au pays des merveilles*. L'expansion de l'Univers et la création de matière sont deux phénomènes qui s'épaulent l'un l'autre et nous avons montré (1) qu'il y a une solution mathématique exacte, unique, dans laquelle le contenu produit par l'expansion est précisément le contenu qu'il faut pour soutenir cette expansion. Celle-ci s'emballe exponentiellement, c'est la première proposition théorique d'un modèle d'inflation. Divers autres modèles d'inflation qui s'articulent autour des théories unifiées des interactions fondamentales ont ensuite été proposés (2). L'inflation apparaît comme le remède miracle incontournable d'un ensemble de "maladies" dont souffrent les modèles cosmologiques standard.

### **Et c'est ainsi qu'on remplace le Big Bang ?**

Oui. Dans ce scénario cosmologique, la singularité du Big Bang se voit remplacée par un détonateur physique, qui n'est autre qu'une instabilité du vide. En la présence, inévitable, de la gravitation, le système passe nécessairement d'un vide quantique instable à un univers en expansion et empli de matière, selon un processus qui s'entretient tout seul et qui ne coûte rien du point de vue énergétique.

### **L'Univers sortirait donc du vide comme un lapin d'un chapeau ?**

En effet, mais il s'agit d'un chapeau quantique. Tout se passe comme si la matière et l'espace-temps courbe d'une part et le vide d'autre part n'étaient que deux phases distinctes d'un seul et même substrat. Deux phases énergétiquement équivalentes. Tout ce que nous connaissons, y compris nous-mêmes, ne serait qu'une forme cristallisée du vide.

### **Ne nous aviez-vous pas annoncé une "catastrophe du vide" ?**

La catastrophe du vide illustre le conflit majeur qui subsiste entre relativité générale et théorie quantique des champs. Pour les besoins de notre cosmogénèse, nous avons utilisé les excitations du vide quantique, mais nous avons négligé l'énergie du vide en tant que telle. Or, cette énergie est colossale et devrait influencer la courbure de l'espace-temps puisqu'il se courbe en présence de toute masse ou énergie. Si c'était le cas, la courbure deviendrait tellement forte que je ne

pourrais même plus vous parler car l'horizon de l'Univers visible serait de l'ordre de quelques centimètres ! Absurde, évidemment. Cette catastrophe du vide montre que le vide quantique, s'il est capable du meilleur en fournissant un mécanisme pour la création de l'Univers, est aussi capable du pire : imposer une courbure démentielle à ce même Univers.

### **Et comment s'arrête la production exponentielle de particules ?**

Ce modèle a montré là une faiblesse importante, commune d'ailleurs tous les modèles inflationnistes dans lesquels il faut recourir à des procédés ad hoc pour arrêter l'inflation. Mais ici encore une surprise de taille nous attend. Des parades apparaissent aujourd'hui qui étaient déjà contenues dans les équations d'Einstein (équations non pas quantiques mais classiques !) Autrement dit, la relativité générale semble contenir clandestinement la possibilité d'un scénario autoconsistant purement classique ! Ce scénario nous occupe activement en ce moment (3). Il faut souligner que la physique traverse aujourd'hui une époque vraiment extraordinaire où tous les concepts les plus importants sont en pleine révolution. Nous avançons dans la tourmente : on peut s'attendre du jour au lendemain à des innovations stupéfiantes !

Propos recueillis par Elisa Brune.

\* Une classe d'observateurs inertiels est constituée de tous les observateurs en mouvement rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres. On entend par observateur, dans le cadre d'une théorie donnée, un point de vue concret ou mathématique à partir duquel on peut décrire le monde.

\* La cosmogénèse est la description scientifique de l'origine de l'Univers, considérée comme un événement physique.

R. Brout, F. Englert et E. Gunzig, Ann. Phys. 115, 78, (1978); G.R.G., 1, 1 (1979); premier prix de la Gravity Research Foundation 1978; premier prix de la Gravity Research Foundation 1978

E. Gunzig et P. Nardone, Fund. Cosm. Phys. vol. 11, 331-443, (1987);

E. Gunzig et P. Nardone, Phys. Lett.B 118, 324 (1982).

A.H. Guth, Phys. Rev.D 23, 347 (1981);

A. Linde, "Inflation and Quantum Cosmology", Academic Press, Boston, 1990.

E. Gunzig et al, Phys. Rev. D, 63, 067301, (2001)

Paul Davies, Avant le Big Bang, La Recherche, janvier 2002

Virginia Trimble, La genèse du Big Bang, La Recherche, hors série n°1, avril 1998