

Physique au-delà du Modèle Standard

En 2012, lorsque le boson de Higgs a été confirmé au Grand Collisionneur de Hadrons du CERN, le Modèle Standard (MS) était, sur le papier, complet. Chaque particule prédite avait été trouvée. Ses équations avaient passé tous les tests expérimentaux avec une précision stupéfiante.

Pourtant, l'ambiance en physique n'était pas celle d'une conclusion, mais d'une incomplétude. Tout comme les lois de Newton avant Einstein ou la physique classique avant la mécanique quantique, le Modèle Standard était trop performant aux échelles que nous pouvons tester, mais incapable de répondre à des questions plus profondes. C'était une carte presque parfaite – mais seulement d'une petite partie du paysage.

Gravité : La force manquante

L'omission la plus évidente est la gravité.

- Le MS décrit trois des quatre forces fondamentales connues : l'électromagnétisme, la force faible et la force forte.
- La gravité, décrite par la **relativité générale (RG)** d'Einstein, est totalement absente.

Ce n'est pas qu'un simple oubli. La relativité générale considère la gravité comme la courbure de l'espace-temps, un champ géométrique lisse, tandis que le MS traite les forces comme des champs quantiques médiatisés par des particules. Les tentatives de quantifier la gravité de la même manière se heurtent à des infinis qui ne peuvent être renormalisés.

Le Modèle Standard et la RG sont comme deux systèmes d'exploitation différents – brillants dans leurs propres domaines, mais fondamentalement incompatibles. Les réconcilier est peut-être le plus grand défi de la physique actuelle.

Masses des neutrinos

Le MS prédit que les neutrinos sont sans masse. Cependant, des expériences, commençant par le détecteur Super-Kamiokande au Japon (1998) et confirmées dans le monde entier, ont montré que les neutrinos oscillent entre différentes saveurs (électronique, muonique, tau). L'oscillation nécessite une masse.

Ce fut la première preuve confirmée de physique au-delà du Modèle Standard. Cette découverte a valu le prix Nobel de 2015 à Kajita et McDonald.

Les neutrinos sont extrêmement légers, au moins un million de fois plus légers que l'électron. Leurs masses ne sont pas expliquées par le MS – mais elles pourraient indiquer une nouvelle physique, comme le **mécanisme de balancier**, les neutrinos stériles ou des liens avec l'univers primordial. Dans certains scénarios, les neutrinos lourds de type balancier

permettent la **leptogenèse**, où une asymétrie des leptons est créée dans l'univers primordial, qui se transforme ensuite en l'**asymétrie matière-antimatière** observée.

Matière sombre

La matière visible décrite par le MS représente moins de 5 % de l'univers. Le reste est invisible.

- La **matière sombre** (~27 % de l'univers) ne se révèle qu'à travers la gravité : les galaxies tournent plus vite que ne le permet la matière visible, les amas de galaxies dévient la lumière plus qu'ils ne devraient, et le fond cosmique de micro-ondes nécessite une masse invisible supplémentaire.
- Aucune des particules du MS ne peut l'expliquer. Les neutrinos sont trop légers et rapides. La matière ordinaire est trop rare.

Les théories proposent de nouvelles particules : les WIMPs (particules massives à interaction faible), les axions, les neutrinos stériles ou quelque chose de plus étrange. Mais malgré des décennies de recherches – détecteurs souterrains, expériences de collisionneurs, études astrophysiques – la matière sombre reste insaisissable.

Énergie sombre

Encore plus mystérieuse est l'**énergie sombre**, la force qui entraîne l'expansion accélérée de l'univers.

- Découverte en 1998 grâce à des observations de supernovae, l'énergie sombre représente ~68 % de l'univers.
- En principe, elle pourrait être expliquée comme l'"énergie du vide" des champs quantiques. Mais les calculs naïfs de la QFT prédisent une densité d'énergie du vide 120 ordres de grandeur trop élevée – la pire prédiction en physique.

Ce **problème de la constante cosmologique** est probablement le conflit le plus aigu entre la théorie des champs quantiques et la gravité. Le Modèle Standard n'a rien à dire sur l'énergie sombre. C'est un vide béant dans notre compréhension du cosmos.

Le problème de la hiérarchie

Un autre mystère profond réside dans le boson de Higgs lui-même.

La masse du Higgs est mesurée à 125 GeV. Mais les corrections quantiques devraient la pousser vers l'échelle de Planck (10^{19} GeV), sauf en cas d'annulations miraculeuses. Pourquoi est-elle si légère par rapport aux échelles d'énergie naturelles de la gravité ?

C'est le **problème de la hiérarchie** : le Higgs semble anormalement finement ajusté. Les physiciens soupçonnent une nouvelle physique, comme la **supersymétrie (SUSY)**, qui pourrait stabiliser la masse du Higgs en introduisant des particules partenaires qui annulent les corrections dangereuses. (Les débats sur la **naturalité** incluent des idées allant

des solutions dynamiques aux raisonnements **anthropiques** dans un possible “paysage” de vides.)

L'asymétrie matière-antimatière

Le MS inclut une certaine violation de CP, mais loin d'être suffisante pour expliquer pourquoi l'univers actuel est rempli de matière plutôt que de quantités égales de matière et d'antimatière. Comme mentionné ci-dessus, des mécanismes comme la **leptogenèse** (souvent liés à l'origine des masses des neutrinos de type balancier) offrent une voie convaincante où la physique au-delà du MS fait pencher la balance.

Une image belle mais incomplète

Le Modèle Standard est parfois appelé “la théorie la plus réussie en physique”. Ses prédictions correspondent aux expériences jusqu'à 10-12 décimales. Il explique presque tout ce que nous voyons dans les accélérateurs de particules et les laboratoires.

Mais il est incomplet :

- Il ignore la gravité.
- Il ne peut pas expliquer les masses des neutrinos.
- Il ne peut pas rendre compte de la matière sombre ni de l'énergie sombre.
- Il laisse des énigmes profondes comme le problème de la hiérarchie et l'asymétrie matière-antimatière sans réponse.

Les physiciens font maintenant face à un moment familier dans l'histoire. Tout comme la mécanique de Newton a cédé la place à la relativité, et la physique classique à la mécanique quantique, le Modèle Standard doit finalement céder la place à quelque chose de plus profond.

Le Saint Graal : Une théorie unifiée

L'objectif ultime est une **Grande Théorie Unifiée (GUT)** ou même une **Théorie de Tout (ToE)** : un cadre qui unifie les quatre forces, explique toutes les particules et fonctionne de manière cohérente des échelles les plus petites (gravité quantique) aux plus grandes (cosmologie).

C'est le Saint Graal de la physique moderne. C'est pourquoi les chercheurs poussent les collisionneurs à des énergies plus élevées, construisent des détecteurs de neutrinos massifs, cartographient le cosmos avec des télescopes et inventent de nouvelles mathématiques audacieuses.

Les chapitres suivants exploreront les principaux candidats :

- **Supersymétrie (SUSY)** – une symétrie entre les particules de matière et de force.
- **Théorie des cordes et théorie M** – où les particules sont des cordes vibrantes, et le graviton émerge naturellement.

- **Dimensions supplémentaires** – de l'idée précoce de Kaluza–Klein aux modèles modernes Randall–Sundrum.
- **Autres approches** – comme la gravité quantique à boucles et la sécurité asymptotique.

Chacune de ces idées n'est pas née comme un dogme, mais comme la science à son meilleur : remarquer des fissures, construire de nouvelles théories et les tester contre la réalité.

Supersymétrie : La prochaine grande symétrie ?

La physique a une longue histoire d'unification par la symétrie. Les équations de Maxwell ont unifié l'électricité et le magnétisme. La relativité restreinte a unifié l'espace et le temps. La théorie électrofaible a unifié deux des quatre forces fondamentales. Chaque avancée est venue de la révélation d'une symétrie cachée dans la nature.

La supersymétrie – ou SUSY, comme l'appellent affectueusement les physiciens – est la proposition audacieuse que la prochaine grande symétrie relie deux catégories de particules apparemment distinctes : la **matière** et les **forces**.

Fermions et bosons : Matière contre force

Dans le Modèle Standard, les particules se divisent en deux grandes familles :

- **Fermions (spin 1/2)** : Ils incluent les quarks et les leptons, les briques de la matière. Leur spin demi-entier signifie qu'ils obéissent au principe d'exclusion de Pauli : deux fermions identiques ne peuvent pas occuper le même état. Cela explique pourquoi les atomes ont des coquilles structurées et pourquoi la matière est stable.
- **Bosons (spin entier)** : Ils incluent les photons, les gluons, les bosons W et Z, et le Higgs. Les bosons médient les forces. Contrairement aux fermions, ils peuvent s'accumuler dans le même état, ce qui explique l'existence des lasers (photons) et des condensats de Bose–Einstein.

En bref : les fermions forment la matière, les bosons transportent les forces.

L'hypothèse de la supersymétrie

La supersymétrie propose une symétrie qui relie les fermions et les bosons. Pour chaque fermion connu, il existe un partenaire bosonique. Pour chaque boson connu, un partenaire fermionique.

- Quarks → **squarks**
- Leptons → **sleptons**
- Gluons → **gluinos**
- Secteur gauge/Higgs → **neutralinos** (mélanges de bino, wino, higgsinos ; neutres) et **charginos** (mélanges de wino, higgsinos ; chargés)

("Photino" et "zino" sont des surnoms plus anciens pour les états propres de gauge ; les expériences recherchent en réalité les **états propres de masse** mentionnés ci-dessus.)

Pourquoi proposer une telle duplication radicale du monde des particules ? Parce que SUSY promet des solutions élégantes à certains des problèmes les plus profonds laissés par le Modèle Standard.

Résolution du problème de la hiérarchie

L'un des plus grands attraits de SUSY est sa capacité à résoudre le **problème de la hiérarchie** : pourquoi le boson de Higgs est-il si léger par rapport à l'échelle de Planck.

Dans le Modèle Standard, les corrections quantiques des particules virtuelles devraient pousser la masse du Higgs vers des valeurs énormes. La supersymétrie introduit des sparticules dont les contributions annulent ces divergences. Résultat : la masse du Higgs est naturellement stabilisée, sans ajustement fin (du moins dans les spectres SUSY "naturels").

SUSY et la grande unification

Une autre motivation pour SUSY vient de l'unification des forces.

- En calculant les constantes de couplage des forces forte, faible et électromagnétique à des énergies plus élevées, on observe que, dans le Modèle Standard, elles se rencontrent presque, mais pas tout à fait, en un seul point.
- Avec SUSY, grâce aux contributions des sparticules, les couplages convergent magnifiquement autour de 10^{16} GeV.

Cela suggère qu'à des énergies extrêmement élevées, les trois forces pourraient se fondre en une seule **Grande Théorie Unifiée (GUT)**.

SUSY comme candidat à la matière sombre

La supersymétrie fournit également un candidat naturel pour la **matière sombre**.

Si SUSY est correcte, l'une des sparticules devrait être stable et électriquement neutre. Un candidat principal est le **neutralino le plus léger**, un mélange de bino, wino et higgsinos.

Les neutralinos n'interagiraient que faiblement, correspondant au profil des WIMPs (particules massives à interaction faible). S'ils étaient découverts, ils pourraient expliquer les 27 % manquants de la matière de l'univers.

Recherches expérimentales de SUSY

Pendant des décennies, les physiciens espéraient que les particules supersymétriques apparaîtraient juste au-dessus des échelles d'énergie déjà explorées.

- **LEP (CERN, années 1990)** : Pas de particules SUSY jusqu'à ~100 GeV.
- **Tevatron (Fermilab, années 1990–2000)** : Pas de sparticules.

- **LHC (CERN, années 2010–2020) :** Collisions proton-proton jusqu'à **13,6 TeV** (design : **14 TeV**). Malgré des recherches massives, aucune preuve de squarks, gluinos ou neutralinos jusqu'à des échelles de plusieurs TeV.

L'absence de découvertes SUSY au LHC a été décevante. De nombreuses versions les plus simples de SUSY, comme le "Modèle Standard supersymétrique minimal" (MSSM), sont maintenant fortement contraintes. Les spectres "naturels" sont repoussés vers des masses plus élevées, ce qui implique plus d'ajustements fins si SUSY existe près de l'échelle des TeV.

Pourtant, SUSY n'a pas été exclue. Des modèles plus complexes prédisent des particules plus lourdes ou plus subtiles, peut-être hors de portée du LHC, ou avec des interactions trop faibles pour être facilement détectées.

La beauté mathématique de SUSY

Au-delà de ses motivations phénoménologiques, SUSY possède une profonde élégance mathématique.

- C'est la seule extension possible des symétries de l'espace-temps compatible avec la relativité et la mécanique quantique.
- Les théories supersymétriques sont souvent plus calculables : elles domptent les infinis et révèlent des structures cachées dans la QFT.
- Dans la théorie des cordes, SUSY est essentielle pour la cohérence : sans elle, la théorie contient des tachyons et d'autres pathologies.

Même si la nature ne réalise pas SUSY à des énergies accessibles, ses mathématiques ont déjà enrichi la physique.

L'état de la supersymétrie

Aujourd'hui, SUSY occupe une position étrange.

- Elle reste l'un des cadres les plus convaincants pour la physique au-delà du Modèle Standard.
- Elle résout le problème de la hiérarchie, soutient l'unification et offre un candidat à la matière sombre.
- Pourtant, aucune preuve expérimentale n'a encore été trouvée.

Si le LHC et ses successeurs ne trouvent rien, SUSY pourrait ne se réaliser qu'à des échelles d'énergie bien au-delà de notre portée – ou peut-être la nature a-t-elle choisi un chemin totalement différent.

Une méthode, pas un dogme

La supersymétrie illustre la méthode scientifique en action.

Les physiciens ont identifié des problèmes : la question de la hiérarchie, l'unification, la matière sombre. Ils ont proposé une nouvelle symétrie audacieuse qui les résout tous. Ils

ont conçu des expériences pour la tester. Jusqu'à présent, les résultats sont négatifs – mais cela ne signifie pas que l'idée était vaine. SUSY a affiné nos outils, clarifié ce que nous cherchons et guidé des générations entières de recherche.

Comme l'éther ou les épicycles avant elle, SUSY pourrait s'avérer être un tremplin vers une vérité plus profonde, qu'elle survive comme le dernier mot ou non.

Théorie des cordes et théorie M

La physique au-delà du Modèle Standard est souvent motivée par des correctifs : résoudre le problème de la hiérarchie, expliquer la matière sombre, unifier les couplages gauge. La théorie des cordes est différente. Elle ne commence pas par un puzzle particulier. Au lieu de cela, elle commence par des mathématiques – et finit par reformuler toute notre conception de l'espace, du temps et de la matière.

Origines : Une théorie née d'un échec

La théorie des cordes a commencé, étonnamment, non pas comme une théorie de tout, mais comme une tentative ratée de comprendre la force nucléaire forte.

À la fin des années 1960, avant que la QCD ne soit pleinement développée, les physiciens tentaient d'expliquer le zoo des hadrons. Ils ont remarqué des motifs dans les données de diffusion qui suggéraient que les résonances pouvaient être modélisées par des cordes vibrantes.

Le "modèle de résonance duale," introduit par Veneziano en 1968, décrivait les interactions fortes comme si les hadrons étaient des excitations de minuscules cordes. C'était élégant mais rapidement abandonné une fois que la QCD s'est imposée comme la véritable théorie de la force forte.

Pourtant, la théorie des cordes a refusé de mourir. Cachées dans ses équations se trouvaient des caractéristiques remarquables qui semblaient pointer bien au-delà de la physique nucléaire.

La découverte surprenante : Le graviton

Lorsque les théoriciens ont quantifié les vibrations des cordes, ils ont découvert que le spectre incluait inévitablement une **particule sans masse de spin 2**.

C'était choquant. La théorie des champs quantiques avait montré qu'une particule sans masse de spin 2 est unique : elle doit être le quantum de la gravité, le **graviton**.

Comme l'a noté plus tard John Schwarz : *"Mais un fait surprenant est apparu : les mathématiques de la théorie des cordes contenaient inévitablement une particule sans masse de spin 2 – un graviton."*

Ce qui avait commencé comme une théorie des hadrons avait accidentellement produit la brique de construction de la gravité quantique.

L'idée centrale : Des cordes, pas des points

Au cœur de la théorie des cordes, les particules ponctuelles sont remplacées par de minuscules objets unidimensionnels : des cordes.

- Les cordes peuvent être **ouvertes** (avec deux extrémités) ou **fermées** (des boucles).
- Différents modes de vibration de la corde correspondent à différentes particules.
 - Une vibration particulière peut apparaître comme un photon.
 - Une autre comme un gluon.
 - Une autre comme un quark.
 - Et un mode, inévitablement, comme le graviton.

Ce simple changement – des points aux cordes – résout de nombreux infinis qui affligent la gravité quantique. La taille finie de la corde brouille les interactions qui exploseraient autrement à distance zéro.

Supersymétrie et supercordes

Les premières versions de la théorie des cordes avaient des problèmes : elles contenaient des tachyons (instabilités) et nécessitaient des caractéristiques irréalistes. La percée est venue avec l'introduction de la **supersymétrie**, menant à la **théorie des supercordes** dans les années 1970 et 1980.

Les supercordes ont éliminé les tachyons, incorporé les fermions et apporté une nouvelle cohérence mathématique.

Mais il y avait un hic : la théorie des cordes ne fonctionne que dans des dimensions supérieures. Plus précisément, **10 dimensions de l'espace-temps**.

- Les quatre que nous voyons (trois spatiales, une temporelle).
- Six autres, compactées ou enroulées à des échelles minuscules, invisibles pour les expériences actuelles.

Cette idée, aussi radicale qu'elle puisse paraître, n'était pas entièrement nouvelle. Dans les années 1920, la **théorie de Kaluza-Klein** avait déjà suggéré que des dimensions supplémentaires pouvaient unifier la gravité et l'électromagnétisme. La théorie des cordes a ravivé et considérablement élargi cette idée.

Les cinq théories des cordes

Au milieu des années 1980, les physiciens ont découvert que la théorie des cordes n'était pas unique, mais se présentait en **cinq versions distinctes** :

1. **Type I** – Cordes ouvertes et fermées, incluant des cordes orientées et non orientées.
2. **Type IIA** – Cordes fermées, orientées, non chirales.
3. **Type IIB** – Cordes fermées, orientées, chirales.
4. **Hétérotique SO(32)** – Cordes fermées avec une construction hybride.

5. **Hétérotique** $E_8 \times E_8$ – Une version hautement symétrique, cruciale plus tard pour se connecter à la physique des particules réaliste.

Chacune semblait mathématiquement cohérente, mais pourquoi la nature en choisirait-elle une ?

La première révolution des supercordes

En 1984, Michael Green et John Schwarz ont montré que la théorie des cordes pouvait automatiquement annuler les anomalies quantiques – quelque chose que les théories des champs quantiques devaient soigneusement concevoir. Cette découverte a déclenché la **première révolution des supercordes**, avec des milliers de physiciens se tournant vers la théorie des cordes comme candidate à une théorie unifiée de toutes les forces.

C'était le premier cadre sérieux dans lequel la gravité quantique n'était pas seulement cohérente, mais inévitable.

La deuxième révolution des supercordes : Théorie M

Au milieu des années 1990, une deuxième révolution s'est déroulée. Edward Witten et d'autres ont découvert que les cinq théories des cordes différentes n'étaient pas des rivales, mais des limites différentes d'une seule théorie plus profonde : la **théorie M**.

On pense que la théorie M existe en **11 dimensions** et inclut non seulement des cordes, mais des objets de dimensions supérieures appelés **branes** (abréviation de membranes).

- Branes 1-dimensionnelles = cordes.
- Branes 2-dimensionnelles = membranes.
- Branes de dimensions supérieures jusqu'à 9 dimensions spatiales.

Ces branes ont donné naissance à de riches nouvelles possibilités : des univers entiers pourraient exister comme des 3-branes flottant dans un espace de dimension supérieure, avec la gravité qui s'infiltre dans le volume tandis que les autres forces restent confinées. Cette image a inspiré des modèles modernes de dimensions supplémentaires comme **Randall-Sundrum**.

Exemples marquants : Kaluza-Klein et Randall-Sundrum

- **Kaluza-Klein (années 1920)** : A proposé une cinquième dimension supplémentaire pour unifier la gravité et l'électromagnétisme. L'idée a été mise de côté pendant des décennies, mais la théorie des cordes l'a ravivée sous une forme plus grandiose. Les dimensions supplémentaires compactées restent une caractéristique centrale des modèles de cordes.
- **Randall-Sundrum (1999)** : A proposé des dimensions supplémentaires "déformées", où notre univers est une 3-brane intégrée dans des dimensions supérieures. La gravité se propage dans le volume, expliquant pourquoi elle est plus faible que les

autres forces. De tels modèles prédisent des signaux possibles dans les collisionneurs de particules ou des déviations de la loi de Newton à très courtes distances.

Indices expérimentaux et défis

La théorie des cordes fait des affirmations audacieuses, mais les tester est extrêmement difficile.

- **Dimensions supplémentaires** : Elles pourraient se révéler par des signaux d'énergie manquante ou des **excitations de Kaluza-Klein** – potentiellement pour des **gravitons ou même des champs du Modèle Standard**, selon la configuration. Les contraintes des collisionneurs atteignent généralement la plage des **multi-TeV**.
- **Gravitons** : Une particule sans masse de spin 2 est prédite, mais détecter un seul graviton est hors de portée de la technologie actuelle. Des effets indirects, comme des déviations dans les ondes gravitationnelles, sont possibles.
- **Supersymétrie** : La théorie des cordes exige SUSY à une certaine échelle, mais le LHC n'a pas encore trouvé de sparticules.
- **Cosmologie** : L'univers primordial, l'inflation et le fond cosmique de micro-ondes peuvent contenir des empreintes de la physique des cordes, bien que les résultats jusqu'à présent soient non concluants.

Malgré les défis, la théorie des cordes a fourni un terrain fertile pour les mathématiques, inspirant des progrès en géométrie, topologie et dualités comme AdS/CFT (qui relie la gravité dans des dimensions supérieures à la théorie des champs quantiques sans gravité).

La beauté et la controverse

Les défenseurs soutiennent que la théorie des cordes est la voie la plus prometteuse vers une théorie unifiée : elle inclut la gravité quantique, unifie toutes les forces et explique pourquoi un graviton doit exister.

Les critiques soutiennent que sans confirmation expérimentale, la théorie des cordes risque de se déconnecter de la science empirique. Son vaste "paysage" de solutions possibles (jusqu'à 10^{500}) rend difficile l'extraction de prédictions uniques.

Les deux côtés s'accordent sur une chose : la théorie des cordes a changé notre façon de penser la physique, offrant un nouveau langage pour l'unification.

Vers une théorie de tout

Si la supersymétrie est la prochaine étape au-delà du Modèle Standard, la théorie des cordes est l'étape suivante : une candidate à la **Théorie de Tout** tant recherchée.

Son affirmation la plus audacieuse n'est pas seulement qu'elle inclut le Modèle Standard et la gravité, mais que ceux-ci sont des conséquences inévitables de cordes vibrantes dans des dimensions supérieures. Le graviton n'est pas un ajout – il est intégré.

Reste à découvrir si la nature a choisi ce chemin.

Explorer les frontières : Expériences au-delà du Modèle Standard

Les théories sont la sève de la physique, mais les expériences sont son poulx. La supersymétrie, la théorie des cordes et les dimensions supplémentaires sont de belles constructions mathématiques, mais elles vivent ou meurent par les preuves. Si elles doivent être plus que des spéculations, elles doivent laisser des empreintes dans les données.

Les physiciens ont conçu des moyens ingénieux de chercher ces empreintes – dans les collisionneurs, dans le cosmos et dans la structure même de l'espace-temps.

Collisionneurs : Chasse aux sparticules et gravitons

Le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) au CERN est l'accélérateur de particules le plus puissant au monde, faisant entrer en collision des protons à des énergies allant jusqu'à **13,6 TeV** (design : **14 TeV**). Il a été l'outil principal de l'humanité pour explorer la physique au-delà du Modèle Standard.

Supersymétrie au LHC

- **Recherches de sparticules** : Les expériences ATLAS et CMS ont scruté les données à la recherche de squarks, gluinos et neutralinos/charginos. Ceux-ci apparaîtraient souvent comme des signatures d'"énergie manquante", car les particules SUSY échappent à la détection.
- **Résultats** : Aucune particule SUSY confirmée n'a été trouvée jusqu'à l'échelle de plusieurs TeV. Cela a exclu de nombreuses versions les plus simples de SUSY et repousse la SUSY "naturelle" vers des territoires plus lourds et plus finement ajustés.

Gravitons et dimensions supplémentaires

- **Modes de Kaluza-Klein** : Si des dimensions supplémentaires existent, des **gravitons ou même des champs du MS** pourraient apparaître comme des excitations massives de KK, détectables comme des résonances dans les canaux dilepton, diphoton ou dijet.
- **Signaux Randall-Sundrum** : Des dimensions supplémentaires déformées pourraient produire des résonances de gravitons avec des motifs angulaires caractéristiques de spin 2.
- **Résultats** : Les recherches du LHC n'ont trouvé aucune preuve jusqu'à présent, mais ont repoussé les limites à la plage des **multi-TeV**, restreignant la taille, la déformation et la géométrie des dimensions supplémentaires.

Micro-trous noirs

Certaines théories suggèrent que si la gravité devient forte à l'échelle des TeV, de minuscules trous noirs pourraient se former dans les collisions du LHC, s'évaporant en éclats de particules. Aucun événement de ce type n'a été observé.

Expériences de précision : Tester la gravité à petites échelles

Si des dimensions supplémentaires existent, la loi de la gravité de Newton pourrait se rompre à courtes distances.

- **Expériences de balance de torsion ("Eöt-Wash")** : Testent la loi de l'inverse du carré jusqu'à des échelles **submillimétriques** – actuellement **des dizaines de microns** ($\sim 50 \mu\text{m}$).
- **Résultats** : Aucune déviation n'a été trouvée. Ces expériences **excluent** une large classe de scénarios de dimensions supplémentaires avec des longueurs caractéristiques **supérieures à $\sim 10^{-4} \text{ m}$** (selon le modèle).

Ces expériences de table sont remarquablement sensibles, explorant des échelles inaccessibles aux collisionneurs.

Ondes gravitationnelles : Une nouvelle fenêtre sur la gravité quantique

La découverte des ondes gravitationnelles par LIGO en 2015 a ouvert une nouvelle frontière.

- **Polarisations supplémentaires / propagation modifiée** : Certains modèles de gravité quantique ou de dimensions supplémentaires prédisent des déviations de la RG (polarisations supplémentaires, dispersion ou atténuations modifiées).
- **Spectroscopie des atténuations** : Le "bourdonnement" des trous noirs après une fusion peut révéler des déviations subtiles de la RG.
- **Ondes gravitationnelles primordiales** : Les ondulations du Big Bang pourraient porter des empreintes de la physique des cordes, détectables par de futurs observatoires comme LISA ou le Télescope Einstein.

Jusqu'à présent, les observations sont cohérentes avec la RG dans les incertitudes actuelles, mais une précision accrue pourrait révéler des surprises.

Cosmologie : L'univers comme laboratoire

Le cosmos lui-même est l'accélérateur de particules ultime.

- **Fond cosmique de micro-ondes (CMB)** : De petites fluctuations cartographient l'univers primordial. Certains modèles de cordes prédisent des signatures spécifiques, comme des non-gaussianités ou des caractéristiques oscillatoires.
- **Inflation** : L'expansion rapide de l'univers peut avoir été entraînée par des champs liés à la théorie des cordes. Détecter des modes B primordiaux dans le CMB serait un indice puissant.
- **Recherches de matière sombre** : Les neutralinos de SUSY sont des candidats principaux pour la matière sombre. Des expériences comme XENONnT, LUX-ZEPLIN et PandaX recherchent des WIMPs via des reculs nucléaires.
- **Axions** : La théorie des cordes prédit également des particules semblables aux axions, qui pourraient être détectées via des cavités résonantes ou des observations astrophysiques.

Jusqu'à présent, le ciel est silencieux. La matière sombre reste non détectée, et les données cosmologiques correspondent au modèle Λ CDM sans empreintes claires de cordes.

État actuel : Contraintes, pas confirmations

Des décennies de recherches n'ont pas confirmé SUSY, les dimensions supplémentaires ou les signaux de cordes. Mais l'absence de preuve n'est pas la preuve de l'absence :

- SUSY peut exister à des échelles hors de portée du LHC ou dans des spectres moins visibles ; les résultats nuls jusqu'à présent **favorisent des versions plus finement ajustées ("moins naturelles")** si SUSY est proche de l'échelle des TeV.
- Les dimensions supplémentaires peuvent être plus petites, plus déformées ou autrement cachées aux sondes actuelles.
- La théorie des cordes peut ne laisser des empreintes détectables que dans l'univers très primordial, accessibles uniquement par la cosmologie.

Quelques **anomalies de précision** (par exemple, la mesure du **(g-2)** du muon et certaines tensions dans la **physique des saveurs**) restent **intrigantes mais non résolues** ; elles motivent un examen continu sans encore renverser le MS.

Ce que les expériences ont fait, c'est **réduire l'espace des paramètres**. Elles nous ont dit où SUSY n'est pas, à quel point les dimensions supplémentaires doivent être petites, et à quel point la matière sombre peut ou ne peut pas interagir.

La voie à suivre

Les futures expériences promettent d'explorer plus profondément :

- **LHC à haute luminosité (HL-LHC)** : Collectera $\sim 10\times$ plus de données, explorant SUSY jusqu'à des masses plus élevées et des processus rares.
- **Collisionneur Circulaire Futur (FCC-hh)** : Proposition d'un collisionneur de 100 TeV, suffisamment puissant pour explorer des échelles d'énergie où la physique GUT pourrait apparaître.
- **LISA (années 2030)** : Observatoire d'ondes gravitationnelles basé dans l'espace, sensible aux signaux primordiaux de l'univers primordial.
- **Détecteurs de matière sombre de nouvelle génération** : Avec une sensibilité aux signaux faibles, ils pourraient enfin capturer un WIMP ou un axion.

La science comme un voyage

L'histoire expérimentale de la physique au-delà du Modèle Standard n'est pas celle d'un échec, mais d'un processus.

- Les résultats nuls excluent les modèles simples et affinent nos théories.
- Chaque contrainte nous guide vers des cadres plus raffinés et plus prédictifs.
- L'absence de SUSY ou de dimensions supplémentaires à l'échelle des TeV ne tue pas les idées – elle les pousse vers un nouveau territoire.

Tout comme l'expérience de la feuille d'or de Rutherford a brisé le modèle du pudding aux prunes, ou LIGO a dissipé les doutes sur les ondes gravitationnelles, la prochaine grande découverte pourrait arriver soudainement – et tout changer.

Vers une théorie de tout

Pendant des siècles, la physique a progressé par l'unification. Newton a unifié les cieux et la Terre sous une loi de gravitation. Maxwell a unifié l'électricité et le magnétisme. Einstein a unifié l'espace et le temps. La théorie électrofaible a montré que deux forces très différentes sont des aspects d'une seule.

L'étape suivante est la plus audacieuse à ce jour : unifier **les quatre interactions fondamentales** – forte, faible, électromagnétique et gravitationnelle – dans un cadre unique et cohérent. C'est le Saint Graal de la physique : la **Théorie de Tout (ToE)**.

Pourquoi une ToE est importante

Une unification complète n'est pas seulement une élégance philosophique ; elle répond à des problèmes pratiques et conceptuels profonds :

- **Gravité quantique** : La relativité générale s'effondre à l'échelle de Planck (10^{19} GeV). Seule une théorie quantique de la gravité peut expliquer les trous noirs et la singularité du Big Bang.
- **Naturalité et ajustement fin** : Le problème de la hiérarchie et le problème de la constante cosmologique réclament une explication plus profonde.
- **Paramètres du Modèle Standard** : Pourquoi les particules ont-elles les masses et les charges qu'elles ont ? Pourquoi trois générations de quarks et de leptons ? Une ToE pourrait expliquer ces mystères.
- **Cosmologie** : La matière sombre, l'énergie sombre et l'inflation peuvent toutes être liées à la physique à l'échelle de l'unification.

Une ToE ne ferait pas qu'unifier les forces – elle unifierait les échelles, des cordes les plus petites de la théorie quantique aux structures cosmiques les plus grandes.

Supersymétrie et grande unification

La supersymétrie (SUSY), si elle est réalisée dans la nature, fournit un tremplin vers une ToE.

- **Problème de la hiérarchie résolu** : Les sparticules annulent les corrections divergentes à la masse du Higgs.
- **Couplages gauge unifiés** : Avec SUSY, les forces des trois forces convergent magnifiquement à 10^{16} GeV, suggérant une **Grande Théorie Unifiée (GUT)**.
- **Candidat à la matière sombre** : Le neutralino fournit une explication naturelle à la matière sombre cosmique.

Les GUT inspirées par SUSY (comme SU(5), SO(10) ou E_6) imaginent qu'à des énergies ultra-élevées, les quarks et les leptons sont unifiés en multiplets plus grands, et les forces fu-

sionnent en un seul groupe gauge.

Mais SUSY n'est pas encore apparue dans les expériences. Si elle n'existe qu'à des échelles hors de notre portée, son pouvoir unificateur pourrait rester tentant mais caché.

Théorie des cordes : Gravité quantique et graviton

La théorie des cordes va plus loin. Au lieu de patcher le Modèle Standard, elle réécrit les fondations :

- **Cordes, pas des points** : Toutes les particules sont des vibrations de minuscules cordes.
- **Le graviton émerge naturellement** : L'excitation sans masse de spin 2 est inévitable, ce qui signifie que la gravité quantique est intégrée.
- **Unification** : Différents modes de vibration produisent toutes les particules connues – quarks, leptons, bosons gauge, Higgs – dans un seul cadre.
- **Dimensions supplémentaires** : La théorie des cordes exige 10 dimensions de l'espace-temps ; la théorie M en exige 11, avec des dimensions cachées compactées ou déformées.

Dans cette vision, l'unification n'est pas un hasard – c'est de la géométrie. Les forces diffèrent parce que les cordes vibrent de différentes manières, façonnées par la topologie des dimensions supplémentaires.

Théorie M et mondes de branes

La découverte que les cinq théories des cordes sont connectées par des dualités a conduit à la théorie M, un cadre encore plus grandiose :

- Inclut des cordes, des membranes et des branes de dimensions supérieures.
- Suggère que notre univers pourrait être une 3-brane intégrée dans un volume de dimension supérieure.
- Offre des explications naturelles pour pourquoi la gravité est plus faible (elle se répand dans les dimensions supplémentaires) et comment plusieurs univers pourraient exister dans un "multivers".

La théorie M est encore incomplète, mais elle représente l'étape la plus ambitieuse jamais entreprise vers une ToE.

Autres chemins vers la gravité quantique

La théorie des cordes et la théorie M ne sont pas les seuls chemins. Les physiciens explorent plusieurs cadres, chacun avec des forces différentes :

- **Gravité quantique à boucles (LQG)** : Tente de quantifier directement l'espace-temps, prédisant que l'espace est discret à l'échelle de Planck.
- **Sécurité asymptotique** : Suggère que la gravité peut être bien comportée à hautes énergies grâce à un point fixe non trivial.

- **Triangulations dynamiques causales (CDT)** : Construit l'espace-temps à partir de blocs de construction géométriques simples.
- **Théorie des twistors et amplituèdres** : Nouveaux cadres mathématiques qui réimaginent l'espace-temps et les amplitudes de diffusion.

Bien qu'aucun ne rivalise encore avec l'ampleur unificatrice de la théorie des cordes, ils illustrent la richesse de la quête.

Le rôle de l'expérience

Une ToE doit finalement être testable. Bien que l'échelle de Planck soit bien au-delà des expériences actuelles, les physiciens recherchent des preuves indirectes :

- **Collisionneurs** : Particules SUSY, dimensions supplémentaires ou micro-trous noirs.
- **Tests de précision** : Déviations de la loi de Newton à courtes échelles.
- **Ondes gravitationnelles** : Polarisation exotiques ou échos de dimensions supérieures.
- **Cosmologie** : Empreintes de l'inflation, candidats à la matière sombre ou axions prédits par la théorie des cordes.

Jusqu'à présent, la ToE reste hors de portée, mais chaque résultat nul émonde les possibilités.

La beauté et le défi

Une véritable ToE ne ferait pas qu'unifier la physique – elle unifierait la **connaissance humaine**. Elle relierait la mécanique quantique et la relativité, le micro et le macro, la particule et le cosmos.

Pourtant, elle fait face à un paradoxe : l'échelle même à laquelle l'unification se produit pourrait être à jamais hors de portée expérimentale. Un collisionneur de 100 TeV n'explore qu'une fraction du chemin vers l'échelle de Planck. Nous devons peut-être nous fier à la cosmologie, à la cohérence mathématique ou à des signatures indirectes.

Le rêve reste vivant grâce à l'élégance profonde des cadres. Comme l'a noté Witten, la théorie des cordes n'est pas seulement "un ensemble d'équations" mais "un nouveau cadre pour la physique".

La science comme méthode, pas dogme

La quête d'une ToE ne consiste pas à déclarer la théorie des cordes, SUSY ou toute idée singulière comme "vraie". Il s'agit de la **méthode scientifique** :

- Identifier les fissures dans les théories existantes.
- Proposer de nouveaux cadres audacieux.
- Les tester contre la réalité, les rejeter ou les affiner selon les besoins.

L'histoire est loin d'être terminée. Mais c'est précisément cette ouverture – le refus de considérer une théorie comme sacrée – qui fait de la physique une science vivante, pas un

dogme.

L'horizon devant nous

Le prochain siècle de physique pourrait révéler :

- Des preuves de la supersymétrie ou de ses alternatives.
- Des données cosmologiques confirmant ou infirmant les prédictions des cordes.
- Une reformulation plus profonde de l'espace-temps lui-même.

Ou peut-être la véritable ToE est-elle quelque chose que personne n'a encore imaginé.

Mais la quête elle-même – le désir d'unifier, d'expliquer, de voir la nature dans son ensemble – est autant une partie de l'humanité que les équations elles-mêmes.

Références et lectures complémentaires

Supersymétrie et grande unification

- Wess, J., & Bagger, J. (1992). *Supersymmetry and Supergravity*. Princeton University Press.
- Baer, H., & Tata, X. (2006). *Weak Scale Supersymmetry: From Superfields to Scattering Events*. Cambridge University Press.
- Georgi, H., & Glashow, S. L. (1974). "Unity of All Elementary-Particle Forces." *Physical Review Letters*, 32(8), 438.

Théorie des cordes et théorie M

- Green, M. B., Schwarz, J. H., & Witten, E. (1987). *Superstring Theory* (Vol. 1 & 2). Cambridge University Press.
- Polchinski, J. (1998). *String Theory* (Vol. 1 & 2). Cambridge University Press.
- Witten, E. (1995). "String Theory Dynamics in Various Dimensions." *Nuclear Physics B*, 443(1), 85–126.
- Becker, K., Becker, M., & Schwarz, J. H. (2006). *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge University Press.

Gravité quantique à boucles et alternatives

- Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.
- Thiemann, T. (2007). *Modern Canonical Quantum General Relativity*. Cambridge University Press.
- Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. (2005). "Reconstructing the Universe." *Physical Review D*, 72(6), 064014.

Frontières expérimentales

- Aad, G., et al. (ATLAS Collaboration). (2012). "Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson." *Physics Letters B*, 716(1), 1–29.

- Chatrchyan, S., et al. (CMS Collaboration). (2012). "Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV." *Physics Letters B*, 716(1), 30–61.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger." *Physical Review Letters*, 116(6), 061102.

Récits populaires accessibles

- Greene, B. (1999). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. W. W. Norton.
- Randall, L. (2005). *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*. Harper Perennial.
- Rovelli, C. (2016). *Seven Brief Lessons on Physics*. Riverhead Books.
- Wilczek, F. (2008). *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*. Basic Books.