

Présentation M2 Physique Théorique, 4/12/18

Supercordes, etc

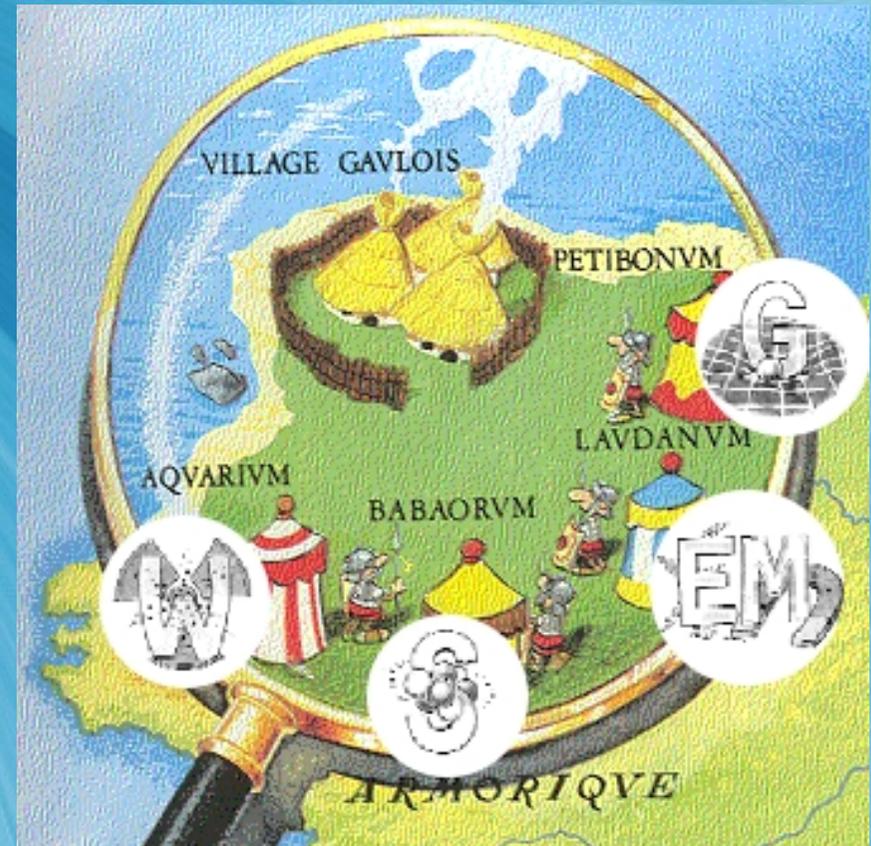
Boris Pioline, LPTHE

pioline[at]lpthe[dot]jussieu[dot]fr



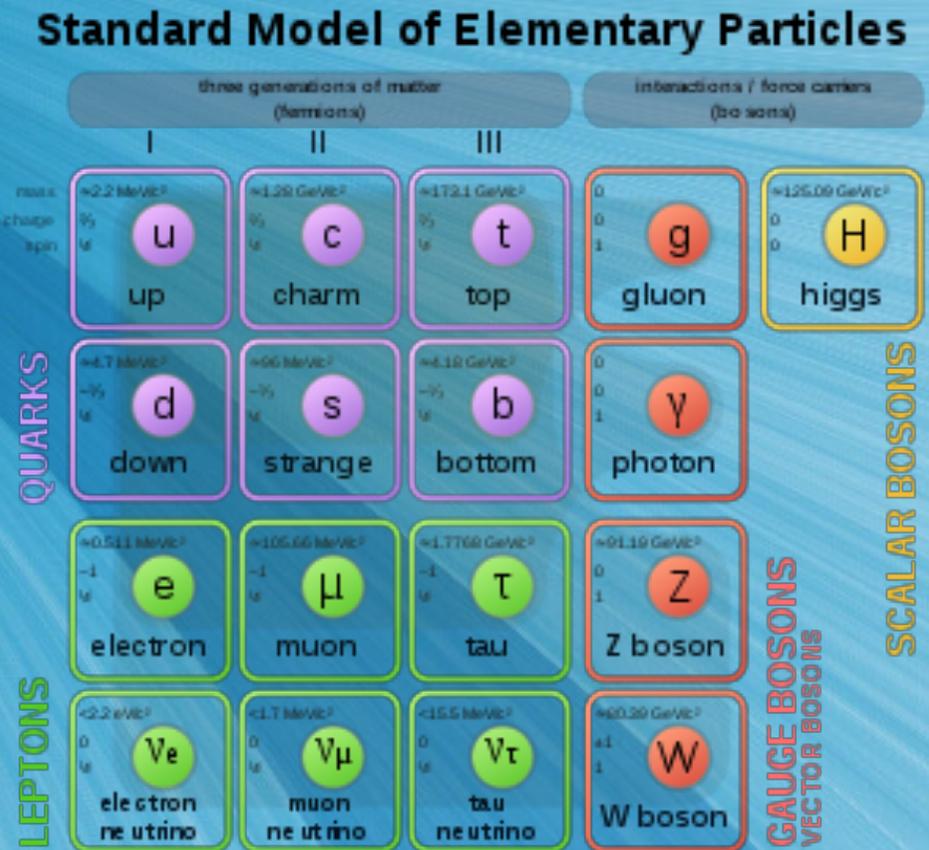
Vers l'unification des forces

- ◆ 2018 après JC: toutes les forces sont unifiées au sein du Modèle Standard des Interactions Fondamentales.
- ◆ Toutes ? Non ! La gravitation résiste encore et toujours à la quantification.
- ◆ Et la vie n'est pas facile (mais combien passionnante !) pour les garnisons de physiciens théoriciens de Gaule et d'ailleurs...



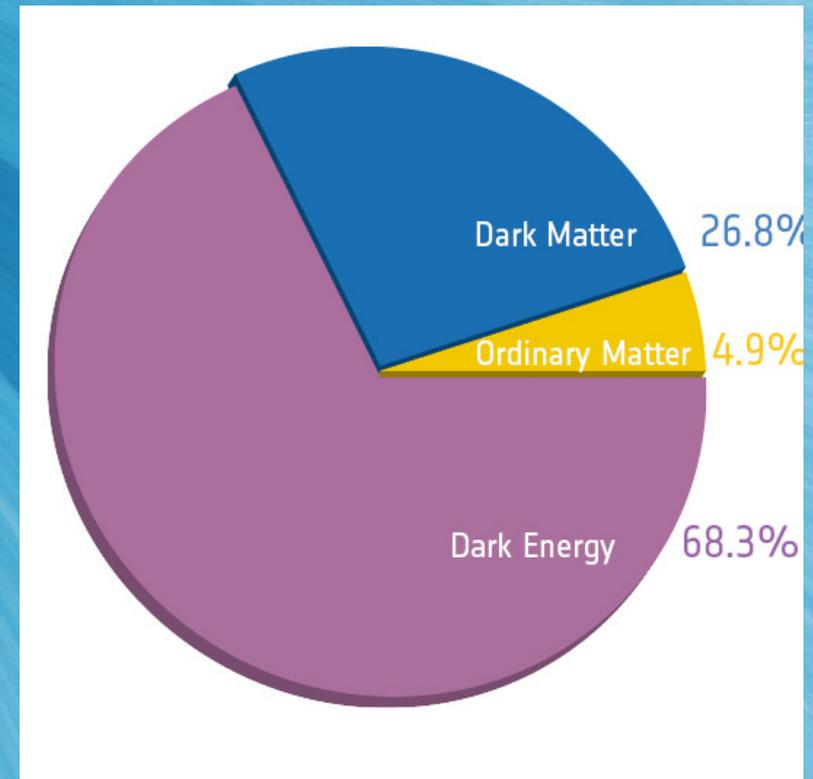
Au delà du Modèle Standard

- ◆ Le Modèle Standard de Glashow-Salam-Weinberg a été amplement confirmé par les expériences de physique des particules des années 80-90, et par la découverte du boson de Higgs en 2012
- ◆ Ce modèle est formulé dans le cadre de la théorie quantique des champs renormalisable.



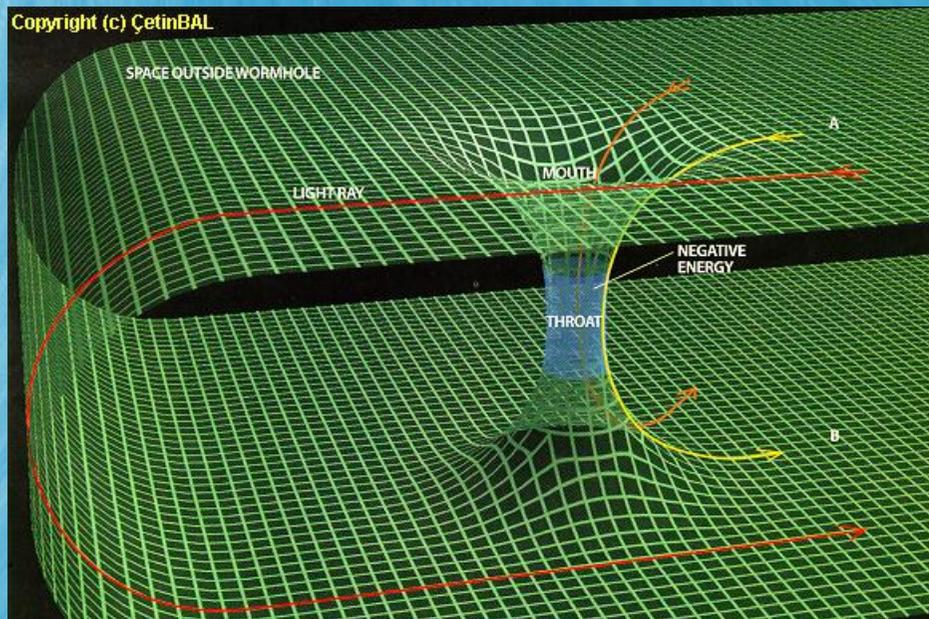
Au delà du Modèle Standard

- ◆ L'origine de l'énergie noire, de la matière noire et le problème de la hiérarchie, requièrent une physique au-delà du Modèle Standard: supersymétrie, dimensions supplémentaires, etc.
- ◆ Plus fondamentalement, la force de gravitation n'est pas incluse dans le Modèle Standard, car elle échappe au cadre de la TdC renormalisable



Gravité classique

- ◆ Classiquement, la gravité est décrite par la théorie de la Relativité Générale d'Einstein, i.e. par l'action d'Einstein-Hilbert.
- ◆ Le champ de gravité n'est autre que le tenseur métrique de l'espace-temps



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

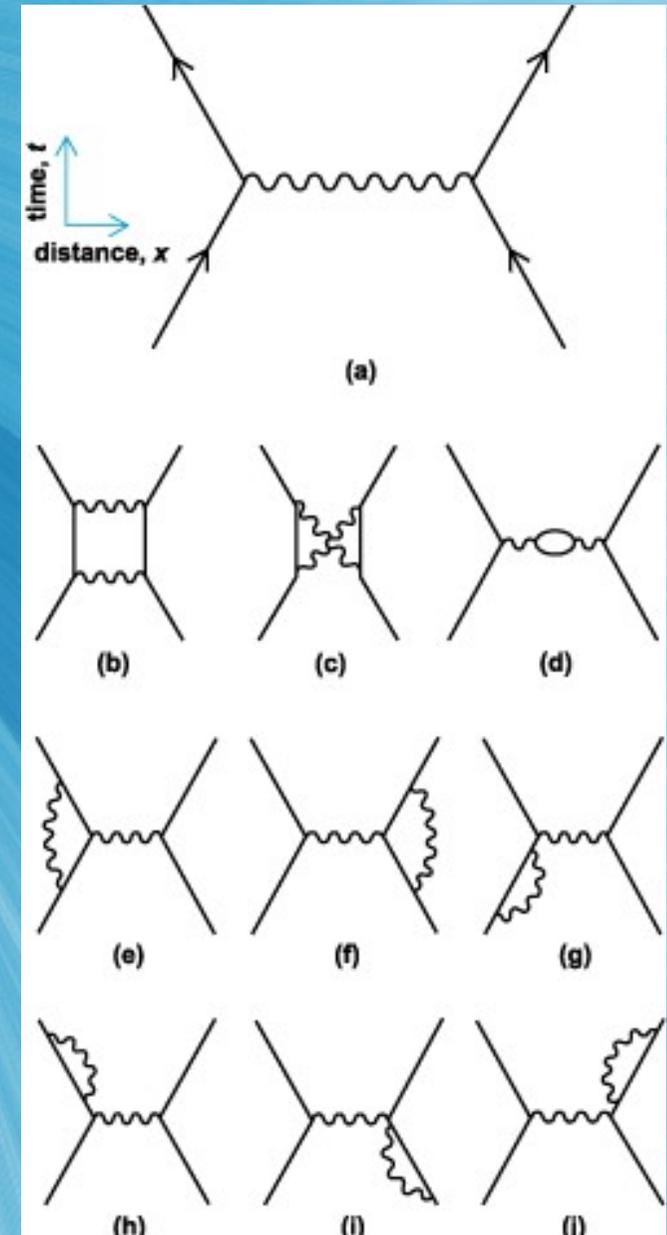
$$S = \frac{1}{G} \int d^4x \sqrt{-g} R$$

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Gravité Quantique Perturbative

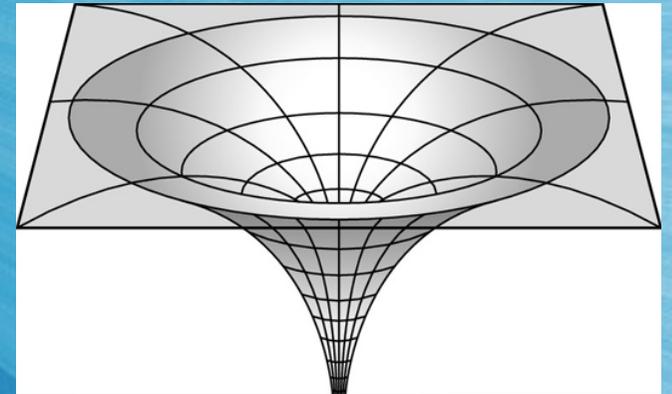
- ◆ En développant au voisinage de l'espace plat, on peut construire une théorie quantique des champs perturbative pour le graviton, mais celle-ci est non-renormalisable, et doit être corrigée par un nombre infinis de contretermes absorbant les divergences ultraviolettes.
- ◆ Ce n'est pas un problème tant que l'énergie est très inférieure à l'échelle de Planck,

$$m_P = \sqrt{\frac{c^3}{\hbar G}} \sim 10^{19} \text{GeV} \sim (10^{-35} \text{m})^{-1}$$



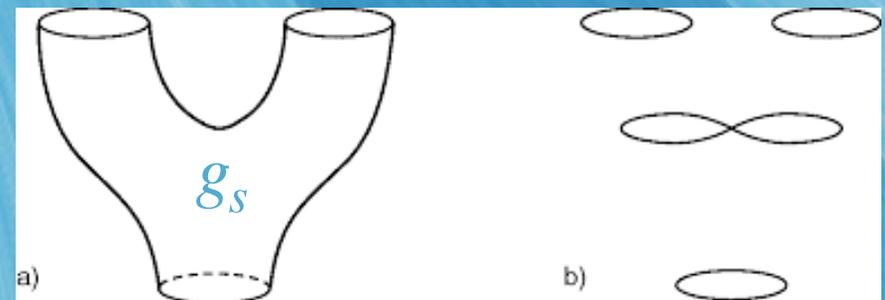
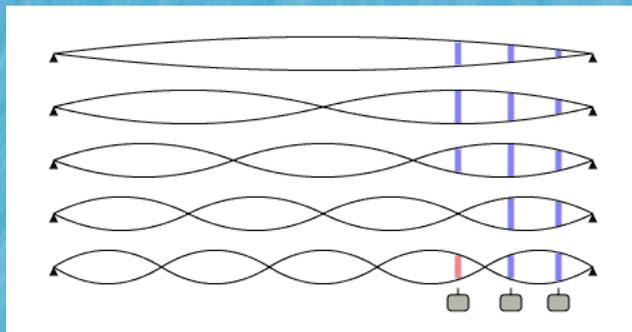
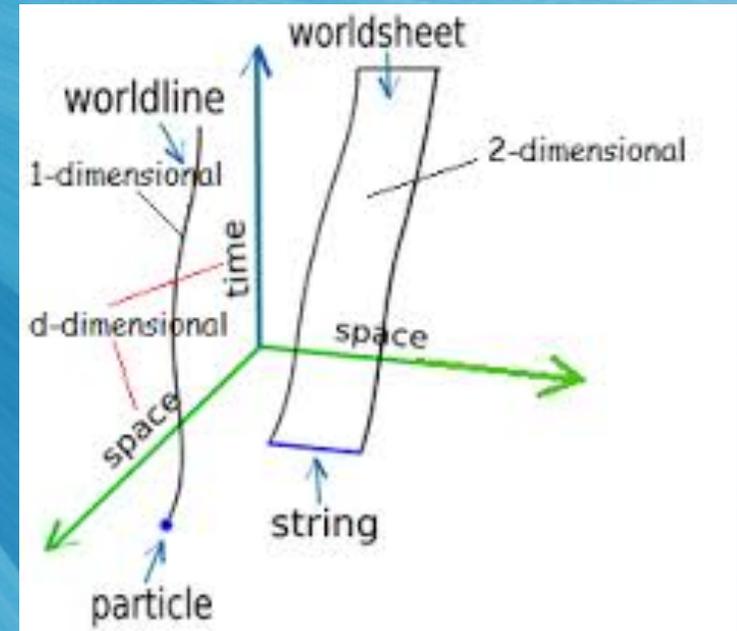
Gravité quantique

- ◆ Ces énergies sont hors de portée des collisionneurs, mais atteintes au voisinage du Big Bang ou au centre des trous noirs.
- ◆ Au niveau théorique, un traitement purement classique de la gravitation est incompatible avec le principe d'incertitude d'Heisenberg
- ◆ La construction d'une théorie quantique de la gravitation reste un défi majeur pour la physique théorique.



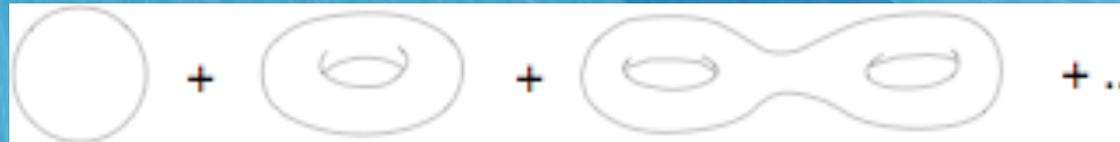
Théorie des supercordes

- ◆ Dans sa formulation la plus naïve, elle postule qu'à très haute énergie, la matière est constituée de lacets oscillants, ouverts ou fermés, de tension $m_s^2 \sim m_P^2$, interagissant par recombinaison, contrôlée par un seul couplage g_s
- ◆ Les particules élémentaires sont identifiées à différents états d'oscillation du lacet. Les états fondamentaux décrivent des particules de masse nulle, spin 0, 1/2, 1, 3/2 et 2 analogues aux particules du modèle standard.



Finitude ultraviolette

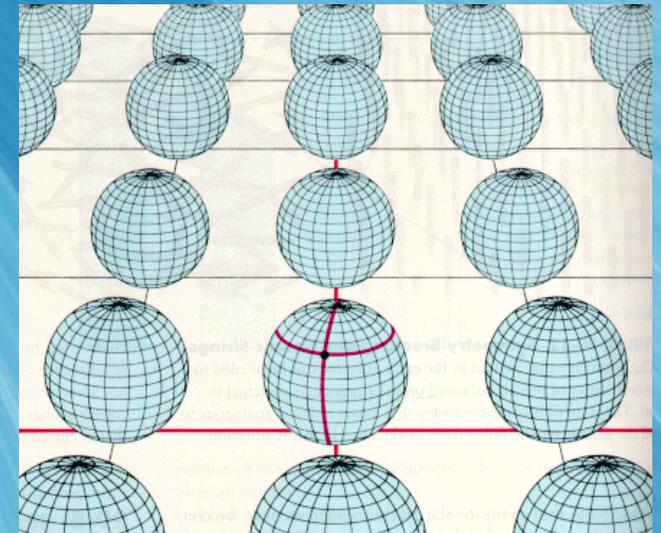
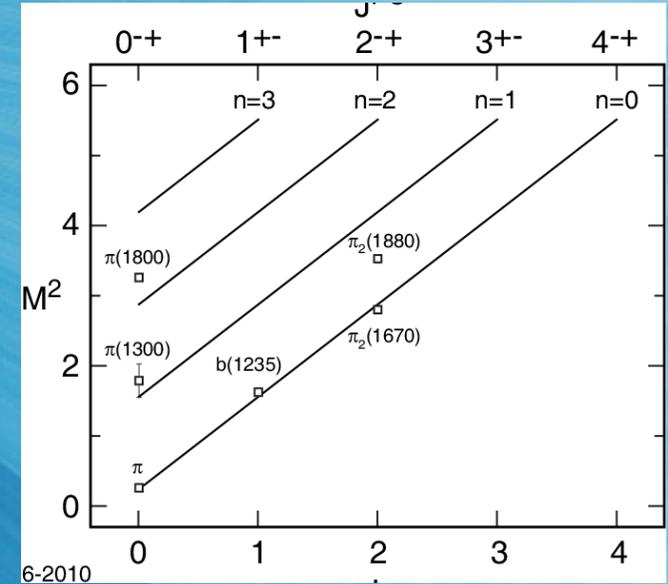
- ◆ Il existe plusieurs types de supercordes, type I, type IIA, type IIB, hétérotique, décrites par différentes actions effectives à basse énergie.
- ◆ Les amplitudes de diffusion en théorie des cordes sont données par une somme sur les surfaces de Riemann de genre arbitraire. Cela définit une série perturbative asymptotique en puissances du couplage.



- ◆ Par construction, les amplitudes de diffusion en théories des cordes sont manifestement finies dans l'ultraviolet, car les dégénération des surfaces de Riemann peuvent toutes s'interpréter comme des effets infrarouges.
- ◆ Les divergences infrarouges sont identiques à celles attendues dans une théorie des champs avec des particules de masse nulle.

Dimensions supplémentaires

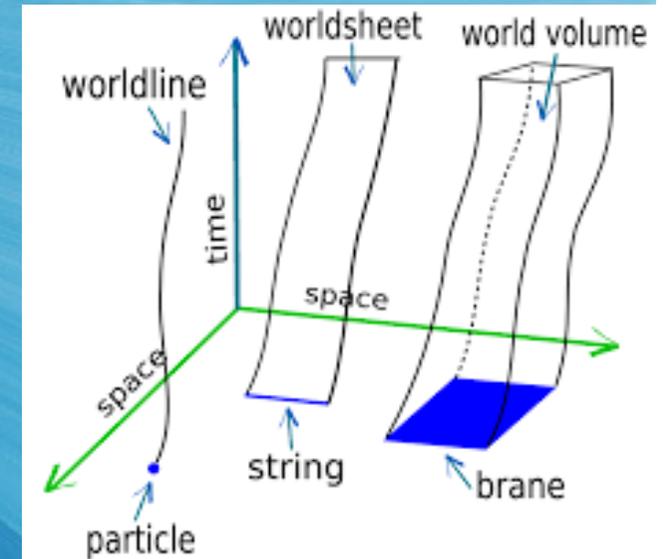
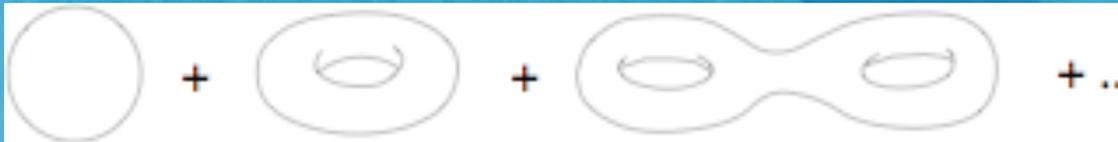
- ◆ Cette victoire a un prix: le spectre contient un nombre infini de particules de masse $O(m_P \sqrt{N})$, spin $J < N$.
- ◆ La dimension de l'espace-temps est fixée à 9+1 dimensions.
- ◆ On suppose que les 6 dimensions supplémentaires correspondent à un espace interne de taille $L \ll l_P$. Les particules de masse nulle en $D=10$ donnent lieu à des états de Kaluza-Klein de masse $m = O(1/L)$ en $D=4$.
- ◆ La géométrie de l'espace interne (tout comme le couplage g) est dynamique, dictée par la vev de champs scalaires dits champs de module.



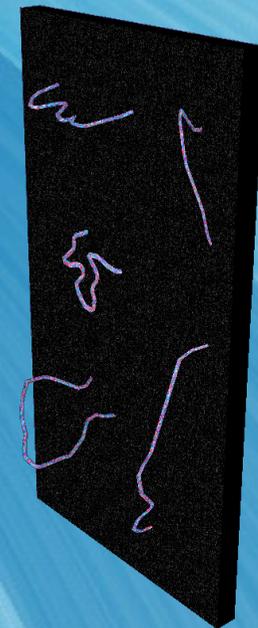
D-branes et dualités

- ◆ Comme en QFT, la série perturbative est une série asymptotique divergente,

$$A = \sum_{h \geq 1} A_h g_s^{2h-2}, \quad A_h \sim (2h)! \Rightarrow \delta A \sim O(e^{-1/g_s})$$

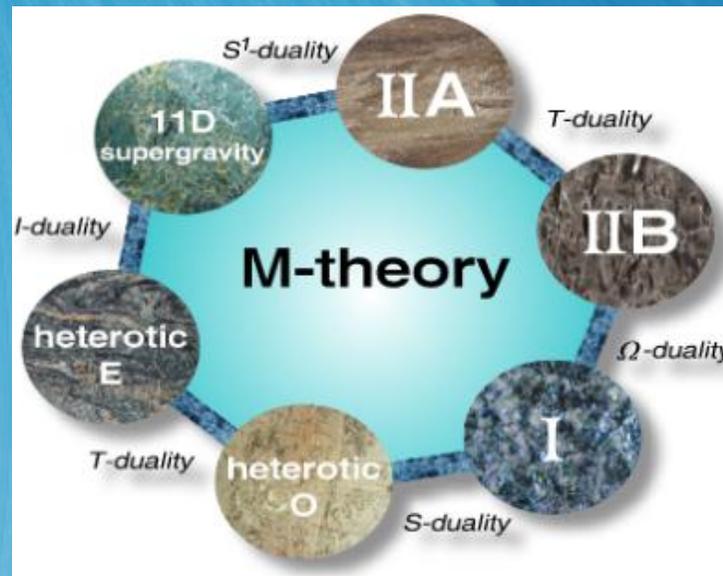


- ◆ Dans la théorie effective de supergravité, il existe des solitons supersymétriques stables, étendus dans p directions spatiales, de masse (ou tension) proportionnelle à $1/g$, dits Dp -branes.
- ◆ Les fluctuations des D -branes sont décrites par des cordes ouvertes dont les extrémités sont confinées sur leur volume d'univers



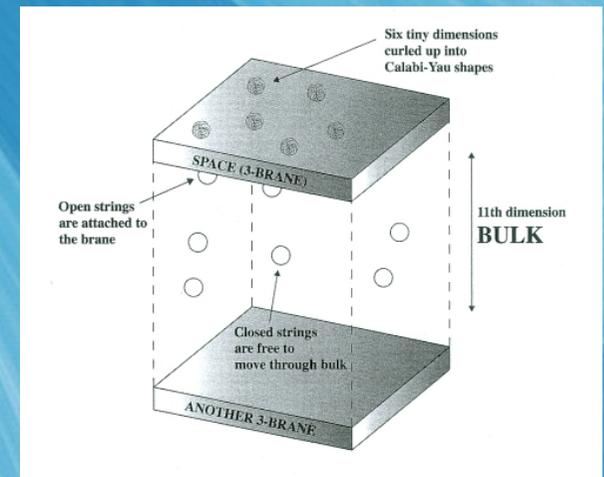
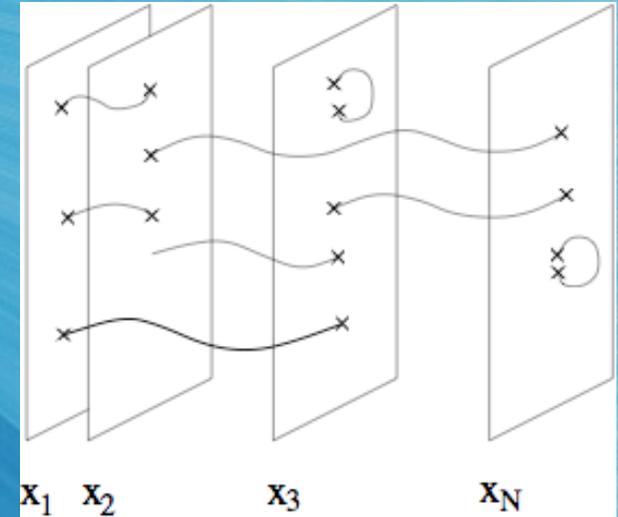
D-branes et dualités

- ◆ La dynamique de ces solitons donne accès au régime non-perturbatif: les D1-branes peuvent être interprétées comme cordes fondamentales d'une théorie duale, de couplage $g'=1/g$! Les D0-branes suggèrent l'existence d'une 11ème dimension !



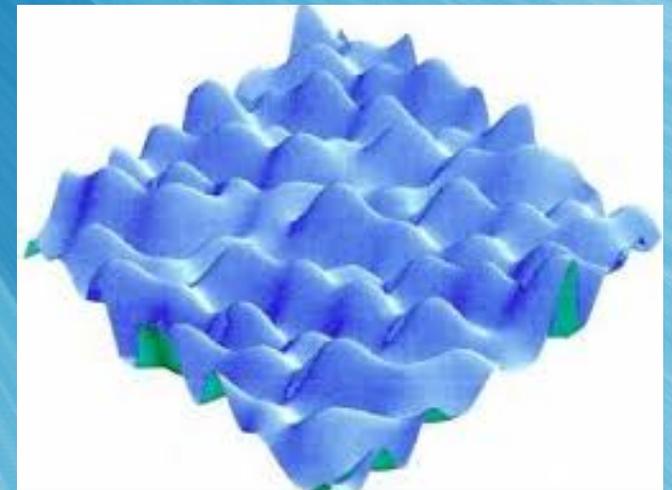
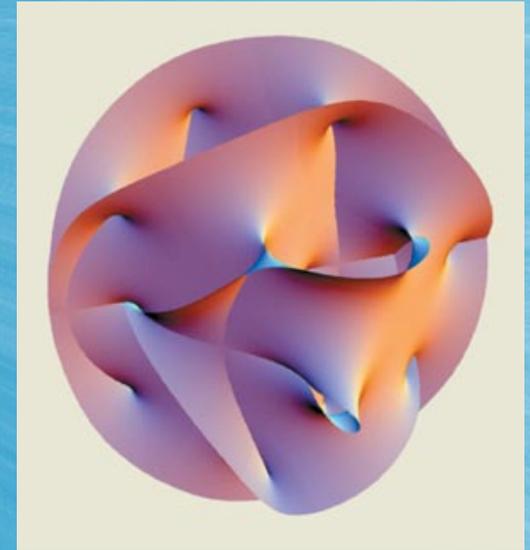
Le Modèle Standard sur une D-brane

- ◆ En présence de N D-branes, les états de masse nulle des cordes ouvertes comportent N^2 bosons de jauge pour la symétrie $U(N)$, ainsi que leurs partenaires supersymétriques
- ◆ Des champs chargés dans la bifondamentale de $U(N) \times U(M)$ en présence de D-branes en intersection
- ◆ Notre univers serait-il localisé sur une D-brane, où se propagent les champs du Modèle Standard, tandis que les gravitons se propagent dans le 'bulk' ?
- ◆ Dans ce type de scénario, l'échelle des cordes peut être très inférieure à la masse de Planck, voire à la portée d'expériences de physique atomique !
- ◆ Un nouveau cadre pour la phénoménologie et la cosmologie.



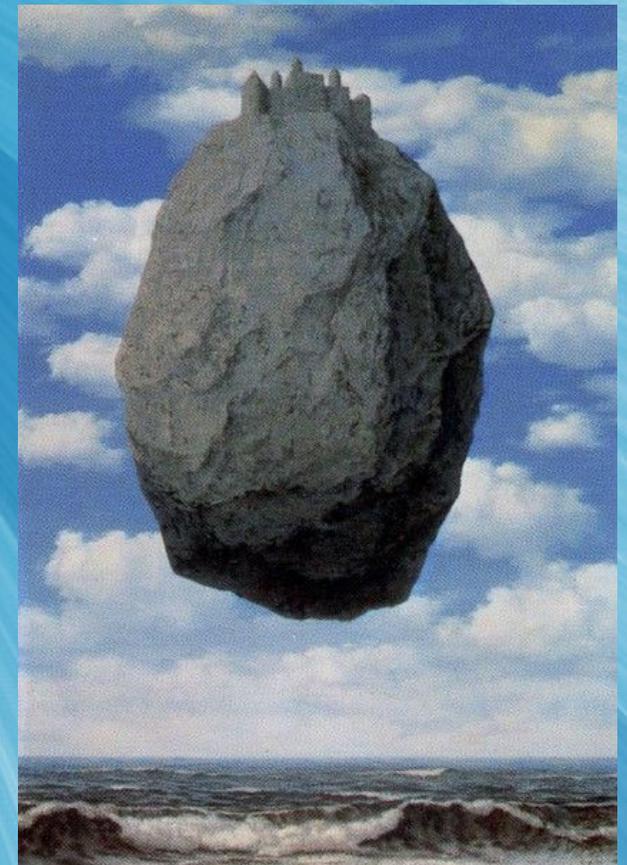
String Landscape

- ◆ La phénoménologie d'un modèle de cordes en $D=4$ dépend de la géométrie de l'espace interne, mais aussi des valeurs des flux magnétiques et de la présence éventuelle de D-branes enroulées dans l'espace interne.
- ◆ La stabilité de ces modèles n'est assurée qu'en présence de supersymétrie, éventuellement spontanément brisée.
- ◆ La physique en $D=4$ est décrite par une action effective incluant en particulier un potentiel pour les champs de modules. Malheureusement, ce potentiel ne stabilise en général pas tous les modules.
- ◆ Pour un espace de Calabi-Yau avec flux, le nombre d'états (méta)stables est gigantesque, $O(10^{100})$!



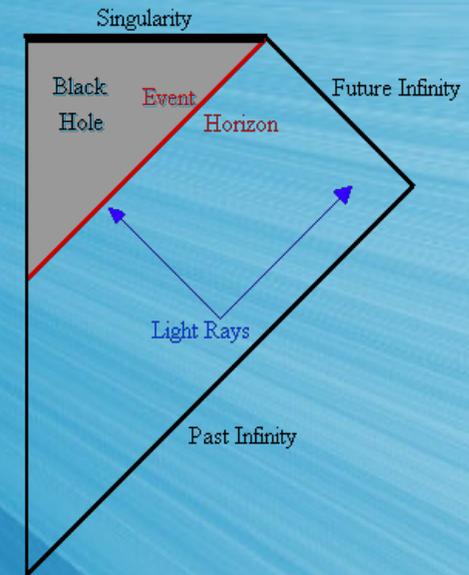
Landscape vs Swampland

- ◆ L'existence de ce grand nombre de vide semble ruiner l'espoir d'une théorie unifiée prédictive, mais elle rend possible une détermination anthropique de la constante cosmologique.
- ◆ Quelques contraintes anthropiques permettraient-elles de fixer uniquement une classe de modèles ?
- ◆ L'existence d'une théorie finie dans l'ultraviolet (contenant la gravitation) impose-t-elle des contraintes universelles sur la physique de basse énergie ?
- ◆ Cette question est l'objet d'une activité intense: weak gravity conjecture, (Anti) de Sitter swampland conjectures...
- ◆ Une prédiction robuste: absence de symétrie globale exacte dans une théorie incluant la gravité quantique



Thermodynamique des trous noirs

- ◆ Bekenstein et Hawking (1975) ont montré que les trous noirs, vus comme solutions classiques des équations de la Relativité Générale, satisfont à des principes analogues à ceux de la **thermodynamique**. En particulier, l'aire joue le rôle de l'entropie.
- ◆ On attend que ces propriétés thermodynamiques émergent de la **statistique** des micro-états quantiques.
- ◆ La théorie des cordes décrit avec succès ces micro-états pour une certaine classe de trous noirs supersymétriques, en terme d'états liés de D-branes enroulées dans l'espace interne.

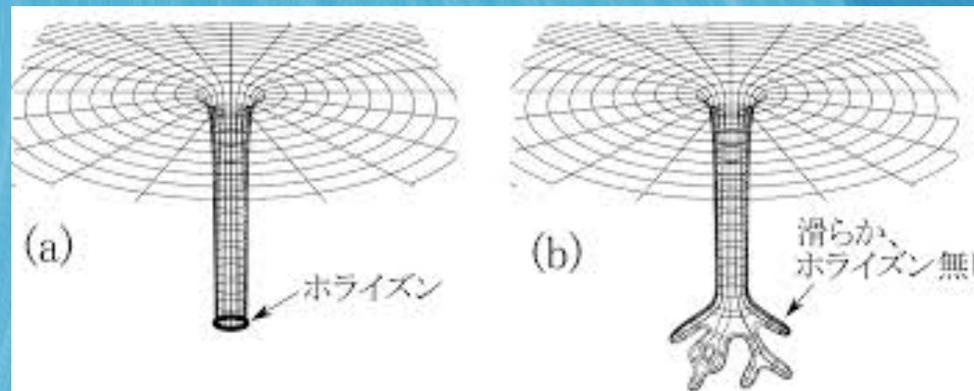


$$S_{BH} = \frac{k_B c^3}{\hbar G} \frac{A}{4}$$

$$T = dS/dE$$

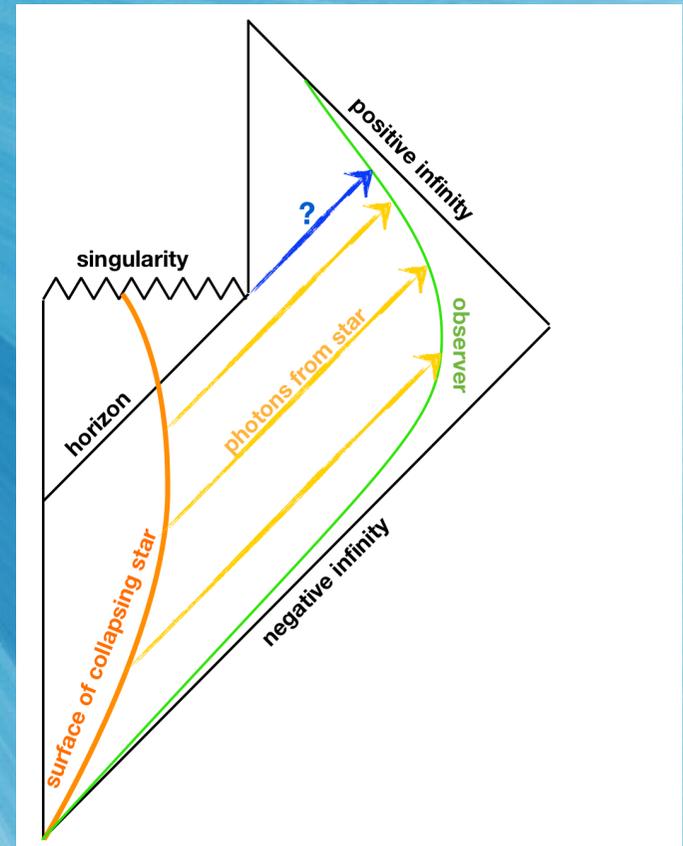
Micro-états de trous noirs

- ◆ Dans le régime de faible couplage, les D-branes sont décrites par une théorie conforme bi-dimensionnelle, dont on peut facilement extraire le nombre d'états à haute énergie.
- ◆ La supersymétrie permet d'interpoler entre le régime de faible couplage, où le rayon de Schwarzschild est effectivement nul, et le régime de fort couplage, où la description en termes de trou noir est valide.
- ◆ Le « fuzzball proposal » suggère que chaque micro-état pourrait être décrit par une solution de supergravité régulière sans horizon, celui-ci apparaissant de manière effective après « coarse-graining ».



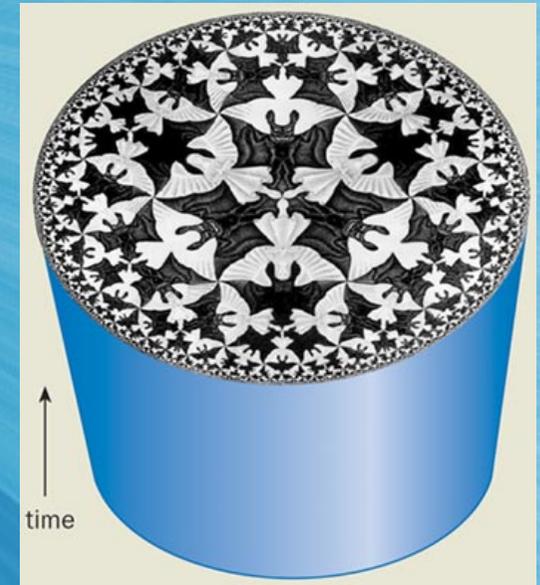
Paradoxe de l'information et firewall

- ◆ L'extension au cas non supersymétrique est délicate, mais essentielle pour résoudre le paradoxe de l'information de Hawking: si la radiation de Hawking est thermique, que devient l'information initiale après que le trou noir soit complètement évaporé ?
- ◆ En utilisant les propriétés de l'entropie d'intrication, on peut montrer qu'il y a un conflit entre l'unitarité et l'existence d'un horizon régulier décrit par la théorie d'Einstein.
- ◆ La question de savoir ce qui arrive à un observateur en chute libre approchant l'horizon dans un trou noir reste ouverte.



Dualité holographique

- ◆ La dualité holographique, découverte via l'étude des propriétés gravitationnelles des D-branes, ouvre une nouvelle fenêtre sur le régime non-perturbatif de la gravité quantique.
- ◆ La **correspondance AdS/CFT** relie la (super) gravité dans l'espace Anti-de Sitter AdS_{d+1} à une théorie de Yang-Mills (super) conforme sur le bord R^d
- ◆ Le couplage dans le bulk est $g_s=1/N$, tandis que la courbure est inversement proportionnelle au couplage de t'Hooft λ . La gravité est classique dans la limite $N \rightarrow \infty$. La direction radiale dans AdS correspond à un changement d'échelle sur le bord.

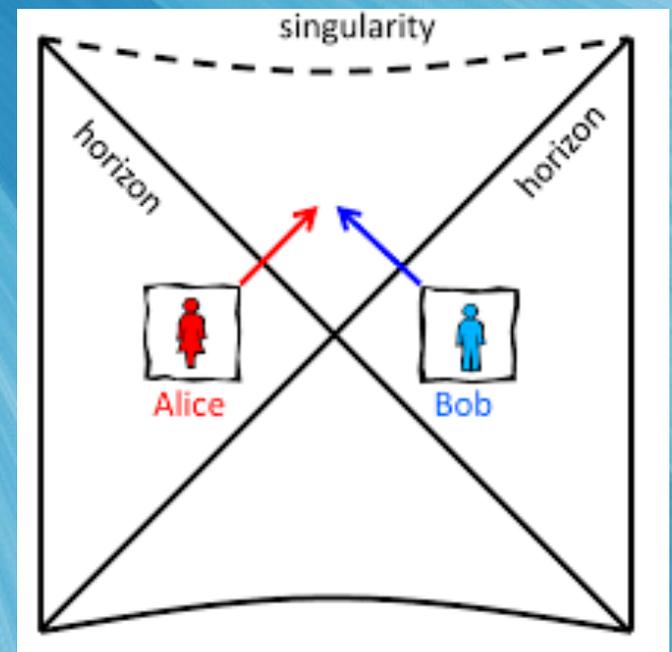
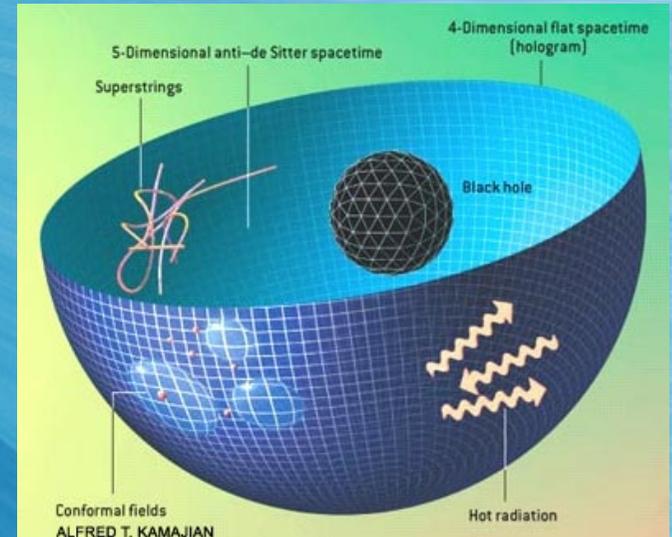


$$ds_{AdS}^2 = \frac{-dt^2 + dx_i^2 + dy^2}{y^2}$$

$$\lambda = g_{YM}^2 N$$

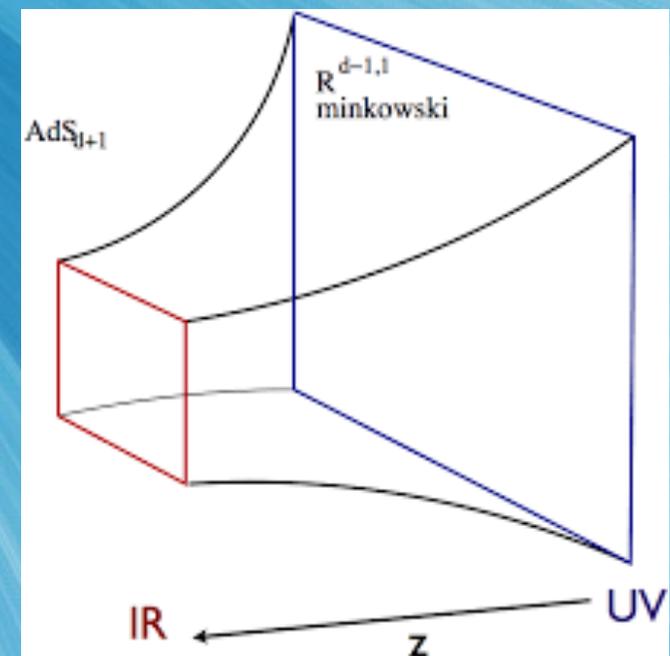
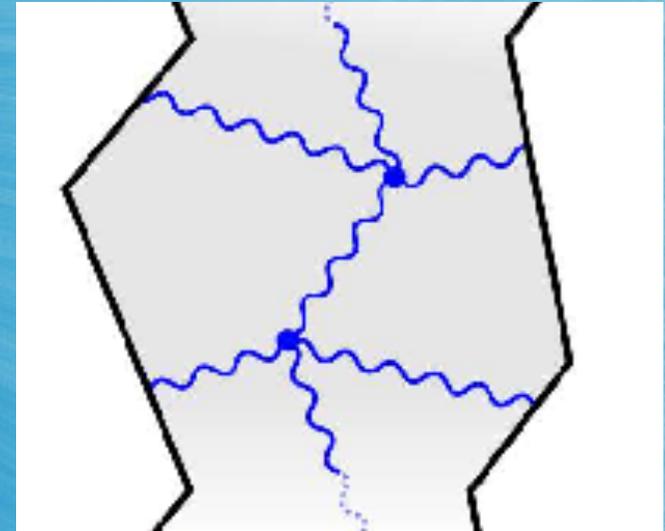
Dualité holographique

- ◆ Le trou noir dans AdS est dual à un état thermal sur le bord. La formation d'un trou noir correspond à un processus de thermalisation.
- ◆ La dualité permet de calculer des observables non-triviales dans des théories des champs fortement couplées par un calcul semi-classique en gravité.
- ◆ Réciproquement, la théorie de jauge fournit en principe une définition non-perturbative de la gravité dans le bulk.
- ◆ L'unitarité est manifeste, mais la localité est mal comprise. L'intrication de l'information joue un rôle important.



Dualité holographique

- ◆ L'holographie met au jour des symétries non-manifestes dans les théorie de jauge: e.g. l'intégrabilité de la théorie de Yang-Mills $N=4$ dans la limite planaire, et donne de nouveaux outils pour les théories conformes en $D > 2$ (conformal bootstrap).
- ◆ La dualité holographique peut être étendue au cas où la symétrie conforme est brisée. L'évolution radiale correspond au flot du groupe de renormalisation.
- ◆ La correspondance peut aussi servir à modéliser certaines théories des champs fortement couplés (e.g. QCD, ou des modèles de fermions fortement corrélés en matière condensée) en termes d'une théorie de gravité ad hoc dans le bulk.



Cordes & Maths

- ◆ La théorie des cordes fait appel à de nombreux domaines des mathématiques (tous sauf la logique, diront certains): topologie, géométrie différentielle, algébrique, symplectique; algèbre, théorie des représentations; théorie des nombres, formes automorphes...
- ◆ Réciproquement, les intuitions physiques issues de la théorie des champs et de la relativité générale donnent un nouvel éclairage à certains problèmes mathématiques, et suggèrent des propriétés et connections complètement inattendues par les mathématiques.
- ◆ Par exemple: symétrie miroir entre espaces de Calabi-Yau, géométrie énumérative, invariants de Donaldson-Thomas, etc
- ◆ Que la théorie des cordes (et plus généralement la supersymétrie) soit un jour validée expérimentalement ou non, son utilité pour les mathématiques n'est plus à démontrer.

String Theory in Greater Paris

- ◆ La théorie des cordes (au sens large) en région parisienne rassemble environ 40 chercheurs permanents, répartis sur 6 labos:
 - LPTENS: Ecole Normale Supérieure,
 - LPTHE: Sorbonne Université,
 - CPHT: Ecole Polytechnique
 - APC: Univ Denis Diderot
 - IPHT: CEA Saclay Orme des merisiers,
 - IHES: Bures sur Yvette,
- ◆ La liste est consultable sur <http://string.lpthe.jussieu.fr>

Chercheurs par thèmes

Trous noirs Quantiques

Bena*
Bossard
Damour
Pioline
Puhm
Warner*

Holographie, CFT, QFT

Bachas*
Gouteraux*
Kiritsis*
Nitti
Paulos
Petropoulos
Policastro*
Rychkov

Landscape, Effect.actions

Antoniadis*
Dudas
Grana
Minasian
Mourad
Israel
Partouche
Petrini

Amplitudes & Intégrabilité

Bossard
Basso
Kazakov
Korchemsky
Serban
Tourkine
Vanhove

StringMath & SUSY QFT

Bilal
Kashani Poor*
Julia
Pestun
Pioline
Troost*

! Classification arbitraire; * : a indiqué son intention de prendre un étudiant en stage/ PhD.