

# Cordes et théories d'unification

## L'éther du 20<sup>e</sup> siècle ?

P. Marios Petropoulos (Marios.Petropoulos@cph.t.polytechnique.fr)  
Centre de physique théorique, École polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex

L'histoire moderne de la théorie des cordes est jalonnée d'impasses et de rebondissements. Elle succède à l'ancienne théorie des modèles duaux<sup>(a)</sup> et, lorsqu'on en déroule le fil d'Ariane, on découvre la supersymétrie, les groupes de grande unification, les dimensions en surnombre ainsi que d'autres objets étendus, les membranes ou les *p*-branes...

Dans cet imbroglio d'idées sur la nature, ses symétries et ses dimensions, la théorie d'objets étendus a eu pour ambition d'embrasser d'une accolade toutes les particules et les interactions, avec pour objectif de reproduire le modèle standard et de répondre aux questions laissées en suspens en cosmologie. Est-ce le choix de la nature ou notre vœu, faute de mieux ?

(a) Voir, du même auteur, « Histoire de la théorie des cordes, des hadrons à l'échelle de Planck », paru dans le numéro 22 de *Reflets de la physique* (2010), pp. 8–13.

### Interrogations en physique microscopique

La physique du 20<sup>e</sup> siècle est née pour une grande part des questions que soulevaient le corps noir et la lumière, et qui mettaient en porte-à-faux la physique du siècle précédent. Les questions qui suscitent notre intérêt depuis une trentaine d'années sont d'un autre registre. Elles sont pour la plupart de nature conceptuelle, car aucune expérience directe ne met en cause les fondements de notre vision des constituants de la matière et de leurs interactions.

On connaît un spectre de particules dont on pense qu'elles sont élémentaires, et un ensemble d'interactions auxquelles elles peuvent participer. Les paramètres décrivant ce système (familles de particules, masses, constantes d'interaction...) sont libres et déterminés par ajustement expérimental. Ce cadre est celui du modèle standard des particules.

Dans ce modèle, qui s'appuie sur la théorie quantique des champs, la matière est constituée de quarks et de leptons, et les interactions y sont véhiculées par des bosons vecteurs intermédiaires : le photon pour l'interaction électromagnétique, les bosons massifs pour l'interaction nucléaire faible et les gluons pour l'interaction nucléaire forte. Ces trois interactions sont dites de jauge ou de Yang–Mills.

Le modèle standard a été testé avec la plus haute précision, en particulier dans les expériences du LEP (CERN), jusqu'à des énergies de l'ordre de 100 GeV. Seul le boson scalaire de Higgs, responsable de la brisure de la symétrie électrofaible et de la génération de la masse, reste à découvrir ; sa masse est supérieure à 120 GeV et sa découverte pourrait être prochainement confirmée au LHC (CERN) (voir *Reflets de la physique* n°28 (2012), pp. 15–17).

Les théories de Yang–Mills utilisées dans le modèle standard ont la remarquable propriété d'être cohérentes et prédictives à des énergies arbitrairement élevées, autrement dit à toutes les échelles microscopiques ; elles sont *renormalisables*. La relativité générale, théorie de la gravitation, ne possède pas cette propriété. Elle ne semble donc pas adéquate pour décrire la gravitation microscopique, vraisemblablement nécessaire au voisinage du Big Bang, et soulève à ce titre nombre de questions : Existe-t-il une version quantique satisfaisante de la théorie de la gravitation ? Peut-on calculer la constante cosmologique, si petite qu'on la croyait nulle il y a à peine dix ans ? Pourquoi la force gravitationnelle est-elle si faible comparée aux autres forces ?

Ces questions s'intègrent dans un vaste programme impliquant toutes les autres interactions dans une perspective d'unification : Existe-t-il une nouvelle physique aux énergies accessibles dans les collisionneurs actuels ? De nouvelles particules élémentaires qui seraient plus massives que les leptons et les quarks, et d'autres encore qui interagiraient très faiblement et pourraient fournir un candidat pour la matière noire<sup>(1)</sup> ? De nouvelles interactions qui seraient véhiculées par d'autres bosons intermédiaires ?

*A contrario*, existe-t-il une théorie plus fondamentale encore que le modèle standard, dans laquelle le nombre de paramètres serait inférieur ? Une théorie qui expliquerait pourquoi toutes les particules ont une charge multiple d'un quantum élémentaire et en déterminerait la valeur ? Une théorie dont les constituants élémentaires seraient plus élémentaires que les leptons et les quarks ? Une théorie, enfin, qui inclurait la gravitation microscopique ?

## Les premières tentatives d'unification

Des forces sont unifiées lorsqu'elles apparaissent comme manifestations différentes d'une même interaction. On sait depuis Faraday et Maxwell que les phénomènes magnétiques et électriques ne sont pas distincts, et plus encore depuis Glashow, Salam et Weinberg, que des interactions aussi différentes<sup>(2)</sup> que l'électromagnétisme et l'interaction nucléaire faible, sont des composantes de basse énergie d'une théorie unique : la théorie électrofaible. À mesure que l'énergie augmente et que la matière est sondée à des distances de plus en plus courtes, le comportement des interactions est modifié et les constantes de couplage effectives tendent vers une valeur commune, celle de l'interaction électrofaible.

### Les théories de Kaluza-Klein

Les théories de Nordström (1914), puis de Kaluza (1921) et Klein (1926), sont les premières tentatives d'unification des forces gravitationnelle et électromagnétique. Ce sont aussi les premières où apparaît l'idée d'espaces-temps de dimension supérieure à 4 : l'espace-temps possède 5 dimensions, et seule l'interaction gravitationnelle existe. En dimension 4, l'électromagnétisme et la gravitation émergent tous deux comme différentes facettes de la gravitation penta-dimensionnelle.

Les dimensions supplémentaires ont été très étudiées, en particulier par Einstein, dès la fin des années 20, dans le cadre des « théories unitaires » ou d'unification, dans le langage contemporain. L'obstacle principal était alors d'expliquer, de façon naturelle, la grande différence de magnitude des deux interactions unifiées<sup>(2)</sup>.

L'introduction d'une cinquième dimension comme outil d'unification à la Kaluza-Klein est assortie d'une contrainte naturelle : la dimension supplémentaire doit rester inobservable. Elle doit donc être petite. Elle peut être compacte, par exemple fermée à la façon d'un cercle dont le rayon  $R$  (fig. 1) serait plus petit que la définition des instruments d'observation de la présente génération.

La nature compacte d'une dimension impose des conditions de périodicité dans les fonctions d'onde, qui se traduisent *in fine* par l'apparition d'une infinité de répliques pour chaque particule présente à l'origine dans le spectre (modes de Fourier). Les masses carrées des répliques sont séparées de  $(\hbar/Rc)^2$ . Cette structure, appelée séquence de Kaluza-Klein, est la signature typique d'une dimension compacte.

Mettre en évidence une dimension compacte par l'examen des spectres, nécessite donc l'observation d'une *succession* de particules de mêmes nombres quantiques et de masses (carrées) espacées régulièrement selon une séquence de Kaluza-Klein. Une seule particule ne suffit pas, pas plus qu'une seule raie de l'atome d'hydrogène n'aurait suffit à démontrer le bien-fondé de l'équation de Schrödinger. Les expériences réalisées à ce jour dans les accélérateurs de particules permettent d'atteindre des énergies de l'ordre du TeV, et rien n'est observé à l'heure actuelle qui ressemblerait à une séquence de Kaluza-Klein. Le seuil de masse typique d'une telle séquence étant (d'après ce qui précède) de  $\hbar/Rc$ , les accélérateurs de particules établissent une borne supérieure de l'ordre de  $10^{-17}$  cm au rayon d'une éventuelle dimension compacte. La recherche de dimensions supplémentaires de taille inférieure d'un ordre de grandeur fait partie des programmes du collisionneur LHC au CERN (10 TeV).

Une autre manifestation de l'existence d'une cinquième dimension de taille  $R$  serait le comportement de la loi de Newton : en  $1/r^2$  ou en  $1/r^3$  selon que  $r$  est grand ou petit par rapport à  $R$ . La loi en  $1/r^2$  est vérifiée expérimentalement à des échelles supérieures à quelques dizaines de microns<sup>(3)</sup>. De nouvelles générations d'expériences de gravité submillimétrique devraient explorer la validité de la loi de Newton en deçà de ces échelles.

### Les théories de grande unification

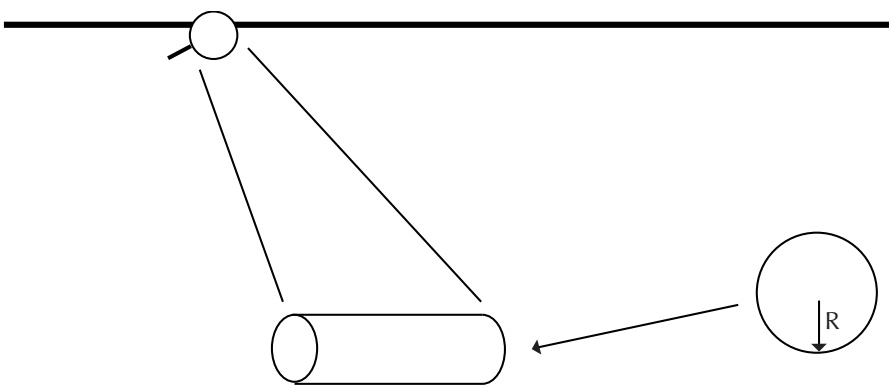
Le procédé d'unification des forces électrofaibles du modèle standard est devenu dans les années quatre-vingt le paradigme pour des extensions de celui-ci. On parle de théories de *grande* unification pour souligner que l'unification à haute énergie s'applique à *toutes* les interactions (forte, faible et électromagnétique, à l'exception de l'interaction gravitationnelle), qui paraissent dès lors comme manifestations distinctes, à basse énergie, d'une seule et unique force.

La phénoménologie des modèles de grande unification a été largement développée par la suite. Il est impossible, dans ces modèles, de réaliser l'unification en se limitant aux seuls « secteurs »<sup>(4)</sup> du modèle standard. De nouveaux secteurs sont nécessaires, qui introduisent de nouvelles particules et de nouvelles interactions (*i.e.* de nouveaux bosons intermédiaires), inobservées à ce jour. Par ailleurs, l'interaction gravitationnelle continue d'être décrite par la relativité générale et n'est pas intégrée dans le schéma de grande unification.

### La supersymétrie

La supersymétrie est la symétrie autour de laquelle se sont articulées toutes les extensions du modèle standard et de la relativité générale de la fin du 20<sup>e</sup> siècle.

L'espace-temps introduit dans la relativité d'Einstein est le lieu naturel pour l'étude des particules et de leurs interactions. Il est caractérisé par sa symétrie : translations d'espace et de temps, rotations d'espace et transformations de Lorentz (reliant des référentiels d'inertie) forment le groupe de Lorentz-Poincaré. Comme tous les groupes, ce dernier possède des représentations, c'est-à-dire des espaces abstraits sur lesquels il agit linéairement. À chaque représentation de ce groupe, déterminée par le *spin* et le paramètre de masse, est associée une particule de *spin* et de masse correspondants. Les états physiques de cette particule, au



1. Une dimension non compacte et une autre, compacte (cercle de rayon  $R$ ). Plusieurs dimensions compactes pourraient coexister et former des espaces de géométrie plus riche (par exemple, de Calabi-Yau).





sens de la mécanique quantique, sont des vecteurs dans l'espace abstrait de la représentation qui est aussi appelée « multiplet ». Le multiplet du photon contient les deux états de polarisation du photon, celui de l'électron les deux états de projection de  $spin \pm \hbar/2$ , etc.

Le concept de supersymétrie est né au tout début des années 70 (Gervais et Sakita, 1971, Gol'fand, Likhtman, Volkov et Akulov, 1971, et Wess et Zumino, 1973). Il s'agit d'une extension de la symétrie décrite ci-dessus, dont il résulte concrètement des multiplets constitués à la fois de bosons et de fermions, tous de même masse. Par exemple, un boson de jauge de type photon (hélicité 1, masse nulle) est accompagné d'un ou plusieurs partenaires supersymétriques, les jauginos ( $spin \ 1/2$ , masse nulle), en nombre égal au degré de supersymétrie ( $N = 1, 2, \dots$ ).

La découverte de cette nouvelle structure mathématique, extension naturelle de la symétrie relativiste d'Einstein, Lorentz et Poincaré, a conduit à d'importantes spéculations en physique des particules, en gravitation et en cosmologie. La plus répandue a été de proposer une version supersymétrique du modèle standard. Cette généralisation nécessite l'introduction de partenaires supersymétriques pour chacune des particules présentes dans le modèle.

Par exemple, le partenaire de l'électron ( $spin \ 1/2$ ) est un « électron scalaire » ( $spin \ zéro$ ) de même masse. Or aucune particule scalaire, chargée, de la masse de l'électron n'a jamais été observée – et il en est de même pour les partenaires des autres particules. Tout modèle supersymétrique doit donc être accompagné d'un mécanisme de brisure de supersymétrie, qui reste aujourd'hui encore le talon d'Achille de cette construction.

En contrepartie, l'introduction de la supersymétrie rend possible la convergence des constantes de couplage des trois forces du modèle standard (électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte) à des énergies très élevées<sup>(5)</sup> ( $\sim 10^{16}$  GeV, voir figure 2).

La réalisation d'un tel édifice, manifestement plus complexe et incertain que le modèle standard, a été soutenue par des propriétés propres à la nature profonde de la supersymétrie, qui devraient transcender les modèles particuliers. Elle a donné lieu à des extensions supersymétriques de la relativité générale, appelées *supergravités*, et a engendré une phénoménologie prolifique, située au cœur des investigations expérimentales (Fermilab, CERN), dont l'objectif est de mettre en évidence l'existence d'éventuels partenaires supersymétriques pour les particules connues.

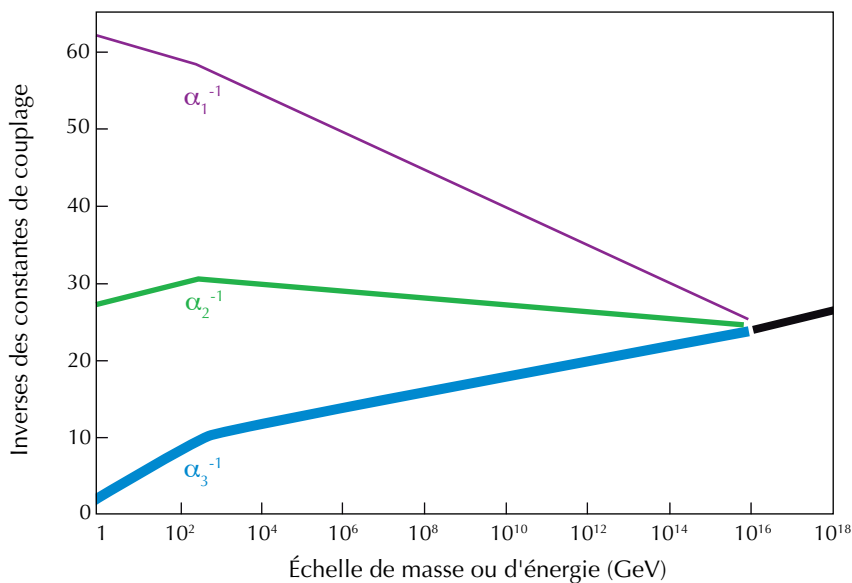
### Les objets étendus

Historiquement, c'est Dirac (voir p. 16) qui suggéra le premier l'introduction de membranes en physique des particules. Le scepticisme qui, à la fin des années 50, entourait la théorie quantique des champs, du fait de la renormalisation et de ses procédés d'apparence artificielle, avait en effet conduit à l'élaboration de théories alternatives.

L'électron comme membrane chargée, proposé par Dirac en 1962, avait un double objectif. D'une part éviter l'énergie infinie de l'électron ponctuel sans procédé *ad hoc* et, d'autre part, amorcer un processus d'unification des particules et des interactions.

Si la charge de l'électron est distribuée sur une membrane sphérique dont le rayon est inférieur à la résolution expérimentale, l'énergie électrostatique est finie et l'électron paraît ponctuel. L'équilibre de la membrane à un rayon donné résulte de la compétition entre l'effet de sa tension, qui tend à la réduire à un point, et celui des forces électrostatiques de répulsion entre chacune de ses parties. Ce système est dynamique et peut vibrer autour de sa position d'équilibre. À l'énergie électrostatique s'ajoute alors l'énergie des vibrations conduisant à un spectre de masse dont la première excitation est, dans le modèle de Dirac, 53 fois plus massive que celle du fondamental représentant l'électron. Cet objet a une masse quatre fois inférieure à celle du muon, second lepton massif après l'électron<sup>(6)</sup>. Quant au rayon de la membrane à l'équilibre, il est de l'ordre du fermi ( $10^{-13}$  cm), compatible avec les observations de l'époque.

Le modèle de la membrane chargée était remarquable à plus d'un titre. Ses prédictions pratiques étaient en effet suffisamment réalistes pour qu'on envisageât des amendements qui auraient éventuellement permis d'expliquer la *spin* ou de reproduire les observations expérimentales avec une meilleure précision. Sur le plan conceptuel, ce modèle était sans équivoque le précurseur des théories de cordes, apparues dix ans plus tard, posant clairement ses objectifs : finitude (ici de l'énergie électrostatique) et unification (du spectre des leptons). Il n'y eut toutefois aucune suite directe à ce type d'investigation, et les membranes ont disparu pendant trente ans pour revenir en 1995 comme « D-branes ».



**2. Unification des interactions.** Les inverses des constantes de couplage électromagnétique (en rouge), nucléaire faible (en vert) et nucléaire forte (en bleu), extrapolées en fonction de l'énergie dans le modèle supersymétrique minimal SU(5), convergent mieux que les modèles non supersymétriques. Ce résultat est un argument en faveur d'une unification supersymétrique de ces trois interactions. (D'après S. Dimopoulos *et al.*, *Physics Today* 44 (1991) 25-33).

## Les cordes et les branes

La théorie des cordes occupe une place privilégiée dans la quête d'unité et de cohérence, notamment parce qu'elle englobe naturellement toutes les méthodes d'unification imaginées et décrites précédemment. Les objets fondamentaux de cette théorie sont des cordes de taille très petite, de l'ordre de l'échelle de Planck,  $L_{\text{Planck}} = (G_{\text{Newton}} \hbar / c^3)^{1/2} \approx 1,62 \cdot 10^{-35}$  m.

La corde possède un *spectre infini de fréquences propres*. À chacun de ces modes classiques correspond un état quantique, dont la masse est reliée à la fréquence par la relation masse-énergie-fréquence d'Einstein-Planck :  $mc^2 = E = h\nu$ . Plus la fréquence propre  $\nu$  est élevée, plus la masse de l'état quantique associé est grande. Le spectre commence par un secteur de masse nulle ou presque nulle (corde au repos) et se poursuit par un secteur dont les états ont des masses multiples d'une masse fondamentale associée à la fréquence fondamentale  $\nu_0$ . Ce motif spectral fut à l'origine du succès de la corde hadronique dans les années soixante (voir référence en note (a), p. 12).

À l'instar du contenu harmonique de la corde d'un instrument de musique, le spectre d'une théorie des cordes est rigide. L'ensemble des particules qu'il décrit est déterminé une fois choisis les paramètres qui caractérisent la corde ; aucune fréquence propre ne peut alors être ajoutée ou soustraite. Cette propriété distingue la théorie des cordes d'une théorie des champs ordinaire, où la liberté de sélectionner les particules du spectre n'est limitée que par des considérations de cohérence quantique, somme toute peu contraignantes. À titre d'exemple, le modèle standard est une théorie des champs possédant trois familles de leptons (celle de l'électron, celle du muon et celle du tau). Ce choix est dicté exclusivement par l'observation expérimentale : on pourrait ajouter une quatrième famille sans altérer la cohérence de la construction.

La masse fondamentale de la théorie des cordes est la masse de Planck,  $M_{\text{Planck}} = (\hbar c / G_{\text{Newton}})^{1/2}$ . Toutes les particules élémentaires observées dans la nature sont de masse si petite par rapport à cette échelle qu'elles doivent être cherchées dans le secteur de masse nulle ou presque nulle de la théorie. Ce spectre contient, entre autres, une particule de masse nulle et de *spin* 2, interprétée comme le graviton<sup>(7)</sup> ;

la théorie des cordes fournit une généralisation de la relativité générale, cohérente à des énergies arbitrairement grandes, là où émerge la nature quantique, microscopique de l'interaction.

La théorie des cordes fait figure de théorie de « *super-unification* », permettant de décrire d'un seul trait toutes les particules et toutes les interactions. Aux basses énergies, on démontre que les modes de masse nulle (ou très petite vis-à-vis du mode fondamental situé à  $M_{\text{Planck}}$ ) de la théorie des cordes sont décrits au moyen d'une théorie effective, qui est une théorie quantique des champs. On renoue de cette façon avec les descriptions conventionnelles du monde observable.

Cet accord entre l'approximation de basse énergie de la théorie des cordes et la physique observable est un accord de principe, car il aboutit à la question cruciale suivante : est-il possible d'extraire exactement et exclusivement le modèle standard de cette structure et de faire en sorte que les masses exactes des particules observées soient reproduites en l'état au sein de la théorie des cordes – laissant en suspens la confrontation expérimentale du seul secteur multiple de  $M_{\text{Planck}}$  ?

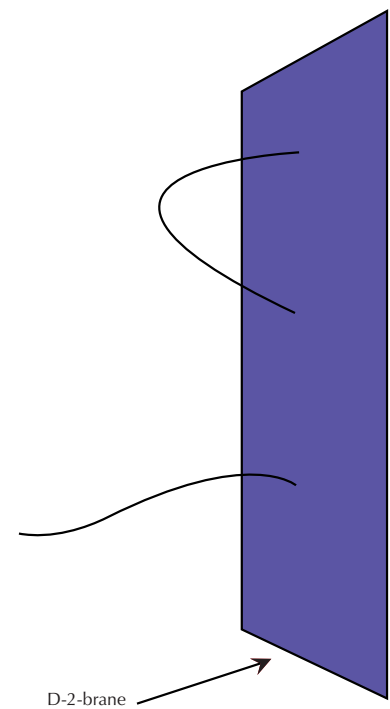
À l'heure actuelle, la réponse à cette question n'est pas définitive. Ce qui motive l'analyse approfondie à laquelle la communauté se livre depuis trente ans, ce sont les propriétés remarquables de cette théorie : la théorie des cordes incorpore de façon naturelle et incontournable tous les ingrédients qui ont été évoqués au fil des années comme possibles extensions de la relativité générale et du modèle standard.

On y trouve :

- (1) **Les dimensions supplémentaires** – En théorie des cordes, les dimensions supplémentaires ne sont pas une option mais une nécessité, et leur nombre n'est pas arbitraire. Dans la théorie quantique, la symétrie de Lorentz est présente à condition que l'espace-temps soit de dimension 10 (éventuellement 26). Cela nécessite l'introduction d'un processus de compactification pour les 6 dimensions d'espace supplémentaires, et nous renvoie ainsi aux méthodes de Kaluza-Klein.
- (2) **La supersymétrie et la grande unification** – Le spectre de la théorie des cordes, dans chaque secteur de masse, contient autant de bosons que de fermions. Cette dégénérescence reflète

la supersymétrie de la théorie. En outre, le spectre contient de nombreux bosons intermédiaires d'interaction de jauge, plus nombreux que ceux du modèle standard, qui rapprochent la corde d'une théorie de grande unification. Cette dernière apparaît comme théorie effective de basse énergie.

- (3) **Les membranes** – La corde est un objet étendu unidimensionnel. Une théorie des cordes contient généralement des cordes fermées et ouvertes. Les extrémités des cordes ouvertes sont libres ou astreintes à se déplacer sur des hypersurfaces plongées dans l'espace ambiant de dimension 9 (espace-temps décadimensionnel). Ces hypersurfaces sont potentiellement de dimension  $p \in \{1, \dots, 9\}$ , et apparaissent comme de nouveaux objets étendus appelés *D-p-branes* (Polchinski, 1995). Le « D » rappelle les conditions au bord de *Dirichlet* imposées à la corde pour en fixer les extrémités<sup>(8)</sup>. Le cas  $p = 2$  correspond à une membrane au sens ordinaire (fig. 3). Une théorie de cordes moderne est finalement une collection de cordes fermées, ouvertes, et de branes. Tous ces ingrédients sont indispensables et ont permis d'étayer de remarquables relations de dualité entre les principales théories de supercordes, définies en 10 dimensions d'espace-temps. >>>



3. Deux cordes ouvertes, dont les extrémités sont accrochées sur une D-2-brane (membrane de Dirichlet).



## L'état des lieux

Les extensions du modèle standard sont riches en physique nouvelle. Les notions de supersymétrie, de dimensions supplémentaires et de grande unification sont intéressantes et ont ouvert de nombreuses voies d'investigation expérimentale, explorées dans les collisionneurs contemporains. Cependant, sur le plan conceptuel, toutes ces extensions peinent à atteindre l'objectif principal annoncé : réduire le nombre de paramètres et de constituants fondamentaux. Elles sont systématiquement accompagnées de nombreuses symétries qui ne sont pas manifestes dans la nature et sont difficiles à briser, et d'une pléthore de particules jamais encore observées. Retrouver le modèle standard et ses caractéristiques fondamentales (telle la stabilité du proton dont la durée de vie est supérieure à  $10^{32}$  années) nécessite souvent des ajustements fins et de nombreux nouveaux paramètres, dont le caractère arbitraire incite à des velléités anthropiques. Même l'extension la plus modeste du modèle standard, le modèle standard supersymétrique minimal, possède presque 10 fois plus de paramètres et est pourtant en voie d'être exclu par les mesures du LHC. Avec lui, risque de disparaître

aussi la seule indication d'une unification des forces électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte à environ  $10^{16}$  GeV, proposée il y a exactement 30 ans<sup>(5)</sup> (fig. 2).

La théorie des cordes est en principe capable de décrire particules et interactions, toutes intégrées dans une théorie fondamentale, par opposition aux théories émergentes que sont les extensions directes du modèle standard (modèles supersymétriques, de grande unification...). Nonobstant la liberté de choix dans la compactification, la rigidité du spectre des cordes a pour conséquence qu'aucune construction satisfaisante ne restitue, aujourd'hui encore, le modèle standard aux basses énergies ; pas plus du reste qu'il n'existe un principe permettant de justifier un choix plutôt qu'un autre.

Des hadrons aux trous noirs, l'Odyssée de l'unification risque finalement de rester inachevée. Nombre des questions soulevées n'ont pas encore reçu de réponse satisfaisante, convaincante ou définitive. Cependant, les moyens et l'ingéniosité mis en œuvre, ainsi que l'ouverture vers d'autres disciplines, ne laissent aucun doute sur l'importance et la créativité du sujet. Se demander si les cordes existent dans la nature paraît aujourd'hui secondaire. ■

(1) Avec la constante cosmologique (appelée encore « énergie noire »), la matière noire est indispensable pour expliquer l'évolution de l'Univers. Cette matière est cependant invisible, et sa nature reste indéterminée.

(2) Deux protons distants de 5 fermi exercent l'un sur l'autre une force électromagnétique de 10 N et une force faible de  $10^{-2}$  N. Pour mémoire, il résulte de l'interaction gravitationnelle une force de  $10^{-35}$  N.

(3) La meilleure limite de validité publiée est de 56  $\mu\text{m}$  (voir D.J. Kapner *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 021101).

(4) On entend par « secteur » un ensemble de particules qui se distinguent soit par les interactions qu'elles véhiculent (les bosons intermédiaires des interactions fortes), soit par les interactions auxquelles elles participent (les leptons, qui ne participent qu'aux interactions électrofaibles), soit plus généralement par un ou plusieurs nombres quantiques communs (masse, *spin*...).

(5) S. Dimopoulos, S. Raby et F. Wilczek, "Supersymmetry and the scale of unification", *Phys. Rev.* **D24** (1981) 1681.

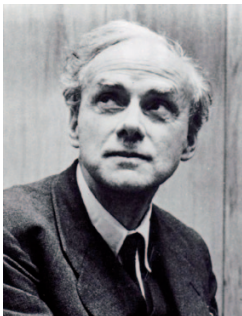
(6) Le muon ( $\mu$ ) a été découvert par Neddermeyer et Anderson en 1937 ; sa masse est  $m_\mu \approx 105,66 \text{ MeV}/c^2$ . Son aîné, découvert par Thomson en 1897, l'électron, a une masse environ 200 fois inférieure,  $m_e \approx 511 \text{ KeV}/c^2$ .

(7) Particule élémentaire hypothétique, qui serait le quantum de la force gravitationnelle.

(8) Une condition aux limites de Dirichlet est imposée à une équation différentielle lorsque l'on spécifie les valeurs que la solution doit vérifier sur les limites du domaine.

### ► Paul Adrien Maurice Dirac

(1902–1984)



Physicien et mathématicien britannique, professeur à l'Université de Cambridge. L'importance des travaux de Dirac repose essentiellement sur sa célèbre équation d'onde, introduite en 1928 dans le cadre de sa théorie quantique relativiste de l'électron, qui permet de prédire l'existence des antiparticules, confirmée peu après (1932) par la découverte expérimentale du positon. Il est le premier à avoir suggéré l'introduction de membranes en physique des particules.

Paul Dirac a reçu le prix Nobel de physique en 1933.

### Bibliographie

De nombreux ouvrages et articles de vulgarisation ont paru au cours des dernières années. Parmi les plus connus, on trouve :

- B. Greene, *The elegant universe: superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory*, W.W. Norton, New York (1999). Traduction française : *L'univers élégant*, Gallimard (2005).
- B. Greene, *The fabric of the cosmos: space, time, and the texture of reality*, Alfred A. Knopf, New York (2004). Traduction française : *La magie du cosmos*, Robert Laffont (2005).
- L. Randall, *Warped passages: unraveling the mysteries of the universe's hidden dimensions*, Ecco/HarperCollins (2005).
- L. Randall, *Knocking on heaven's door: how physics and scientific thinking illuminate the universe and the modern world*, Ecco/HarperCollins (2011).
- L. Susskind, *The cosmic landscape: string theory and the illusion of intelligent design*, Little, Brown and Company (2005).

Le lecteur doit être cependant averti que tous les ouvrages destinés au grand public mettent souvent en exergue les aspects les plus spéculatifs de la théorie. Ils sont moins axés sur les moyens et les résultats que sur une finalité parfois dogmatique, qui prend l'apparence d'une quête caricaturale de l'ultime où la frontière entre science et fiction disparaît.

Il existe également des ouvrages dont les auteurs présentent des points de vue réservés sur la théorie des cordes (encore dogmatiques et davantage orientés vers la sociologie de la communauté des cordes), faisant état de développements alternatifs controversés (théorie de la gravitation quantique à boucles) :

- L. Smolin, *The trouble with physics: the rise of string theory, the fall of a science, and what comes next*, Penguin Books (2007). Traduction française : *Rien ne va plus en physique ! L'échec de la théorie des cordes*, Dunod (2007).
- P. Woit, *Not even wrong: the failure of string theory and the search for unity in physical law*, Basic Books (2007). Traduction française : *Même pas fausse ! La physique renvoyée... dans ses cordes*, Dunod (2007).