

Les champs quantiques.

Session nr 4 du 25 mars 2023 – Traduction Française -Original Anglais

Lieu : Mezza Verde au Belize

Commentaires :

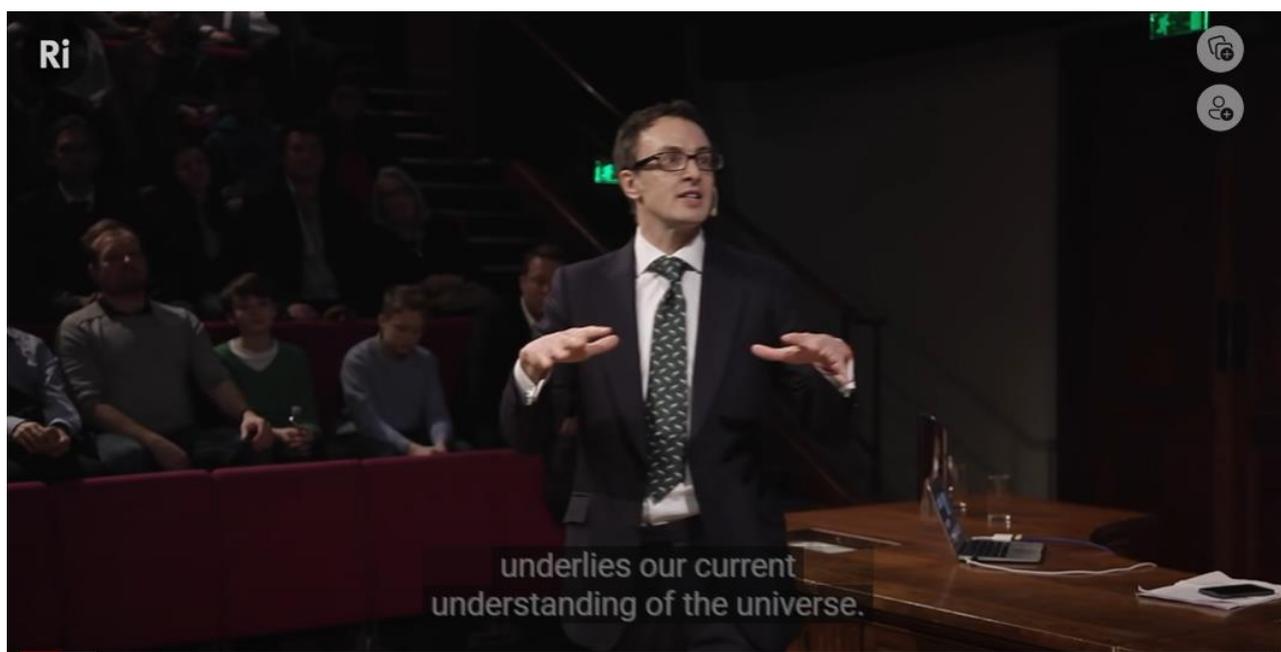
Ceci est la transcription et traduction de la vidéo de David Tong mentionnée dans la session nr 3 – 2023- [C'est notre devoir de savoir - Partie 1](#) pour vous aider à comprendre mieux ce qui suit dans les parties 2 à 4 . Cela changera complètement votre vision sur la création et de quoi est constitué notre univers.

Wivine.

Les vrais éléments constitutifs de l'univers.

David Tong – 15 février 2017

[\(4456\) Quantum Fields: The Real Building Blocks of the Universe - with David Tong - YouTube](#)



J'aimerais vous parler ce soir d'une des grandes questions de la science. C'est une question qui remonte à au moins deux mille cinq cents ans, aux anciens Grecs. Et c'est une question qui a été discutée dans cette salle de nombreuses fois au cours des 200 dernières années, car c'est une question importante. Et je pense qu'il est important que nous la revoyions. Et la question est simplement celle-ci :

De quoi sommes-nous faits ?

Quels sont les éléments constitutifs fondamentaux de la nature à partir desquels vous et moi et tout le reste de l'univers sont construits ?

C'est l'histoire que j'aimerais vous raconter. Donc, ce que j'aimerais faire, c'est essayer de vous donner un aperçu de notre compréhension actuelle. J'aimerais aussi essayer de vous donner un aperçu de ce que nous espérons faire à l'avenir, des progrès que nous pouvons espérer faire au cours des prochaines années et des prochaines décennies. Nous allons couvrir pas mal de terrain dans cette conversation. Je dois vous avertir maintenant, et pas le moins du monde parce que je vais littéralement discuter de chaque chose dans l'univers.

Nous allons parler, entre autres, de ce qui se passe au niveau du **collisionneur de particules** le plus puissant du monde. C'est une machine qui s'appelle le *Grand collisionneur de Hadrons* (*Large Hadron Collider*, ou le *LHC* en abrégé). Cela reviendra beaucoup dans cette conversation. C'est une machine qui est basée sous terre dans un endroit appelé CERN qui est juste à l'extérieur de Genève. Nous parlerons également des expériences des dernières années qui regardent en arrière dans le temps vers le Big Bang, qui nous permettent de comprendre ce qui s'est passé dans les premières fractions de seconde après que le temps lui-même a commencé à exister. Et en plus de tout cela, je veux aussi vous donner une idée des idées abstraites théoriques, et même une petite idée des mathématiques, qui sous-tendent notre compréhension actuelle de l'univers.

Je suis un physicien théoricien. Ce que je fais, c'est étudier les équations, j'essaie de comprendre les équations qui régissent le monde dans lequel nous vivons. Et donc, j'aimerais juste vous donner une idée de ce dont il s'agit. À un moment donné... Je dois vous en avertir, je vais même vous montrer une équation. Sachez que vous pouvez suivre une formation pour ce genre de choses.

Il y a une règle numéro un. La règle numéro un est de ne jamais montrer à

son auditoire des équations. Si vous leur montrez des équations, vous ne ferez que les terrifier. À un moment donné de cette conférence, vous allez tous être terrifiés, alors préparez-vous.

Vous savez, il y a une façon traditionnelle de commencer des discussions comme celle-ci. La manière traditionnelle est d'être très cultivé et de parler de ce que Démocrite et Lucrèce ont dit il y a 2.500 ans et des idées que les anciens Grecs avaient sur les **atomes**.

Mais je ne veux pas commencer comme ça.

Nous avons fait beaucoup de progrès en 2.500 ans, et sachez qu'il y a de meilleurs endroits pour lancer une conférence scientifique.

Ainsi, la première image moderne que nous avons de ce dont l'univers est fait, **de tout ce dont nous sommes faits**, est celle-ci. J'espère que cela vous est tous familier ?

C'est

le tableau périodique des éléments.

IUPAC Periodic Table of the Elements

1 H hydrogen (1.007, 1.008)																	2 He helium (4.002)
3 Li lithium (6.938, 6.941)	4 Be beryllium (9.012)											5 B boron (10.81, 10.83)	6 C carbon (12.01, 12.02)	7 N nitrogen (14.01, 14.01)	8 O oxygen (16.00, 16.00)	9 F fluorine (18.99)	10 Ne neon (20.18)
11 Na sodium (22.99)	12 Mg magnesium (24.31)											13 Al aluminum (26.98)	14 Si silicon (28.09, 28.09)	15 P phosphorus (30.97)	16 S sulfur (32.06, 32.06)	17 Cl chlorine (35.45, 35.46)	18 Ar argon (39.95)
19 K potassium (39.10)	20 Ca calcium (40.08)	21 Sc scandium (44.96)	22 Ti titanium (47.87)	23 V vanadium (50.94)	24 Cr chromium (52.00)	25 Mn manganese (54.94)	26 Fe iron (55.85)	27 Co cobalt (58.93)	28 Ni nickel (58.69)	29 Cu copper (63.55)	30 Zn zinc (65.38(2))	31 Ga gallium (69.72)	32 Ge germanium (72.63)	33 As arsenic (74.92)	34 Se selenium (78.97)	35 Br bromine (79.90, 79.91)	36 Kr krypton (83.80)
37 Rb rubidium (85.47)	38 Sr strontium (87.62)	39 Y yttrium (88.91)	40 Zr zirconium (91.22)	41 Nb niobium (92.91)	42 Mo molybdenum (95.94)	43 Tc technetium (98.91)	44 Ru ruthenium (101.07)	45 Rh rhodium (102.91)	46 Pd palladium (106.38)	47 Ag silver (107.87)	48 Cd cadmium (112.41)	49 In indium (114.82)	50 Sn tin (118.71)	51 Sb antimony (121.76)	52 Te tellurium (127.60)	53 I iodine (126.91)	54 Xe xenon (131.30)
55 Cs caesium (132.91)	56 Ba barium (137.33)	57-71 Lanthanoids	72 Hf hafnium (178.49)	73 Ta tantalum (180.95)	74 W tungsten (183.85)	75 Re rhenium (186.21)	76 Os osmium (190.23)	77 Ir iridium (192.22)	78 Pt platinum (195.08)	79 Au gold (196.97)	80 Hg mercury (200.59)	81 Tl thallium (204.38, 204.39)	82 Pb lead (207.2)	83 Bi bismuth (208.98)	84 Po polonium	85 At astatine	86 Rn radon
87 Fr francium	88 Ra radium	89-103 actinoids	104 Rf rutherfordium	105 Db dubnium	106 Sg seaborgium	107 Bh bohrium	108 Hs hassium	109 Mt meitnerium	110 Ds darmstadtium	111 Rg roentgenium	112 Cn copernicium	113 Uut ununtrium	114 Fl flerovium	115 Uup ununpentium	116 Lv livermorium	117 Uus ununseptium	118 Uuo ununoctium



57 La lanthanum (138.91)	58 Ce cerium (140.12)	59 Pr praseodymium (140.91)	60 Nd neodymium (144.24)	61 Pm promethium	62 Sm samarium (150.36)	63 Eu europium (151.96)	64 Gd gadolinium (157.25)	65 Tb terbium (158.93)	66 Dy dysprosium (162.50)	67 Ho holmium (164.93)	68 Er erbium (167.26)	69 Tm thulium (168.93)	70 Yb ytterbium (173.05)	71 Lu lutetium (174.97)
89 Ac actinium	90 Th thorium (232.04)	91 Pa protactinium (231.04)	92 U uranium (238.03)	93 Np neptunium	94 Pu plutonium	95 Am americium	96 Cm curium	97 Bk berkelium	98 Cf californium	99 Es einsteinium	100 Fm fermium	101 Md mendelevium	102 No nobelium	103 Lr lawrencium

For notes and updates to this table, see www.iupac.org. This version is dated 8 January 2016. Copyright © 2016 IUPAC, the International Union of Pure and Applied Chemistry.

C'est l'une des images les plus emblématiques de toute la science. Ce que nous avons ici, ce sont 120 éléments différents. Je dois souligner que pas moins de 10 d'entre eux ont été découverts dans ce bâtiment même (à Cambridge), qui constituent, ou du moins dans les années 1800, on pensait qu'ils constituaient tout ce qui existait dans la nature.

Il est donc certainement vrai que tout matériau que vous obtenez, vous pouvez le distiller en ses composants, et vous constaterez que tous ces composants sont constitués de l'un de ces 120 éléments.

C'est donc un grand moment scientifique. C'est vraiment l'un des triomphes de la science. C'est aussi, devrais-je ajouter, la raison pour laquelle j'ai arrêté de faire de la chimie à l'école. Parce que si vous êtes chimiste, c'est fondamentalement aussi bon que possible. Vous savez, pour être honnête, c'est un peu du gâchis. Tout dans l'univers est classé à gauche en choses qui explosent si vous les mettez dans l'eau à travers des choses, classées à droite qui, si nous sommes honnêtes, ne font pas grand-chose du tout.

Vous organisez en quelque sorte tout dans ces formes stupides. Cela ressemble un peu à l'Australie. Il y a un grand plongeon en haut, puis il y a ces deux bandes d'éléments que vous devez mettre en bas, car il n'y a pas de place pour eux au milieu où ils appartiennent. Vous savez, je ne sais pas pour vous, si on m'avait demandé de proposer une classification fondamentale de tout dans l'univers, ce n'est pas ce que j'aurais fait.

Y a-t-il des chimistes dans le public ? [RIRE] Je suis désolé pour vous.

Sachez que je ne suis pas seul à le penser. Il n'y a pas que moi qui pense que c'est une façon stupide d'organiser la nature. La nature elle-même pense que c'est une façon stupide d'organiser la nature. Bien sûr, nous savons que ce n'est pas la base - ce n'est pas la fin de l'histoire, que ce ne sont pas les 'Éléments constitutifs fondamentaux'.

La première personne à se réaliser qu'il y avait quelque chose de plus profond que cela était un physicien de Cambridge appelé JJ Thomson. Ainsi, à la fin des

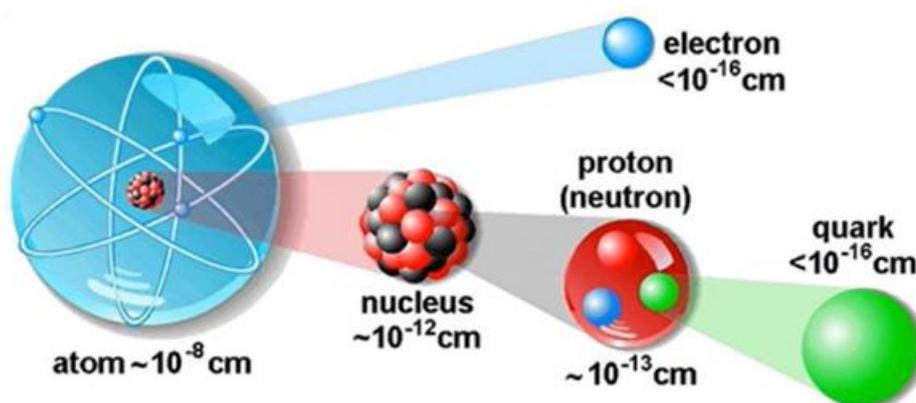
années 1800, JJ Thomson a découvert **une particule plus petite qu'un atome** que nous appelons aujourd'hui **l'électron**. Il a annoncé cela en 1897 dans cette salle-ci -- en fait, dans cette même série de conférences -- à un public stupéfait, un public si stupéfait qu'au moins la moitié d'entre eux ne croyaient pas ce qu'il disait. Il y avait un scientifique très distingué qui a dit à JJ Thomson qu'il pensait que tout cela était un canular, que JJ Thomson s'était moqué d'eux. Mais bien sûr, ce n'est pas un canular. Car ce ne sont pas les éléments fondamentaux de la nature.

Et moins de 15 ans après la découverte de JJ Thomson, son successeur à Cambridge, un homme du nom d'Ernest Rutherford, avait compris exactement de quoi étaient faits ces atomes.

Et voici l'image que Rutherford a imaginé.

A l'intérieur de l'atome.

Inside the atom



Nous savons donc maintenant que chacun de ces éléments est composé de

- un **noyau**, qui est minuscule. La métaphore que Rutherford lui-même a utilisée était que c'était comme une mouche au centre d'une cathédrale. Et puis en orbite autour de ce noyau dans des orbites assez floues, se trouvent
- les **électrons**, qui remplissent en quelque sorte très peu le reste de l'espace.

Par la suite, nous avons appris que le **noyau** n'est pas non plus fondamental. Le noyau contient des particules plus petites. Ce sont des particules que nous appelons

- **protons** et **neutrons**.

Dans les années 1970, nous avons appris que les protons et les neutrons ne sont pas fondamentaux non plus.

Dans les années 1970, nous avons appris qu'à l'intérieur de chaque proton et neutron se trouvent

- **trois** particules plus petites que nous appelons : **quarks**.

Il existe deux types de quarks différents.

Dans les années 1970, je suppose que les physiciens n'avaient pas reçu d'éducation grecque classique et étaient à court de noms chics.

On a donc appelé ces quarks :

- le **quark up** ou le **quark U**
- le **quark down**.

Sans raison valable. Ce n'est pas comme si le quark up était plus élevé que le quark down. Ce n'est pas comme si cela pointe vers le haut.

Sans aucune bonne raison. Nous avons le 'quark up' et le 'quark down'.

Le proton est donc constitué de

- 2 quarks up et
- 1 quark down.

Le neutron est constitué de

- deux quarks down et

- un quark up.

Ce sont, à notre connaissance, **les éléments fondamentaux de la nature.**

Nous n'avons jamais rien découvert de plus petit que **l'électron**, et nous n'avons jamais rien découvert de plus petit que les **quarks**.

Nous avons donc **trois particules** dont tout ce que nous connaissons est fait.

Et ça vaut le coup de le souligner, car c'est assez étonnant.

Nous le prenons en quelque sorte pour acquis. On apprend ça à l'école. Nous n'y pensons même pas profondément.

Tout ce que nous voyons dans le monde, toute la diversité du monde naturel, vous, moi, tout ce qui nous entoure, sont juste ces trois mêmes particules avec des réarrangements légèrement différents, répétés encore et encore et encore. C'est une leçon incroyable à tirer sur la façon dont le monde est construit. C'est donc ce que nous avons.

Nous avons un électron et deux quarks.

Sachez, que ce ne sont pas les éléments constitutifs fondamentaux auxquels les Grecs avaient pensé, et ce ne sont certainement pas les éléments constitutifs fondamentaux auxquels les Victoriens avaient pensé.

Bien que l'esprit du problème n'a pas vraiment changé.

L'esprit est exactement ce que Démocrite a dit il y a 2 500 ans :

qu'ils sont comme des blocs de LEGO à partir desquels tout dans le monde est construit. Ces blocs de LEGO sont des particules, et **ces particules sont l'électron et les deux quarks.**

C'est une très belle image. C'est une image très réconfortante. C'est l'image qu'on enseigne aux enfants à l'école. C'est l'image que nous enseignons même aux étudiants de premier cycle universitaire.

Mais il y a un problème avec ça. Le problème c'est que c'est un mensonge.

C'est un pieux mensonge. C'est un pieux mensonge que nous disons à nos enfants parce que nous ne voulons pas les exposer trop tôt à la dure et horrible vérité. Il est plus facile d'apprendre si vous croyez que ces particules

sont les éléments constitutifs fondamentaux de l'univers.
Mais ce n'est tout simplement pas vrai.

Les meilleures théories que nous ayons en physique n'ont pas soutenu la particule de l'électron et les deux particules de quark. En fait, les meilleures théories que nous ayons en physique ne reposent pas du tout sur les particules.

Les meilleures théories que nous avons nous disent que les éléments constitutifs fondamentaux de la nature **ne sont pas des particules, mais quelque chose de beaucoup plus nébuleux et abstrait.**

Les éléments constitutifs fondamentaux de la nature sont des substances fluides qui se répandent dans tout l'univers et ondulent de manière étrange et intéressante.

Ça c'est la réalité fondamentale dans laquelle nous vivons.
Ces substances fluides pour lesquelles nous avons un nom.

Nous les appelons **champs**.

Voici donc une photo d'un champ (*field*).

Fields



Ce n'est pas le genre de *champ* que les physiciens ont en tête. C'est ce que vous pensez être un champ si vous êtes un agriculteur ou si vous êtes une personne normale. Si vous êtes physicien, vous avez une image très différente dans votre esprit lorsque vous pensez aux *champs*.

Je vais vous donner la définition générale d'un *champ*, puis nous passerons en revue quelques exemples afin que vous vous familiarisiez avec cela.

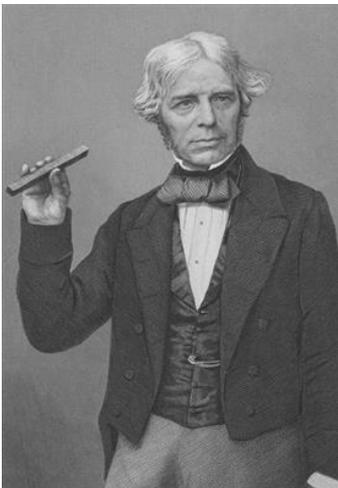
La définition du physicien d'un *champ* est la suivante.

C'est quelque chose qui, comme je l'ai dit, est répandu partout dans l'univers. C'est quelque chose qui prend une valeur particulière à chaque point de l'espace. Et qui plus est, cette valeur peut changer dans le temps. Donc, une bonne image pour votre esprit c'est que

c'est fluide, cela ondule et se balance dans tout l'univers.

Ce n'est évidemment pas une idée nouvelle. Ce n'est pas une idée que nous venons d'imaginer. C'est une idée qui remonte à près de 200 ans. Et comme tant d'autres choses en science, c'est une idée qui est née dans cette même salle. Parce que, comme je suis sûr que beaucoup d'entre vous le savent, c'est la maison de Michael Faraday (*Université de Cambridge*).

Michael Faraday a lancé cette même série de conférences en 1825. Il a donné plus d'une centaine de ces discours le vendredi soir, et la grande majorité d'entre eux étaient sur ses propres découvertes, sur les expériences qu'il a faites sur **l'électricité et le magnétisme**.



Faraday.

Il a donc fait beaucoup, beaucoup de choses dans le domaine de l'électricité et

du magnétisme pendant de nombreuses décennies. Et ce faisant, il a développé une '*intuition*' sur le fonctionnement des phénomènes électriques et magnétiques. Et *cette intuition* est ce que nous appelons maintenant **le champ électrique et magnétique**.

Donc, ce qu'il envisageait, c'était qu'enfilés partout dans l'espace se trouvaient ces choses invisibles appelés **champs électriques et magnétiques**.

Nous avons évidemment appris cela à l'école. Encore une fois, c'est quelque chose que nous tenons pour acquis parce que nous l'avons appris à un âge précoce, mais nous n'apprécions pas à quel point cette idée de Faraday est radicale.

Je tiens à souligner, que c'est l'une des idées *abstraites* les plus révolutionnaires de l'histoire des sciences, que ces champs électriques et magnétiques existent. Alors laissez-moi juste... vous êtes censés être une démonstration dans ce domaine. Je ne suis pas qu'un physicien théoricien. Je suis un physicien très théoricien. C'est très difficile pour moi de faire n'importe quel genre d'expérience qui va marcher. Mais je vais juste vous montrer quelque chose que vous avez tous vu.



Ce sont des **aimants**. Nous avons tous joué à ces jeux quand nous étions enfants ou quand nous étions à l'école. Vous prenez ces aimants et vous les

déplacez l'un vers l'autre. Et à mesure qu'ils se rapprochent de plus en plus, il y a cette **force** que vous pouvez en quelque sorte sentir s'accumuler qui pousse, la pression qui pousse entre ces deux aimants. Peu importe la fréquence à laquelle vous le faites, et peu importe le nombre de diplômes que vous avez en physique.

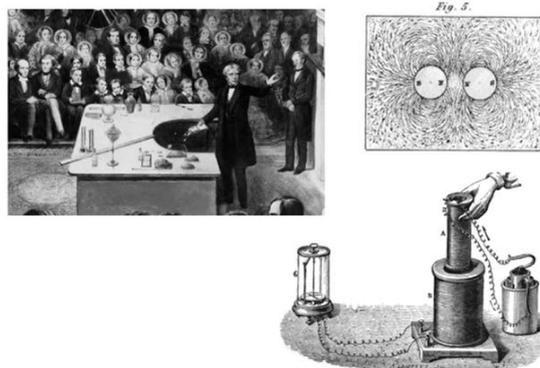
C'est un peu magique, n'est-ce pas ? Vous connaissez tous ceci. Il y a quelque chose de spécial dans cette sensation étrange qu'on ressent entre deux aimants.

C'était cela le génie de Faraday. C'était pour faire comprendre que même si vous ne pouvez rien voir entre les deux, peu importe d'aussi près que vous regardez, l'espace entre ces aimants semblera toujours vide. Néanmoins, a-t-il dit, **il y a quelque chose de réel entre les deux.**

Il y a quelque chose de réel et de physique, qui est invisible, mais qui se construit, et c'est ce qui est responsable de la force. Alors il les a appelés lignes de force.

Nous l'appelons maintenant **le champ magnétique**. Alors ci-dessous vous voyez une photo de Michael Faraday. C'est une photo de Michael Faraday donnant une conférence derrière cette même table où je me trouve actuellement. Avec un dessin d'une de ses expériences.

The electric and magnetic fields

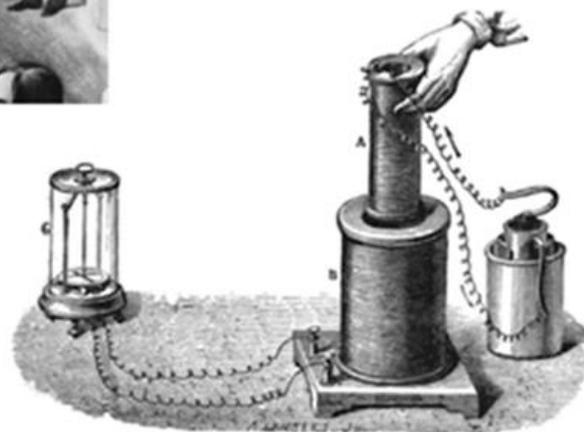
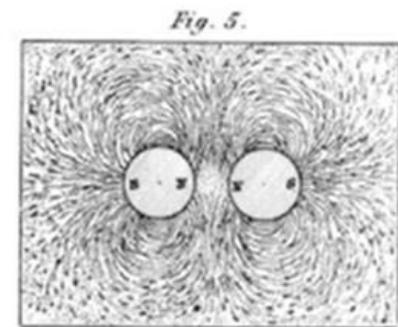


On m'a signalé plus tôt que quand vous sortez, il y a un tapis juste ici. Le tapis a ce motif (*comme sous l'écran ci-dessous*). Cette image se répète encore et encore et encore.



Et en bas de l'écran lui-même, il y a l'une des démonstrations les plus célèbres de Michael Faraday qu'il a faites ici. Je vais donc vous expliquer ce que Faraday a fait. La chose à droite en bas, est une petite bobine avec une main dessus (voir photo ci-dessous).

The electric and magnetic fields



Il s'agit d'une batterie, et la batterie fait passer un courant autour de cette bobine. Et ce faisant, *il y a un champ magnétique qui est induit là-dedans*. C'est ce qu'on appelle un *solénoïde*. Et puis Faraday a fait la chose suivante. Il a simplement déplacé cette petite 'bobine A' dans cette grande 'bobine B' comme ceci. Et quelque chose de miraculeux s'est produit.

Lorsque vous faites cela, il en résulte un *champ magnétique en mouvement*. La grande découverte de Faraday a été **l'induction**. Cela donne naissance à un courant dans B, qui ensuite, à cette extrémité de la table, fait bouger une aiguille comme celle-ci. Donc extrêmement simple. Vous déplacez un champ magnétique, et il crée un courant, qui fait bouger une aiguille de l'autre côté de la table. Cela a étonné énormément le public dans les années 1800.

Parce que vous faisiez quelque chose ici, qui affectait l'aiguille à l'autre bout de la table, sans jamais avoir touché l'aiguille. C'était incroyable. On pouvait faire bouger quelque chose sans jamais s'en approcher, sans jamais le toucher. Nous sommes un peu blasés ces jours-ci. Vous pouvez faire la même expérience.

Vous pouvez récupérer votre téléphone portable.

Vous pouvez appuyer sur quelques boutons. Vous pouvez appeler quelqu'un à l'autre bout du monde en quelques secondes. C'est exactement le même principe.

C'était la première fois qu'il avait démontré que **le champ** est réel.

Vous pouvez **communiquer en utilisant le champ**.

Vous pouvez **affecter des objets éloignés en utilisant le champ** sans jamais les toucher.

Voici l'héritage de Michael Faraday. Il n'y a pas que des particules dans le monde.

Il existe d'autres objets un peu plus subtils appelés **champs** qui sont **répartis dans tout l'espace**.

Au fait, si jamais vous voulez vraiment apprécier le génie de Michael Faraday, il a donné cette conférence en 1846. Il a donné de nombreuses conférences en 1846. Mais il y en a une en particulier où il a terminé 20 minutes plus tôt.

Il n'avait plus rien à dire, et s'est alors livré à des spéculations vaines pendant 20 minutes. Et Faraday a suggéré que ces champs invisibles, électriques et magnétiques qu'il avait postulés étaient littéralement la seule chose que nous ayons jamais vue.

Il a suggéré que les **ondulations du champ électrique et magnétique étaient ce que nous appelons la lumière.**

Il a fallu une période de 50 ans à des gens comme Maxwell et Hertz pour confirmer que c'est bien de cela que la lumière est faite. Mais c'est le génie de Faraday qui a compris qu'il y avait **des ondes** dans le **champ magnétique - électrique**, et que **ces ondes sont la lumière** que nous voyons autour de nous. C'est donc bien l'héritage de Faraday.

Mais il s'avère que cette idée de champs était beaucoup plus importante que ne l'avait réalisé Faraday. Et il nous a fallu plus de 150 ans pour apprécier l'importance de ces champs. Donc, ce qui s'est passé au cours de ces 150 années, c'est qu'il y a eu une petite révolution dans la science.

Dans les années 1920, nous avons réalisé que le monde était très, très différent des bonnes idées que Newton et Galilée nous avaient transmises des siècles auparavant. Ainsi, dans les années 1920, des gens comme Heisenberg et Schrodinger ont réalisé qu'aux plus petites échelles, à l'échelle microscopique, le monde est beaucoup plus mystérieux et contre-intuitif que nous l'avions imaginé.

Ceci est la théorie que nous connaissons maintenant sous le nom de **mécanique quantique.**

Il y a donc beaucoup de choses que je pourrais dire sur la mécanique quantique. Permettez-moi de vous dire que l'une des lignes de force de la mécanique quantique est que **l'énergie n'est pas continue**. L'énergie dans le monde **est toujours fragmentée en un petit morceau discret**. C'est en fait ce que signifie le mot quantique.

Quantum signifie : discret ou forfaitaire. Donc, le vrai plaisir commence lorsque vous essayez de **prendre les idées de la mécanique quantique, qui**

disent que les choses doivent être discrètes, et d'essayez de les **combiner** avec les idées de champs de Faraday, qui sont des objets très continus et lisses, qui ondulent et oscillent dans l'espace.

La théorie quantique des champs est :

l'idée d'essayer de combiner ces deux théories ensemble.

L'implication de la théorie quantique des champs est que :

Les ondes lumineuses sont constituées de particules : les **PHOTONS**.

La première implication c'est ce qui se passe pour le champ électrique et magnétique. Ainsi Faraday nous a appris, et Maxwell plus tard, que

- les **ondes** du champ électromagnétique sont ce que nous appelons la **lumière**. Mais lorsque vous appliquez la mécanique quantique à cela, vous constatez que ces ondes lumineuses ne sont pas aussi lisses et continues qu'elles le paraissent. Donc, si vous regardez attentivement les **ondes lumineuses**, vous constaterez qu'elles sont constituées de **particules**.

- **Le champ d'électrons.**

Ce sont de petites **particules de lumière**, et ce sont des particules que nous appelons les **photons**.

La magie de cette idée est que ce même principe s'applique à toutes les autres particules de l'univers.

Il y a donc partout dans cette pièce quelque chose que nous appelons **le champ d'électrons**. C'est comme un fluide qui remplit cette pièce et, en fait, **remplit tout l'univers**. Et les **ondulations de ce fluide d'électrons**, les ondulations des ondes de ce fluide, sont **liées en petits faisceaux d'énergie** par les règles de la mécanique quantique. Ces **faisceaux d'énergie** sont ce que nous appelons la particule : **électron**.

Nous sommes tous connectés les uns aux autres.

Tous les électrons qui sont dans votre corps ne sont pas fondamentaux. Tous les électrons qui existent dans votre corps sont des ondes du même champ

sous-jacent. Ce qui fait que nous sommes tous connectés les uns aux autres. Tout comme les vagues de l'océan appartiennent toutes au même océan sous-jacent, **les électrons de votre corps sont des ondulations du même champ que les électrons de mon corps.** Il y a plus que cela.

Deux champs de Quark.

Il y a aussi dans cette pièce deux champs de quarks. Et les ondulations de ces deux champs de quarks donnent naissance à ce que nous appelons le *quark up* et le *quark down*.

Et il en va de même pour tous les autres types de particules dans l'univers. Il y a des champs qui sous-tendent tout. Et ce que nous considérons comme des particules ne sont pas du tout des particules.

Les particules sont des ondes de ces champs liées à de petits faisceaux d'énergie.

C'est l'héritage de Faraday. C'est là que la vision des champs de Faraday nous a menés. Il n'y a pas de particules dans le monde.

Les blocs de construction fondamentaux de base de notre univers sont ces substances fluides que nous appelons *champs*.

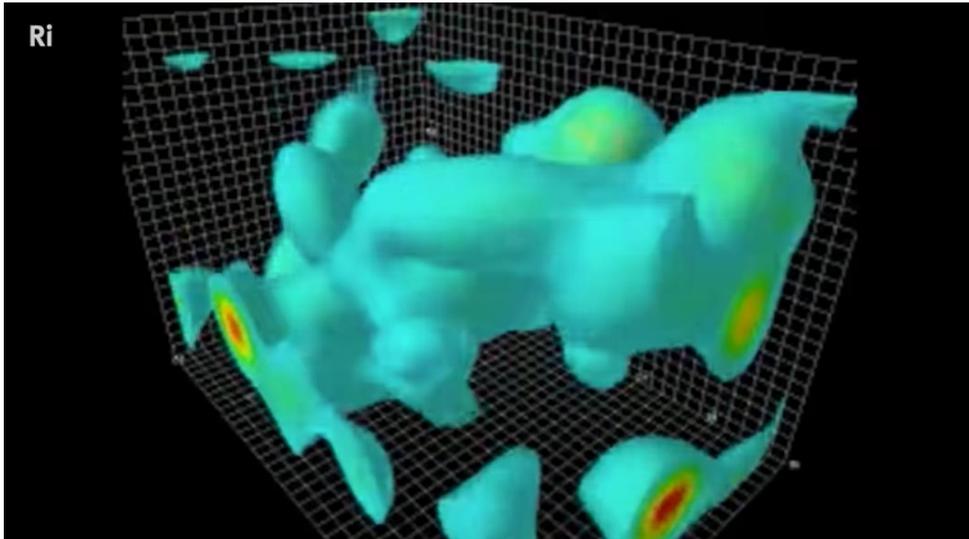
Donc, ce que je veux faire dans le reste de cet exposé, c'est vous dire où cette vision nous mène. Je veux vous dire ce que cela signifie que nous ne sommes pas faits de particules.

Nous sommes faits de champs.

Et je veux vous dire ce que nous pouvons faire avec cela, et comment nous pouvons mieux comprendre l'univers qui nous entoure.

Voici donc la première chose. Prenez une boîte et sortez tout ce qui existe de cette boîte. Sortez toutes les particules de la boîte, tous les atomes de la boîte. Ce qui vous reste est **un pur vide.**

Et voici à quoi ressemble **le vide**.



Le vide.

Donc, ce que vous voyez ci-dessus est une simulation informatique utilisant notre meilleure théorie physique de quelque chose appelé le **modèle standard**, que je présenterai plus tard. Mais c'est une simulation informatique d'absolument 'rien'. C'est un espace vide.

Un espace littéralement vide sans rien dedans. C'est la chose la plus simple que vous puissiez imaginer dans l'univers.

Et vous pouvez voir qu'un **espace vide** est un endroit intéressant,. Ce n'est pas terne et ennuyeux. Ce que vous voyez ici, c'est que même lorsque les particules sont supprimées, **le champ existe toujours**. Le champs est là. Mais qui plus est, le champ est régi par les règles de la mécanique quantique. Et il y a un principe en mécanique quantique, qui s'appelle - le principe d'incertitude de Heisenberg, qui dit

- vous n'êtes pas autorisé à rester immobile. Et le champ doit obéir à cela.

Ainsi, même lorsqu'il n'y a rien d'autre, le champs bouillonne et fluctue constamment d'une manière très compliquée. Ce sont des choses que nous appelons les **fluctuations quantiques du vide**.

Et voilà donc à quoi ressemble le néant du point de vue de nos théories physiques actuelles. Il faut dire qu'il s'agit d'une simulation informatique. Cela ressemble un peu à un dessin animé, mais c'est en fait une simulation

informatique assez puissante, et cela a pris beaucoup de temps à faire.

Mais ce ne sont pas que des théories. Ces fluctuations quantiques qui existent dans le « *vide pur* » sont des choses **que nous pouvons mesurer**. Il y a quelque chose qui s'appelle la *force Casimir*. La force de Casimir est une force entre deux plaques de métal qui se rapprochent essentiellement parce qu'il y a plus de ce genre de choses à l'extérieur qu'à l'intérieur. Sachez que ceux-ci sont réels. Ce sont des choses que nous pouvons mesurer. Elles se comportent exactement comme nous prévoyons qu'elles le feraient à partir de nos théories.

Cela n'est encore rien. Cela m'amène au côté plus mathématique de mon exposé. Parce qu'il y a un défi là-dedans. C'est la chose la plus simple que nous puissions imaginer dans tout l'univers, et pourtant c'est compliqué. C'est étonnamment compliqué. Cela ne devient pas plus facile.

Vous savez, si vous voulez maintenant comprendre, non pas le « rien », mais uniquement une seule particule, eh bien, c'est beaucoup plus compliqué que vous ne le pensez. Et si vous voulez comprendre comment 10^{23} particules font toutes des choses intéressantes, c'est vraiment, vraiment beaucoup plus compliqué que cela.

Il y a donc un problème -- mon problème, pas le vôtre -- à aborder cette description fondamentale de l'univers : c'est que c'est difficile.

Les mathématiques que nous utilisons pour décrire les *champs quantiques*, pour décrire tout ce dont nous sommes faits en termes de champs quantiques, sont considérablement plus difficiles que les mathématiques qui surviennent dans n'importe quel autre domaine de la physique ou des sciences. C'est vraiment difficile. Je peux mettre cela dans une certaine perspective.

Il y a une liste de six problèmes ouverts en mathématiques.

Ils sont considérés comme les six problèmes les plus difficiles en mathématiques. Il y en avait sept, mais un génie russe en a résolu un. Il en reste donc six. Vous gagnez un million de dollars si vous pouvez résoudre l'un

de ces problèmes. Si vous connaissez un peu les mathématiques, ce sont des choses comme l'hypothèse de Riemann, ou P contre MP.

Ce sont des problèmes notoirement difficiles et c'est l'un de ces six problèmes. Vous gagnez un million de dollars si vous pouvez comprendre cela. Alors qu'est-ce que cela signifie? Cela ne signifie pas que vous pouvez construire un gros ordinateur et simplement démontrer qu'ils sont là. Cela signifie que : pouvez-vous comprendre à partir des premiers principes en résolvant les équations, les modèles qui émergent dans ces fluctuations quantiques ?

C'est un problème extraordinairement difficile. Vous savez, c'est écrire le genre de chose que je fais. Je ne connais pas une seule personne au monde qui travaille réellement sur ce problème. C'est tellement difficile. Nous ne savons même pas vraiment comment commencer à comprendre ce genre d'idées dans la *théorie quantique des champs*.

Ce thème sur les mathématiques étant un défi est quelque chose qui va revenir plus tard dans l'exposé. J'aimerais donc juste faire une petite diversion pendant quelques minutes et vous donner une idée de ce que nous pouvons faire mathématiquement et de ce que nous ne pouvons pas faire mathématiquement. Juste pour vous dire en quelque sorte quel est l'état d'avancement en termes de compréhension de ces théories appelées **théories quantiques des champs qui sous-tendent notre univers**.

Il y a donc des moments où nous comprenons extrêmement bien ce qui se passe avec les champs quantiques. Et cela se produit essentiellement lorsque ces fluctuations sont très calmes et apprivoisées, lorsqu'elles ne sont pas sauvages et fortes. Ceux-là sont grands. Mais quand ils sont beaucoup plus calmes, quand le vide ressemble beaucoup plus à un étang calme qu'à une tempête déchaînée, dans ces cas-là, nous pensons vraiment que nous comprenons ce que nous faisons.

Pour illustrer cela, je veux juste vous donner cet exemple.

Donc ce nombre "**g**" (*voir image ci-dessous*) est une propriété particulière de la

particule électron.

Je vais vous expliquer rapidement de quoi il s'agit.

Sometimes we understand it...

$$g = 2.0023193043617 \pm 3$$

$$g = 2.00231930436...$$

L'électron est une particule, et il s'avère que l'électron tourne. Il orbite un peu comme les orbites terrestres. Et il a un axe de rotation.

Et vous pouvez changer l'axe de cette rotation. Et la façon dont vous le changez, c'est que vous prenez un champ magnétique comme celui-ci. Et en présence d'un champ magnétique, l'électron va commencer à tourner. L'électron restera au même endroit, mais tournera. Et puis l'axe de rotation tournera lentement comme ça. C'est ce qu'on appelle une précession.

La Vitesse de précession de l'axe de la rotation est donnée par ce nombre ici. Ce n'est pas la chose la plus importante dans l'ensemble. Cependant, historiquement, cela a été extrêmement important dans l'histoire de la physique, car il s'avère que c'est un nombre que vous pouvez mesurer très, très précisément en faisant des expériences. Ce nombre a en quelque sorte servi de terrain d'essai pour nous de voir à quel point nous comprenons les théories qui sous-tendent la nature, et en particulier la *théorie quantique des champs*. Alors laissez-moi vous dire ce que vous regardez ici.

Le premier nombre est le résultat de nombreuses décennies d'expériences minutieuses mesurant très, très précisément cette caractéristique de l'électron. C'est ce qu'on appelle le *moment magnétique*, pour ce que ça vaut. Et le deuxième nombre est le résultat de nombreuses décennies de calculs très tortueux assis avec un stylo et du papier en essayant de prédire à partir des premiers principes de la *théorie quantique des champs* quel devrait être le

moment magnétique des électrons. Et vous pouvez le voir, c'est tout simplement spectaculaire. Il n'y a rien de tel ailleurs dans la science avec un accord entre le calcul théorique et les mesures expérimentales. Je pense que ce sont 12 ou 13 chiffres significatifs.

C'est vraiment étonnant. Dans n'importe quel autre domaine de la science, vous sauteriez de joie si vous réussissiez les deux premiers chiffres. L'économie, même pas ça. [RIRE] Juste que c'est là où nous en sommes en physique des particules dans un bon jour où nous comprenons vraiment ce que nous faisons. C'est nettement mieux que n'importe quel autre domaine de la science - 12 chiffres significatifs !!

Mais cela, bien sûr, je vous l'ai montré parce que c'est notre meilleur résultat. Il existe de nombreux autres résultats qui sont loin d'être aussi bons. Et la difficulté survient lorsque ces *fluctuations quantiques du vide* commencent à devenir de plus en plus sauvages et fortes.

Alors laissez-moi vous donner un exemple. Il devrait nous être possible de nous asseoir et de calculer à partir des premiers principes la **masse** du **proton**. Nous avons les équations.

Tout devrait être là. Nous devons juste travailler dur et déterminer quelle est la **masse du proton** simplement en faisant des calculs. Nous essayons de le faire depuis environ 40 ans. Nous pouvons l'obtenir avec une précision d'environ 3 %. Ce qui n'est pas mal. Nous sommes à 3% du but.

Mais nous devrions être beaucoup, beaucoup mieux. Nous devrions en quelque sorte pousser plus loin ces niveaux de précision. Et la raison en est très simple. Nous avons la bonne équation. Nous sommes à peu près sûrs de résoudre la bonne équation. C'est simplement que nous ne sommes pas assez intelligents pour le résoudre.

40 ans, avec les ordinateurs les plus puissants du monde et beaucoup, beaucoup de gens intelligents. Et nous n'avons pas réussi à comprendre cela.

Il y a d'autres situations dont je ne vous parlerai pas où nous ne démarrons même pas.

Il y a des situations où, pour des raisons assez subtiles, nous ne pouvons pas utiliser les ordinateurs pour nous aider, et nous n'avons tout simplement aucune idée de ce que nous faisons. C'est donc une situation un peu étrange.

Nous avons ces théories de la physique. Ce sont les meilleures théories que nous ayons jamais développées, comme vous pouvez le voir ici. Mais en même temps, ce sont aussi les théories que nous comprenons le moins et c'est pour progresser que nous avons en quelque sorte cet étrange équilibre entre augmenter notre compréhension théorique et trouver comment l'appliquer aux expériences que nous faisons. Et encore une fois, c'est un thème sur lequel je reviendrai à la fin de la conférence. D'accord. Jusqu'ici, j'ai parlé un peu de manière générale de ce dont nous sommes faits.

Et c'est la ligne de chute pour le point à mi-chemin de l'exposé.

Vous êtes tous faits de champs quantiques, et je ne les comprends pas.

Je ne les comprends pas aussi bien que je pense que je devrais. Donc, ce que je veux faire maintenant, c'est entrer un peu plus dans les détails. Je veux vous dire exactement de quoi sont faits les champs quantiques. En fait, je vais vous dire exactement quels champs quantiques existent dans l'univers.

La bonne nouvelle, c'est qu'il n'y en a pas beaucoup. Alors je vais simplement vous les nommer tous. Nous avons donc commencé par un *tableau périodique*.

Voici le nouveau tableau périodique.

Il est bien plus simple, et bien mieux.

The new periodic table



Il y a les **trois particules** dont nous sommes tous faits :

- **l'électron** et les deux quarks :
- **quark up** et le
- **quark down**.

Et comme je l'ai souligné, les particules ne sont pas fondamentales. Ce qui est vraiment fondamental, c'est le **champs** qui les sous-tend. Et puis il s'avère qu'il y a

une quatrième particule dont je n'ai pas parlé jusqu'ici, qu'on appelle :

- **neutrino**.

Ce n'est pas important dans ce dont nous sommes faits, mais cela joue un autre rôle important ailleurs dans l'univers. **Ces neutrinos sont partout**. Vous ne les avez jamais remarqués, mais depuis que j'ai commencé cette conférence, quelque chose comme 10^{14} d'entre eux ont coulé à travers le corps de chacun d'entre vous, autant venant d'en haut depuis l'espace que venant d'en bas, parce qu'ils coulent à travers la terre et continuent ensuite. Ils ne sont pas très sociables. Ils n'interagissent pas. C'est donc de cela que tout est fait.

Les quatre particules qui forment le socle de notre univers sont :

- L'électron
- Le Quark up
- Le Quark down
- Le neutrino

Sauf que quelque chose d'assez étrange s'est produit. Pour une raison que nous ne comprenons pas du tout, la nature a choisi de prendre ces quatre particules et de les reproduire deux fois. Nous avons donc établi une liste de tous les champs qui composent les particules de notre univers. Alors qu'est-ce qu'on regarde ici ?

La nouvelle table périodique.

The new periodic table

electron 1	electron neutrino 10^{-6}	up quark 8	down quark 4
muon 200	muon neutrino 10^{-6}	strange quark 200	charm quark 2000
tau 3000	tau neutrino 10^{-6}	bottom quark 8000	top quark 340,000

L'électron.(à gauche en haut)

Il existe deux autres particules comme l'électron, qui se comportent en tous points exactement de la même manière que l'électron, sauf qu'elles sont plus lourdes. Nous les appelons

- **le muon** qui a une masse d'environ 200 fois l'électron, et
- **le tau**, qui est 3 000 fois plus lourde que l'électron.

Pourquoi sont-ils là ?

Nous n'en avons aucune idée. C'est l'un des mystères de l'univers.

Il y a aussi deux autres neutrinos.

- **Neutrino muon**
- **Neutrino tau**

Il y a donc trois neutrinos au total.

Et les deux quarks que nous connaissions au début sont maintenant rejoints par quatre autres quarks que nous appelons

- **quark étrange** (ou *strange quark* ou *quark 's'*)
- **quark charmé** (ou *quark de charme* ou *quark 'c'*)

Et puis au moment où nous sommes arrivés ici, nous avons vraiment manqué d'inspiration pour nommer les suivants. Nous les avons donc appelé

- le **quark bottom** (ou le *quark beau* ou le *quark 'b'*)
- le **quark top**. (ou *quark 't'*)

Alors je dois insister. Nous comprenons très, très bien les choses qui vont dans cette direction.

On comprend pourquoi ils viennent par groupe de quatre. Nous comprenons pourquoi ils ont les propriétés qu'ils ont.

Nous ne comprenons pas du tout pourquoi cela se passe ainsi. Nous ne savons pas pourquoi il y en a trois plutôt que deux ou 17. C'est un mystère.

Mais c'est tout.

C'est tout ce qu'il y a dans l'univers.

Tout ce dont vous êtes fait, sont ces trois-là en haut.

Et ce n'est que lorsque vous vous dirigez vers des situations plus exotiques, comme les collisionneurs de particules, que nous avons besoin des autres en bas.

Mais tout ce que nous avons jamais vu peut être fait à partir de ces

- **12 particules** et
- **12 champs**.

Ces 12 champs interagissent les uns avec les autres, et ils interagissent à travers **quatre forces** différentes.

Deux d'entre eux sont extrêmement familiers.

Ce sont

- **la force de gravité** et
- **la force électromagnétique**.

Mais il y a aussi deux autres forces qui n'opèrent qu'à la petite échelle d'un noyau. Il y a donc quelque chose qui s'appelle -

- **la force nucléaire forte**, qui maintient les quarks ensemble à l'intérieur des

protons et des neutrons. Et il y a quelque chose qui s'appelle

- **la force nucléaire faible**, qui est responsable de la désintégration radioactive et entre autres de faire briller le soleil.

Encore une fois, **chacune de ces forces est associée à un champ**. Alors Faraday nous a parlé du

- champ électromagnétique, mais il y a des champs associés à cela, qui s'appellent

- **le champ de gluons** et

- **le champ W** et

- **Le champ de bosons Z**.

-Le champ de gravité :

Il y a aussi un champ associé à la gravité. Et c'était vraiment la grande perspicacité d'Einstein dans le monde. Le **champ associé à la pesanteur** s'avère être

- **l'espace et le temps** lui-même. Donc, si vous n'aviez jamais entendu cela auparavant, sachez que c'est la plus courte introduction au monde à la relativité générale. Et je ne dirai rien d'autre à ce sujet. Je vais juste vous laisser découvrir celui-là par vous-même.

Voici donc l'univers dans lequel nous vivons avec :

- **Le champs de la matière**

Il y a **12 champs** qui donnent de la matière que j'appelle "le champ de la matière", et

-**Les forces**

Il y a **quatre autres champs** qui sont les **forces**.

Le monde dans lequel nous vivons est une combinaison de

16 champs qui interagissent tous ensemble de manière intéressante.

C'est donc à cela que vous devriez penser pour vous faire une vision de ce qu'est l'univers.

L'univers est rempli de ces champs, de substances fluides.

Notamment :

De **12 champs de matière et de quatre forces.**

Lorsque l'un des **champs de matière** commence à osciller et à onduler, supposons que le champ d'électrons commence à onduler de haut en bas, car il y a des électrons là-bas. Cela lancera l'un des autres champs. Cela déclenchera, disons, le **champ électromagnétique**, qui, à son tour, oscillera et ondulera. Il y aura de la **lumière** qui sera **émise**.

Donc ça va osciller un peu. À un moment donné, cela commencera à interagir avec le **champ de quarks**, qui à son tour oscillera et ondulera.

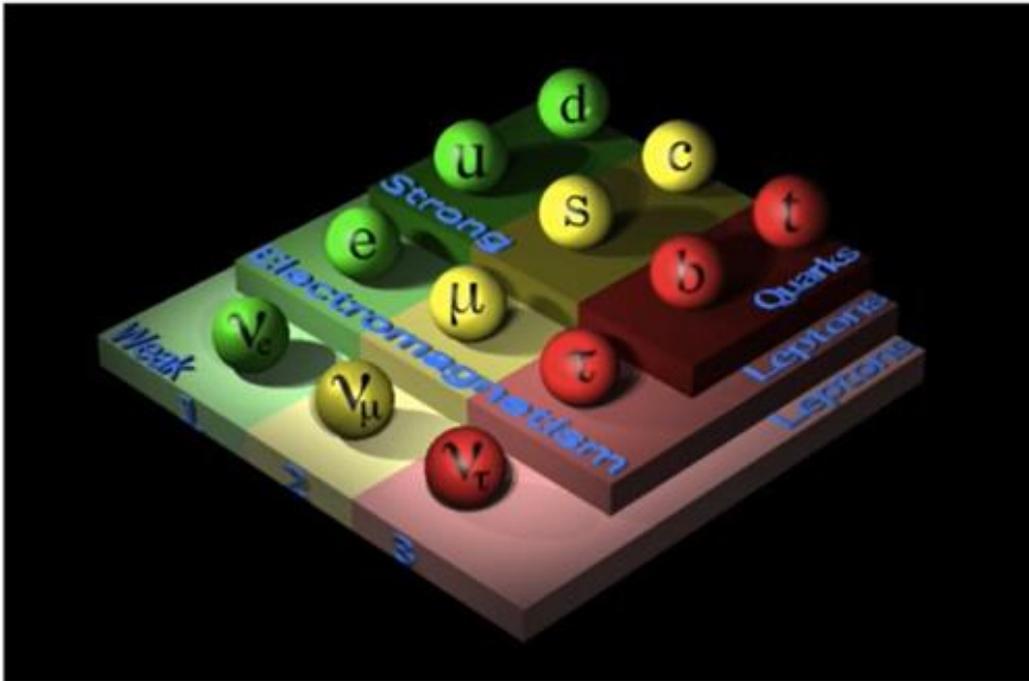
Et l'image avec laquelle nous nous retrouvons est cette danse harmonieuse entre tous ces champs, s'emboîtant, se balançant, se déplaçant d'un côté et de l'autre. C'est l'image que nous avons des lois fondamentales de la physique. Nous avons une théorie qui sous-tend tout cela. C'est le summum de la science.

C'est la plus grande théorie que nous ayons jamais inventée. Nous lui avons donné le nom le plus étonnamment nul dont vous ayez jamais entendu parler. Nous l'appelons **le modèle standard**. Lorsque vous entendez le nom *modèle standard*, cela semble fastidieux et banal.

Il devrait vraiment être remplacé par *La plus grande théorie de l'histoire de la civilisation humaine*.

Le Model Standard.

The standard model



C'est ce que nous avons considéré.

Donc c'est tout, sauf que ça ne l'est pas tout à fait. En fait, je viens d'omettre un champ. Il y a une chose supplémentaire que nous savons, qui est devenue assez célèbre ces dernières années. C'est un champ qui a été suggéré pour la première fois dans les années 1960 par un physicien écossais du nom de Peter Higgs.

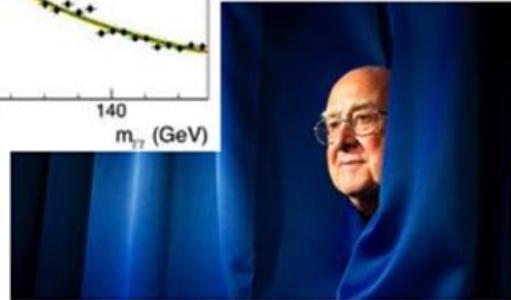
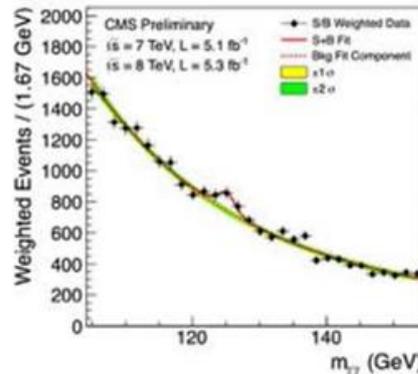
Et dans les années 1970, il était devenu partie intégrante de notre façon de voir l'univers. Mais pendant très longtemps, nous n'avions pas de preuve expérimentale directe que ce champ existait, où la preuve expérimentale directe signifie que nous faisons onduler ce *champ de Higgs* pour voir une particule qui lui est associée. Mais cela a changé.

Cela a changé de manière célèbre le 4 juillet 2012 au LHC (*Large Hadron Collider construit au Cern - Suisse - c'est le collisionneur de particules le plus grand et le plus énergétique au monde.*)

Ce sont les deux expériences du LHC qui l'ont découvert. Ils ont en quelque sorte la taille d'une cathédrale et sont remplis d'électrons.

Le Champ de Higgs.

The Higgs field



The particle is the “Higgs boson”. It is about 2.4×10^6 heavier than the electron

Ce sont des choses étonnantes.

- L'image ci-dessus en haut à gauche s'appelle Atlas.
- L'autre ci-dessus en bas à gauche s'appelle CMS.

Cette particule de Higgs ne dure pas longtemps. La particule de Higgs dure environ 10 à moins 22 secondes. Ce n'est donc que vous pouvez la voir, en prendre une photo pour la mettre sur Instagram.

C'est un peu plus subtil. Voici donc les données, et cette petite bosse ici (sur la graphique) est la façon dont nous savons que cette particule de Higgs appelée « le Higgs Boson » a existé. A droite en bas se trouve une photo de Peter Higgs.

C'était l'élément constitutif final.

Vous savez, c'était important. C'était vraiment un gros problème.

C'était important pour deux raisons.

- 1) La première est que c'est ce qui est responsable de ce que nous appelons la "masse" dans l'univers. Ainsi, les propriétés de toutes les particules, des

choses comme

- **charge électrique** et

- **masse**,

sont vraiment une déclaration sur la façon dont leurs champs interagissent avec d'autres champs.

Ainsi, la propriété que nous appelons **charge électrique d'un électron** est une déclaration sur la façon dont le **champ électrique interagit avec le champ électromagnétique**.

Et la propriété de sa **masse** est la déclaration sur la **façon dont elle interagit avec le champ de Higgs**. Il était donc vraiment nécessaire de comprendre cela pour comprendre **la signification de la masse** dans l'univers. C'était donc un gros problème.

2) L'autre raison pour laquelle c'était un gros problème, c'est que c'était la dernière pièce de notre puzzle. Nous avons cette théorie que nous appelions le *modèle standard*. Nous l'avons depuis les années 1970. C'était la dernière chose que nous devions découvrir pour être sûr que cette théorie est correcte. Ce qui est étonnant, c'est que cette particule a été prédite dans les années 1960. -cela faisait 50 ans qu'on attendait. Nous l'avons finalement créé au CERN. Il se comporte exactement comme nous le pensions. Il se comporte absolument parfaitement comme nous l'avons prédit en utilisant ces théories.

Ce qui suit va être la partie effrayante de la conversation.

Je vous ai parlé de cette théorie. Et j'ai agité mes mains prétendant que je suis un champ. Laissez-moi vous dire ce qu'est vraiment la théorie. Laissez-moi juste vous montrer ce que nous faisons.

Voici l'équation du modèle standard de la physique.

The theory of everything (so far)

$$Z = \int \mathcal{D}(\text{Fields}) \exp \left(i \int d^4x \sqrt{-g} (R - F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} - W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} + \sum_i \bar{\psi}_i \not{D} \psi_i + \mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H - V(H) - \lambda_{ij} \bar{\psi}_i H \psi_j) \right)$$

Je ne m'attends pas à ce que vous le compreniez, notamment parce qu'il y a des parties de cette équation que **personne sur la planète ne comprend**.

Mais néanmoins, je veux vous la montrer pour la raison suivante.

Cette équation prédit correctement le résultat de chaque expérience que nous avons faite en science. Tout est contenu dans cette équation. C'est vraiment le summum de l'approche réductionniste de la science. Tout est ici.

J'admets que ce n'est pas l'équation la plus simple du monde. Mais ce n'est pas non plus la plus compliqué. Vous pouvez la mettre sur un t-shirt si vous le souhaitez. En fait, si vous allez au CERN, vous pouvez acheter un t-shirt avec cette équation dessus. Permettez-moi de vous donner une idée de ce que nous envisageons.

1) La 1^{ière} partie a été écrite par Albert Einstein et décrit **la gravité**.

Cela signifie que si vous pouviez résoudre cette toute petite partie de l'équation, juste ce **R**, vous pouvez, par exemple, prédire à quelle vitesse une pomme tombe d'un arbre, ou le fait que les orbites de la planète autour du soleil forment des ellipses. Ou vous pouvez prédire ce qui se passe lorsque deux énormes trous noirs entrent en collision et forment un nouveau trou noir, envoyant des ondes gravitationnelles à travers l'univers. Ou en fait, vous pouvez prédire comment l'univers entier lui-même se dilate. Tout cela vient de la résolution de cette petite partie de l'équation.

2)Le terme suivant de l'équation a été écrit par James Clerk Maxwell, et il vous dit tout sur **l'électromagnétisme**.

Donc, toutes les expériences que Faraday a passées toute sa vie à faire dans ce bâtiment -- en fait, toutes les expériences sur plusieurs siècles, de Coulomb à Faraday, à Hertz jusqu'aux développements modernes des lasers, tout -- est dans cette toute petite partie de l'équation.

Il y a donc une certaine puissance dans les prochaines équations.

3)C'est l'équation qui régit **la force nucléaire forte, la force nucléaire faible**.

C'est une équation qui a été écrite pour la première fois par un physicien britannique appelé Paul Dirac. Il décrit le sujet.

Il décrit ces 12 particules qui composent la matière. Étonnamment, chacun d'eux obéit exactement à la même équation.

4)Ensuite, nous avons les équations de Peter Higgs. Et c'est une équation qui vous dit comment **la matière interagit avec la particule de Higgs**.

Donc tout est ici, dans cette équation. C'est vraiment une réussite étonnante, mais c'est aussi la limite actuelle de nos connaissances. Nous n'avons jamais fait d'expérience qui ne puisse être expliquée par cette équation. Et nous n'avons jamais trouvé comment cette équation cesse de fonctionner.

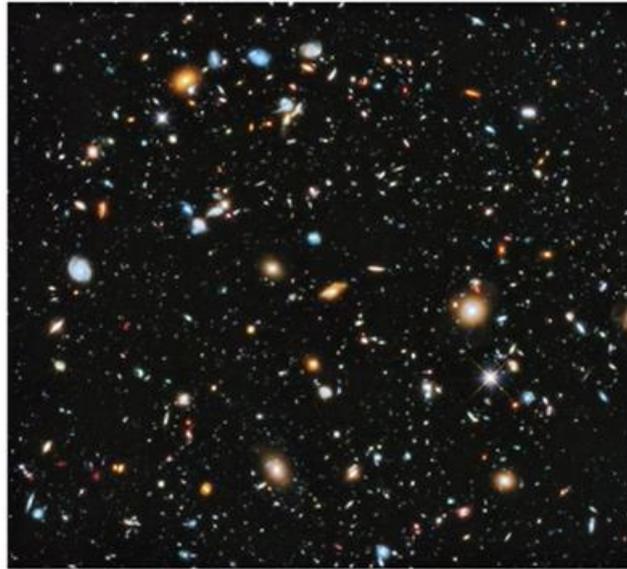
C'est donc la meilleure chose que nous ayons actuellement.

Matière Sombre et Energie Sombre.

Cependant, nous voulons faire mieux, car nous savons avec certitude qu'il y a des choses qui ne s'expliquent pas par cela. Et la raison pour laquelle nous le savons, c'est que même si cela explique chaque expérience que nous avons jamais faite ici sur Terre, si nous regardons dans le ciel, il y a des choses supplémentaires qui restent un mystère. Donc, si nous regardons dans l'espace, il y a, par exemple, des particules invisibles là-bas.

En fait, il y a beaucoup *plus de particules invisibles que de particules visibles*.
Nous les appelons **matière sombre**.

There's stuff we're missing



Dark matter? Dark energy? Inflation?

Nous ne pouvons pas les voir, évidemment, parce qu'ils sont invisibles. Mais nous pouvons voir leurs effets. Nous pouvons voir leurs effets dans la façon dont les galaxies tournent ou dans la façon dont elles courbent la « lumière » autour des galaxies. Ils sont là-bas.

Nous ne savons pas ce qu'ils sont. Il y a des choses encore plus mystérieuses. Il y a quelque chose qui s'appelle **l'énergie sombre**, qui se répand dans tout l'espace. C'est aussi une sorte de champ, bien que nous ne le comprenions pas, qui fait que **tout dans l'univers repousse tout le reste**. Autres choses.

Nous savons qu'au début des premières secondes, même avant cela, les premières fractions de seconde après le Big Bang, l'univers a connu une phase d'expansion très rapide que nous appelons **l'inflation**.

Nous savons que c'est arrivé, mais cela ne s'explique pas par cette équation

que je viens de vous montrer. C'est donc le genre de choses que nous devons comprendre si nous voulons aller de l'avant et décider quelles sont les prochaines lois de la physique qui vont au-delà du *modèle standard*. Je pourrais passer des heures à en parler. Mais je vais me concentrer uniquement sur le dernier.

Inflation.

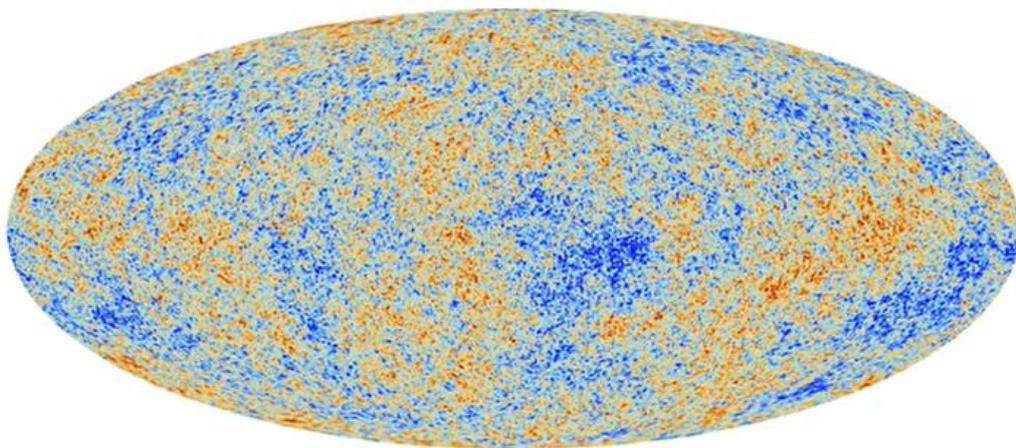
Je vais vous parler un peu de « l'inflation ».

L'univers a donc 8 milliards d'années. Et nous le comprenons assez bien -- mais, nous ne comprenons pas du tout comment cela a commencé. Nous ne comprenons pas ce qui a déclenché tout cela au temps t égal à 0. Mais nous comprenons assez bien ce qui s'est passé après le démarrage. Et on sait notamment que pendant les 380 000 premières années de l'univers, elle était remplie d'une boule de feu. Et nous le savons avec certitude parce que nous avons vu la boule de feu. En fait, nous l'avons vu, et nous en avons pris une photo.

C'est ce qu'on appelle le *rayonnement de fond cosmique des micro-ondes*, mais un bien meilleur nom est **la boule de feu qui a rempli l'univers** quand il était beaucoup plus jeune.

La boule de feu du Big Bang.

The Fireball of the Big Bang



La boule de feu se refroidit. Sa lumière coule à travers l'univers depuis 13,8 milliards d'années et on peut le voir.

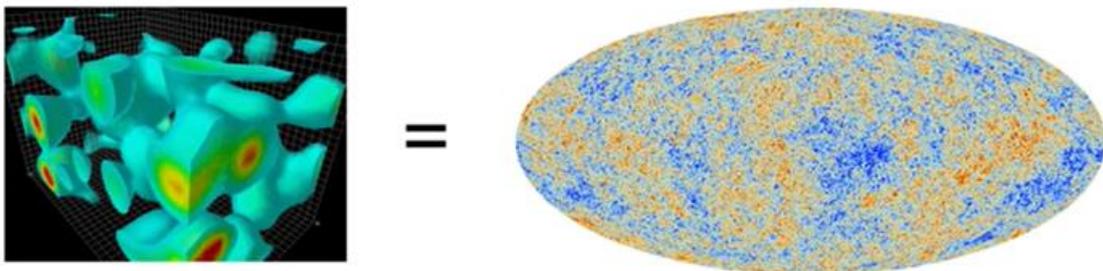
Nous pouvons en prendre cette photo. Et nous pouvons très bien comprendre ce qui se passait dans ces premiers instants de l'univers. Comme vous pouvez le voir, cela ressemble littéralement à une boule de feu. Il y a des parties rouges qui sont plus chauds. Il y a des parties bleus qui sont plus froids. Et en étudiant ce scintillement que vous pouvez voir sur cette image, nous obtenons beaucoup d'informations sur ce qui se passait il y a 13,8 milliards d'années lorsque l'univers était un bébé. L'une des principales questions que nous voulons poser est

qu'est-ce qui a causé le scintillement de la boule de feu ?

Et nous avons une réponse à cela. Nous avons une réponse, qui je pense est l'une des choses les plus étonnantes de toute la science. Il s'avère que bien que la boule de feu ait duré 380 000 ans, la cause de ce scintillement n'a pas pu se produire pendant la grande majorité de cette période. Quelle que soit la cause du scintillement de cette boule de feu, cela **s'est produit dans les premières fractions de seconde** après le Big Bang.

Quel est le champ quantique que nous voyons ici ?

What quantum field are we seeing here?



Et ce que c'était, c'était la chose suivante. Lorsque l'univers était très, très jeune, peu après le Big Bang, il n'y avait pas de particules, mais il y avait :

- **des champs quantiques**, car les champs quantiques étaient partout. Et il y avait

- **les fluctuations quantiques du vide.**

Et ce qui s'est passé, c'est que l'univers s'est étendu très, très rapidement, et il a pris ces fluctuations quantiques sur le fait. Ainsi, les fluctuations quantiques se sont étendues à travers tout le ciel, où elles se sont figées. Et ce sont ces fluctuations du vide qui sont les ondulations que vous voyez dans la boule de feu.

C'est donc une histoire étonnante que *les fluctuations quantiques du vide aient eu lieu 10 à moins 30^{ième} de secondes après le Big Bang*. Elles étaient absolument microscopiques. Et maintenant, nous les voyons s'étendre à travers l'univers entier, s'étendre sur 20 milliards d'années-lumière à travers le ciel. C'est ce que vous voyez ici. Si vous faites les calculs pour cela, cela correspond parfaitement à ce que vous voyez ici. C'est donc un autre des grands triomphes de la **théorie quantique des champs**.

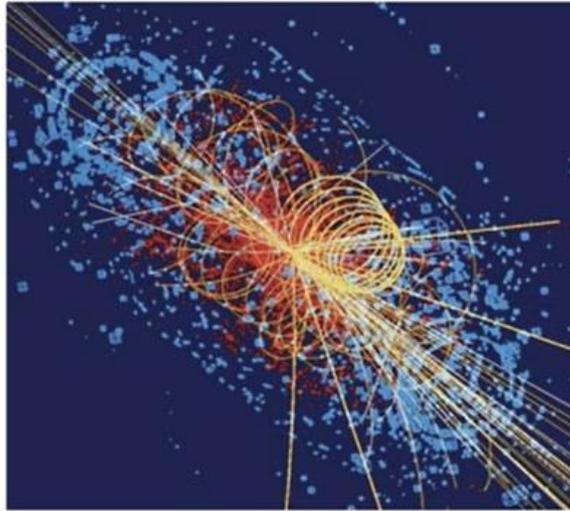
Mais cela laisse beaucoup de questions. Le plus important est, quel champ voyons-nous ici ? Quel est ce champ qui est imprimé sur le rayonnement de fond ? Et la réponse est que nous ne le savons pas. Le seul des champs du *modèle standard* que cela pourrait être est celui de Higgs. Mais la plupart d'entre nous pensent que ce n'est pas le Higgs, mais probablement quelque chose de nouveau.

Ce que nous aimerions faire à l'avenir, c'est obtenir une bien meilleure image de cette boule de feu, en particulier obtenir la polarisation de la lumière. Et en obtenant une image de cela, nous pouvons mieux comprendre les propriétés de ce **champ qui fluctuait dans l'univers primitif**.

Ce regard vers l'avenir est l'un des meilleurs espoirs que nous ayons pour aller au-delà du *modèle standard* et comprendre la nouvelle physique.

Dans les 10 dernières minutes, cependant, j'aimerais vous ramener sur terre.

Meanwhile, back on Earth



Nous expérimentons beaucoup ici sur Terre où nous essayons toujours de faire mieux, où nous essayons également d'aller *au-delà du modèle standard de la physique*, au-delà de cette *équation* pour comprendre ce qui est nouveau.

Et il y en a beaucoup, mais le plus important est celui que j'ai déjà mentionné. C'est le **LHC - Cern**.

Le LHC a découvert le '**boson de Higgs**' en 2012. Et peu de temps après, il a fermé pendant deux ans. Ils y ont fait une mise à niveau. Et en 2015, le LHC a redémarré avec deux fois plus d'énergie qu'il n'en avait lorsqu'il a découvert le 'boson de Higgs'.

Il y avait deux buts pour cela. L'objectif était :

- premièrement de mieux comprendre le *Boson de Higgs*, ce qu'il a fait de manière fantastique, et
- deuxièmement, de découvrir une nouvelle physique qui se situe au-delà du *Boson de Higgs*. Une nouvelle physique au-delà du **modèle standard**.

Donc, avant de vous dire ce qu'il a vu, permettez-moi de vous faire part de certaines des idées que nous avons, de certaines de nos attentes et d'espoirs quant à ce qui se passerait à l'avenir.

Voici donc à nouveau notre équation préférée :

la Théorie de tout (jusqu'ici).
The theory of everything (so far)

$$Z = \int \mathcal{D}(\text{Fields}) \exp \left(i \int d^4x \sqrt{-g} (R - F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - G_{\mu\nu} G^{\mu\nu} - W_{\mu\nu} W^{\mu\nu} + \sum_i \bar{\psi}_i \not{D} \psi_i + \mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H - V(H) - \lambda_{ij} \bar{\psi}_i H \psi_j) \right)$$

L'idée a toujours été la suivante. Vous savez, si vous étiez un scientifique de l'époque victorienne, et que vous reveniez en arrière et que vous regardiez le *tableau périodique des éléments*, vous vous rendriez compte qu'il y a des modèles là-dedans qui donnent une idée de la structure qui se trouve en dessous. Ces chiffres qui se répètent.

Où, si vous êtes très intelligent, vous pourriez commencer à vous réaliser que, en effet, il y a quelque chose de plus profond que ces éléments. Donc, notre espoir en tant que théoriciens est d'examiner cette équation et de voir si nous pouvons peut-être trouver des modèles dans cette équation qui suggèrent qu'il pourrait y avoir quelque chose de plus profond qui se cache en dessous.

Et cela se trouvent là, dans cette équation.

Alors laissez-moi vous donner un exemple.

- Ceci est l'équation qui décrit la **force de l'électricité et du magnétisme**.
- Et ceci est presque la même chose que les équations qui décrivent **la force nucléaire forte et faible**. Comme vous pouvez le voir, je viens de changer les lettres.

C'est un peu plus compliqué que ça, mais ce n'est pas beaucoup plus compliqué que ça. **Les trois forces se ressemblent vraiment**.

Alors vous pourriez vous demander que peut-être qu'il n'y a pas trois forces différentes dans l'univers.

Peut-être que **ces trois forces ne sont en fait qu'une seule force** ?

Et que si nous pensons qu'il y a trois forces, c'est parce que nous regardons

cette **force unique** sous des angles légèrement différents ? Peut-être?

Voici une autre chose qui est incroyable.

Ce sont les équations des **12 champs de matière de l'univers** : les neutrinos, les électrons et les quarks. **Chacun d'eux obéit exactement à la même équation.**

Chacun d'eux obéit à l'équation de Dirac.

Alors encore une fois, vous vous demandez que peut-être, peut-être **qu'il n'y a pas 12 champs différents ?**

Peut-être qu'ils sont tous le même champ et la même particule, et le fait qu'ils semblent différents est, encore une fois, peut-être simplement parce que nous les regardons sous des angles légèrement différents ? Peut être?

IDEES D'UNIFICATION

Ideas of \bar{u} nification

$$Z = \int \mathcal{D}(\text{Fields}) \exp \left(i \int d^4x \sqrt{-g} (R - F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - G_{\mu\nu} G^{\mu\nu} - W_{\mu\nu} W^{\mu\nu} + \sum_i \bar{\psi}_i \not{D} \psi_i + \mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H - V(H) - \lambda_{ij} \bar{\psi}_i H \psi_j) \right)$$

Donc, ces idées que j'ai suggérées portent le nom **d'unification**.

L'idée que les trois forces sont en fait combinées en une seule est ce qu'on appelle la **Grande Unification**.

Il est très facile d'écrire une théorie mathématique dans laquelle toutes ces forces ne font qu'une seule force de ce qui semble être trois de notre point de vue.

Il y a d'autres possibilités. Vous pourriez dire, eh bien

- c'est le problème, et

- ce sont les forces.

- Et les équations qui sont différentes.

Mais elles ne sont pas si différentes. Parce qu'en fin de compte, ce ne sont que des champs.

Dans ce cas vous pourriez vous demander s'il y a peut-être des manières dont **la matière et les forces sont liées les unes aux autres** ?

Eh bien, nous avons aussi une théorie pour cela.

C'est une théorie qui s'appelle

la Supersymétrie.

Et c'est une belle théorie. C'est très profond conceptuellement. Et on a l'impression que cela pourrait être juste.

Enfin, vous pourriez être vraiment, vraiment audacieux. Vous pourriez dire : Et si je combinais simplement le lot? Pour me débarrasser de tous ces termes et **n'écrire qu'un seul terme d'où tout le reste émerge** ? **La gravité, les forces, les particules, le Higgs, tout.**

Là aussi j'ai quelque chose pour vous si cela vous intéresse.

C'est ce qu'on appelle la **Théorie des cordes**. (String Theory)

Nous avons donc la possibilité d'une théorie qui contient le tout dans un seul concept. Et la question qui survient de suite est : est-ce que c'est correct ? Vous savez, il est très facile pour nous, théoriciens, d'avoir ces idées. Et je devrais dire que ces idées sont ce qui a guidé la physique théorique pendant 30 ans, mais nous voulons savoir si elles ont raison ? Et nous avons un moyen de dire qu'elles ont raison: en faisant des expériences scientifiques.

Alors je dois vous répondre que si vous voulez savoir si la **théorie des cordes** est correcte, que nous n'avons aucun moyen de la tester pour le moment.

Mais si vous voulez savoir si certaines de ces autres idées sont justes, alors cela devrait provenir du **LHC-Cern**.

La raison pour laquelle nous avons construit le LHC était :

- d'abord pour trouver le 'Boson de Higgs' et cela a marché.
- Deuxièmement, pour tester ce genre d'idées dont nous venons de parler pour voir ce qu'il y a au-delà.

Le LHC a donc fonctionné.

Il a fonctionné comme un rêve absolu. C'est une machine parfaite. Deux ans.

Voici ce qu'il a vu : **Absolument rien**. Toutes ces belles idées fantastiques que nous avons eues, aucune d'entre elles apparaissent.

Et la question suivante est : comment allons-nous y remédier? Comment allons-nous progresser dans la compréhension de la prochaine couche de physique alors que le LHC ne voit rien et que nos idées ne semblent tout simplement pas correspondre à la façon dont la nature fonctionne ?

Je dois vous dire que souvent je n'ai pas de bonne réponse à cela. J'ai l'impression que la majeure partie de ma communauté est un peu choquée par ce qui s'est passé. Il n'y a certainement pas de consensus dans la communauté pour aller de l'avant. Mais je pense qu'il y a trois réponses que différentes personnes ont eues et que j'aimerais partager avec vous. Et je pense que ces trois réponses sont raisonnables jusqu'à un certain point.

La première réponse au LHC qui ne voit rien est la suivante.

Vous les jeunes, vous êtes si pessimistes. Tout est catastrophique avec vous. Vous avez besoin d'un peu plus de patience. Vous savez, je n'ai rien vu l'année dernière, et je n'ai rien vu cette année. Mais l'année prochaine, je verrai quelque chose. Et sinon ce sera l'année prochaine, ou l'année d'après que je verrai quelque chose. Ce sont généralement mes très illustres collègues seniors qui ont ça... et vous savez quoi ? Ils pourraient bien avoir raison. Il se pourrait bien que l'année prochaine, le LHC découvre quelque chose d'étonnant, qui nous ouvre la voie vers la compréhension de la prochaine couche de réalité.

Mais il est également vrai que ces mêmes personnes prédisaient qu'on aurait déjà dû voir quelque chose.

Et c'est aussi vrai que ça ne peut plus durer longtemps. Si le LHC ne voit rien

dans, disons, une échelle de temps de deux ans, il semble très, très peu probable qu'il verra quelque chose par après. C'est toujours possible mais cela semble juste peu probable. J'espère donc de tout mon cœur que le LHC découvrira quelque chose l'année prochaine ou l'année d'après. Mais je pense que nous devons nous préparer au pire, que ce ne sera peut-être pas le cas.

Réponse numéro deux. Réponse numéro deux, qui provient également de personnes similaires, eh bien, c'est que toutes nos théories sont si belles. Elles doivent absolument être correctes, et ce dont nous avons vraiment besoin, c'est d'une machine plus grosse : 10 fois plus grand fera l'affaire. Encore une fois, ils pourraient avoir raison. Je n'ai pas de bons arguments contre ça. La réfutation évidente, cependant, est qu'une nouvelle machine coûte 10 milliards de dollars. Il n'y a pas trop de gouvernements dans le monde qui disposent de 10 milliards de dollars pour nous permettre d'explorer ces idées. Il y en a un : la Chine. Et donc si cette machine devrait être construite, elle sera construite par le gouvernement chinois.

Je pense que le gouvernement chinois trouverait extrêmement intéressant que toute la communauté des *physiciens et ingénieurs des particules*, actuellement basés au CERN et à Genève, déménage dans une ville légèrement au nord de Pékin. Je pense qu'ils considéreraient cela comme un gain politique et économique, et qu'il y a de fortes chances qu'ils décident de construire cette machine. S'ils le font, il faudra environ 20 ans pour qu'elle soit construite. Nous attendrons donc un peu plus longtemps.

Il y a une troisième réponse. Et je devrais dire que la troisième réponse est un peu le camp dans lequel je me trouve. Je devrais mentionner d'emblée que c'est spéculatif, et que ce n'est probablement pas approuvé par la plupart de mes pairs. Donc, ce n'est vraiment que mon opinion personnelle à ce stade. C'est mon point de vue là-dessus.

Or...

$$Z = \int \mathcal{D}(\text{Fields}) \exp \left(i \int d^4x \sqrt{-g} (R - F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - G_{\mu\nu} G^{\mu\nu} - W_{\mu\nu} W^{\mu\nu} + \sum_i \bar{\psi}_i \not{D} \psi_i + \mathcal{D}_\mu H^\dagger \mathcal{D}^\mu H - V(H) - \lambda_{ij} \bar{\psi}_i H \psi_j) \right)$$

maybe there are further hints in this equation that we've missed?

C'est l'équation dont nous savons qu'elle est correcte.

C'est en quelque sorte le fondement de notre compréhension.

Mais bien que nous sachions que c'est vrai, il y a énormément de choses dans cette équation que nous n'avons pas comprises.

Il y a énormément de choses pour moi qui sont encore mystérieuses dans cette équation.

Donc, bien que cette équation ait ressemblé à des suggestions **d'unification**, ce ne sont peut-être que des faux-fuyants.

Et peut-être que si nous travaillons plus dur pour essayer de mieux comprendre cette équation, nous découvrirons d'autres modèles émergent.

Donc ma réponse est, je pense que nous devrions peut-être simplement retourner à la planche à dessin et commencer à remettre en question certaines des hypothèses et des paradigmes que nous avons maintenus au cours des 30 dernières années.

Je me sens donc assez énergisé, en fait, par l'absence de résultats du LHC.

En quelque sorte, ça me fait du bien que tout le monde se soit trompé.

Vous savez bien que c'est quand on se trompe qu'on commence à progresser.

Donc je me sens assez heureux à ce sujet, et je pense qu'il y a une chance très réelle que nous puissions simplement commencer à réfléchir à des idées différentes.

Je dois dire qu'il y a même des indices ici.

Il me semble qu'il y a des indices que nous n'avons pas explorés sur les modèles mathématiques. Il y a des indices là-dedans sur les liens avec d'autres domaines de la science.

Des choses comme :

- la [physique de la matière condensée](#), qui est la science du fonctionnement des matériaux, ou

- la [science de l'information quantique](#), qui est la tentative de construire un ordinateur quantique.

Tous ces sujets fantastiques ont de nouvelles idées qui alimentent en quelque sorte le genre de questions que nous posons ici.

Je suis donc assez optimiste sur le fait qu'en allant de l'avant, nous pouvons faire des progrès, peut-être pas les progrès que nous pensions faire il y a quelques années, mais juste quelque chose de nouveau. Voilà donc le punchline de mon discours.

Le punchline est que c'est la plus grande équation que nous ayons jamais écrite.

J'espère qu'un jour, nous pourrons vous offrir quelque chose de mieux.

Merci pour votre attention.

GROUPE MEZZA VERDE.

<http://www.mezzaverde.com>