

AIP Emilio Segrè Visual Archives  
Gianpaolo Pagni

Un débat de près d'un siècle a resurgi ces toutes dernières années avec une vigueur nouvelle. L'enjeu ? Mettre fin, ni plus ni moins, à l'une des contradictions

les plus inouïes de la physique fondamentale, en réconciliant mécanique quantique et relativité générale. En effet, à l'heure où la gravitation semble enfin sur le point de fusionner avec les trois autres forces de la nature, il est certain que la relativité d'Einstein doit être bientôt remplacée par une nouvelle théorie... Reste que tous les physiciens sont loin de s'accorder sur la marche à suivre. Gravitation quantique, relativité d'échelle, supersymétrie, les candidates ne manquent pas.

# Qui sera le



# Dossier nouvel Einstein ?

## Vers une nouvelle théorie de la gravitation

**N**UL ne peut, aujourd'hui encore, expliquer ce qui s'est passé en Allemagne et en Autriche entre 1920 et 1930. En quelques années seulement, un fantastique bouillonnement d'idées nou-

velles déferla sur les laboratoires de physique, bousculant toutes les conceptions classiques accumulées depuis des millénaires, outrepassant toutes les règles. Werner Heisenberg, Max Born, Erwin

Jean-Marc Bonnet-Bidaud  
astrophysicien au CEA

Schrödinger et Wolfgang Pauli — bientôt rejoints par Paul Dirac en Angleterre, Louis

Qui sera le nouvel Einstein ?



Gianpaolo Pagni

## La mécanique quantique : l'Univers irrésolu

La **mécanique quantique** est la théorie de l'infiniment petit. Elle est le modèle d'explication de trois des quatre forces fondamentales. Un de ses premiers succès est d'avoir expliqué... l'existence de la matière. Dans le modèle classique de l'atome, en effet, l'électron tourne autour du noyau (composé de protons et neutrons) et devrait, d'après les lois de la mécanique, chuter sur lui. Autrement dit, aucun atome ne devrait exister ! C'est sur cette contradiction fondamentale que s'est bâti l'atome de Bohr, une description dite quantique car, selon Bohr, l'électron ne pouvait, pour rester en équilibre, occuper que certains niveaux "quantifiés" autour du noyau et jamais de positions intermédiaires. Le "quantum" est une quantité indivisible. Cette constatation et la nouvelle mécanique quantique qui en résulte entraînent une cascade de conséquences. Déjà, la notion classique de particules ponctuelles devient floue car chaque particule a en quelque sorte un don d'ubiquité : elle existe simultanément en différents points de l'espace. La particule quantique "électron" est, par exemple, représentée par une fonction

mathématique, la fonction d'onde, qui réunit les deux aspects d'onde et de particule, et qui permet de calculer précisément une probabilité de présence en chaque point. La meilleure "photographie quantique" de l'électron nous est dès lors donnée sous la forme d'un "nuage" de possibilités autour du noyau. À cette vision étonnante du "réel", s'ajoute un principe d'incertitude : il est impossible de mesurer simultanément avec précision deux propriétés de

l'électron comme sa position et son énergie. L'irruption de ces concepts étrangers au sens commun a fait de la mécanique quantique la théorie reine du XX<sup>e</sup> siècle. Bien que ses fondements logiques soient déroutants, il s'agit d'un fantastique outil de description du monde dont la précision de prédiction est phénoménale — la valeur de la force magnétique de l'électron y est prédite à 1,0011596524 près, en accord au milliardième près avec la mesure ! Elle a permis d'expliquer les phénomènes de fission et de fusion nucléaires et surtout de comprendre le comportement des électrons dans les matériaux semi-conducteurs, tout comme celui des photons dans les lasers, bases de toute l'électronique moderne. Sans elle, il aurait été également impossible de comprendre les liaisons de l'hydrogène sur lesquelles s'est construite la fameuse "double hélice" de l'ADN, et de bâtir toute la biologie moléculaire. C'est aussi sur ces bases purement quantiques que reposent le "modèle standard" des particules et la tentative d'unification des forces fondamentales.

de Broglie en France et le charismatique Niels Bohr au Danemark — fondaient alors la plus spectaculaire des théories physiques : la mécanique quantique. Celle-ci allait faire faire à la connaissance humaine un de ses plus fulgurants progrès. C'est grâce à elle, aussi étrange qu'elle nous paraisse encore, qu'a pu se développer le

monde moderne qui nous entoure. Électronique et ordinateurs, lasers et vidéo-disques, presque tout notre quotidien est fondé sur cette nouvelle conception du monde, qui s'est aussi imposée définitivement pour comprendre la structure et le rayonnement des étoiles, les résultats des grands accélérateurs de particules ou, plus

**"Je suis convaincu que Dieu ne joue pas aux dés." A. Einstein**



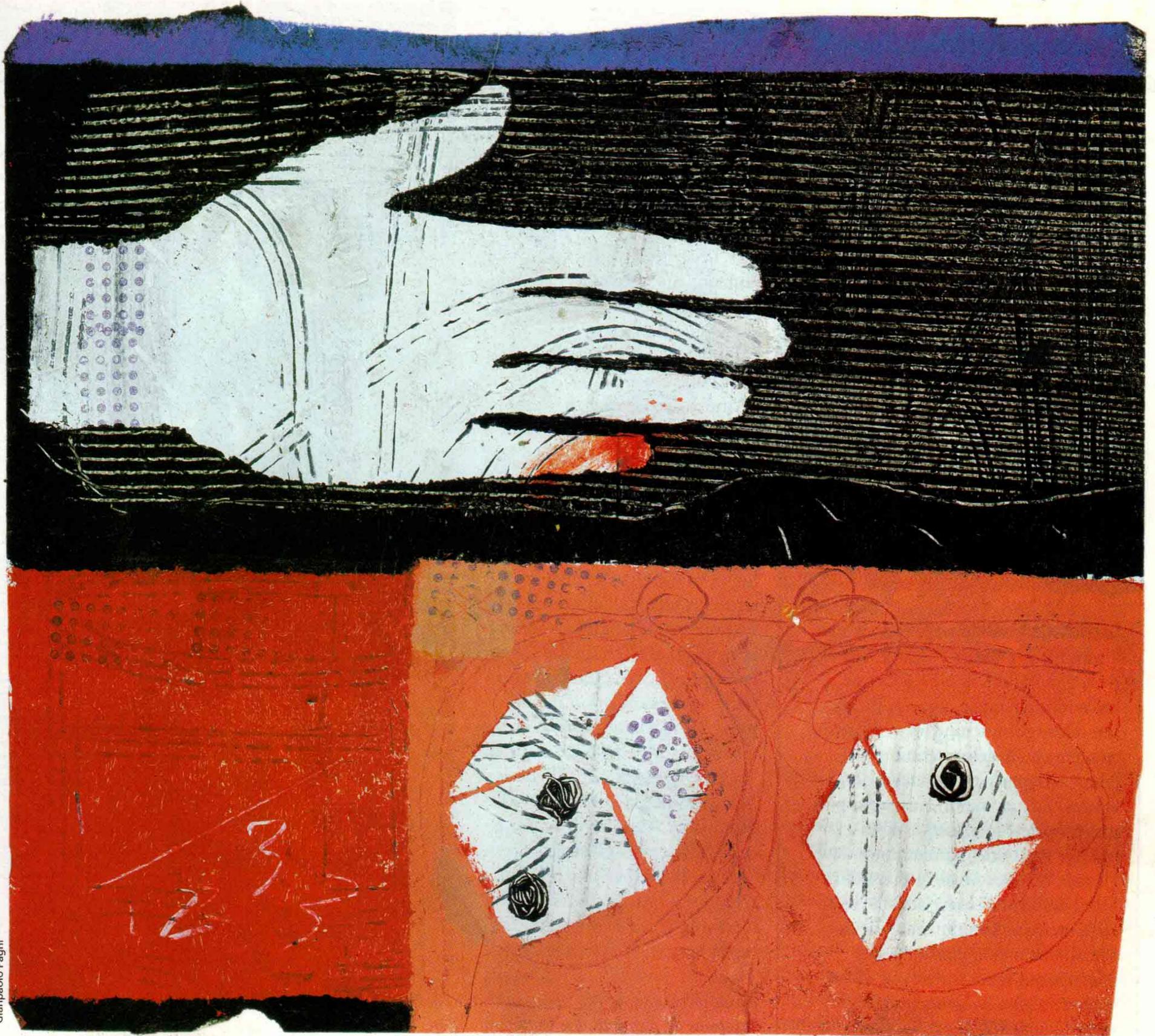
AIP Emilio Segre Visual Archives

**Werner Heisenberg. Son fameux "principe d'incertitude" est au cœur de la théorie quantique et fait toujours l'objet d'intenses débats : que signifie-t-on exactement en disant que l'on ne peut connaître à la fois la position et la vitesse d'une particule ?**

récemment, de la supraconductivité. On s'est sans doute trop peu interrogé sur les causes historiques de cette révolution. Il est probable que le choc culturel de l'atroce charnier de la guerre de 14-18 ait provoqué une remise en cause globale du monde. Pour tous ces hommes, il était devenu sans doute impératif de voir une autre face du réel, même dans la science dite "objective". Ils décidèrent donc d'interpréter leurs expériences différemment de tout ce que leur avait appris la physique classique.

Dans cette nouvelle vision des choses, lorsqu'on examine la matière au niveau microscopique, il n'existe plus de particules au sens classique du terme, c'est-à-dire au sens de point matériel. Une particule comme l'électron n'existe pas, ou plutôt elle emplit tout un espace. On ne peut plus que calculer la probabilité pour qu'un électron se trouve en un endroit donné et il devient impossible de déterminer avec précision à la fois sa position et sa vitesse. Selon l'interprétation quantique classique, dite de l'école de Copenhague, le résultat d'une mesure n'est alors qu'une "loterie", un tirage au hasard parmi de nombreux résultats possibles. L'acte même de mesure crée en partie le résultat.

Il a fallu néanmoins bien du courage à ces audacieux physiciens pour imposer leur nouvel état d'esprit car ils créèrent ainsi une situation inédite : un véritable divorce dans la pensée scientifique. En face de la mécanique quantique naissante, existait déjà en effet un autre monument de notre siècle, la



Gianpaolo Pagni

théorie de la relativité générale d'Einstein. Un pur achèvement de la pensée classique, cette fois, issu d'une réflexion sur l'identité de l'espace et du temps qu'Albert Einstein aurait amorcée en s'imaginant à cheval sur un électron lancé à la vitesse de la lumière. Cette théorie est, pour l'essentiel, une conception nouvelle de la force de gravitation. Selon elle, l'espace-temps, tel un tissu élastique, est déformé par la matière, et la gravitation est une conséquence de cette déformation. Gravitation qui se trouve donc inscrite dans la géométrie même de l'espace-temps.

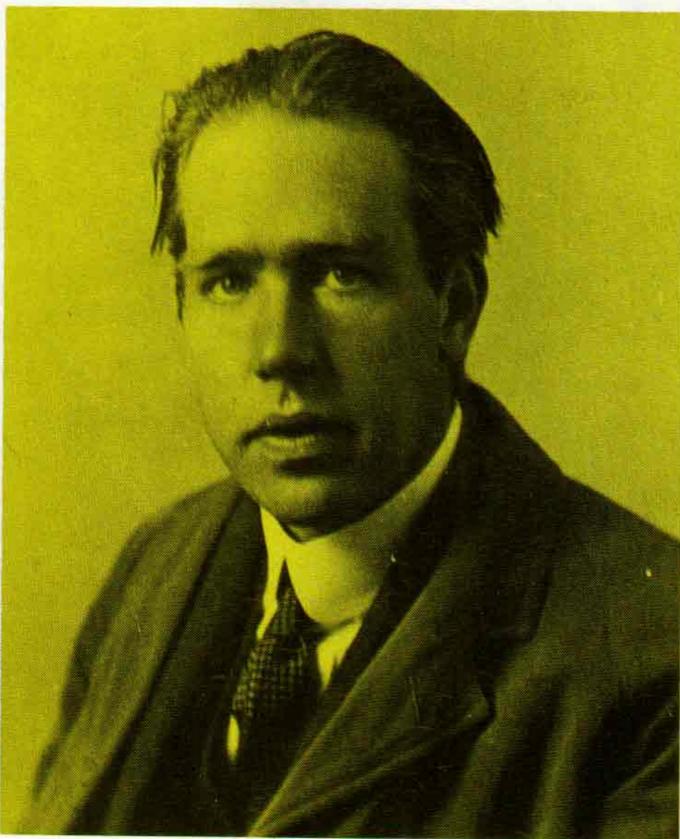
L'inconvénient de la relativité, dont la beauté formelle est reconnue par tous les physiciens, est qu'elle s'attache justement à conserver tous les concepts classiques. Dans un espace-temps creusé par l'existence de masses, on y décrit celle de particules ponctuelles dont on connaît précisément la position, la vitesse, l'énergie et qui se déplacent selon une trajec-

toire bien définie. Bien sûr, toutes ces conceptions sont valables à l'échelle macroscopique et, si elles ont peu d'applications dans la vie courante, elles ont montré leur

efficacité dans l'explication de nombre de phénomènes dans l'Univers. Mais dès que l'on passe au niveau microscopique, on entre en contradiction totale avec la mécanique quantique. Comme la mécanique quantique de son côté ignore tout à fait la courbure de l'espace-temps, les deux théories sont ainsi irréconciliables depuis leur naissance. Leurs créateurs ne sont d'ailleurs jamais tombés d'accord. Dans son dialogue avec Bohr, Einstein a toujours clamé qu'*"il est impossible que Dieu puisse jouer aux dés"* tandis que Bohr maintenait *"la nécessité d'un renoncement final à l'idéal classique et une révision radicale de notre attitude sur le problème de la réalité"*. De quoi plonger la physique dans une totale schizophrénie.

Pour sortir de l'impasse, une première voie possible est de tenter d'intégrer la

***"La physique n'a pas pour vocation de découvrir ce qu'est la Nature, affirmait le Danois Niels Bohr, autre pionnier de la mécanique quantique et chef de file de l'École de Copenhague. Elle touche à ce que nous disons de cette Nature."***



AIP Emilio Segrè Visual Archives

## Qui sera le nouvel Einstein ?

mécanique quantique dans la relativité générale. Dans ce cas, c'est l'espace qu'il faut avant tout repenser. La théorie d'Albert Einstein n'est en effet pas complète. Elle souffre même de contradictions internes inquiétantes : lorsque les dimensions sont infiniment petites, des grandeurs physiques comme la densité ou l'énergie deviennent infinies. C'est le cas en particulier lors du

### La relativité générale : l'Univers géométrique

La relativité générale est la théorie de l'infiniment grand. C'est une théorie de la gravitation, la plus ancienne force fondamentale connue, qu'elle interprète comme une force d'inertie résultant de la déformation de l'espace-temps par l'existence des masses. La gravitation n'est ainsi plus une propriété intrinsèque de la matière mais une manifestation de l'espace courbe. Ainsi, la masse du Soleil déforme l'espace autour de lui en le creusant comme une bille de métal sur un tissu élastique. Les planètes qui tournent autour de lui vont en réalité en ligne droite. Mais étant obligées de suivre les lignes d'espace, elles parcourent ainsi une trajectoire circulaire tout comme le cycliste qui sans changer sa direction épouse les virages relevés de la piste. Les prédictions de la relativité sont presque inexistantes dans la vie courante, car la gravitation est la plus faible des quatre forces fondamentales et ses effets sur la matière atomique négligeables. En revanche, ils deviennent prédominants dans le cas de l'Univers tout entier. Rien d'étonnant donc à ce que la théorie ait reçu de spectaculaires confirmations avec l'explication de l'anomalie de mouvement de Mercure, la déviation des rayons lumineux mesurée lors des éclipses ou les mirages gravitationnels, et qu'elle soit à la base du concept d'expansion des modèles de big bang. Mais en raison de sa description particulière de la gravitation, la relativité générale reste en dehors de la plupart des tentatives d'unification des forces.

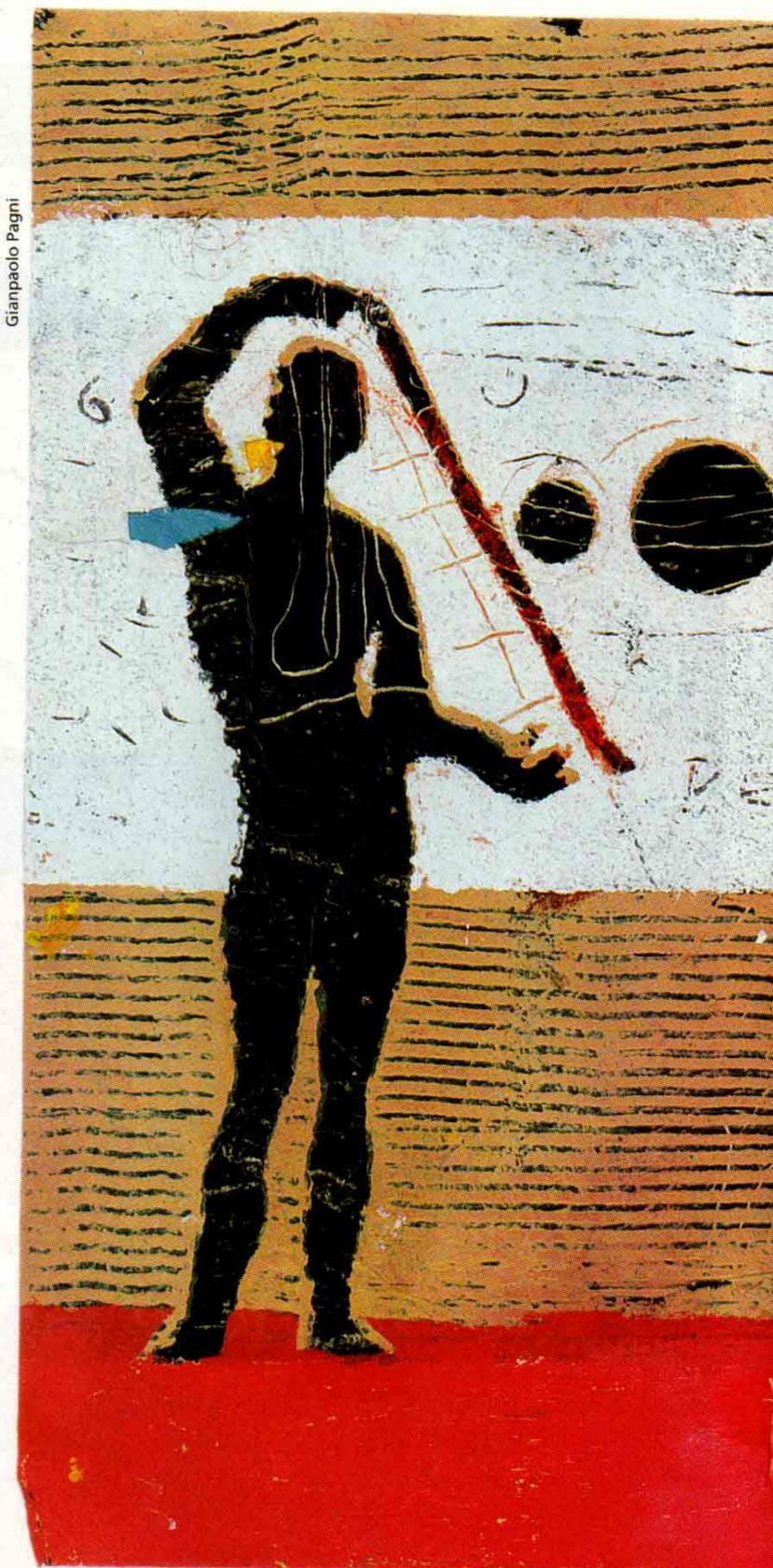
big bang, mais aussi au centre des trous noirs et lors d'interactions entre particules. Ces "défauts" de la théorie, que les mathématiciens appellent *singularités*, montrent que la relativité doit, dans le domaine microscopique, laisser la place à une théorie plus générale, et encore à découvrir.

Plusieurs pistes ont déjà été suivies. Pour échapper à ces infinis, l'Américain John Archibald Wheeler tenta en 1964 d'imaginer la structure de l'espace à très petites dimensions en appliquant les règles de la mécanique quantique. Il aboutit ainsi à une sorte de géométrie "floue", où l'espace lui-même peut devenir quantique, animé de nombreuses fluctuations qui le brouillent comme le vent brouille le haut des vagues en écume. Sous certaines conditions, la reformulation des équations d'Einstein apparaît possible dans ce nouvel espace baptisé "mousse quantique" par Wheeler. Néanmoins, la complexité des équations est telle que peu de conclusions peuvent en être tirées.

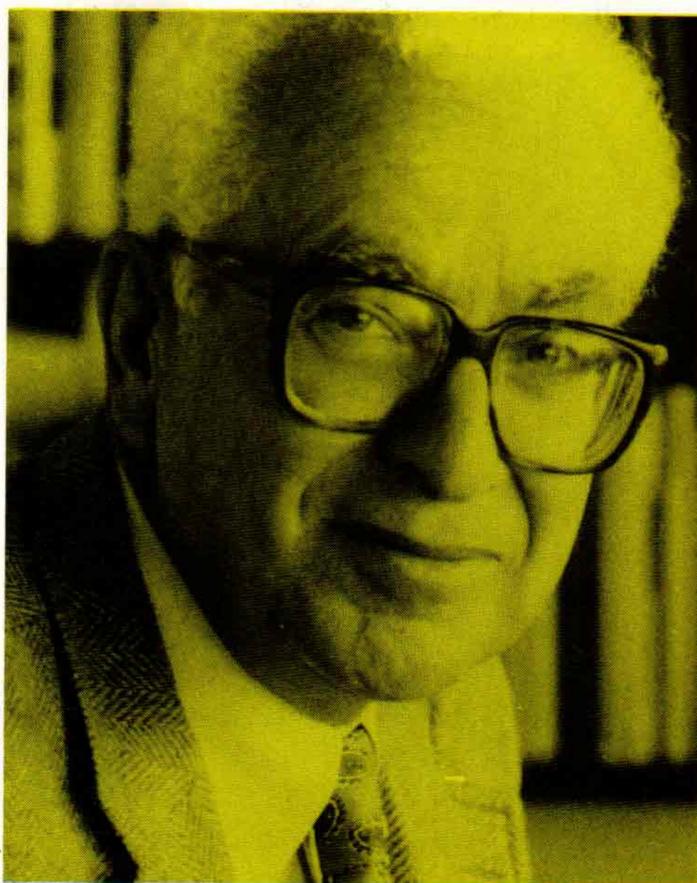
Dans la même voie, une autre tentative originale a été faite plus récemment par Laurent Nottale, astrophysicien à l'observatoire de Meudon, qui a eu l'idée d'inclure dans la relativité les propriétés fractales de l'espace. Le caractère "fractal", introduit en 1975 par le mathématicien Benoît Mandelbrot pour désigner des courbes dont les formes sont fragmentées à l'infini, a une illustration bien

connue, celle de la longueur des côtes bretonnes. Lorsque l'on veut mesurer sur une carte la longueur d'une côte, le résultat est différent selon l'échelle que l'on choisit. En effet, à chaque grossissement, de nouveaux détails apparaissent qui rallongent d'autant la longueur. La mesure dépend donc de l'échelle, c'est-à-dire de la loupe que l'on utilise. Si l'on veut que la relativité opère du plus petit au plus grand, à toutes les échelles, il semble donc nécessaire de lui adjoindre des règles supplémentaires à appliquer selon la loupe et l'échelle choisies. La nouvelle théorie, baptisée relativité d'échelle par Laurent Nottale, a alors pour cadre non plus l'espace-temps

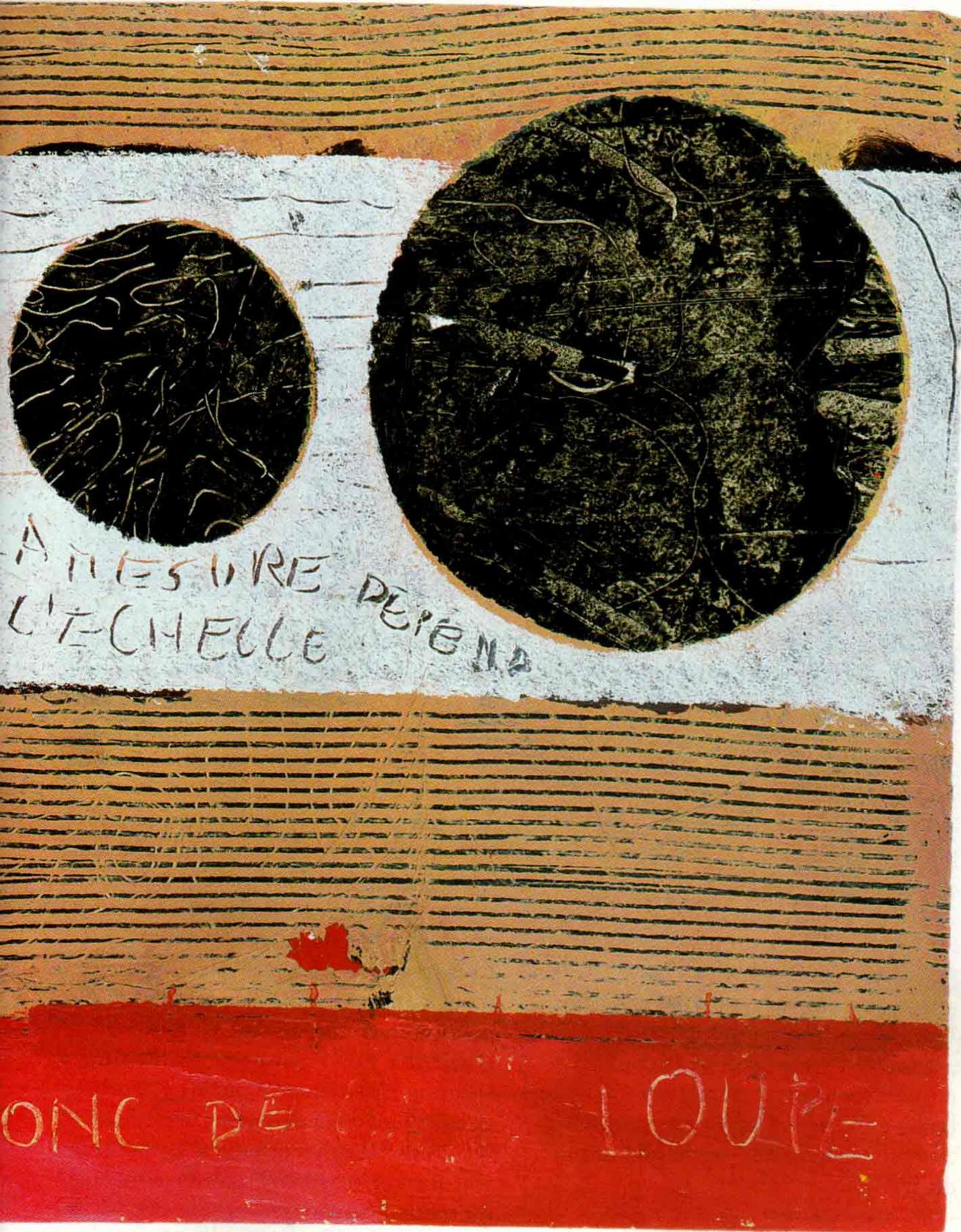
Pour Murray Gell-Mann, prix Nobel de physique 1969, "la mécanique quantique n'est pas en soi une théorie ; c'est plutôt le cadre dans lequel doit s'inscrire toute la théorie physique contemporaine". In *Le quark et le jaguar*, Albin Michel, 1995.



Gianpaolo Pagni



Jerry Bauer/Albin Michel



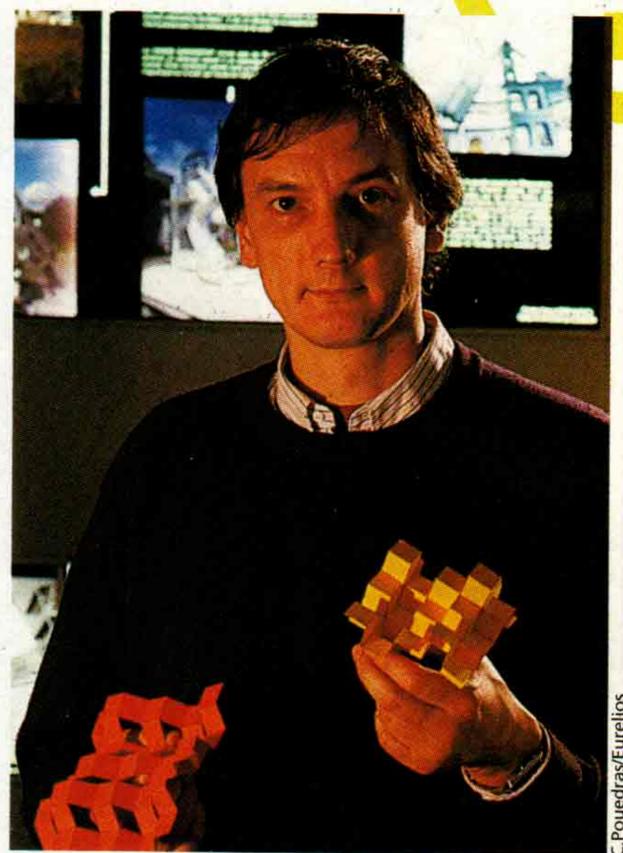
courbe mais l'espace-temps fractal. En plus des lois du mouvement, elle comporte des lois de changement d'échelle. Cette liberté donnée à la géométrie de l'espace permet alors d'introduire des concepts nouveaux. Ainsi les caractéristiques que sont la masse ou la charge des particules pourraient-elles être comprises comme des propriétés nouvelles de l'espace apparaissant lorsque la loupe devient suffisamment puissante. Cette approche est sans doute l'une des plus élégantes tentatives de prolonger la voie "géométrique" ouverte par Einstein. Mais en l'état actuel des choses, il n'est même pas sûr que la relativité puisse être reformulée de façon rigoureuse dans ce nouvel espace.

En revanche, la seconde voie, qui cherche à ramener la gravitation dans le giron quantique, a ces dernières années enregistré de formidables progrès. Car, si d'après l'expression de certains physiciens, la relativité est longtemps restée "à l'étiage", la mécanique quantique a considérablement évolué et, avec elle, nos conceptions

sur les forces, les champs et surtout les particules. À sa naissance, la mécanique quantique n'était que la théorie de l'électron et du proton, les deux seules particules connues. Les forces fondamentales étaient elles aussi réduites à deux, l'interaction élec-

## La relativité souffre de contradictions internes inquiétantes

tromagnétique entre particules chargées et la gravitation — même si déjà le phénomène de radioactivité, cette brisure spontanée de certains noyaux, laissait présager l'existence d'une troisième force agissant au cœur de l'atome. Cette force allait être simplement baptisée "interaction faible". En 1935, le tableau se compliqua avec la découverte de la quatrième force, la plus intense, baptisée "interaction forte" qui,



**Laurent Nottale propose de refonder la mécanique quantique sur le principe de relativité lui-même, "à condition de le généraliser encore, et de ne plus l'appliquer seulement aux déplacements et mouvements, mais aussi aux changements d'échelle".**  
*In La relativité dans tous ses états, Hachette Littératures, 1998.*

agissant comme une colle puissante, assure la cohésion du noyau atomique. Chaque découverte vit la mise en évidence de particules nouvelles dont le nombre dépassait déjà 50 en 1950, bien avant les accélérateurs. Une étape supplémentaire fut franchie en 1964 lorsque l'Américain Murray Gell-Mann suggéra que les particules comme le proton ou le neutron n'étaient pas "élémentaires" mais constituées de briques plus essentielles : les quarks.

Les quarks sont des particules étranges, qui ne peuvent pas être isolées ni observées directement, et sont totalement "virtuelles". Or ce concept général de particules virtuelles — c'est-à-dire soit dotées d'une durée de vie très courte, soit inobservables — allait bouleverser l'image classique des forces. Les physiciens comprirent qu'une force s'exerçant entre deux particules pouvait s'interpréter comme un échange d'une "balle invisible", d'un "messager" : une particule virtuelle, porteuse de l'interaction en question. Il devint dès lors possible de distinguer d'un côté les particules messagères, vecteurs des forces, et qui seront baptisées "bosons" et de l'autre toutes les autres particules, objets des forces, et appelées "fermions" (1).

Cette simplification considérable va permettre enfin aux physiciens d'imaginer la fameuse "Unification", ce regroupement des différentes forces fondamentales recherché en vain par Einstein durant les trente

Qui sera le nouvel Einstein ?



## La nouvelle physique des particules

**La matière** qui nous entoure est constituée de molécules, elles-mêmes composées d'atomes contenant chacun des particules élémentaires : protons, neutrons et électrons. Ces particules interagissent les unes avec les autres selon quatre forces connues : l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux atomiques, l'interaction faible, responsable de la désintégration radioactive des atomes instables, l'interaction électromagnétique entre particules chargées et la gravitation. Cette description simple n'est plus tout à fait celle admise aujourd'hui par les physiciens. Depuis les années 60, on sait en effet que si les électrons restent "élémentaires", protons et neutrons sont eux constitués de briques plus essentielles appelés *quarks*. Pour expliquer la constitution de la quasi-totalité des particules, six variétés de quarks seulement suffisent, baptisées de noms hauts en couleur : haut, bas, étrange, charme, base et sommet. Le proton est ainsi composé de trois quarks (haut, haut, bas), tout comme le neutron (haut, bas, bas). Les quarks et leurs composés sont tous sensibles à la force d'interaction

forte. La prédiction de l'existence des quarks a été vérifiée avec la découverte du dernier quark (sommet) en 1995. Pour compléter les six quarks, il existe six *leptons*, particules qui ne sont pas sensibles à l'interaction forte, parmi lesquels l'électron, le neutrino et leurs cousins. Toutes les particules (et leurs antiparticules) sensibles aux différentes interactions sont désormais qualifiées de *fermions*, qui regroupent donc quarks et leptons. Face à ces particules de "matière", la physique moderne a introduit le concept de particules "virtuelles", porteuses des différentes interactions et baptisées *bosons*. Le plus ancien boson connu est le photon, messenger de la force électromagnétique. L'interaction faible est portée par les bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z_0$ , l'interaction forte par huit gluons et la gravitation par le graviton. Gluons et gravitons n'ont pas encore été observés. Une interaction se résume donc désormais à l'échange d'un boson, sa portée dépendant de la masse dudit boson : elle est infinie lorsque cette masse est nulle, ce qui est le cas du photon et du graviton.



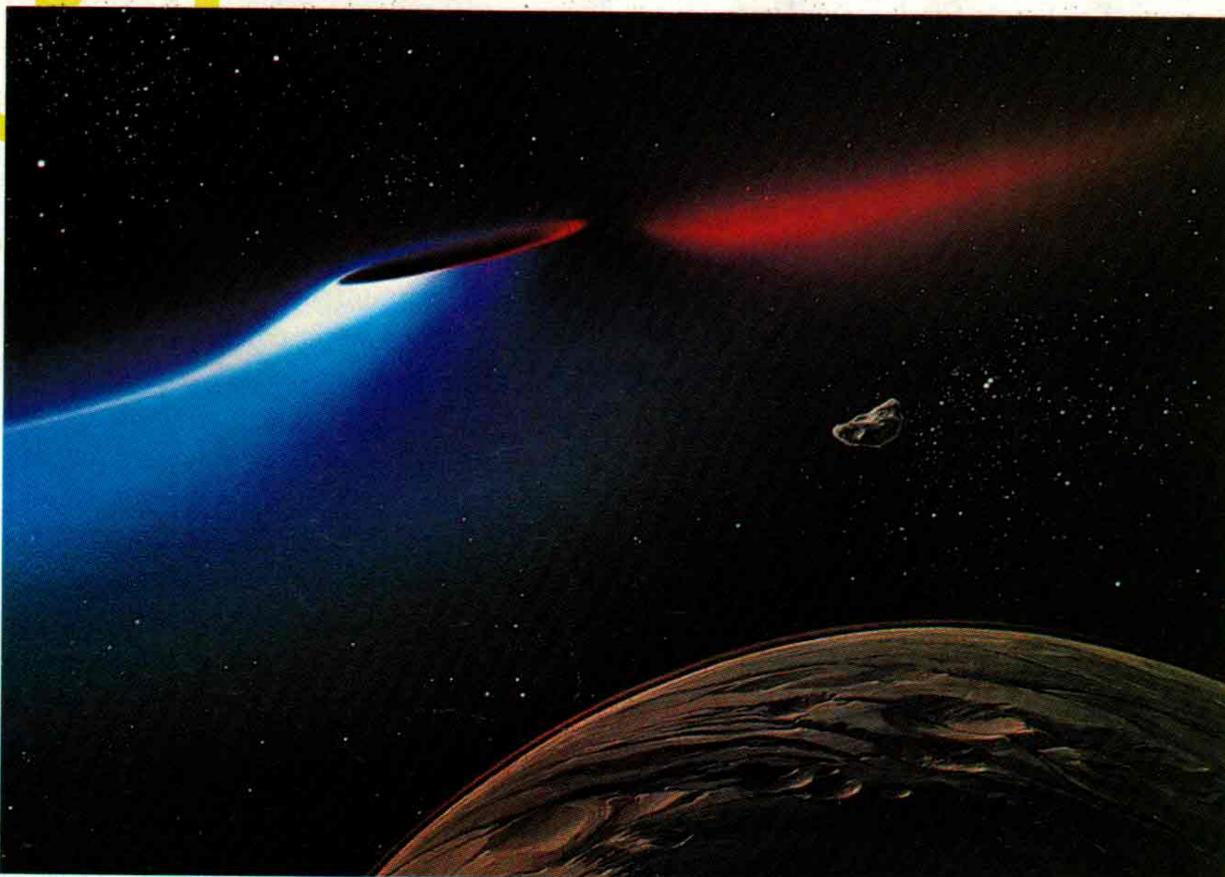
Gianpaolo Pagni

prédisant au passage l'existence des bosons messagers de l'interaction faible, baptisés  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z_0$ . Ces particules furent triomphalement découvertes en 1983 dans l'accélérateur européen LEP à Zurich, au prix d'un travail titanesque — neuf  $W$  isolés pour un milliard de collisions analysées ! Sur cette lancée, fut proposée l'étape ultérieure, la Grande Unification, autrement dit le regroupement de l'interaction électrofaible et de l'interaction forte.

Cette théorie est considérée actuellement comme le "modèle standard" des particules. Mais son succès masque une faille : la gravitation en est toujours absente. Il y a encore quelques années, l'impasse semblait définitive. Mais de nouveau, un changement radical de point de vue, survenu vers 1985, a ouvert la brèche. En tentant de corriger certains défauts de la Grande Unification, notamment son incapacité à prédire la masse des particules, les physiciens ont recherché une symétrie des forces encore plus fondamentale, une transformation qui établirait cette fois-ci une passerelle entre bosons et fermions. Bref, une équivalence directe entre particules et forces. Après de nombreux essais, cette quintessence de symétrie — la "supersymétrie", alias Susy — a pu être trouvée au prix de deux modifications majeures. Tout d'abord, elle ne peut opérer que dans un espace beaucoup plus complexe que l'espace ordinaire puisqu'il doit comporter pas moins de neuf dimensions (dix en y ajoutant le temps) au lieu des trois (quatre avec le temps) qui nous sont familières. Enfin dans ce "super-espace", les particules ne sont plus ponctuelles mais prennent la forme de minuscules filaments, les "supercordes". Toutes ces propriétés ne sont pas décelables dans le

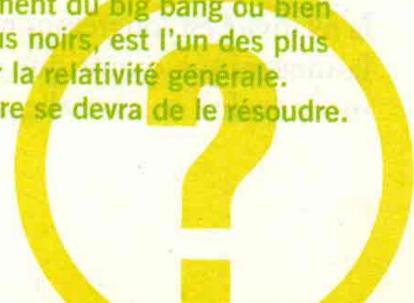
dernières années de sa vie. Puisque les forces sont chacune portées par une particule "boson", les unifier revient à trouver une symétrie, un passage, d'un boson à l'autre. La première réussite fut spectacu-

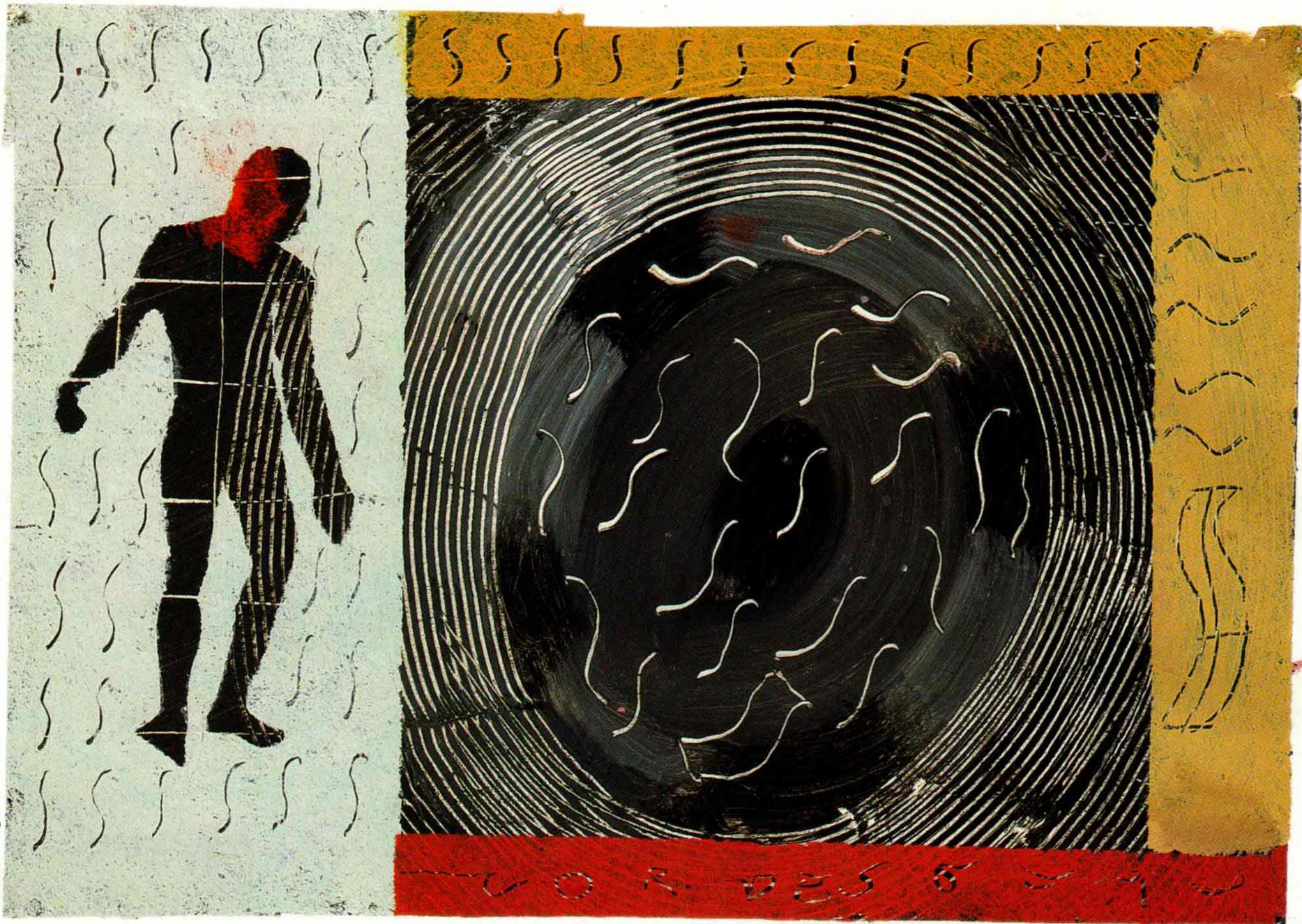
laire. En 1967, Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg, prix Nobel 1979, proposaient la théorie "électrofaible", une symétrie entre l'interaction électromagnétique et l'interaction faible,



Manchu/C&E

**Le problème des infinis, ces singularités surgissant au moment du big bang ou bien au centre des trous noirs, est l'un des plus épineux posés par la relativité générale. Toute théorie future se devra de le résoudre.**





Gianpaolo Pagni

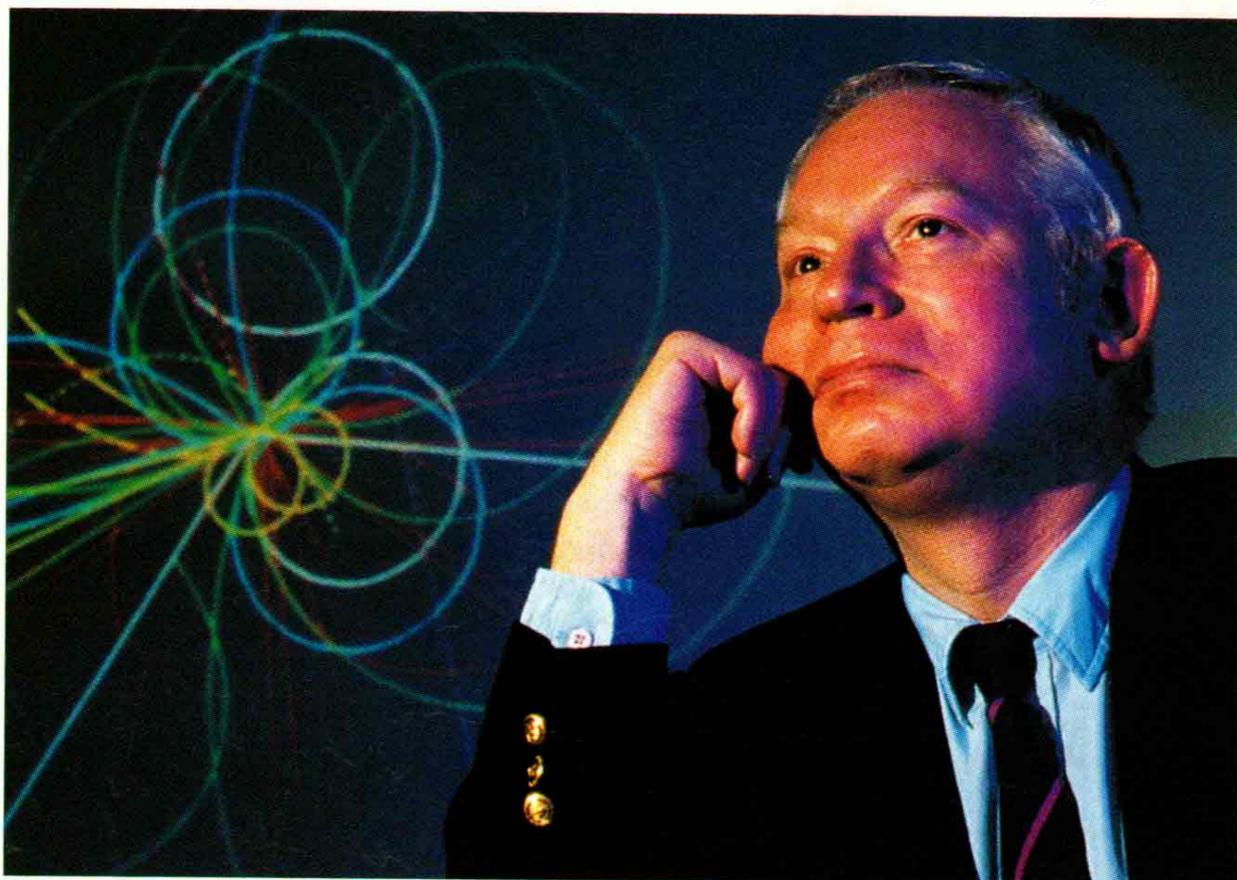
monde ordinaire, car nous n'avons aucun outil pour examiner des structures de si petites tailles, bien inférieures à celles des noyaux atomiques. De même, les dimensions supplémentaires de l'espace nous restent cachées car elles sont très compactes. Repliées sur elles-mêmes, elles paraissent invisibles tout comme un tube peut nous apparaître comme une simple ligne si son diamètre est minuscule. La théorie des

## Les supercordes doivent encore subir le baptême du feu de l'expérience

supercordes semble pour la première fois comporter tous les ingrédients nécessaires à la réconciliation entre relativité et mécanique quantique. D'abord, elle a une propriété remarquable : elle prédit naturellement l'existence de la gravitation

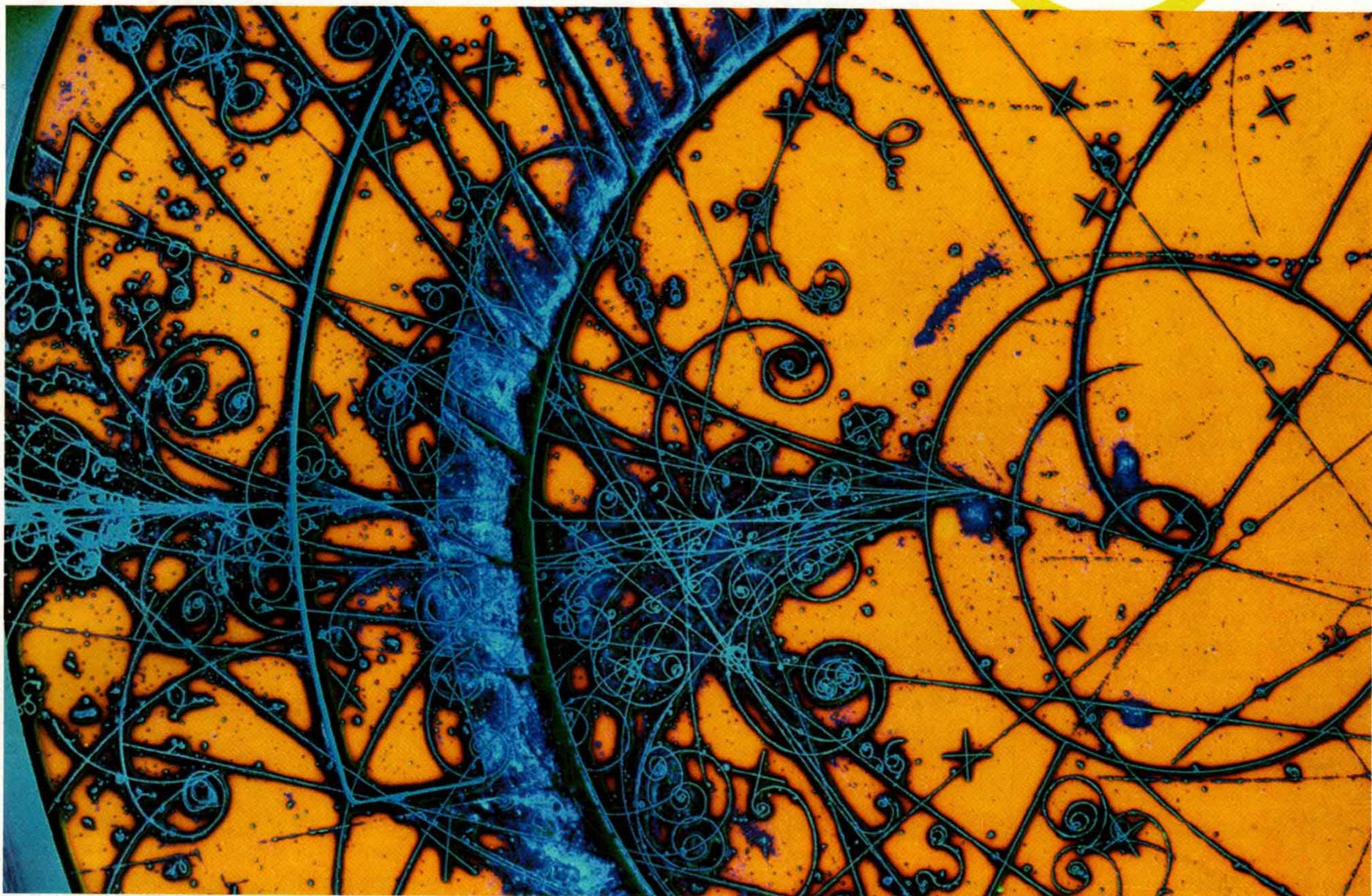
sous la forme d'un nouveau boson messager, le *graviton*. La gravité "réintégrerait" dès lors le statut d'une force quantique comme les autres. Ensuite, les propriétés des particules comme la masse ou la charge sont élégamment fixées à l'aide d'un paramètre unique — la tension de la particule-corde — et sont ainsi déterminées de la même façon que les notes de musique produites par les différentes tensions d'une corde vibrante. Enfin et surtout, le concept de particule-corde permet de résoudre le problème des infinis posé par la relativité. Car les cordes, bien que minuscules, ont une certaine surface qui rend toutes les interactions beaucoup plus douces, plus réparties que pour une particule ponctuelle, évitant ainsi les points infinis.

Reste que cette belle théorie est encore un pur objet mathématique — ce n'est d'ailleurs pas un hasard si l'un de ses inven-



B. Daemrich/Sygma

**Pour Steven Weinberg, "les théories des cordes, incorporant les gravitons et toute une gamme d'autres particules, ont pour la première fois jeté les bases d'une théorie fondamentale ultime possible".**  
*In Le rêve d'une théorie ultime,*  
 Odile Jacob, 1997.



CERN

## L'unification des forces

**De même** que le concept unique de photon a permis d'unifier des manifestations de la lumière aussi différentes que les ondes radio et les rayons gamma, les physiciens sont sur la voie d'un principe unificateur qui leur permettrait de décrire l'ensemble des quatre interactions connues à l'aide d'une force unique. Force électromagnétique et interaction faible sont déjà unifiées par la théorie électrofaible lorsque les particules ont une énergie d'environ 100 fois celle du proton (100 GeV). La théorie de Grande Unification prévoit leur "fusion" avec l'interaction forte lorsque l'énergie est encore un million de milliards de fois plus élevée ( $10^{17}$  GeV). À cette énergie,

qui correspond à des distances entre particules de seulement  $10^{-33}$  m, l'intensité des trois forces devient équivalente. Mais celle de la gravitation "classique", relativiste, reste très en deçà (aux basses énergies du monde ordinaire, elle est même  $10^{-40}$  fois plus faible que les autres forces). En revanche, sous sa "forme quantique", déduite de la supersymétrie, la gravitation pourrait augmenter considérablement lorsque la distance entre les particules diminue. Selon la description choisie pour les particules (cordes ou membranes), elle pourrait s'unifier aux trois autres forces pour une distance comprise entre  $10^{-33}$  et  $10^{-35}$  m, soit des énergies se situant entre  $10^{17}$  et  $10^{19}$  GeV.

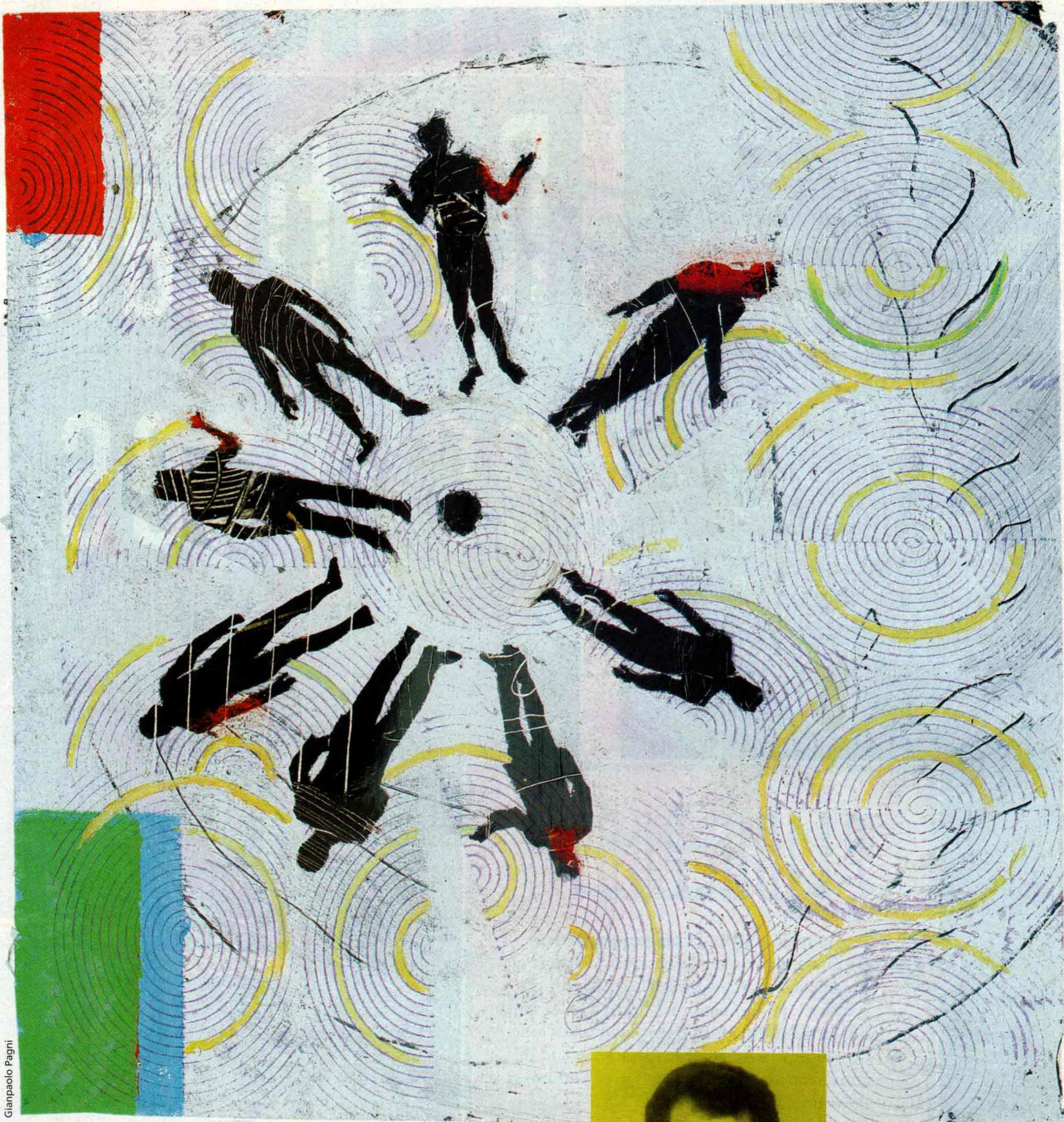
teurs, Edward Witten de l'Institut de Princeton, a déjà reçu la médaille Fields, l'équivalent du prix Nobel en mathéma-

tiques. Elle a la beauté des grandes théories mais doit avant tout subir le baptême du feu de l'expérience. Or pour l'instant, le

La théorie des supercordes prédit l'existence d'une foule de particules qui restent encore à découvrir.

graviton est encore hypothétique. D'autre part, la théorie prévoit que chaque particule est associée à une "particule sœur", baptisée squark pour le quark, sélectron pour l'électron, photino pour le photon, gravitino pour le graviton. Ces particules sont activement recherchées. Il est probable que la plupart ont une durée de vie extrêmement brève et une énergie élevée, encore hors d'atteinte des instruments actuels, mais peut-être à la portée de la prochaine génération — on attend ainsi beaucoup du LHC (Large Hadron Collider) européen qui entrera en activité en 2006. Leur existence a évidemment des conséquences déterminantes pour l'Univers. Un récent article de la revue *Nature*, titré "Le monde fantôme des théories supercordes", envisageait très sérieusement que nous puissions vivre, sans le savoir, au milieu d'une montagne ou au fond d'un océan... fantômes. Cette matière miroir, très différente de l'antimatière, aurait pour propriété de n'interagir sous l'effet d'aucune force, hormis la gravitation. Elle serait aujourd'hui presque indiscernable de la matière ordi-

## Une matière "miroir" insensible à toutes les forces, sauf la gravitation...



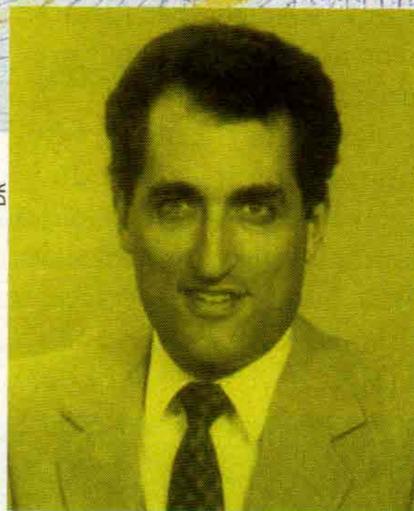
Gianpaolo Pagni

naire, mais aurait évidemment joué un rôle capital dans l'Univers, en particulier dans les tout débuts de l'expansion. On comprend ainsi combien il serait illusoire de vouloir construire une cosmologie avant même d'avoir résolu le problème des forces fondamentales.

Depuis sa création, en tout cas, la théorie des supercordes résiste plutôt bien. Des variantes nouvelles apparaissent même, qui font évoluer les particules-cordes (en forme de lignes) vers des particules-membranes (en forme de surface), et les physiciens restent stupéfaits de sa capacité à prédire l'existence de la gravitation. La piste consistant à envisager un nouveau concept de particule, assez éloigné de l'image classique, semble

faire recette. Si les supercordes recevaient une confirmation sous la forme d'un prix Nobel de physique pour Edward Witten, il est certain que celui-ci aurait fait mieux qu'Einstein. Lequel s'était avancé à une opinion catégorique au sujet de la mécanique quantique en déclarant : *"Je pense que cette théorie ne peut pas servir de point de départ au développement futur de la physique."* Il se peut qu'il ait eu tort.

Quelle aurait été l'histoire de la physique si la mécanique quantique avait été décou-



Edward Witten, l'un des "inventeurs" de la théorie des supercordes, a-t-il fait mieux qu'Albert Einstein ?

verte avant la relativité ? La théorie d'Einstein, avec sa conception classique et sa singularisation de la gravitation, n'a-t-elle pas finalement ralenti les progrès de la physique ? La réponse à ces questions est, à n'en pas douter, inscrite dans l'issue du débat actuel, dans cette entreprise théorique sans précédent qui entrevoit, pour la première fois, l'uni-

fication des forces. ■

(1) Les bosons doivent leur nom au fait que les lois de probabilité qui les régissent ont été découvertes par le physicien indien Satyendra Nath Bose. Les fermions ont été baptisés ainsi parce qu'ils suivent les lois statistiques du physicien ita-