

**SÉNAT DE BELGIQUE** | **BELGISCHE  
SENAAT**

**CONFÉRENCE** | **CONFERENTIE**

**Pleins feux sur la recherche  
fondamentale et ses défis** | **Voor het voetlicht: fundamenteel  
onderzoek en zijn uitdagingen**

**avec la participation du  
Baron FRANÇOIS ENGLERT,  
Prix Nobel de physique 2013** | **met Baron FRANÇOIS ENGLERT,  
winnaar van de Nobelprijs  
natuurkunde 2013**

**14 MARS 2014** | **14 MAART 2014**



**Mot d'accueil 5**

Welkomstwoord 5

Sabine de Bethune

**Introduction 6**

Inleiding 6

Dominique Tilmans

**D'un boson à l'Univers, des particules aux satellites 8**

Van boson tot universum, van elementair deeltje tot satelliet 8

Prof. Jean-Marie Frère

**Le Big Bang de Lemaître dans la cosmologie contemporaine 12**

Satellietbeelden van Lemaîtres Big Bang 12

Prof. Thomas Hertog

**IceCube : des neutrinos venus de l'espace captifs des glaces 15**

IceCube: neutrino's uit de ruimte gevangen in het ijs 15

Prof. Catherine De Clercq

**La portée de la recherche fondamentale 19**

Het belang van fundamenteel onderzoek 19

Baron François Englert, Prix Nobel de Physique 2013

**Échange de vues 22**

Gedachtewisseling 22

**Clôture 26**

Slot 26



## Mot d'accueil Welkomstwoord

Sabine de Bethune

**Mevrouw Sabine de Bethune**, voorzitter van de Senaat. – Geachte professor Englert, geachte excellenties, beste collega's, beste liefhebbers van de wetenschap en de technologie, dames en heren, ik heet u allen welkom in het halfroond van de Senaat, dat vandaag uitzonderlijk is opengesteld voor onze Nobelprijswinnaar Fysica 2013, professor Englert.

Professor Englert, het is een grote eer u hier te mogen ontvangen. Ik verheug mij zeer over de internationale erkenning van een talent als het uwe. Deze erkenning versterkt ook de positie van het Belgische onderzoek op wereldschaal. De ontdekking van een minuscuul deeltje betekent aldus een grote eer voor ons kleine land!

En 1964 – il y a cinquante ans déjà ! –, vous avez imaginé avec feu Robert Brout qu'il existait un champ, le champ dit de Brout-Englert-Higgs, qui englobe tout ce qui est autour de nous jusqu'aux bornes les plus extrêmes de l'Univers, champ qui est né dans les premiers instants de notre monde. Toutes les particules, qui composent toute matière, acquièrent la masse à travers ce champ. Telle est l'information qui m'a été donnée et comme je ne suis pas physicienne, j'ose espérer que vous et vos collègues nous éclairerez quelque peu à ce sujet tout au long de cette conférence.

Het onderzoek dat door professor Englert werd ontwikkeld, wordt voortgezet door de interuniversitaire attractiepool Fundamentele Interacties, die gefinancierd wordt door het federaal wetenschapsbeleid en gecoördineerd door professor Jean-Marie Frère, die hier aanwezig is.

De heer Frère wordt vergezeld door een panel van uitmuntende professoren die eveneens actief zijn in het domein van het wetenschappelijk onderzoek en meer bepaald van de fysische verschijnselen die het oneindig kleine, maar ook het oneindig grote bepalen.

Chers orateurs, je vous salue toutes et tous et vous adresse un souhait particulier : j'aimerais qu'en tant que détenteurs d'un savoir aussi complexe, vous puissiez nous faire rêver – je suis sûre que vous y parviendrez –, que vous puissiez nous faire comprendre, ou peut-être entrapercevoir, le fonctionnement de certaines lois physiques et leurs applications concrètes, nous apprendre ce que la science fondamentale peut apporter à notre civilisation et à notre humanité.

Car quelle place cette particule, ce fameux boson, a-t-elle dans la science ? Comment expliquer l'infiniment petit dans un monde de plus en plus complexe ? Inversement, quels enseignements peut-on tirer des lois physiques à l'origine du monde, le Big Bang, etc. ? Autant de questions qui continuent à nous fasciner.

Beste jongeren, ik hoop oprecht dat de Nobelprijs voor professor Englert een inspiratiebron mag zijn voor uw generatie. Het fundamenteel onderzoek onderzoekt zonder iets te moeten vinden, maar stoot soms op onverwachte zaken. Onderzoek en innovatie moeten niet 'commercieel' renderen, maar ze kunnen een waarborg vormen voor onze toekomst.

Ons land telt overigens heel wat ondernemingen en onderzoekscentra die wetenschappers en ingenieurs aanwerven. De werkgroep Ruimtevaart van de Senaat buigt zich al enkele maanden over de vraag hoe meer jongeren warm kunnen worden gemaakt voor een carrière in de wetenschap of de ruimtevaart. Wetenschap is immers een boeiend domein waarin een grote voldoening kan worden

gevonden. Het is een buitengewoon instrument dat toekomstgericht is en voor de technologische innovatie van morgen kan zorgen.

Le travail effectué par le Professeur Englert et les équipes qui lui ont succédé durant des décennies prouve l'importance de la recherche fondamentale pour un pays comme la Belgique. Il s'agit d'une découverte dont les applications et les enseignements sont essentiels à la compréhension de notre monde.

Je vous souhaite une conférence passionnante et enrichissante ! (*Applaudissements*)

## Introduction

### Inleiding

Dominique Tilmans

**Mme Dominique Tilmans**, présidente du groupe de travail Espace du Sénat. – Madame la présidente du Sénat, monsieur le président de la Politique scientifique, mesdames et messieurs les professeurs, mesdames et messieurs les académiciens, les industriels, les institutionnels, chers collègues parlementaires et collègues du groupe de travail Espace, et vous, les jeunes, qui êtes passionnés par la recherche et par l'espace, quel bonheur, quelle chance d'accueillir dans cet hémicycle chargé d'histoire celui qui fait la fierté de la Belgique, le Professeur Englert !

Professeur, voici quelques mois à peine, le 8 octobre, vous décrochiez cette reconnaissance suprême, attendue depuis si longtemps – 50 ans ! –, le Prix Nobel de Physique.

Vos travaux de recherche portent, disait le journal *Le Monde*, sur ce petit bout de rien mais pas n'importe quel petit bout, puisqu'il est la clé de voûte du système à l'origine de notre monde : le – « votre » – boson scalaire.

C'est une avancée considérable, l'une des plus importantes de l'Histoire, qui révolutionne la physique des particules et qui était la petite pièce manquante pour expliquer les mécanismes du monde qui nous entoure.

Professeur, cette reconnaissance fait resplendir une fois de plus la Belgique et nous en sommes fiers. Elle met en lumière à travers vous, grâce à vous, les équipes, les experts brillants dont la Belgique ne manque pas.

In België kennen we reeds een lange traditie van theorieën, zoals de theorie die op een briljante manier door Georges Lemaître wordt geïllustreerd. Hij was een fysisch astronoom, een grote visionair, die de grondslag van de Big Bang heeft weten uit te leggen. Hij wordt dit jaar gehuldigd met de lancering naar het internationaal ruimtestation van de bevoorradingmodule die zijn naam zal dragen.

Deze traditie wordt voortgezet door u, professor Englert, en door uw collega en vriend, Robert Brout, die helaas inmiddels overleden is.

Vous nous avez déjà permis de comprendre beaucoup sur l'origine de l'Univers mais aujourd'hui surtout, cinquante ans après et grâce à vos travaux, monsieur le professeur, la physique ouvre de nouvelles voies. Les défis futurs sont gigantesques, ils sont d'une telle ampleur qu'ils vont forcer la technologie au-delà de ses limites pour obtenir les réponses aux questions fondamentales ; je pense notamment au satellite Planck.

Lors des réunions du Groupe de travail Espace, il a souvent été question des difficultés mais aussi des espoirs de la recherche, qu'elle soit fondamentale ou appliquée. Nous sommes deux Ardennaises dans ce groupe, et les Ardennais(es) aiment le concret ! Le Groupe de travail Espace s'est dit que l'occasion était belle non seulement de vous mettre à l'honneur, monsieur le professeur, mais aussi de vous donner l'occasion, à tous les quatre, de nous faire part de vos messages. Je voudrais en souligner deux.

Primo, la crainte, en période de crise, que les budgets – importants mais jamais suffisants – alloués aujourd'hui à la recherche fondamentale et à la recherche appliquée ne soient rabetés par la tentation de sacrifier temporairement le futur pour améliorer le présent. Or, s'il est bien un domaine où l'on ne peut interrompre l'effort, c'est celui de la recherche au risque de suspendre pour des générations l'élan, l'enthousiasme des avancées déjà acquises !

Secundo, le souhait d'une meilleure collaboration entre recherche fondamentale et recherche appliquée, car il semble que la question de la recherche sur l'évolution de l'Univers par d'autres méthodes que les accélérateurs et tout particulièrement les satellites soit mûre. D'ailleurs, des universités envisagent un développement en ce sens mais sont malheureusement freinées à ce jour par le risque d'engager un professeur qui serait isolé dans son domaine.

C'est pourquoi votre message se veut politique : N'est-il pas temps d'accroître les synergies entre les différentes disciplines, d'initier un vrai travail commun entre la physique des particules, la cosmologie et le spatial afin d'impulser de nouvelles initiatives, de nouvelles priorités que les chercheurs détermineraient avec l'appui des politiques afin de ne pas rater les découvertes les plus radicales ?

Ce sont justement vos travaux, professeur Englert, pour comprendre l'infiniment petit qui nous amènent vers la cosmologie, cette science de la formation de l'Univers et de son évolution. Aujourd'hui, la cosmologie n'est donc plus un rêve fou impossible à atteindre mais elle est bien désormais une science de l'observation qui nous éclaire sur les mécanismes les plus intimes du monde qui nous entoure.

Aujourd'hui, la cosmologie ouvre des horizons jamais espérés et fait se croiser recherche fondamentale et recherche appliquée – on sait bien que sans recherche fondamentale, il n'y a pas de recherche appliquée – et ce, tout particulièrement au moment où se développent de nouvelles voies aux confins de la physique nucléaire, des particules, de l'astrophysique et du spatial.

Parce que la Belgique n'a pas la place qui lui revient dans cette formidable évolution, alors qu'elle possède les équipes puissantes pour faire partie des Grands, nous avons voulu, avec le Groupe de travail Espace du Sénat, mettre à l'honneur cette grande dame trop discrète qu'est la recherche fondamentale, nous avons voulu les pleins feux sur la recherche fondamentale et ses défis.

Avant de conclure, je voudrais remercier très chaleureusement le professeur Frère, Directeur du service de Physique théorique de l'ULB, qui pendant quatre mois m'a accompagnée, épaulée et conseillée pour mettre en œuvre cette conférence ; elle n'aurait pas été possible sans lui.

*(Applaudissements)*

Je tiens aussi à remercier très sincèrement les services du Sénat que j'ai mis à rude épreuve pour la réalisation de cette conférence dans un délai très court.

Je remercie aussi, bien évidemment, mes collègues du Groupe Espace pour tout le travail que nous avons accompli ensemble au cours de cette législature mais aussi et surtout pour l'ambiance chaleureuse et l'excellent état d'esprit qui ont prévalu à l'ensemble de nos travaux.

Messieurs les professeurs, la tribune du Sénat est aujourd'hui la vôtre.

# D'un boson à l'Univers, des particules aux satellites

## Van boson tot universum, van elementair deeltje tot satelliet

Prof. Jean-Marie Frère

**Mme Dominique Tilmans**, présidente du groupe de travail Espace du Sénat. – Le professeur Frère va tout d'abord faire un exposé intitulé « D'un boson à l'Univers, des particules aux satellites ».

Le professeur Frère a obtenu sa licence en Sciences physiques en 1973, après des études brillantissimes puisqu'il a obtenu la plus grande distinction, le prix Fleurice Mercier. Il a ensuite entamé un doctorat et une série de stages postdoctoraux qui l'ont successivement conduit au CERN pour trois ans et à l'Université du Michigan pour deux ans. En 1983, il est chercheur qualifié au FNRS. Il entre ensuite à l'ULB où il est successivement maître de recherche, directeur de recherche et chargé de cours. Il est aujourd'hui professeur ordinaire et directeur du Service de physique théorique de l'ULB.

**M. Jean-Marie Frère**. – Je me réjouis de prendre la parole dans un endroit aussi prestigieux.

We zullen de vele jongeren in de zaal tonen wat ons werk inhoudt. Misschien zullen enkelen onder hen later ook wetenschappelijk werk willen doen. Daarnaast zal ik ook aantonen dat dit wetenschappelijk werk niet gemakkelijk is en dat wetenschappers gemotiveerd en toegewijd moeten zijn.

Mon rôle est d'introduire le sujet et, comme la présidente l'a souligné, de montrer l'unité de notre science. Le résultat majeur des travaux de Brout, Englert et Higgs et d'un tas d'autres est de montrer que nous avons une compréhension de l'Univers dans son unité qui va de l'infiniment petit à la cosmologie, science expérimentale, mais qu'il nous reste beaucoup de problèmes à résoudre.

L'essentiel de mon intervention portera sur quelques notions scientifiques mais, rassurez-vous, je les aborderai en images et pas en équations. Je terminerai par quelques considérations sur notre fonctionnement et sur les carrières scientifiques.

Le premier transparent que je vous présente montre tout l'appui que nous recevons pour la recherche. Cela va du pouvoir fédéral aux régions : la Politique scientifique fédérale, le FNRS, le FWO et l'IISN, fonds associé au FNRS qui a joué un rôle capital puisque c'est lui qui a rapidement supporté les travaux du groupe de François Englert.

Les trois noms de Brout, Englert et Lemaître sont associés car, depuis l'époque de Georges Lemaître déjà, la collaboration entre les groupes scientifiques en Belgique a été considérable. Ce n'est pas un hasard si, sur cette photo, vous les voyez debout au tableau. Le tableau et les craies restent en effet notre principal instrument de travail, vous en trouverez dans chacun de nos bureaux.

Je dois préciser très rapidement les ordres de grandeur. Un des problèmes que nous rencontrons lorsque nous voulons parler de notre sujet est que, depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle – 1905 plus précisément –, la physique n'est pratiquement pas enseignée dans le secondaire et que même le vocabulaire est donc parfois inconnu. Dans une émission de radio, on m'a un jour reproché d'utiliser le mot « photon » qui paraissait trop technique.

Quand je parle de l'infiniment petit, il s'agit d'éléments vraiment très petits. Lors d'une observation au microscope, on distingue des détails de l'ordre du millième de millimètre, comme les cellules de

ma langue que je présente sur ce transparent. À une échelle 10 000 fois plus petite, on trouve les atomes. Dans la chimie, les atomes ne sont pas touchés, ils sont l'outil de la chimie. Celle-ci se décrit en fonction de la structure des atomes, de leur forme spatiale, etc. À une échelle encore 100 000 fois plus petite, on tombe au niveau du noyau, avec les protons et les neutrons. Le noyau est composé de ces particules que l'on croyait naguère élémentaires. Nous sommes là face à des énergies 1 000 000 de fois plus fortes que l'énergie de la chimie, nous sommes dans le domaine de l'énergie nucléaire mais aussi de la médecine nucléaire.

C'est à ce niveau que l'on se situait dans les années cinquante. C'est la raison pour laquelle beaucoup de centres portent le nom de « nucléaires », comme le Centre européen de recherche nucléaire, le CERN, même si l'on s'y livre plutôt à de la recherche de physique des particules qu'à de la recherche nucléaire.

Quand on travaille sur les particules, on se situe à des distances qui sont encore de 100 à 1 000 fois plus petites que l'atome. Nous sommes donc très loin de la taille des cellules visibles au microscope. Nous observons que les protons et neutrons sont composés notamment de particules plus petites que nous croyons maintenant élémentaires, c'est-à-dire que l'on ne peut plus diviser, comme les quarks « u » et « d ».

En utilisant des accélérateurs et en regardant notre environnement cosmique, nous avons découvert bien d'autres particules. C'était une surprise. J'y reviendrai plus tard.

C'est d'ailleurs une des caractéristiques de ce domaine : certaines choses sont prédites par la théorie et d'autres arrivent par surprise, comme cela a été le cas pour la multiplication de ces particules.

Par ailleurs, ces particules interagissent : une particule agit sur une autre qui répond avec une certaine force. Elles interagissent, et j'utiliserai souvent ce terme, notamment par des désintégrations faibles. Cependant, nous n'en savons rien parce que toutes ces forces sont à très courte portée. Si l'on refait toute la série de puissances de dix, on constate que nous n'avons aucune conscience de ces interactions. Par exemple, une désintégration *bêta* peut se faire dans un noyau ; on prend un neutron et il se désintègre en proton avec émission d'autres particules. Cela semble innocent mais en fait, cela modifie le noyau de l'atome, sa nature : c'est la fameuse transmutation que cherchaient les alchimistes – du cobalt se transforme en nickel. Là, on sort du domaine de la chimie ; les énergies ne sont pas du tout celles de la chimie. Il n'est pas étonnant que les alchimistes n'aient pas pu les trouver en chauffant l'un ou l'autre corps dans leur athanor. Cela ne fonctionne malheureusement pas pour transformer le plomb en or.

Ces interactions sont très discrètes, nous ne les connaissons pas. J'ai parlé d'interactions faibles, voire très faibles, et nous ne savons en général pas de quoi il s'agit, mais elles font quand même fonctionner le soleil. Toutes les énergies renouvelables proviennent de la chaleur du soleil par le biais de ces interactions, des interactions à très courte portée qui étaient extrêmement mal comprises, notamment en 1964, au point que l'on avait à peu près renoncé à une description fondamentale.

Par contre, certaines forces étaient très bien connues, essentiellement la lumière et l'électromagnétisme. La force de Brout-Englert-Higgs a été de montrer que l'on pouvait expliquer les forces mal comprises en se basant sur celles que l'on comprenait très bien. Par exemple, si une étoile se trouvant à l'autre bout de l'Univers émet un petit signal avec un photon, ce signal traversera tout l'Univers jusqu'à moi. Ce sont là des forces à très grande portée qui interviennent par un échange de particules.

Ce qui se passe entre une étoile qui m'envoie un signal à dix milliards d'années-lumière et moi-même se passe aussi dans l'atome : l'électron interagit avec le noyau par le même échange de photons. C'est un peu comme un jeu de tennis : les particules interagissent en s'envoyant des photons ou d'autres particules, comme des joueurs de tennis interagissent en s'envoyant des balles.

Pourquoi cette digression sur l'électromagnétisme ? Parce que l'interaction faible, donc la désintégration du proton ou du neutron qui, en son temps, n'était pas du tout comprise, a exactement la même forme que l'interaction électromagnétique. On le voit très bien dans les graphes de Feynman, sorte de petits dessins.

L'interaction faible a exactement la même forme que l'interaction électromagnétique. C'était vraiment la chose évidente. Mais ces forces sont complètement différentes.

Les professeurs Englert, Brout et Higgs ont montré que ces forces, qui paraissent si différentes, sont en fait les mêmes. Elles sont de la même nature, il y a une symétrie entre les interactions faibles et l'électromagnétisme. La force est la même, mais les interactions sont différenciées parce que l'intermédiaire, dénommé W sur le graphique, est très massif ; il a 80 fois la masse du proton – on n'a pas pu le produire avant 1982 – tandis que le photon n'a pas de masse.

Il y a une symétrie mais elle est brisée, de telle sorte qu'une des particules est favorisée par rapport à l'autre. C'est une espèce de roulette, tout à fait symétrique, et la petite bille qui se trouve sur la roulette va finir par tomber sur une case, le photon. Ce dernier a le droit de traverser tout l'Univers, ce qui n'est pas le cas des autres. Tel est le mécanisme de brisure de symétrie.

Si l'on considère les articles historiques avec en priorité celui de Brout et Englert, un problème de reconnaissance se pose. Même au CERN, il a été très difficile d'obtenir que le travail de Brout et Englert, soit au moins mis sur un pied d'égalité avec les autres. Ce n'est d'ailleurs pas encore tout à fait réalisé.

Au début, ces travaux ont très peu attiré l'attention. Un graphique des citations révèle qu'entre 1964 et 1972, il n'y a pratiquement pas eu de citation.

Jusqu'en 1971, des travaux étendent la cohérence mathématique. En 1973, on a la première confirmation expérimentale, qui n'est pas complète. Dès ce moment, les citations commencent très timidement à décoller.

En 1972, j'ai fait mon mémoire chez François Englert et Robert Brout, tous deux inséparables. Ce fut une expérience extraordinaire, nous étions tous les après-midi entre le sofa et le tableau. À ce moment-là, on me demandait pourquoi j'allais travailler chez ces gens-là. Tout cela pour dire à quel point des découvertes extraordinaires peuvent être ignorées.

Il y a eu ensuite une cascade de découvertes et une série de prix Nobel. Mais François Englert n'en a pas obtenu. Pourquoi ? Parce qu'il manquait une particule – peut-être plusieurs, on l'ignorait à l'époque. Il s'agit de la particule qui correspond à la roulette. Les interactions existent, mais la roulette va provoquer la brisure de symétrie. Pour atteindre de très petites distances, des instruments énormes sont nécessaires. Il a donc fallu toute la puissance du CERN, une grande organisation européenne mais gérée par des scientifiques, pour y parvenir.

Il y a une interaction entre recherche fondamentale et technologique. La première fournit en même temps les bases et les défis qui font progresser la technologie.

Je mentionnerai encore simplement qu'il y a aussi des surprises. Par exemple, le web a été créé au CERN en raison de la nécessité de communication. Or, cet échange d'informations était à l'époque opposé à toute culture d'entreprise, mais il a finalement mené aux résultats que l'on connaît.

Puis, en 2012, c'est la première rencontre entre François Englert et Peter Higgs, au CERN. Elle allait déboucher en 2013 sur la remise du Prix Nobel, permettant ainsi à François Englert de déguster la « glace Nobel », servie uniquement aux lauréats du Prix au *Nobelmuseum* de Stockholm.

Quels sont les nouveaux défis ? On peut décrire l'Univers avec le « modèle standard » mais nombre de questions demeurent sans réponse : Comment est-il né ? Pourquoi y a-t-il plus de matière que d'antimatière autour de nous ? De quoi est faite la matière noire ? Nous allons y revenir.

Une des hypothèses serait une brisure de symétrie. Au début, l'Univers était très chaud, comme nous l'a appris Lemaître avec son Big Bang, avec une symétrie entre toutes les interactions. Lorsque l'Univers se refroidit, la « roulette » se déforme et prend sa forme finale. Donc, en regardant le début, on comprend mieux ce mécanisme, qui peut être aussi un moteur pour l'expansion de l'Univers. L'exposé de Thomas Hertog nous montrera comment l'ESA et le satellite Planck nous renseignent sur cette évolution.

Autre question, on a découvert énormément de particules ; il en existerait trois fois trop. C'est lié à la défaite de l'antimatière. Lorsqu'on contemple l'ensemble de l'Univers, on s'aperçoit que les galaxies ne devraient pas tenir d'une pièce, car la force centrifuge devrait éjecter les étoiles. Il faut donc de la matière noire, comme nous le montrent le satellite Planck et l'observation directe. Il y a cinq fois plus de matière noire que de matière ordinaire, et encore beaucoup plus d'énergie noire ; nous ne le savons que depuis une quinzaine d'années.

Comment résoudre ces défis ? Les accélérateurs de particules sont l'outil idéal : on y contrôle les conditions de départ. Cependant, leur construction coûte très cher, et il y a des limitations pratiques. Nous avons un accélérateur de 27 km, on parle d'un accélérateur de 100 km, avec dix fois l'énergie actuelle, ce qui ne nous donnerait pas encore toutes les possibilités : peut-être faudrait-il centupler l'énergie pour trouver une nouvelle physique.

Nous observons une complémentarité entre les approches : les accélérateurs, la recherche directe de matière noire, dans laquelle la Belgique n'est pas impliquée mais qui pourrait être intéressante au niveau technologique, la recherche indirecte dont vous parlera Catherine De Clercq avec IceCube, l'étude de l'Univers avec les satellites et la cosmologie observationnelle, qu'il faut vraiment développer en Belgique où nous avons beaucoup d'astronomie classique, et d'autres encore.

Si vous voulez vous lancer – c'est surtout aux jeunes que je m'adresse – dans la recherche scientifique, sachez que les études sont longues : le doctorat vous prendra trois ou quatre années après la maîtrise, puis vous devrez voyager pour deux « post-docs » de deux ans avant d'espérer un des rares postes permanents. Ne vous inquiétez pas de savoir si vous gagnerez 650 000 euros : la réponse est négative, mais vous aurez la liberté de comprendre.

J'ai le souvenir de trajets un peu secoués pour aller écouter les cours de François Englert et de Robert Brout à la KUL ou à l'UCL, parce que Robert avait une conduite un petit peu effrayante, surtout lorsqu'il dessinait sur la buée du pare-brise...

Évidemment, les pôles d'attraction interuniversitaires ont formalisé cette coopération, y compris avec les groupes expérimentaux. Toutefois, c'est une chose qui est limitée dans le temps.

Les théoriciens demandent aujourd'hui la création d'un centre de recherche international portant les noms de Brout, Englert et Lemaître. Ce serait très indiqué pour les honorer, d'autant plus que l'acronyme est assez évocateur. Le but est bien sûr d'obtenir un financement à long terme.

Si l'on considère l'ensemble des découvertes de 1964 à 2012, on constate qu'une découverte majeure intervient tous les cinq ans.

# Le Big Bang de Lemaître dans la cosmologie contemporaine

## Satellietbeelden van Lemaîtres Big Bang

Prof. Thomas Hertog

**Mevrouw Dominique Tilmans**, voorzitter van de werkgroep Ruimtevaart van de Senaat. – Ik geef nu het woord aan professor Thomas Hertog. Hij zal het hebben over ‘Satellietbeelden van Lemaîtres Big Bang’.

Professor Hertog received his undergraduate degree from the KU Leuven and his doctorate from the University of Cambridge. He joined the University of California as a research fellow in 2002 and became a fellow at CERN, Geneva, in 2005. He returned to Belgium in 2011 with the Odysseus program of the Flemish government and is currently Associate Research Professor in the Physics Department at the KU Leuven.

**De heer Thomas Hertog**. – Dames en heren, het is mij een genoegen hier vandaag de beide Leuvense universiteiten te vertegenwoordigen.

Wij delen een zeer bijzondere voorgeschiedenis in de kosmologie, de studie van het heelal. Die begint met de figuur van Georges Lemaître, een Franstalige prof, geboren in Charleroi, die in Leuven werkzaam was en de grondlegger is van wat we nu het oerknalmodel noemen. Hij poneerde als eerste de idee dat het heelal niet statisch is, zoals men destijds aannam, maar dat het expandeert. In zijn notities van de jaren 1920-1930 vinden we de eerste schetsen ter wereld van evoluerende, dynamische modellen van het heelal. Zijn schetsen zijn gemaakt op basis van de relativiteitstheorie van Einstein, met op de horizontale as de tijdsdimensie en op de verticale as de ruimtedimensie. De curves stijgen en dalen en tonen een uitdijend en een eventueel contracterend heelal. Welke curve wordt gerealiseerd, hangt af van de samenstelling van het heelal. Lemaître kende die nog niet en nam dus verschillende modellen van het heelal in overweging.

Lemaître heeft ook geprobeerd Einstein te overtuigen van de notie van een expanderend heelal. Hij ontmoette hem in de marge van de Solvayconferentie van 1927, waarop de meeste beroemde geleerden van die tijd aanwezig waren om de recentste ontwikkelingen in de wetenschap te bespreken. Einstein moest echter niets weten van de notie van een uitdijend heelal. ‘C’est tout à fait abominable’, was zijn reactie. Hij had zware bedenkingen bij Lemaîtres gedachtegoed.

Lemaître liet zich echter niet van zijn stuk brengen en ontwikkelde verder zijn model van een expanderend heelal. In een geheel nieuwe visie op het heelal stapte hij volledig af van de notie van een statisch, eeuwig heelal en breidde hij de notie van evolutie, die men kende van de geologie en de biologie, dramatisch uit naar het hele heelal. In Lemaîtres visie wordt het hele heelal een beetje een ecosysteem met tal van verbanden tussen heden en verleden. Alles raakt met elkaar verweven.

Zijn model was in overeenstemming met de waarnemingen van toen, maar een *golden grail*, een ultieme bevestiging ervan was er niet. Dat had alles te maken met het feit dat telescopen nog niet voldoende krachtig waren. Het heeft vele decennia geduurd. Mijn collega Stephen Hawking vertelde me ooit dat toen hij als wetenschapper begon, kosmologie een domein was met wilde speculaties en geen enkele waarneming die ook maar enigszins voor *reliable constraints* zorgde.

In 1964 veranderde dat toen twee ingenieurs van de Bell Laboratories het ultieme bewijs vonden dat Lemaître op het juiste spoor zat. Toen ze experimenteerden met nieuwe radioantennes namen ze een

zekere ruis waar. Die bleek niet afkomstig te zijn vanuit een welbepaalde richting in de ruimte, maar bereikte de aarde vanuit alle richtingen en altijd met ongeveer dezelfde intensiteit. Uit gesprekken en discussies met kosmologen bleek dat het wel degelijk ging om de *Big Bang afterglow*, de nagloed van de hete oerknal waarover Lemaître het al die tijd had gehad.

De medewerkers van de Bell Laboratories namen een soort van ruis waar, die de hele ruimte vult, die de aarde uit alle richtingen bereikt en die heel koud is: maar 2,7 graden boven het absolute nulpunt, of 2,7 Kelvin. Wij hebben een 'foto' van die ruis, die men zich kan voorstellen als een projectie van het bolvormige hemelgewelf waarbij de temperatuur wordt waargenomen vanuit alle verschillende richtingen van de ruimte. Het is een saaie foto – wellicht de meest beroemde saaie foto ter wereld – omdat de temperatuur van die straling die ons bereikt uit alle verschillende richtingen, dezelfde is, namelijk 2,7 Kelvin. In het midden van de foto kan men een wit lijntje zien, dat is de projectie van de Melkweg, die in de weg zit om die kosmische straling in die band waar te nemen.

Deze waarnemingen uit 1964, die ongeveer samenvielen met professor Englerts ontdekking van het boson, hebben het oerknalmodel van Lemaître verankerd als een leidinggevend paradigma voor de moderne kosmologie.

Waarom was Einstein niet gelukkig met Lemaîtres oerknalmodel? Dat had niet zozeer te maken met de notie van een heet begin en een uitdijende ruimte die afkoelt en structuren vormt, maar met de oerknal zelf. Einstein zag immers de bui al hangen: bij de oerknal zelf, als we ver teruggaan in de tijd, gaat Einsteins theorie niet meer op. Hawking heeft dat rigoureus bewezen. Hij schreef: 'The notions of space and time cease to be meaningful at the Big Bang'. Einsteins theorie was een theorie van de evolutie van het heelal en van de expansie van de ruimte, waarop Lemaîtres kosmologie gebaseerd was, maar die evenwel niet de oorsprong van tijd en ruimte beschreef. Als men het heelal herleidt tot die oerknal, is die oerknal echter niet enkel een explosie, maar is het de totstandkoming van noties als tijd en ruimte. Daar had de relativiteitstheorie, en ook Lemaîtres model, niets over te zeggen. Dat gegeven baarde Einstein dus zorgen.

Lemaître was zich bewust van die beperking. Een van de meest visionaire wetenschappelijke artikelen van de twintigste eeuw is wellicht het heel korte artikel dat gepubliceerd is in *Nature* en ondertekend is door Georges Lemaître. Daarin suggereerde hij, als allereerste ter wereld, dat de oerknal zelf wel degelijk deel uitmaakt van het wetenschappelijk domein, dat het een fenomeen is dat onderhevig is aan wetenschappelijke wetten en dat kan worden bestudeerd. Net die stap had Einstein niet durven te zetten: de oerknal deed hem te veel aan goddelijke interventie denken, terwijl de priester Lemaître de oerknal incorporeerde in het wetenschappelijk denken. Dat is wellicht de grootste conceptuele bijdrage van onze Leuvense professor.

Zoals blijkt uit de titel van het artikel, *The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory*, beseft Lemaître dat de oerknal niet kon worden verklaard aan de hand van Einsteins theorie, omdat die niet bruikbaar is als tijd en ruimte niet bestaan. Desalniettemin is het zeer belangrijk om de oerknal beter te begrijpen, want als men de fysische gegevens met betrekking tot de oerknal een beetje wijzigt, dan wijzigt heel het verdere verloop van de evolutie van het heelal. Het succes van Lemaîtres model hangt dus af van hoe men begint. Het feit dat via de evolutie in de kosmologie het heden met het verleden wordt verweven, is het mooie van Lemaîtres model, maar het is ook de achilleshiel ervan.

Die paradox is essentieel om te begrijpen waar het om draait: de oerknal is belangrijk om het heden te begrijpen, maar het model van Lemaître zegt niets over de oerknal.

Zo komen we bij de grote uitdaging van de 21e eeuw: het verenigen van twee domeinen in de fysica om iets te kunnen zeggen over de oerknal. Wat zijn die twee domeinen? De relativiteitstheorie – gravitatie, tijd, ruimte, een deterministisch kader – en de deeltjesfysica – de kwantumwereld van waarschijnlijkheden, deeltjes, elementen uit kernkrachten en dergelijke. Die twee raken bij de

oerknal met elkaar verstrengeld. Om een model van de oerknal te formuleren, moeten beide met elkaar worden verenigd. Als men grote zware dingen op een kleine plaats bijeen propt, komen beide met elkaar in aanraking.

Hierover gebeurt zowel in België als in het buitenland veel onderzoek. De eerste, benaderende, modellen van de oerknal zijn nu reeds voorhanden. Mijn collega's en ikzelf hebben die modellen geëxploreerd. We kunnen ze voorstellen als scenario's waarbij het heelal zich bij de oerknal op zichzelf terugplooit. Die modellen hebben één heel bijzonder kenmerk: ze wijzen op een zeer snelle expansiefase in het prille begin van het heelal. Die snelle expansiefase laat sporen na in de kosmische achtergrondstraling waarover ik het daarnet had. In de eerste waarnemingen van de kosmische achtergrondstraling, uit 1965, zijn nog niet veel sporen op te merken. Toen duidelijk werd dat er in de achtergrondstraling meer informatie over de oerknal te vinden is, hebben de NASA en de ESA satellietmissies ontwikkeld om de achtergrondstraling beter in kaart te brengen.

Een satelliet die wordt gelanceerd om de achtergrondstraling in kaart te brengen, kan niet zomaar de hele hemel scannen en onmiddellijk een foto nemen van de achtergrondstraling. Het vergt enorm veel inspanning om alle materie, de lichtstralen van de sterren en de sterrenstelsels, alle bronnen van stralingen die ons bereiken, weg te filteren. Het gaat om het observationele proces in de kosmologie. Men neemt foto's, maar wat men niet wil zien of wat bekend is, wordt weggefilterd. Wat overblijft is een heel gedetailleerde foto waaruit blijkt dat er heel kleine variaties zijn in de achtergrondstraling. Het temperatuurverschil op de foto tussen rood en blauw bedraagt, naargelang de richting, ongeveer een tienduizendste van een graad.

Dit patroon van de variaties is precies wat de eerste modellen van de oerknal voorspellen. Het betreft dus een fantastische opportuniteit. Er zijn modellen van de oerknal, enerzijds, en een observationeel verifieerbaar gevolg van die modellen, namelijk een patroon van variaties in de achtergrondstraling, anderzijds.

De bekendmaking van de eerste resultaten van de ESA-ruimtetelescoop Planck heeft vorig jaar terecht de voorpagina's gehaald. Ze omvatten ook een heel gedetailleerde digitale foto van die achtergrondstraling.

Die variaties zijn om twee redenen belangrijk. Ten eerste vormt dit patroon het sluitstuk van Lemaître's theorie van een expanderend heelal. Die temperatuurvariaties zijn eigenlijk de zaden van alle structuren – sterrenstelsels, sterren en dergelijke – die later zijn ontwikkeld.

Ik zal dit illustreren met een filmfragment, waarin de evolutie van het heelal in minder dan één minuut wordt weergegeven. De hete, ietwat warmere gebieden in de achtergrondstraling zijn geëvolueerd en zijn beginnen klonteren tot gaswolken. In die gaswolken zijn uiteindelijk vele miljoenen jaren later de eerste sterren ontstaan. Die sterren zijn dankzij hun gravitationele aantrekking verder geclusterd en gegroepeerd in grotere structuren, zoals sterrenstelsels en galaxieën. Het heelal is langzaam in een meer volwassen fase gekomen. Het wordt een beetje rustiger. Het wordt ook chemisch rijker, want in die sterren is er nucleaire fusie. Ten slotte zijn er de planeten, de aarde en uiteindelijk ook de satellieten waarmee we naar alles kijken.

Dat is de evolutie van het heelal in minder dan één minuut: van die kleine, minuscule variaties, die samen met het heelal zijn ontstaan en die voortkomen uit onze modellen van de oerknal, tot minstens één complexe planeet, met leven, België en een satelliet.

Ten tweede is de achtergrondstraling zo belangrijk, en ze zal dat in de toekomst van de kosmologie blijven, omdat ze ons een glimp geeft van de oerknal zelf. We kunnen de achtergrondstraling dan in detail bestuderen en zo komen we de fijne details te weten over hoe de oerknal is te werk is gegaan.

Mijn collega's van de UCL zijn experts in het analyseren van die achtergrondstraling. Ik heb een voorbeeld van een analyse van dat patroon van variaties, waarin de curve weergeeft wat de theorie

van de oerknal voorspelt en de puntjes de waarnemingen van die achtergrondstraling weergeven: de wisselwerking tussen waarneming en theorie aan het werk.

De volgende jaren zal de kosmologie zich verder ontwikkelen als een *high energy lab*. We zullen vele voorbeelden krijgen van zaken die, enerzijds, voorspeld zijn op basis van die modellen van de oerknal en, anderzijds, kunnen worden geverifieerd aan de hand van observaties met satellietmissies. Dat domein is in volle ontwikkeling.

Als besluit kan ik stellen dat Lemaître's big bang een succesmodel is, dat bovendien de basis heeft gelegd voor de huidige ontwikkelingen, namelijk de wetenschap van de oerknal zelf. Die wetenschap werkt op basis van modellen van de oerknal die de zaden van latere structuren en complexiteiten, zoals galaxieën, ontwikkelen, en vervolgens op basis van satellietbeelden en de analyse ervan, die een observationele verificatie van dergelijke modellen geven.

Voor de beleidsmakers heb ik een drieledig advies.

Laten we, ten eerste, die observationele dimensie in de kosmologie ontwikkelen. In België heerst op dat vlak een grote leegte.

Laten we, ten tweede, de deeltjesfysici en de kosmologen samenbrengen in een *joint world class international* onderzoekscentrum dat de nodige zichtbaarheid, daadkracht en internationale reputatie heeft om die nieuwe ontwikkeling, namelijk de brug slaan tussen deeltjesfysica en kosmologie, te realiseren.

Ten derde mogen we ook niet vergeten dat het belangrijk is om het bredere publiek bij dit project en deze exploratie te betrekken. Uiteindelijk gaat het om de grote vragen: het mysterie van ons bestaan, onze plaats in het geheel ... Bij het grote publiek bestaat onbetwistbaar interesse. Toen Stephen Hawking een paar jaar geleden in Leuven een lezing gaf, liep het Stadspark in een oogwenk vol. Die interesse in de fundamentele wetenschap moeten we blijvend opwekken.

## **IceCube : des neutrinos venus de l'espace captifs des glaces**

### **IceCube: neutrino's uit de ruimte gevangen in het ijs**

Prof. Catherine De Clercq

**Mevrouw Dominique Tilmans**, voorzitter van de werkgroep Ruimtevaart van de Senaat. – Ik geef nu het woord aan Catherine De Clercq, die zal spreken over “IceCube, neutrino's uit de ruimte gevangen in het ijs”. Ze is professor in de experimentele fysica en de astrodeeltjesfysica aan de Vrije Universiteit Brussel. Haar onderzoeksdomein is momenteel de studie van de donkere materie via de observatie van neutrinosignalen met de IceCube neutrinodetector.

**Mevrouw Catherine De Clercq**. – IceCube is een neutrinodetector die diep begraven zit in het ijs op Antarctica ter hoogte van de geografische Zuidpool. De bedoeling van het project is aan neutrinoastronomie te doen. De conventionele astronomie observeert signalen in elektromagnetische straling: infrarood, UV, radiogolven, gamma- en x-stralen die ons bereiken vanuit de ruimte. Met IceCube proberen we een nieuw venster op het heelal te openen en te zoeken naar objecten in de ruimte die neutrinodeeltjes uitstralen. Neutrino's zijn elementaire deeltjes, die we ons kunnen voorstellen als een elektron, maar dan zonder lading en met een heel kleine massa.

De belangrijkste missie van IceCube is de studie van neutrino's bij zeer hoge energie. We proberen daarmee een antwoord te vinden op een aantal vragen. De hoofdvraag is wat de oorsprong is van kosmische straling met zeer hoge energie.

Wat wij in deze context kosmische straling noemen, zijn geladen deeltjes die invallen op de aardatmosfeer en daarin interageren. Deze geladen deeltjes zijn voornamelijk protonen of waterstofkernen. Sommige experimenten, bijvoorbeeld in het Auger Observatory in Argentinië, hebben kosmische deeltjes ontdekt met een enorm hoge energie, namelijk een miljoen keer de energie die bij de hoogste versneller in het CERN kan worden bereikt. We kennen echter nog altijd niet de oorsprong van die deeltjes.

Volgens de theorieën waarin we geloven, zouden de objecten die deze zeer-hoge-energieprotonen uitstralen, ook neutrino's uitstralen. Voorbeelden daarvan zijn actieve melkwegstelsels – onze Melkweg is niet actief – met een actief zwart gat dat nog heel sterk materie opsloopt. Deze melkwegstelsels hebben loodrecht op het zogenaamde accretievlak twee jets die fotonen of lichtdeeltjes uitstralen, maar waarschijnlijk ook neutrino's. We kijken met het observatorium naar de ruimte, naar neutrino's met hoge energie, en we hopen in de ruimte bronnen te vinden of astrofysische objecten die neutrino's uitstralen.

IceCube werd gebouwd om hoge-energie-neutrino's waar te nemen met energieën hoger dan de gammastralen die in observatoria werden gezien. We kunnen IceCube echter ook gebruiken voor lage-energieastrofysica, onder andere de zoektocht naar donkere materie. Dat doet mijn groep in Brussel. Dit is in het kort de doelstelling.

IceCube is de grootste neutrinodetector in werking in de wereld. Hij zit diep begraven in het ijs op Antarctica ter hoogte van de geografische zuidpool.

Op de kaart van Antarctica is in het midden een rode stip te zien: dat is de locatie van het Amundsen-Scott South Pole Station, waar IceCube staat. De groene stip is de Prinses Elisabethbasis.

Op de luchtfoto van de zuidpoolbasis, die uitgebaat wordt door de Amerikaanse National Science Foundation, zien we in het midden de landingsbaan voor de vliegtuigen. Links zien we de basis zelf en rechts de locatie van de wetenschappelijke instrumenten. Behalve IceCube staat er bijvoorbeeld ook nog de South Pole Telescope, die een opname maakt van de kosmische achtergrondstraling. De basis wordt twaalf maanden per jaar bewoond. In de zogenaamde winter is er een crew van ongeveer dertig personen, waaronder wetenschappers. Twee medewerkers van ons IceCube-project overwinteren er.

Nu hier zoveel jonge mensen aanwezig zijn, maak ik van de gelegenheid gebruik om mee te delen dat we elk jaar in januari een oproep doen voor overwinteraars. Wie interesse heeft, kan me contacteren.

De basis is enkel toegankelijk tussen november en februari omdat tijdens de overige maanden vliegtuigen er niet kunnen landen en opstijgen. Tijdens die zogenaamde zomermaanden sturen we mensen naar de Zuidpool om onderhoudswerk te doen, om computers te installeren en te vervangen, enzovoort.

Rechts van de landingsbaan ligt IceCube. Die detector zit ongeveer 2000 meter diep in het ijs begraven. De detector bestaat uit een rooster van ongeveer vijfduizend lichtsensoren, die op regelmatige afstand van elkaar staan. Ze bekleden in totaal een kubieke kilometer aan ijs. De bedoeling is door middel van de lichtsensoren neutrino's uit de ruimte te observeren. Daarmee bedoelen we neutrino's die in of buiten de atmosfeer, in of buiten de Melkweg, worden gecreëerd.

Een woordje over neutrino's. Een atoom bestaat uit een kern, die uit quarks bestaat. De kern is omgeven door elektronen. Uit experimenten met versnellers en uit kosmische straling hebben we ontdekt dat er behalve het elektron, nog twee zwaardere partners in de familie van de leptonen zijn,

namelijk het muon en het tauon. Ze gedragen zich gelijkaardig als het elektron, maar ze hebben een grotere massa. Het elektron heeft een neutrale partner, het neutrino. Elk van de twee andere leptonen heeft ook een neutrino-partner. Men moet zich het neutrino voorstellen als een elektron zonder lading en met een zeer kleine massa.

In het vervolg zal ik voornamelijk over het muonneutrino spreken en zijn geladen partner, het muon.

Waarom neutrino's? Neutrino's hebben geen lading. Dat betekent dat ze niet door de magneetvelden tussen sterren en sterrenstelsels worden afgebogen. Ze vliegen recht van de bron naar de aarde.

Neutrino's hebben de eigenschap dat ze enkel gevoelig zijn voor de zogenaamde zwakke wisselwerking. Dat betekent dat ze weinig zin hebben te reageren wanneer ze een atoom tegenkomen. Ze worden bijgevolg niet tegengehouden door gaswolken of stofwolken tussen sterren en sterrenstelsels. Dat heeft als gevolg dat ze, als wij ze detecteren in IceCube, recht naar de bron terugwijzen. Dat is uiteraard ideaal. Er is een klein nadeel: doordat de neutrino's niet zo graag interageren, zijn ze moeilijk te detecteren. Er is een grote detector nodig om ze waar te nemen. Daarvoor wordt meestal een natuurlijk medium gebruikt, namelijk water of ijs.

Wanneer een neutrino naar de aarde vliegt en in de omgeving van IceCube interageert met een atoomkern, dan zal het transformeren in zijn geladen partner, in dit geval in een muon. Bij de energieën die ons interesseren, gaat het muon zodanig snel dat het langs zijn baan een blauwachtig licht uitstraalt, het zogenaamde Cherenkovlicht. Dat is gelijkaardig aan het blauwe licht dat boven een kernreactor is te zien.

De bedoeling van de lichtsensoren die in IceCube zijn geïnstalleerd, is dat lichtpatroon op te nemen. Uit de reconstructie van dat lichtpatroon kan de richting worden bepaald waaruit het neutrino afkomstig is. De afbeelding toont een lichtsensoren waarop is ingezoomd. De lichtsensoren zitten vervaardigd in een glazen bol met een dikte van twee centimeter om te kunnen weerstaan aan de druk van het ijs. Elk van de modules heeft een computer aan boord die het signaal digitaliseert.

Ik heb ook een afbeelding met een schema van de afgewerkte detector. Diep in het ijs zijn er ongeveer vijfduizend lichtsensoren. De detector is af sinds 2010. De ijslaag aan de Zuidpool is drieduizend meter dik. IceCube zelf ligt tussen 1500 en 2500 meter diep. Aan de oppervlakte is iets analoogs gebouwd: IceTop. Het bevat dezelfde lichtsensoren. De bedoeling van IceTop is om de geladen deeltjes, die we kosmische straling noemen en die invallen op de atmosfeer en daarin reacties ondergaan, te bestuderen.

We zijn ook verantwoordelijk voor het onderhoud van de detector. Daarom sturen we elk jaar tussen november en februari een aantal medewerkers naar de Zuidpool. Freija, bijvoorbeeld, werkte tijdens en na haar doctoraat op de basis. Ook Philip, een van mijn doctoraatsstudenten, professor Philippe Herquet van de UMons, en Kael Hanson, die nu aan de ULB verantwoordelijk is voor IceCube en ook verantwoordelijk is voor het nemen van de gegevens, verbleven op de basis.

De detector werd gebouwd en wordt uitgebaat door een internationale samenwerking. Die samenwerking bestaat uit ongeveer 250 wetenschappers uit veertig instellingen verspreid over de wereld, ongeveer fiftyfifty in de Verenigde Staten en in Europa. In België zijn de deelnemers VUB, ULB, UGent en UMons. Voor de constructie van de detector en voor de jaarlijkse operationele kosten hebben we een beroep kunnen doen op het FWO en het FRS-FNRS.

De missie van IceCube is velerlei. Een van de bedoelingen is om een aantal fenomenen uit de kosmos te begrijpen dankzij neutrinosignalen die we verwachten uit objecten als actieve melkwegstelsels, *gamma ray bursts* en andere.

Door neutrino's te bestuderen proberen we enkele grote onbeantwoorde vragen te beantwoorden. Ik behandel er twee: het probleem van de zoektocht naar de identiteit van de donkere materie en het probleem van de oorsprong van de kosmische straling.

Ik begin met de identiteit van de donkere materie. Heel veel observaties van gravitationele effecten tonen aan dat het totale massa/energiebudget van het heelal vandaag eigenlijk maar voor 5% bestaat uit de atomen en elementaire deeltjes die we kennen. 95% van het massa/energiebudget van het universum is eigenlijk onbekend. Uit de analyse van de data verzameld met de Planck-satelliet, onder andere door mijn collega Ringeval, en de modellering door collega's in de theoretische fysica, zoals collega Hertog, blijkt dat ongeveer 27% van dat energiebudget uit materie zou bestaan waarvan we absoluut niet weten wat ze is. Algemeen wordt wel aangenomen dat elk melkwegstelsel een soort halo heeft van dergelijke donkeremateriedeeltjes. Ze hebben een massa, ondergaan gravitatiekracht, en zitten dus geconcentreerd in zware astrofysische objecten, zoals het centrum van de Melkweg of de zon. We geloven ook dat ze overblijfselen, stabiele deeltjes uit het heel prille heelal zijn.

Hoe kunnen wij iets te weten komen over de donkere materie? In de loop van de geschiedenis van het universum zouden de donkeremateriedeeltjes, bijvoorbeeld neutralino's, opgehoopt zijn in de zon. Daar interageren ze af en toe met elkaar en daarbij kunnen neutrino's ontstaan. De neutrino's worden in alle richtingen uitgestraald, dus ook in de richting van de aarde. Hebben we het geluk dat ze interageren in IceCube, dan kunnen we ze waarnemen. We kijken dus onder andere in de richting van de zon naar een exces of een flux van neutrino's met een welbepaalde energie die de donkere materie zou kunnen verklaren. Jammer genoeg hebben we nog geen neutrinosignaal van donkere materie gezien. Er zijn ook nog vele andere experimenten gaande. Over de aard van de donkere materie tasten we dus eigenlijk nog altijd in het duister.

Dan hebben we de vraag naar de oorsprong van de hoogenergetische kosmische deeltjes. In 2013 was er een grote doorbraak in de waarnemingen met IceCube. We registreren met de detector behalve de energie ook de richting van de neutrino's. Die gegevens zetten we uit op een hemelkaart, een beeld van de hemel gezien vanop aarde, met het evenaarsvlak, de noord- en de zuidpool. Elk zwart punt staat voor de richting van een neutrino. Dat zouden we zien als we een neutrinobril zouden hebben.

De meeste van die neutrino's komen uit de aardatmosfeer. We noemen ze standaardneutrino's en we begrijpen ze goed. We zijn blij dat we ze zien, maar eigenlijk zijn ze niet de interessantste. Daarom laten we er speciale filters op los om alleen neutrino's over te houden met een hoge energie.

Zo hebben we van 2011 tot 2012 in het totaal 28 neutrino's waargenomen die van buiten de aardatmosfeer kwamen. Dat is een doorbraak. Het was de eerste keer in de geschiedenis dat we dit soort van neutrino's hebben waargenomen. Ze hebben de hoogste energie die ooit gezien werd, ook bij versnellers. Het lichtpatroon van een van die waarnemingen – we noemen het Ernie – heeft een energie van ongeveer 1000 TeV, dus bijna 1 000 keer de energie van de LHC.

We hebben ook een weergave van de hemelkaart, maar dan alleen voor de 28 neutrino's met hoge energie. We hebben daarop een statistische analyse losgelaten om te zien of er uit sommige richtingen meer neutrino's komen dan uit andere.

Jammer genoeg zijn er nog geen duidelijke aanwijzingen dat bepaalde richtingen meer neutrino's uitstralen dan andere.

We zijn dus nog altijd op zoek naar de oorsprong van die deeltjes. We blijven gegevens nemen voor de volgende tien jaar. We denken echter binnenkort het antwoord te zullen vinden.

Ik besluit. IceCube is de grootste operationele neutrinodetector. In 2013 hebben we een grote doorbraak gerealiseerd en de eerste buitenaardse neutrino's gezien. De aard van de donkere materie is jammer genoeg nog altijd onbekend.

## La portée de la recherche fondamentale Het belang van fundamenteel onderzoek

Baron François Englert, Prix Nobel de Physique 2013

**Mme Dominique Tilmans**, présidente du Groupe de travail Espace du Sénat. – La parole est à M. François Englert, Prix Nobel de physique 2013.

**M. François Englert**. – Je vais vous parler de la portée de la recherche fondamentale, en reprenant tout ce qui a été dit dans un contexte plus général.

Madame la présidente du Sénat, mesdames, messieurs, chers amis, en quatre siècles, la physique a transformé notre vision du monde. Son histoire éclaire le chemin parcouru vers l'intelligibilité scientifique de l'Univers et situe dans cette perspective les défis actuels. Cette histoire marque aussi le rôle social de la quête du savoir.

La physique telle que nous la connaissons aujourd'hui tente d'interpréter la diversité apparente des phénomènes observés comme autant de manifestations particulières de lois générales. La chute des corps, le déroulement des marées, le mouvement des planètes, la révolution des satellites naturels et artificiels, par exemple, s'expliquent qualitativement et quantitativement par la loi newtonienne de l'attraction universelle des masses : deux masses s'attirent en proportion du produit de leurs masses et en proportion inverse du carré de leur distance.

Cette conception d'un monde régi par des lois générales vérifiables expérimentalement est étonnement récente dans l'histoire de l'humanité. Elle débute en Europe, à la Renaissance, et connaît un développement extraordinairement rapide.

À la fin du 17<sup>ème</sup> siècle, Newton, inspiré par les concepts révolutionnaires de Galilée, formule sa loi de gravitation universelle des masses. Il imagine le monde formé de petites entités. Ces petites entités sont devenues nos particules élémentaires.

Au 19<sup>ème</sup> siècle, Maxwell introduit un nouveau concept, le champ, qui, contrairement aux particules, occupe une certaine région de l'espace. Il formule en des termes nouveaux les lois générales de l'électromagnétisme qui gouverneraient tous les phénomènes électriques, tous les phénomènes magnétiques, tous les phénomènes lumineux et tout ce qu'il y a autour des phénomènes lumineux : infrarouges, ultraviolets, ondes gamma, rayons X, etc.

Les notions de champ et de particules sont unifiées au début du 20<sup>ème</sup> siècle en mécanique quantique. La loi newtonienne de l'attraction gravitationnelle est généralisée par Einstein. Son concept de relativité générale ouvre la porte à l'intelligibilité scientifique de l'évolution cosmologique de l'Univers.

Les progrès impressionnants réalisés au cours de la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle dessinent une vision du monde dans laquelle l'ensemble des phénomènes depuis le niveau de l'atome jusqu'aux confins de l'Univers observable sont régis par deux lois fondamentales, à savoir la relativité générale d'Einstein, qui est donc la théorie de la gravitation généralisée, et l'électrodynamique quantique, qui est la version quantique de la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell.

Les interactions gravitationnelles et électromagnétiques sont des interactions à longue portée. Elles agissent sur des objets quelle que soit la distance qui les sépare, que ce soit au niveau des étoiles, des galaxies ou au niveau atomique.

Les découvertes des structures subatomiques, nucléaires et subnucléaires indiquent l'existence d'autres interactions fondamentales, à courte portée cette fois. À la distance qui est la nôtre, nous n'observons pratiquement aucun effet.

Au début des années 60, l'interprétation théorique de ces interactions ou forces à courte portée posait des problèmes apparemment insurmontables. En 1964, Robert Brout et moi, et, peu après, Peter Higgs, postulons l'existence de particules dites « bosons scalaires » formant un condensat qui enveloppe l'Univers entier comme une mer uniforme. Cette mer n'est pas orientée comme le serait le champ d'un aimant, par exemple. Le mot « scalaire » signifie d'ailleurs qu'il n'y a pas d'orientation. Il faut qu'il n'y ait pas d'orientation, évidemment, puisqu'il n'y a pas de direction orientée dans l'Univers. Il est donc essentiel que cela soit une particule scalaire.

Ce condensat peut transformer des forces à longue portée, certaines étant transmises par des particules sans masse, qui se propagent à la vitesse de la lumière et uniquement à cette vitesse, en forces à courte portée en freinant ces particules, qui doivent alors nécessairement être massives.

Voilà, en résumé simplifié, ce qu'est le mécanisme BEH – Brout, Englert, Higgs – qui permet de transmuter certaines forces à longue portée en forces à courte portée et plus généralement d'engendrer la masse de particules élémentaires. Cette masse est un élément essentiel à notre existence, même si ce n'est pas toute la masse, et à l'existence du monde qui nous entoure. Le mécanisme BEH est la pierre angulaire du modèle standard contenant toutes les particules connues et les lois qui les gouvernent. Sa validité est corroborée par les succès du modèle. L'impressionnante découverte récente au LHC du boson scalaire lui-même en fournit une vérification expérimentale directe et précise. Le mécanisme BEH a été récompensé en 2013 par le Prix Nobel de physique.

Le mécanisme et la découverte du boson scalaire étendent l'intelligibilité scientifique du monde à l'infiniment petit, en fait aux niveaux nucléaire et subnucléaire. Ils ouvrent aussi des perspectives du côté de l'infiniment grand, de l'évolution cosmologique de l'Univers. Nous savons que l'Univers primordial était très chaud et qu'il s'est refroidi par l'expansion. Cela devrait se traduire par une évaporation du condensat à haute température dans une phase primordiale sans constituants massifs. La masse du boson scalaire et nos connaissances théoriques concernant la cosmologie suggèrent que cette transition de phase s'est opérée à une température d'environ un million de milliards de degrés alors que l'Univers n'existait que depuis quelques milliardièmes de secondes. Ainsi se profile l'unité de l'infiniment petit et de l'infiniment grand.

L'histoire du développement de l'intelligibilité scientifique est loin d'être terminée. À ce sujet, nous avons d'ailleurs entendu des choses. Le développement prodigieux de nos connaissances éclaire aussi l'étendue de notre ignorance. Quelle est la nature exacte des neutrinos ? Allons-nous découvrir aux énergies encore inexplorées de nouvelles particules élémentaires douées d'autres propriétés comme la supersymétrie, qui doublerait le nombre de particules déjà connues ? Quelle est cette matière invisible, dite « noire », révélée par ses effets gravitationnels mais pas encore détectée autrement, c'est-à-dire directement ? Quelle est la cause de l'énergie noire qui est responsable d'une accélération de l'expansion de l'Univers ? Et, surtout, quelle est l'origine des fluctuations, dans le ciel, du rayonnement cosmique primordial dont l'origine remonte probablement bien avant ce premier milliardième de seconde et qui marque l'origine très probablement des galaxies et des étoiles qui nous entourent ?

La diversité de ces questions, à tout le moins de certaines de ces questions, est peut-être un leurre. Bien des réponses sont sans doute cachées dans l'intervalle qui sépare la formation du condensat et l'origine de l'Univers. Il faut chercher ces réponses dans une fusion de l'infiniment petit et de

l'infiniment grand. La quantification de la relativité générale, c'est en fait l'identification des problèmes de l'infiniment petit et de l'infiniment grand. L'intelligibilité rationnelle de ce que l'on dénomme la création du monde se cache sans doute dans cette fusion. À nous de la découvrir !

L'histoire du développement de l'intelligibilité scientifique que j'ai esquissée est le fruit d'une recherche fondamentale dont les acquis conceptuels et pratiques ont transformé la société. De manière directe et, souvent, indirecte, cette recherche fut à l'origine de pratiquement tous les développements techniques qui sous-tendent la civilisation contemporaine.

Si la recherche fondamentale peut avoir un tel impact, c'est bien sûr par le biais des applications techniques qui en découlent, mais c'est aussi, et peut-être davantage, parce que son appel constant à la créativité la rend exemplaire. Sans réelle créativité, il n'y a pas de vrai progrès technique. Sans elle, la recherche appliquée n'aboutit qu'à des copies sans avenir, rapidement dépassées, qui signalent surtout le danger d'un glissement vers un sous-développement scientifique et technique.

Il est donc essentiel de privilégier une recherche fondamentale qui ne peut exister que dans un climat de liberté totale et d'indépendance par rapport aux impératifs à court terme, politiques ou financiers. Elle requiert une collaboration sans contrainte idéologique entre les universités et les centres de recherches. Si Robert Brout et moi pouvons tirer quelque fierté de notre apport à ce problème, c'est d'avoir contribué à établir des collaborations entre les universités belges et de les avoir développées internationalement. J'appartiens personnellement à l'Université Libre de Bruxelles, mais j'ai aussi donné cours à l'Université Catholique de Louvain et j'ai dirigé de nombreux séminaires à la *Katholieke Universiteit Leuven*, avec laquelle j'ai beaucoup de publications communes. Des relations de travail et d'amitié se sont forgées et se sont développées dans les universités belges, les universités étrangères et les centres de recherches, et elles ne font que s'amplifier. Elles limitent, j'espère, l'impact de projets à trop court terme sur la créativité, dont j'ai souligné le rôle dans la recherche appliquée de qualité.

Après avoir esquissé l'importance de la recherche fondamentale pour le progrès des techniques, je voudrais conclure en soulignant son importance politique et humaine. La diffusion compétente des acquis et des questionnements de la recherche fondamentale permettrait à la population de découvrir la dignité et le plaisir qu'apporte la connaissance. Elle remettrait l'addiction au superflu répandu par les publicités soumises aux intérêts financiers à sa juste place, la seconde. Bref, elle fournirait un accès privilégié à la rationalité. Partant, elle pourrait être un rempart au déferlement d'idéologies irrationnelles, destructrices et dangereuses qui, en Europe en particulier, ont été le soutien des barbaries et qui sont à nouveau menaçantes par la violence et l'intolérance qu'elles transportent.

Il appartient aux organismes de décision de promouvoir la recherche fondamentale et sa diffusion à tous les niveaux. Il s'agit d'assurer les bases d'un développement scientifique et technique durable, et aussi de valoriser la connaissance pour une société plus humaine et plus civilisée.

*(Applaudissements)*

## Échange de vues Gedachtewisseling

**Mme Dominique Tilmans**, présidente du Groupe de travail Espace du Sénat. – Je propose à présent que les personnes présentes dans la salle posent leurs questions aux orateurs.

Ces derniers seront rejoints par M. Christophe Ringeval, professeur à l'UCL au Centre de cosmologie, physique des particules et phénoménologie ; M. Dirk Ryckbosch, professeur à la Ghent University et Head of Department of Physics and Astronomy, ainsi que par M. Christian Barbier. Dr. Barbier earned his PhD in 1983. He set up what would become one of CSL's landmarks. He heads the 'Signal' Laboratory. He also has teaching activities at the University of Liège with courses on Theoretical Physical Cosmology, Remote Sensing and Space Mission Design.

**M. Bernard Van Lysebetten.** – Les radioamateurs utilisent souvent le spectre de radiofréquences. Or, dans le domaine des transmissions par satellites, nous sommes confrontés à l'effet Doppler qui nous amène à une réflexion sur la relativité restreinte et ensuite sur la relativité générale.

Dans un futur relativement proche, sera-t-il possible, selon vous, de modifier le champ gravitationnel et de replier l'espace-temps, comme le prévoyait Einstein ?

**M. Guillaume Bottin.** – Vous avez largement traité de la matière et de la matière noire. Pourriez-vous nous éclairer sur l'antimatière dont on sait peu de chose, si ce n'est qu'elle est presque omniprésente ?

**M. Jean-Marie Frère.** – Je répondrai d'abord à la deuxième question.

L'antimatière est un sujet qui s'apparente un peu à la science-fiction. Toutefois, les hôpitaux pratiquent tous les jours des examens appelés PET scan qui relèvent de ce principe. Ces investigations nécessitent l'injection d'un produit qui, par désintégration dans le corps, produira des antiélectrons – des positrons – lesquels, en s'annihilant avec un électron, produiront deux photons qui seront détectés. Et c'est sur cette base que l'examen peut être interprété.

L'antimatière existe bel et bien autour de nous ; c'est un phénomène quotidien pour le CERN – Centre Européen pour la Recherche Nucléaire – et les hôpitaux. Cela ne signifie pas pour autant qu'un antiélectron va annihilier l'hémicycle du Sénat !

Le mystère réside dans ce constat : matière et antimatière se comportent de la même façon à l'égard de la gravitation. Dans les modèles d'Univers, par exemple le modèle selon Lemaître, l'idée est qu'à la base, la matière et l'antimatière existent en proportions égales. D'où cette question essentielle : pourquoi seule la matière subsiste-t-elle ? A priori, puisque matière et antimatière étaient à égalité, le tout pouvait s'annihiler et donner beaucoup de photons – on le constate avec le satellite Planck. Cependant, un petit excès de matière subsiste ; il s'agit d'une brisure de symétrie entre matière et antimatière et nous ne la comprenons pas actuellement. Ce phénomène est probablement dû au fait qu'il existe trois fois plus de particules que ce qui est nécessaire pour la chimie.

Sachez que ce domaine de recherche est tout à fait actif.

La première question portait sur la possibilité éventuelle de recourber l'Univers pour faciliter la tâche des radioamateurs, et ainsi faire en sorte que les ondes envoyées reviennent plus facilement.

Nous ne sommes évidemment pas en mesure de le faire. Bien sûr, il existe des courbures d'univers et lorsqu'un photon ou un signal radio vient d'une étoile lointaine et passe près du soleil, leur

trajectoire n'est pas tout à fait droite et ils sont déviés. Il faut que l'étoile soit suffisamment importante pour susciter ce phénomène ; un pauvre physicien ne pourrait y parvenir. Il ne faut donc pas craindre non plus que cela nous arrive prochainement.

**M. Colin Sterckx.** – On nous parle beaucoup d'énergie mais de quoi s'agit-il exactement ? J'en sais peu de chose si ce n'est qu'elle peut être conservée.

**M. François Englert.** – Selon Einstein, l'énergie, c'est la même chose que la masse. Attention, il ne s'agit pas la masse d'un objet au repos ; il faut entendre la masse de l'objet comme la difficulté à lui faire subir des changements. Un corps acquiert une masse par son mouvement et son environnement.

L'objet du premier travail extraordinaire d'Einstein sur la masse en relativité restreinte a été de démontrer que la masse d'un corps augmente avec sa vitesse, sans jamais atteindre la vitesse de la lumière. Prenons l'énergie des protons envoyés au LHC – *Large Hadron Collider* – au CERN. Cette énergie est énorme : 125 fois pour la découverte de la particule, mais jusqu'à des milliers de fois la masse du proton au repos, car sa vitesse est extrêmement proche de la vitesse de la lumière.

Il y a donc une équivalence entre l'énergie et la masse en mouvement de tout objet.

**M. Frédéric Soumois.** – L'idée d'un centre international de recherche BEL – Brout, Englert, Lemaître – a été lancée aujourd'hui. J'aimerais que les scientifiques présents nous éclairent sur ce qu'ils voudraient y faire et sur quels types d'outils ils rêvent de construire.

**M. François Englert.** – La Belgique manque vraiment d'un centre de recherche, mais je ne parlerai pas de ce projet-ci puisque mon nom y est associé.

**De heer Thomas Hertog.** – Er worden in de eerste plaats een visie en een voorstel geformuleerd voor een dergelijk onderzoekscentrum. Wij denken dat het België in de 21e eeuw aan de *forefront* als internationale speler in ons domein kan houden. Het onderzoekscentrum zou niet gelieerd zijn aan een universiteit, maar de onderzoekscentra van de universiteiten verenigen en ons ook op internationaal vlak versterken.

**M. Christian Barbier.** – Je travaille dans le domaine spatial, un autre bout de la chaîne scientifique, en quelque sorte.

Ce type de centre pourrait faire office de forum et rassembler les scientifiques qui émettent des théories et vérifient des observations et ceux qui soumettent des projets de moyens scientifiques – dans mon cas, l'Agence spatiale européenne – via des concepts de mission. Je pense évidemment au satellite Planck mais, plus récemment, au projet Euclid. On pourrait imaginer une interaction entre tous ces scientifiques qui émettraient leurs besoins et d'autres scientifiques et ingénieurs qui proposeraient des expériences, des missions qui rencontreraient ces besoins. Ils pourraient constituer une sorte de groupe de pression ou d'entité soumissionnaire d'idées de mission aux agences spatiales telles que l'Agence spatiale européenne ou la NASA.

**M. Philippe Mahoux (PS).** – Puisque nous parlons d'énergie, oserais-je vous demander ce que vous pensez du centre de Cadarache ? Je passe évidemment de la recherche fondamentale à son application.

**M. Jean-Marie Frère.** – Je vais devoir botter en touche, car nous n'avons actuellement pas de réponse. Le centre de Cadarache est un exemple de la volonté de mettre en application un certain niveau de connaissances fondamentales. Il s'agit, en gros, de concevoir des centrales nucléaires qui ne fonctionneraient plus à partir de la fission de l'uranium – technologie très sale – mais à partir de la fusion qui, en principe, génère des produits moins radioactifs, bien qu'une quantité considérable de radioactivité se trouve dans l'anneau du tokamak.

Les centrales à fusion sont un rêve déjà ancien dont la réalisation est toujours reportée à une trentaine d'années... Cette voie de production de l'énergie serait intéressante. Je souligne toutefois que le problème le plus important n'est pas la production d'énergie. Nous avons déjà une centrale à fusion,

le soleil, qui produit une énergie verte en suffisance. Le problème réside plutôt dans le stockage. Certes, les barrages permettent de stocker l'eau et de produire l'énergie lorsqu'elle est nécessaire. Les barrages de l'Eau d'Heure ont une belle capacité mais ils ne couvrent tout de même que 24 à 48 heures du fonctionnement d'un petit parc éolien. Le problème du stockage est donc essentiel. Des solutions sont envisagées, et c'est dans ce domaine qu'il faut, me semble-t-il, concentrer tous les efforts.

La démarche poursuivie au centre de Cadarache porte sur le long terme et n'est pas sans risques. On ne peut donc pas tabler uniquement sur un tel projet pour construire notre futur énergétique. C'est là l'opinion d'un non-spécialiste que je vous livre ici.

**Un intervenant.** – Quels sont, selon vous, les facteurs limitatifs actuels dans la recherche en physique ? S'agit-il de facteurs technologiques ou d'éléments relatifs à la théorie des modèles ? Quelles sont les nouvelles frontières ?

**De heer Thomas Hertog.** – Er werden allerlei waarnemingen gedaan. Sommige van die waarnemingen verwacht men niet binnen een theorie, zoals de donkere energie, de donkere materie. Die waarnemingen vormen een leidraad om theorieën en modellen verder te ontwikkelen. Daartegenover staan aspecten van bestaande modellen die nog nooit werden geverifieerd.

De status van de wetenschap op elk moment in de geschiedenis is er een van wisselwerking tussen waarnemingen, verificatie en theorie. Voorbeelden van wat werd voorspeld in theorieën zijn supersymmetrie en supersymmetrische partners van elementaire deeltjes.

**M. Robert Centner.** – Sans être scientifique, je suis passionné par le sujet. J'aimerais savoir si la notion de vide absolu dont on parlait voici quelques dizaines d'années a toujours le même sens aujourd'hui dans l'Univers et dans l'espace.

**M. François Englert.** – Oui et non, dirais-je. Si l'on parle du vide classique que l'on rencontre dans la recherche des pompes à vide, par exemple, la notion est inchangée.

Toutefois, dans la physique moderne, le terme de « vide » recouvre une dimension bien plus complexe. Ainsi, nous avons parlé tout à l'heure des photons, des particules, etc. En général, le vide est souvent défini comme l'absence de particule. Cependant, en l'absence de toute particule, la mécanique quantique nous apprend qu'il existe tout de même des fluctuations résiduelles de champs. Donc, d'une certaine manière, le vide est plein.

Toutefois, il ne s'agit pas de la notion technique du vide absolu ; c'est la notion théorique fondamentale. Ce vide absolu est essentiel ; il permet bien des choses qui ne se produiraient pas sans lui : l'émission de lumière cohérente et induite, par exemple. La plupart des choses qui existent une fois atteintes les limites de température extrêmement basses sont tributaires du fait que le monde ne se réduit pas simplement à l'absence des choses qui se manifestent, comme les particules.

On peut donner à cela une définition plus générale, mais elle cacherait certains aspects. On peut dire que le vide est l'état d'énergie minimum de la matière, mais cet état ne peut pas être identifié au néant. C'est la grande découverte de la mécanique quantique : le néant n'existe pas, dans un monde où quelque chose d'autre existe.

**M. Jean-Marie Frère.** – J'ajouterai, si vous me le permettez, que le vide n'est pas un endroit où l'on n'arrive pas à respirer. Pour les théoriciens, le vide est en général considéré comme l'état d'énergie minimum. Prenons un objet quelconque de façon à en faire une sorte de pendule. En mécanique classique, je dirai qu'il est à sa position de repos et sans vitesse. En mécanique quantique, je ne peux pas préciser en même temps la position et la vitesse. Soit je dis qu'il n'a pas de vitesse mais il aura alors une certaine énergie parce qu'il ne sera pas au plus bas qu'il puisse être, soit je dis qu'il est au plus bas, mais il aura alors une certaine énergie cinétique parce qu'il aura une vitesse. En mécanique

quantique, le minimum d'énergie n'est pas le zéro. Ce type de fluctuation peut engendrer des choses, comme notre Univers.

**De heer Karim Rega**, student aan VIA-2, Tienen. – Professor De Clercq zei dat twee donkeremateriedeeltjes die met elkaar reageren, een neutrino uitzenden. Ik vraag me af waarop die informatie gebaseerd is.

**Mevrouw Catherine De Clercq**. – In het door mij aangehaalde voorbeeld heb ik me gebaseerd op een van de nieuwe modellen die we supersymmetrie noemen.

Supersymmetrie veronderstelt dat er tussen de materiedeeltjes en de interactiedeeltjes een symmetrie bestaat. Die theorie wordt nu uitgebreid getest in de LHC-versneller van het CERN. Het gevolg van die symmetrie is dat een hele resem nieuwe deeltjes zou bestaan, maar die werden in de LHC jammer genoeg nog niet ontdekt.

In dat model is er een deeltje dat neutralino heet. Het is stabiel en heeft eigenschappen die het mogelijk maken om met elkaar te interageren. De neutrino's worden in feite niet direct geproduceerd. Ik heb dat vereenvoudigd. Meestal worden andere deeltjes geproduceerd, die dan vervallen. Dat geeft neutrino's.

Men zoekt zowel met de LHC-versneller als met IceCube en andere experimenten naar signalen van donkere materie, met als doel ze rechtstreeks of onrechtstreeks te zien. Het supersymmetrische model is zowat het meest populaire model. Het is het model waar we momenteel het meest in geloven.

**Mme Christine Defraigne (MR)**. – Je suis extrêmement modeste car je ne suis pas scientifique. Vous parlez de « notre Univers », mais n'est-on pas confronté à la théorie de plusieurs univers qui se seraient créés à partir des trous noirs de l'espace ? J'espère ne pas dire de bêtise. La réflexion ne porte-t-elle pas sur l'existence d'univers multiples ? Si ces univers devaient un jour entrer en collision, je suppose que nous disparaîtrions tous.

**M. François Englert**. – Je ne suis pas trop inquiet ! (*Sourires*) Il est exact que plusieurs propositions postulant l'existence d'autres univers ont été formulées. On leur a même donné le nom de « Multivers ». C'est fort possible, mais je resterais néanmoins prudent. Il ne faudrait pas que cela soit un prétexte à ne pas réfléchir trop loin. Si les autres univers n'ont aucune influence sur nous – et c'est plutôt ainsi que l'on considère les choses –, cette théorie est une manière de dire que la science a des limites. Un système de « Multivers » de ce genre soulève maintes objections, y compris théoriques.

Souvent, lorsqu'on se trouve face à un problème difficile à résoudre en physique, on a tendance à inventer des choses qui nous dispensent de réfléchir au problème. En l'occurrence, on pourrait définir des soi-disant moyennes de ces univers, décréter qu'il y a vie ici, et non là. C'est ce que l'on appelle le problème anthropique (de *anthropos*).

Je vais illustrer mon propos. La légende veut que Newton ait commencé à réfléchir à la gravitation parce qu'une pomme lui était tombée sur la tête. Il aurait pu réfléchir autrement et considérer, par exemple, que certains arbres produisent des pommes qui tombent et d'autres, des pommes qui ne tombent pas. Évidemment, les pommes qui ne tomberaient pas ne donneraient pas de graines et de nouveaux pommiers ne pourraient se développer. Dans notre Univers, si nous disposons de pommiers portant des pommes, c'est parce que les pommes tombent. Si Newton avait postulé l'existence de deux types de pommiers, il n'aurait pas développé la théorie de la gravitation. Heureusement, il ne l'a pas fait.

J'invite donc les tenants de la théorie du « Multivers » à la prudence.

## Clôture Slot

**Mme Dominique Tilmans (MR).** – Je vais devoir malheureusement briser la magie de ce moment et vous prie déjà de m'en excuser. Je voudrais surtout remercier tous les orateurs de nous avoir entrouvert les portes de l'Univers. Professeur Englert, vous avez insisté sur toute l'importance de la recherche fondamentale pour notre société et vous nous avez aussi fait prendre conscience de toute la dimension de l'homme, cet infiniment petit qui est capable de rechercher, mais aussi d'apporter les réponses à l'infiniment grand.

Soyez remerciés tous, mesdames et messieurs les professeurs, pour votre contribution. Je suis sûre que c'est un moment que peu d'entre nous oublieront, particulièrement les jeunes. Nous espérons tous que parmi ceux-ci, nombreux seront ceux qui se destineront à la carrière scientifique, à la recherche. Notre société a besoin de leurs cerveaux ; ils apporteront certainement des avancées et des innovations pour le bien de la société.

Je vous invite maintenant à prendre le verre de l'amitié au péristyle. Vous aurez ainsi l'occasion de poser des questions aux professeurs. Je vous informe également qu'un rapport reprenant les différentes présentations sera publié sur le site du Sénat.

Je vous remercie encore. Peut-être nous reverrons-nous bientôt au Sénat.