

KOSMOI

ou

Les mondes multiples de l'astrophysique contemporaine

Aurélien Barrau (UJF/IUF et LPSC)

Julien Grain (IAS)

Dès la théogonie hésiodique – sans doute la première grande cosmogonie qui nous soit parvenue sous forme essentiellement exhaustive – Khaos joue un rôle ambivalent. Il est, bien sûr, le désordre qui s'oppose au pouvoir structurant de Kosmos, mais il est aussi la faille, la béance, le hiatus originel qui permettra l'émergence d'une pensée (si ce n'est d'une conscience) scrutant et interrogeant Nyx, la nuit étoilée. L'aède, le poète de la Grèce ancienne, protégé par Apollon, est détenteur d'un savoir : il connaît la liste des néréides. Mais il est aussi inspiré par les muses, comme perméable à l'étrangeté du réel et poreux aux inévidences de la Nature. Le physicien contemporain n'est pas étranger à la posture de l'aède. Il n'y a pas de révélation dans la pensée grecque : si religion il y a, c'est une religion athée, au sens contemporain du terme, immanente et incarnée. L'astrophysique d'aujourd'hui entend scruter les visages de Kosmos, comme autant de Kosmoi révélés par une sorte de gigantesque praxinoscope universel, en s'affranchissant – en partie – des contingences de notre biologie. Nos détecteurs naturels de lumière, nos yeux, sont adaptés à notre environnement : nous sommes sensibles aux rayonnements émis par notre étoile, le Soleil. Il existe pourtant des « grains de lumière » dont l'énergie ne nous est pas directement accessible – la part « visible » du spectre est dérisoire – et dont la légitimité intrinsèque à révéler les structures et les méandres cosmiques ne se trouve, de ce fait, pas le moins du monde amoindrie. Bien au contraire, ils autorisent une plongée vertigineuse au cœur de l'étrangeté d'un univers diapré et foisonnant. Ils révèlent les astres les plus étranges et les processus les plus extrêmes. Ils conduisent vers ce rapport radical à l'altérité qui, jointe à la dimension presque démiurgique de démarche de théorisation, constitue peut-être la caractéristique la plus fascinante – si ce n'est la définition – de la physique contemporaine.

Dans le domaine des basses énergies, si l'on scrutait les cieux avec des yeux sensibles aux ondes radiofréquences, c'est, entre beaucoup d'autres choses, la structure filamentaire du gaz de galaxies qui apparaîtrait aisément. La raie à 21 cm, causée par la transition hyperfine de l'hydrogène, s'imposerait comme une échelle de longueur caractéristique de la matière usuelle. A légèrement plus haute énergie, dans le domaine des infrarouges, ce sont, par exemple, les processus thermiques révélant la formation des étoiles qui livreraient certains de leurs secrets les mieux gardés à l'heure actuelle. Les grands nuages sombres de l'optique y apparaîtraient au contraire comme des régions très brillantes. Au-delà des énergies visibles, le domaine ultraviolet témoigne de processus thermiques extrêmes dont les températures s'échelonnent de plusieurs dizaines de milliers de degrés à quelques dizaines de millions de degrés. Les rayons X sont, pour la plupart, associés à l'émission du gaz

ionisé qui peut être associé à des phénomènes très diversifiés (surface d'un astre compact, restes d'une supernovae ou amas de galaxies, par exemple). Enfin, les photons gamma s'étendent – par définition – jusqu'aux énergies les plus élevées détectées à ce jour. Avec des impulsions plusieurs dizaines de milliards de fois supérieures à celles de la lumière visible, ces photons révèlent une toute autre route céleste. Un monde sans Hélios ni Séléné, essentiellement noir, où c'est la nébuleuse du Crabe, objet ténu aux énergies optiques, qui brillerait de milles feux et s'imposerait comme « astre du jour ». Cette étoile à neutrons en rotation rapide, dont la densité se compte de millions de tonnes par centimètre cube, irradie la nébuleuse environnante par les *particules relativistes* qu'elle émet. La physique des particules et la relativité restreintes sont précisément deux des révolutions conceptuelles les plus importantes du vingtième siècle.

L'étude des constituants élémentaires est guidée par le désir d'unification. Elle se fonde essentiellement sur deux principes. D'abord le concept de jauge et, singulièrement, de jauge locale. Le principe de jauge consiste à identifier une transformation laissant globalement le système physique inchangé et à la promouvoir au rang de symétrie locale. Consacrée par son extraordinaire efficacité, cette démarche est au cœur de l'unification dite « électrofaible » qui permet – en se fondant sur ces notions de symétries – de décrire de manière unifiée et cohérente les forces électromagnétiques et nucléaires faibles. Mais encore faut-il constater que le monde qui nous entoure n'est – fort heureusement – *pas* unifié. Il faut donc invoquer un second principe qui vient, d'une certaine façon, contrebalancer le premier : c'est l'idée de brisure spontanée de symétrie. Au niveau technique, cela signifie que les solutions n'ont plus la symétrie des équations. Au niveau conceptuel, il s'agit, fondamentalement, de réinterpréter les lois comme des paramètres environnementaux. A partir d'un état initial symétrique et instable, le système évolue spontanément en rompant l'invariance originelle : un crayon posé sur sa mine ne privilégiait aucune direction, jusqu'à ce qu'il tombe et pointe, aléatoirement, suivant un unique axe devenu privilégié. Une contingence s'immisce jusque dans la nécessité jusqu'alors perçue comme la plus impérieuse... Le boson de Higgs, aujourd'hui au cœur de la quête du grand accélérateur de hadrons (LHC) du CERN est précisément le champ physique qui permet de briser la symétrie électrofaible et de restaurer la diversité apparente des interactions. Il est l'acteur nécessaire pour concilier le désir de l'Un avec l'évidence du multiple.

Physique des particules donc, mais physique des particules *relativistes*. La relativité restreinte, fondamentale pour comprendre l'essentiel des phénomènes cosmiques, est avant tout révolutionnaire en ceci qu'elle fut la première théorie de jauge de l'histoire. Les invariances ne sont plus ici à penser dans des espaces abstraits (électron-neutrino pour l'interaction faible ou proton-neutron pour l'interaction forte) comme en physique des particules mais dans l'espace usuel. Invariance par translation temporelle d'abord : les lois de la physique ne dépendent pas du temps. Les phénomènes évoluent, bien sur, mais pas les lois auxquelles ils sont soumis. Quand Newton énonce les *Principia*, il ne les suppose pas exclusivement valides en l'an de grâce 1687 mais aussi hier et demain. Invariance par translation spatiale ensuite : les lois de la physique ne dépendent pas de la position. Les phénomènes ne sont évidemment pas les mêmes ici et là mais les lois qui les régissent sont identiques en tout lieu. Quand Newton énonce les *Principia*, il ne les suppose pas non plus exclusivement valides à Cambridge mais aussi à Rome ou

Athènes. Invariance par rotation enfin : peut importe l'étoile qui se trouve au zénith du lieu quand une loi physique est établie ou testée. A partir de ces simples symétries (qui constituent presque la condition de possibilité d'une intelligibilité physico-mathématique du réel), il est possible de montrer trois conséquences fondamentales pour la physique contemporaine : l'existence d'une vitesse limite, la nécessité conceptuelle de lier espace et temps et l'équivalence masse-énergie. Le premier point n'est pas strictement lié à la lumière : cette vitesse indépassable doit être comprise comme une constante de structure de l'espace-temps. Elle n'est pas une conséquence des processus physiques qui y prennent naissance mais vient de la structure de groupe de l'espace-temps lui-même. Elle constitue donc un « absolu » indépassable de cette méta-théorie à laquelle toutes les théories physiques spécifiques (physique des particules, physique nucléaire, électromagnétisme, etc.) doivent satisfaire. Le second point a trait à la relativité de l'espace et du temps. Ils peuvent se « transformer » l'un en l'autre. Le temps d'un objet mobile se dilate, son espace se contracte. Les voyages « dans le futur » (au sens où le temps de l'observateur ne coïncide plus avec le temps de l'observé) ne sont plus l'apanage de la seule science-fiction mais sont quotidiennement à l'œuvre dans les accélérateurs de particules. Ces « formes *a priori* » (c'est à dire transcendantale dans le vocabulaire kantien) de la sensibilité humaine sont à réinterpréter dans l'*a posteriori* d'une cinématique particulière. L'enfant en déplacement rapide par rapport à ses parents deviendra aisément, réellement et effectivement plus jeune que ses géniteurs lorsqu'ils se retrouveront. Peut-être y a-t-il ici paradoxe mais certainement pas contradiction. Le troisième point est sans doute le plus étonnant : $E=mc^2$ met en regard l'innée (la masse) et l'acquis (l'énergie), l'essentiel et l'accidentel, l'être et l'avoir. Egaler énergie et masse signifie qu'une propriété peut se muer en existence. C'est exactement ce qui est à l'œuvre dans un collisionneur de particules (ou quand un rayon cosmique frappe l'atmosphère terrestre) : la vitesse de la particule est – littéralement – transformée en existence de nouveaux corpuscules. Un peu comme si la qualité de timbre d'un vieux piano viennois était utilisée pour construire, matériellement, de nouveaux pianos de concert... Cette propriété saisissante de la matière, quotidiennement vérifiée et utilisée elle aussi, ouvrit la voie à la découverte de l'antimatière et à la théorie quantique des champs, c'est-à-dire au « transformisme » déployé jusqu'au niveau le plus élémentaire : mêmes les quanta fondamentaux peuvent être créés et détruits.

Ces particules sont évidemment signifiantes en elles-mêmes, parce qu'elle constituent l'état actuel de notre quête de cet oxymore conceptuel que représente l'« infiniment petit ». Les quarks, nommés suivant le génial *Finnegans Wake* de James Joyce, ne sont pas des petites billes liées par des élastiques mais bien plutôt des représentations irréductibles de groupes de rotation. C'est, en l'occurrence, au prix de l'abstraction que se révèle un nouveau visage de Cosmos. Non pas parce que la mathématique serait, dans une vision toute galiléenne, le langage pure et intrinsèque de la Nature, mais parce qu'elle est, dans une acception très goodmanienne, une manière, parmi d'autre, de créer un monde signifiant. Par delà leur intérêt propre, ces particules sont également à considérer comme des sondes particulièrement adaptés à révéler d'autres motifs cosmiques et d'autres formes de notre environnement galactique et extra-galactique.

Les rayons cosmiques chargés (protons, électrons, noyaux d'hélium, de carbone, de fer, etc.) donnent accès à la dynamique de notre Voie Lactée. Ils soulignent la présence d'un champ magnétique désordonné dans notre galaxie et sont soumis à de complexes processus de diffusion et convection. Ils permettent également de contribuer à élucider quelques énigmes lancinantes de l'astrophysique contemporaine : existence de quantités macroscopiques d'antimatière dans l'Univers, nature de la matière noire, etc. Existe-t-il des antimondes aux confins de l'Univers où des anti-planètes orbitant autour de leurs anti-étoiles abritent peut-être des anti-physiciens ?

Les neutrinos sont une autre sonde singulièrement riche. Particules fantômes sans charge, sans couleur et (presque) sans masse, ils ne disposent que de l'interaction faible pour interagir. Les neutrinos voient donc un monde « transparent » et permettent d'accéder au cœur des objets célestes. Les photons que l'on observe en scrutant le Soleil ne proviennent que d'une très fine couche à la surface de celui-ci. Nous n'observons qu'une peau d'étoile parce que le Soleil n'est pas un milieu optiquement transparent. Paul Valéry aimait à rappeler, dans une posture très stoïcienne souvent citée par Deleuze, que « le plus profond c'est la peau ». Mais, derrière cette peau, se cache un corps – fut-il sans organe à la manière d'Artaud – invisible où sont brûlées chaque seconde plusieurs centaines de millions de tonnes d'hydrogène en hélium. Au contraire donc des photons, les neutrinos révèlent directement le lieu des réactions thermonucléaires et, par conséquent, les zones les plus physiquement pertinentes. Cette nouvelle astronomie, en plein développement et aujourd'hui encore balbutiante, soulignera à n'en pas douter de nouveaux visages – insoupçonnés – de Cosmos.

Les ondes gravitationnelles permettront, enfin, de voir l'Univers avec des yeux de géomètre et de réaliser, sans doute, un peu du projet platonicien. Prédites par la relativité générale, ces tressaillements fugaces de la métrique spatiotemporelle témoignent des processus les plus cataclysmiques et leur détection ouvrira la porte d'une nouvelle manière de voir et de concevoir l'Univers. La relativité générale est certainement la théorie la plus élégante et la plus subversive de l'histoire de la physique. Tous les corps chutent de la même manière dans le champ de pesanteur et il est donc légitime de penser la gravité comme un mouvement d'ensemble du référentiel. Mais le mouvement est accéléré et ne l'est pas de la même manière en deux points voisins (parce que, précisément, le champ est inhomogène) : apparition, donc, d'une courbure. La géométrie non seulement se complexifie (les parallèles se coupent, la somme des angles d'un triangle ne vaut plus 180 degrés, etc.) mais surtout se dynamise. Le système-cadre devient assujéti à la présence des corps. Comme si, dans cette étrange partie d'échecs cosmologique, la morphologie des cases devenait une conséquence de la position des pièces. Comme si, ce que les poètes savent depuis toujours, la manière de dire devenait indissociable de la nature de ce qui est dit. L'Univers devient absolument dynamique, jusque dans sa trame elle-même.

Au contraire d'un monde désenchanté et désincarnée, la physique contemporaine contribue donc à construire (et non seulement à révéler) un Cosmos bigarré et foisonnant, multiplement traversé d'étrangetés et d'imprévus : réenchanté. La

cosmologie est une bien étrange science où l'observateur est partie intégrante du système qu'il entend décrire, où les conditions initiales sont signifiantes (doivent être partie intégrante de la construction parce qu'il n'y a ni extériorité ni antériorité au système-univers), où l'expérience « création de l'Univers » est irreproductible, où les énergies en jeu n'ont jamais été observées sur Terre et où le cours du temps doit être conceptuellement remonté puisque seul l'état final nous est connu. Pourtant, malgré – peut-être grâce à – ces paradoxes, ces frictions, ces tensions, elle est incontestablement devenue une science de précision. Entre beaucoup d'autres observations (évolution des galaxies, forêt Lyman alpha, effet de lentille gravitationnelle faible, oscillations acoustiques de baryons, etc.) le modèle du Big Bang – sous-tendu par la relativité générale – se fonde sur trois piliers : éloignement des galaxies, nucléosynthèse primordiale et fond diffus micro-ondes. La théorie est remarquablement descriptive et prédictive. L'ensemble des paramètres qui y interviennent est aujourd'hui mesuré avec une bonne précision. Le fond diffus micro-ondes permet d'ouvrir la porte à une cosmologie subtile et détaillée. Par delà la distribution spectrale des rayonnements, en excellent accord avec le modèle, les infimes variations de température permettent de mettre en évidence les modes de propagation d'ondes acoustiques dans l'univers primordial. C'est presque sans métaphore qu'on peut donc considérer que les cosmologistes « écoutent » les premiers instants du Cosmos et, nous le savons bien, le timbre d'un instrument en dit long sur sa facture. Cette « photographie instantanée » de la première jeunesse de l'Univers permet de mesurer, par exemple, sa masse volumique et son âge avec une précision avoisinant le pourcent.

Michel Schneider écrivait du pianiste Glenn Gould qu'il « fait parti des êtres rares, morts souvent, artistes toujours, qui, comme le pensait Baudelaire de Wagner, aux mauvaises heures, consolent d'être là. Le Bach de Gould, poursuivait-il, a cette énigmatique évidence des choses qui n'attendent rien de nous et ne nous supposent ni désir, ni mémoire ; la musique est alors non ce qu'on entend mais ce qui nous entend ». Il évoquait bien sur les Variations Goldberg, cette œuvre-monde où, avant d'entendre à nouveau l'aria initiale, il faut en être passé par toutes les variations possibles comme autant de modes de l'esprit humain. Jusqu'aux contradictions, jusqu'aux apories. La cosmologie contemporaine, écrite à la manière d'une gigantesque fugue, ne manque précisément pas de telles tensions. En contrepoint de ses succès, elle révèle de nombreuses zones d'incomplétudes, voire d'incohérences. Lignes cachées du palimpseste cosmique.

Les trous noirs, véritables parangons de l'espace-temps, poussent la relativité à son paroxysme. Définis par un horizon « immatériel » ne pouvant être traversé que dans un sens, ils masquent une singularité centrale – déchirure de l'espace-temps – où la densité et la courbure deviennent infinies. La vitesse d'un corps en chute libre est, au niveau de l'horizon, nulle pour l'observateur distant mais égale à la vitesse de la lumière pour l'observateur local. A l'intérieur d'un trou noir, le temps se change en espace et l'espace se change en temps. Bien que surprenants, ces résultats sont tout à fait cohérents dans le cadre d'une description relativiste. Les paradoxes apparaissent quand les trous noirs sont scrutés d'un peu plus près... Comment comprendre en effet qu'ils soient simultanément les objets les plus simples de l'Univers (entièrement décrits par trois paramètres, plus simples donc qu'un noyau d'atome !)

et ceux qui « contiennent » la plus grande quantité d'information ? Plus étrange encore : comment comprendre qu'il puissent s'évaporer en semblant perdre tout souvenir de la matière qui les a formés, s'inscrivant ainsi en faux par rapport à l'un des théorèmes les plus fondamentaux de la mécanique quantique ? Les trous noirs appellent une théorie quantique de la gravitation, qui fait aujourd'hui défaut, et constituent des lieux privilégiés d'expériences de pensée pour progresser dans cette voie.

Mais il y a pire. Il est aisé de montrer que les zones d'Univers révélées par le fond diffus cosmologique et séparées de plus d'un degré environ sont « causalement déconnectées ». Ce qui signifie qu'elles ne peuvent avoir échangé la moindre information et se pose donc une question centrale : comment leurs températures peuvent-elles être exactement les mêmes, avec une précision de l'ordre de 0.01% ? Il faut amender le modèle cosmologique et supposer une phase initiale d'inflation (c'est à dire d'expansion accélérée) durant laquelle la taille caractéristique de l'Univers s'est considérablement accrue, permettant de restaurer ainsi la causalité apparemment perdue. Comprise assez naturellement du point de vue de la physique des particules, l'inflation permet également de résoudre l'essentiel des autres pathologies du Big Bang (absence de monopoles, platitude de l'Univers, etc.) et constitue un mécanisme viable pour comprendre l'origine des fluctuations de densités qui sont la cause de l'existence des galaxies et des amas de galaxies. La morphologie du macrocosme refléterait ainsi de subtils effets quantiques à l'œuvre au niveau le plus microscopique dans les premiers instants de l'histoire cosmique.

Mais il y a pire. L'essentiel de la masse de l'Univers est invisible. Les étoiles – la quasi totalité de ce qui est observable aux longueurs d'onde optiques – ne constituent qu'environ 0.5% du contenu total de l'Univers. Il existe de la « matière noire ». Et, plus gravement encore, on peut montrer que l'essentiel de cette matière sombre n'est pas constituée des particules élémentaires qui nous sont connues ! Ce paradoxe cosmologique est donc aussi un paradoxe de physique des constituants élémentaires qui pointe en direction des incomplétudes du « modèle standard » de la physique des particules. Après les succès de l'unification électrofaible, il devint rapidement évident que la force nucléaire forte devait aussi être ajoutée à l'édifice. Le groupe le plus simple permettant de satisfaire à cette exigence se nomme SU(5). La théorie SU(5) fait partie des modèles qui ne peuvent pas être faux. Trop naturel, trop prédictif, trop évident, trop élégant, trop attendu. Il fut donc mathématiquement construit et mis à l'épreuve de l'expérience. Expérience qui, bien évidemment... l'invalida ! La Nature, *Naturus*, au féminin *Natura*, du verbe latin *nascor*, sa racine, ce qui va naître, ce qui est en train – ou sur le point – de naître, « le processus même de naissance, d'émergence, d'invention, l'éternelle nouvelle née », écrivait Serres, ne cesse, presque par définition, de surprendre. Comme par une sorte de *déllice* de Tantale, la théorie ultime se dérobe dès qu'on croit pouvoir la toucher.

Mais il y a pire. Au-delà même de la matière noire, une plus mystérieuse encore « énergie noire » gouverne la dynamique cosmologique. Celle-ci se manifeste directement par un effet d'accélération de l'expansion de l'Univers qui est inexplicable si la seule force à l'œuvre à grande échelle, la gravitation, est attractive. Ce phénomène a été mis en évidence par une technique très simple : certaines supernovae ont une luminosité intrinsèque connue, on peut donc estimer leur distance à partir de la luminosité observée. Comme leur vitesse d'éloignement est

par ailleurs connue par effet Doppler, on peut en inférer la vitesse en fonction de la distance et donc du temps. A la surprise générale, il fut ainsi observé que cette vitesse d'expansion augmente avec le temps : l'univers accélère ! Cette indication a depuis lors été corroborée par plusieurs approches indépendantes. Ce très mystérieux phénomène appelle vraisemblablement une reconstruction des fondements mêmes de la physique des particules élémentaires.

Se pourrait-il que les quanta fondamentaux ne soient pas des points mais plutôt des structures filiformes, des élastiques, ce que la tradition retiendra sans doute comme des « cordes » ? La théorie des cordes est avant tout un extraordinaire tour de dextérité mathématique qui permet de s'affranchir d'une pathologie récurrente nommée « anomalie ». Au delà de cet aspect technique, elle est une théorie quantique, par construction. Elle est une théorie gravitationnelle car le spectre des cordes contient des bosons sans masse de spin 2, ce qu'on nomme des « gravitons ». Elle est une théorie qui permet de rendre compte de certaines propriétés macroscopiques (par exemple l'information stockée par les trous noirs) à partir d'une description microscopique cohérente. La théorie des cordes s'est développée autour de trois révolutions. D'abord la découverte de la supersymétrie (qui avait été supposée indépendamment pour d'autres raisons), lien qui s'établit entre le monde des forces et celui des particules. De plus, la supersymétrie fournit un candidat naturel pour la matière noire en prédisant l'existence de particules lourdes, stables et essentiellement invisibles. Ensuite, la découverte des relations de dualités, similitudes entre les courtes et les grandes distances d'une part et entre les fortes et les faibles interactions d'autre part. Enfin, la découverte du « paysage », étape particulièrement importante pour la cosmologie. On demande parfois aux enfants comment construire quatre triangles équilatéraux avec six allumettes. Il n'y a pas de solution dans le plan : il faut « inventer » la troisième dimension et penser la pyramide. C'est un peu la difficulté en théorie des cordes : il faut inventer six dimensions supplémentaires, invisibles et donc recroquevillées sur elles-mêmes. Comment compacter ces dimensions ? Là est toute la question : il existe de multiples manières différentes de procéder à cette opération et à chacune de ces manières est associé un jeu de lois physiques effectives. Quand il est, de plus, tenu compte des flux magnétiques généralisés, c'est alors un nombre colossal de lois physiques différentes qui émerge. Première image du multivers.

L'inflation, dans sa version « éternelle », produit des univers-bulles. La théorie des cordes les emplit et les structure avec des lois différentes. Ailleurs autres dimensionnalités, autres constituants, autres régularités. Un monde plus diversifié et polychrome que notre physique usuelle ne permet de le concevoir. « Le monde est tout ce qui a lieu » écrivait Wittgenstein en ouverture de son *Tractatus*. C'est exactement la définition du multivers : là où tout a lieu. Pourquoi les constantes fondamentales de la physique sont-elles aussi finement ajustées pour l'existence de la complexité (et, en particulier, de la vie) ? Comment se fait-il que tous les paramètres de la physique soient « miraculeusement » choisis pour conduire à un monde maximale foisonnant ? Peut-être parce qu'un « dessinateur intelligent » (qu'on nomme habituellement Dieu) a ordonné les choses pour l'existence de l'humanité. C'est la vision théologico-téléologique. Peut-être parce que, jouissant d'une chance inouïe, le coup de dé initial de l'Univers a conduit à cet état très

particulier (l'immense majorité des choix possible conduisant à des univers pauvres, sans structure, sans intérêt et sans complexité). C'est la vision aléatoire-arbitraire. Ou, plus simplement, comme nous le propose cette physique spéculative, parce que les dés ont été lancés un grand nombre de fois. Nous nous trouvons naturellement dans un des univers compatibles avec notre propre existence. Nouvelle blessure narcissique : après les avancées de Copernic, Darwin et Freud, c'est notre Univers lui-même qui se trouve déchu de son piédestal, îlot dérisoire dans un méta-monde infiniment vaste. Après les ères du géocentrisme, de l'héliocentrisme, du galactocentrisme et du cosmocentrisme, se profilerait l'ère de l'acentrisme absolu.

Le multivers est une proposition scientifique au sens le plus orthodoxe et traditionnel du terme. Curieusement, et bien que ces univers multiples ne nous soient pas accessibles, on peut montrer que la démarche est bel et bien falsifiable ou réfutable, au sens le plus poppérien du terme. Ceci parce que le plurivers n'est pas un modèle mais une conséquence – parmi d'autres – de modèles et qu'un unique échantillon (notre propre univers) permet déjà de corroborer ou d'exclure la proposition à un certain niveau de confiance. Mais il ouvre aussi vers d'autres *horizons*. Il joue avec les délinéaments, les frontières, les bords ; il s'immisce dans l'entre-deux et s'installe dans l'équilibre instable de la marge. Faire des mondes avec les limites du monde. Porosité au récit. Retour vers la mythologie mais union radicalisée et désacralisée de *logos* et de *muthos* où, pour la première fois sans doute, c'est la pensée rationnelle (et non pas ici la seule parole) qui entraîne, qui engraine – presque mécaniquement – vers l'existence de dicibles invisibles. La cosmologie comme alternative à ce que Nancy nomme l'« interruption du mythe », comme sortir de la « tautogorie » du mythe. Tous les champs disciplinaires se transforment de l'intérieur : ni les abstraction de Kandinsky ni les série de Schönberg n'auraient sans doute été considérés comme de l'art par un esthéticien du dix-neuvième siècle. Si, aujourd'hui, la physique venait à brouiller ses propres linéaments qui, et au non de quoi, devrait l'en dissuader ?

Pourtant, les univers multiples ne sont pas nécessairement si éloignés. Van Uexküll s'intéressait aux mondes humains et aux mondes animaux. Avec l'exemple saisissant de la tique, il créait le concept d'Umwelt, d'univers propre. L'homme partage un espace commun avec la tique, mais il n'habite, strictement, pas le même monde. Ce qui fait sens pour elle n'est pas ce qui fait sens pour nous. C'est peut-être ce qu'est la physique aujourd'hui : une créatrice d'Umwelten. En un sens, la relativité générale nous montre que la géométrie est dynamique et supplante la gravitation newtonienne. Mais, comme le suggère Carlo Rovelli, quand on la comprend vraiment, elle conduit plutôt à penser le champ de gravité en lieu et place de l'espace-temps. Le monde comme une collection de champs (éventuellement quantiques) vivant sur – ou dans – un autre champ : le champ gravitationnel. La conciliation de la mécanique quantique avec la relativité générale n'est pas optionnelle. Elle n'a rien à voir avec la quête, en partie fantasmagique, d'une « théorie du tout » mais constitue une nécessité conceptuelle : la théorie d'Einstein prédit, en effet, sa propre perte. Les théorèmes de singularités montrent que l'intérieur des trous noirs ou le Big Bang ne *peuvent pas* être correctement décrits par le modèle classique. Il est donc indispensable de construire une théorie quantique du champ gravitationnel, tâche aujourd'hui loin d'être achevée. Lee Smolin et Ted Jacobson ont montré que les solutions de

l'équation de Wheeler-deWitt (la solution quantique la plus simple des équations d'Einstein) sont des boucles. Ces boucles ne sont pas *dans* l'espace mais elles le constituent structurellement. L'espace comme un gigantesque maillage de boucles. Retour à l'espace « par corps » d'Anaximandre, Aristote, Descartes, Leibniz et Berkeley contre l'espace « en soi » (et presque « pour soi ») de Newton. Dans l'image résultante des réseaux de spin, chaque nœud représente un volume élémentaire d'espace et chaque lien représente une relation de contiguïté. Relativité restreinte oblige, ce monde sans espace est aussi un monde sans temps. Peut-on concevoir une physique sans variable temporelle ? Un examen minutieux montre que l'entreprise n'est pas impossible et, finalement, pas même paradoxale. On ne mesure jamais le temps « en tant que tel » mais plutôt un nombre d'oscillations du ressort spiral de la montre entre deux évènements. L'écoulement du temps réinterprété comme une conséquence de notre inconnaissance de l'état fondamental des systèmes. La gravitation quantique à boucles est un modèle potentiellement testable : des relations de dispersion modifiées pour la propagation des photons de très haute énergie ou des traces du « grand rebond » qui remplace le Big Bang (et ouvre donc une mince fenêtre sur l'éventuel univers précédent). La physique « à l'échelle de Planck », réputée intenable, entre doucement dans le champ de la science expérimentale.

Comme Deleuze et Guattari l'avaient pressenti dès le début des années 1990, la physique n'est plus hantée par sa propre unité. Diversifié et pluralisée jusque dans ses strates ontiques, elle dessine un paysage complexe où Khaos reprend ses droits. Un monde intelligible et désordonné, déterministe et imprévu.