

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 52 (1994)
Heft: 263

Artikel: Le quark top, le modèle standard et l'univers
Autor: Guarinos, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-898804>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 28.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



Le quark top, le modèle standard et l'Univers

J. GUARINOS

Introduction

Les physiciens sont, semble-t-il, sur le point d'établir la preuve de l'existence de la douzième brique élémentaire de l'Univers, la dernière qu'il restait à découvrir, selon la théorie. Si cet événement a bien lieu, ce que l'on appelle le *modèle standard* de la matière recevra une éclatante confirmation, laquelle était, il est vrai, attendue depuis plusieurs mois. Le modèle standard, qui décrit les modes d'interactions des particules élémentaires entre elles et, par conséquent, la structure de l'Univers et son histoire, repose sur l'existence de 12 particules fondamentales à partir desquelles s'est construit tout notre Univers. Seule la plus massive d'entre elles, le *quark top*, échappait encore à sa détection jusqu'à très récemment. Il semble que ce soit désormais chose faite au laboratoire américain *Fermilab*, ou que ce ne soit plus qu'une question de mois. Mais cette mise en évidence, que l'on espère depuis près d'une vingtaine d'années, ne constituerait pas la preuve définitive de la validité du modèle standard. Pour avoir l'assurance que ce dernier décrit correctement notre Univers de matière et de rayonnement, il faudra non seulement n'observer aucun phénomène non prévu par le modèle standard, mais également détecter la particule à l'origine d'un phénomène qui paraît pourtant bien naturel: le fait que toute quantité de matière possède une masse.

De l'importance de la notion de masse en astrophysique

Comprendre le mécanisme qui confère à toute chose une masse est déjà fondamental en soi. En astronomie et en astrophysique, la question de l'origine de la masse possède un attrait supplémentaire. En effet, la masse est un paramètre particulièrement important pour ceux qui étudient les astres et l'Univers. Jugeons-en par quelques exemples:

- C'est la masse d'une étoile qui détermine sa vitesse d'évolution (plus une étoile est massive, plus elle évolue vite).
- C'est de la masse d'une étoile que dépend la façon dont cette dernière mourra.

– Il faut que la masse d'un nuage de gaz interstellaire atteigne un certain seuil pour qu'une étoile puisse se former en son sein, quand le nuage se sera suffisamment condensé sous l'effet de son propre poids. A ce moment-là, des réactions de fusion thermonucléaire s'y déclenchent. Ce sont ces réactions qui sont à l'origine de l'énorme quantité d'énergie rayonnée par les étoiles.

– C'est de la masse d'une planète que dépend sa capacité à retenir ou non son atmosphère, par simple gravité. Or la présence d'une atmosphère semble bien être une condition sine qua non de l'apparition de la vie.

– Qu'il s'agisse:

1. des satellites (naturels ou artificiels) en orbite autour d'une planète,
2. des planètes en orbite autour de leur étoile centrale,
3. de chaque étoile d'un amas stellaire par rapport à ses voisines,
4. des étoiles en orbite autour du centre de leur galaxie,
5. ou de chaque galaxie d'un amas de galaxies par rapport à ses voisines,

ce sont les masses de ces objets célestes (et leurs distances respectives) qui déterminent leurs mouvements relatifs. Dans de nombreux cas, ces mouvements et les valeurs des masses en question peuvent, en induisant des effets de marées ou en provoquant des collisions, engendrer des phénomènes très importants comme, par exemple, la formation de grandes quantités d'étoiles dans les galaxies.

– Enfin, c'est de la masse totale de l'Univers que dépend le destin de celui-ci (Cf. ORION n°261, page 90).

L'Univers: un gaz de galaxies

Pour comprendre, si elle est confirmée, toute la portée de la découverte du quark top qu'une équipe internationale de physiciens vient de rendre publique, il convient de faire quelques

Classification des particules élémentaires. Leur masse M , mesurée ou supposée, est indiquée pour chacune d'elles. La colonne Q indique leur charge électrique. Chaque particule possède son antiparticule, de même masse mais de charge électrique opposée (d'autres caractéristiques sont également inversées). Si la détection du quark top à Fermilab se confirme, les douze constituants fondamentaux de l'Univers auront tous été identifiés. Mais de nombreuses questions au sujet de la matière resteront encore sans réponse définitive, comme par exemple la raison pour laquelle les particules élémentaires ont des masses aussi différentes.

Table 1.	1 ^{re} FAMILLE	2 ^e FAMILLE	3 ^e FAMILLE	Q
LEPTONS	électron: $M_e = 1$	muon: $M = 200 M_e$	tau: $M = 3500 M_e$	-1
	neutrino électronique: $M = 0 ?$	neutrino muonique: $M = 0 ?$	neutrino du tau: $M = 0 ?$	0
QUARKS	up: $M = 10 M_e$	charm: $M = 2500 M_e$	top: $M = 340\,000 M_e ?$	+2/3
	down: $M = 16 M_e$	strange: $M = 340 M_e$	bottom: $M = 8300 M_e$	-1/3



rappels au sujet de notre Univers et du modèle standard. Pour davantage de détails ou pour avoir un éclairage différent sur le sujet, on pourra se reporter à l'article *Les défis communs à la cosmologie et à la physique des particules*, publié par l'auteur dans les numéros 260 et 261 d'ORION.

Les cosmologistes ont l'habitude de comparer l'Univers à un gaz de galaxies, car l'Univers a un comportement un peu comparable à celui d'un gaz dont les *molécules* seraient les galaxies. Or, au même titre que les solides ou les liquides, tout gaz possède une masse. Prenons un exemple: un ballon gonflé à l'hélium s'élève dans l'air parce que l'hélium est plus léger que l'air. Le mécanisme qui en est responsable, et qui concerne tous les fluides, est le même que celui qui fait remonter une bulle d'air ou un ballon à la surface de l'eau. Il provient d'une différence de densité: la densité de l'hélium est inférieure à celle de l'air, tout comme la densité de ce dernier est inférieure à celle de l'eau. La densité étant la valeur moyenne de la masse par unité de volume, cela signifie que l'on peut attribuer une masse à une unité de volume de gaz. Or, un gaz est fait de minuscules molécules, lesquelles sont des assemblages d'*atomes*. Ce sont donc ces molécules qui ont une masse caractéristique. Prenons l'exemple d'un gaz bien connu de chacun de nous: la vapeur d'eau. Les molécules d'eau comprenant chacune un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène, leur masse est égale à la somme des masses de ces trois atomes. Dans le cas d'un gaz résultant d'un mélange d'autres gaz, il y a bien sûr plusieurs espèces différentes de molécules, chacune ayant une masse différente. Par exemple, l'air contient du gaz d'oxygène, dont la molécule est formée de deux atomes d'oxygène, mélangé à beaucoup de gaz d'azote, dont la molécule est constituée de deux atomes d'azote, ainsi qu'à d'autres gaz en très petites quantités.

Si les galaxies sont identifiées aux «molécules de l'Univers», il ne faut cependant pas prendre cette analogie au pied de la lettre. Tout d'abord, les galaxies sont très différentes les unes des autres et on ne peut pas vraiment leur attribuer une masse unique ni même considérer que l'on est en présence d'une sorte de mélange de molécules, comme dans le cas d'un mélange de gaz. En outre, l'épineux problème de la masse cachée (Cf. ORION n°261, page 90) nous montre que la question du calcul de la masse de l'Univers est beaucoup plus complexe que celle du calcul de la masse d'une certaine quantité de gaz. En outre, la relativité einsteinienne nous enseigne que l'énergie, dont l'Univers regorge sous la forme de rayonnements divers, contribue, au même titre que la masse, à déformer l'espace-temps dont la structure conditionne l'évolution de l'Univers (Cf. ORION n° 260, page 10). Il n'en reste pas moins vrai que l'Univers tout entier obéit à des équations qui furent établies en le considérant comme un gaz de galaxies, dont la pression et la densité ont les valeurs que l'on observe. L'Univers est donc un milieu dont la «masse par unité de volume» est un paramètre fondamental, ne serait-ce que du point de vue de la cosmologie.

D'où provient la masse d'une galaxie, sorte de «molécule du gaz universel»? Après tout, le photon, qui est un grain de lumière, ne pèse rien. Pourquoi la matière qui compose les galaxies est-elle massive? La physique des particules donne quelques éléments de réponse, comme nous allons le voir.

Les structures de la matière dans l'Univers

Une molécule, nous l'avons vu, est constituée de plusieurs atomes (qui peuvent être identiques entre eux). Deux atomes peuvent se combiner pour former une molécule lorsqu'ils se partagent l'un de leur constituant externe, un *électron*. Un atome, quant à lui, est constitué d'un noyau autour duquel orbitent des électrons. La dimension moyenne d'un atome est voisine du

dixième de milliardième de millimètre, mais la taille de son noyau n'excède pas la dix millième partie du diamètre atomique... Les galaxies qui composent l'Univers sont principalement constituées de molécules, d'atomes et de noyaux. La question de savoir d'où vient la masse des galaxies se trouve donc transformée: il faut savoir ce qui donne une masse aux noyaux et aux électrons puisque, avec ces deux ingrédients, on fait les atomes et les molécules.

Si l'on effectue des statistiques sur les noyaux atomiques qui peuplent l'Univers, on s'aperçoit que 90% d'entre eux sont des noyaux d'atomes d'hydrogène. Il s'agit là du plus simple noyau atomique. Il est formé d'une seule et unique particule: un *proton*. Le proton porte la plus petite charge électrique positive observable directement. Elle est égale en valeur absolue à la charge de l'électron, mais de signe opposé: tandis que la charge du proton vaut +1, celle de l'électron vaut -1, cette plus petite charge électrique servant d'unité.

Après celui de l'atome d'hydrogène, le noyau le plus répandu est celui de l'atome d'hélium, formé de deux protons et de deux *neutrons*, et qui constitue 9% des noyaux atomiques de l'Univers. Quant aux noyaux atomiques du carbone et de l'oxygène, si utiles à la vie, ou de l'azote, l'élément qui constitue les quatre cinquièmes de notre atmosphère, ou encore du fer, à la base de notre civilisation, ils constituent, avec près d'une centaine d'autres, seulement environ 1% de tous les noyaux de l'Univers.

Dans un milieu froid, les noyaux sont entourés d'un cortège d'électrons et n'existent donc que dans les atomes. Si la température est suffisamment basse, les électrons et les protons se trouvent en nombres égaux. Par exemple, l'oxygène, qui constitue un cinquième de notre atmosphère, possède un noyau comprenant 8 protons et entouré de 8 électrons. Ceci permet à l'atome d'oxygène d'être électriquement neutre. Mais un noyau comprend également des neutrons. Comme leur nom l'indique, les neutrons ne contribuent pas à la valeur de la charge électrique du noyau: ils sont neutres. On caractérise les éléments chimiques par le nombre de protons qu'ils recèlent dans leur noyau. Mais, pour un même élément chimique, on peut avoir plusieurs «espèces» différentes, selon le nombre de neutrons qui sont agglutinés aux protons. On parle alors d'*isotopes*. Par exemple, il existe 2 isotopes de l'hélium: l'hélium 3, qui comporte 2 protons et un neutron, et l'hélium 4, qui se distingue du premier par la présence d'un second neutron. Si la charge électrique ne s'en trouve pas modifiée, la masse, elle, subit une modification importante (en proportion!) lorsque s'ajoute un neutron au noyau. En effet, la masse du neutron est sensiblement égale à celle du proton, qui vaut $1.67 \cdot 10^{-27}$ kg, soit environ deux millièmes de milliardièmes de milliardièmes de milligrammes.

Dans tout milieu rempli d'atomes, au fur et à mesure que la température ambiante augmente, les atomes perdent des électrons, ces derniers étant arrachés lors des chocs entre atomes. En effet, la température d'un milieu est tout simplement donnée par la vitesse moyenne d'agitation des particules qui le composent. Par conséquent, plus la température du milieu augmente, plus les collisions entre atomes sont nombreuses et violentes, et plus les électrons externes sont susceptibles d'être arrachés. Il se forme donc ce que l'on appelle des atomes ionisés, ou ions, qui, dans le cas présent, comprennent moins d'électrons que de protons. Ces atomes ont donc perdu leur neutralité électrique et portent une charge positive, égale à la différence entre le nombre de protons et celui des électrons. Si la température est suffisamment élevée, les électrons sont tous arrachés et il n'y a plus que des noyaux,

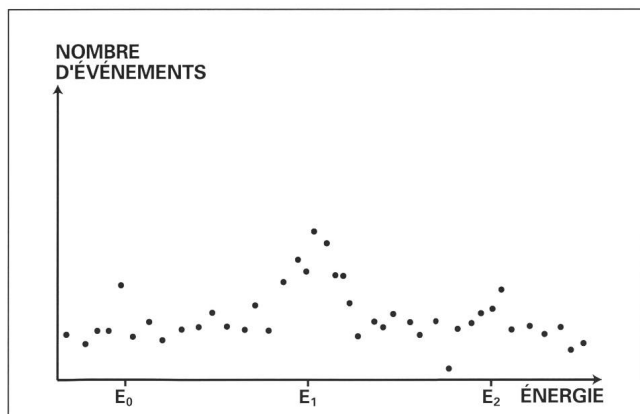


dépourvus de leur habituel cortège d'électrons. Le manque – ou l'absence – d'électrons n'a cependant que peu de conséquences au niveau de la masse de l'ion: l'électron est en effet environ 2000 fois plus léger que le proton ou le neutron. Mais pour calculer la masse d'une galaxie qui compte des milliards de milliards de milliards de milliards d'électrons (et beaucoup plus encore!), la masse des électrons doit être prise en compte.

Actuellement, dans les galaxies, la matière visible ou détectable se trouve sous forme moléculaire, atomique ou nucléaire. Les molécules se trouvent surtout dans le milieu interstellaire (Cf. l'article de J. Guarinos et D. Pfenniger, dans ORION n° 255) mais aussi dans les systèmes planétaires; nous en sommes la preuve. Les molécules peuvent même atteindre un très haut degré de complexité. Ce sont les molécules qui, en s'associant en cellules, forment l'élément de base de tout organisme vivant. Les atomes, neutres ou ionisés, peuplent en grand nombre le milieu interstellaire mais aussi les couches superficielles des étoiles. Quant aux noyaux dépourvus d'électrons périphériques, ils forment le cœur des étoiles, même si l'on en rencontre également dans le rayonnement cosmique.

Abstraction faite des particules sans masse qui le sillonnent de toutes parts comme, par exemple, les photons, l'Univers est donc constitué de protons, de neutrons et d'électrons. Mais on sait depuis environ un quart de siècle que les protons et neutrons sont eux-mêmes constitués de particules encore plus petites: les *quarks*. Pour faire un proton, il faut combiner trois quarks appartenant à deux espèces différentes. C'est une combinaison différente de trois quarks appartenant aux deux mêmes espèces que précédemment qui permet de reconstituer un neutron. Ces deux espèces sont le *quark up* et le *quark down*. Le premier ayant une charge électrique de $+2/3$ et le second de $-1/3$, il devient évident que la combinaison up-up-down est un proton, tandis que l'assemblage up-down-down est un neutron. Par conséquent, la partie matérielle de l'Univers actuel est constituée d'électrons, de quarks up et de quarks down. La Galaxie, le Soleil, la Terre, notre corps ne sont que des assemblages différents de quarks up, de quarks down et d'électrons, groupés en quantités... astronomiques! Par exemple, dans un litre d'eau, il y a plus d'un milliard de milliards de milliards de quarks!

Figure 1a. Nombre d'événements observés en fonction de l'énergie. Il faut davantage de données pour pouvoir affirmer que l'on a détecté des particules de masses E_0/c^2 ou E_1/c^2 ou encore E_2/c^2 .

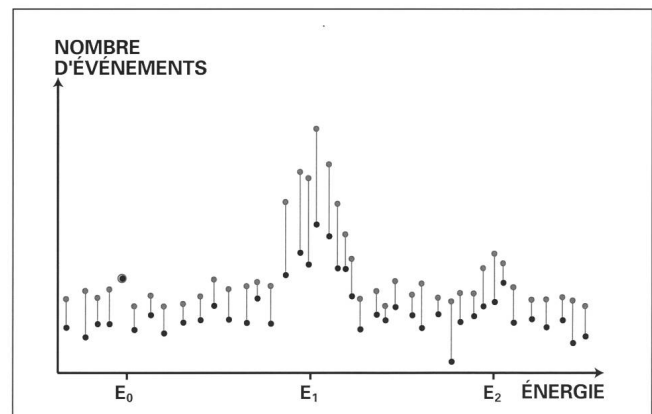


L'électron n'est pas un quark. Il appartient à une autre classe de particules élémentaires: les *leptons*. Notre Univers matériel est donc constitué de deux quarks et d'un lepton. Pourtant, le modèle standard prévoit l'existence de 6 quarks et de 6 leptons. De fait, on a déjà pu détecter, directement ou indirectement, les 6 leptons et 5 des 6 quarks. Et il semble bien que le quark top, celui qui manquait encore à l'appel, soit sur le point de figurer sur le «tableau de chasse» des physiciens... Mais pourquoi a-t-on besoin de douze particules élémentaires pour expliquer l'Univers, alors que l'on vient de voir que seulement trois suffisent à décrire tout ce que nous observons? L'explication viendra plus naturellement en considérant la façon dont on peut classer ces douze particules. La table 1 montre que l'on peut non seulement établir une distinction entre les leptons et les quarks, ces derniers étant définis comme les particules élémentaires sensibles à l'interaction forte (Cf. ORION n° 260 et 261), mais aussi séparer les douze particules en trois familles. Toutes ces particules interagissent en échangeant des *bosons intermédiaires*, les messagers des quatre interactions fondamentales de la nature (Cf. ORION n° 260, page 15).

Les six leptons sont divisés en trois leptons chargés (leurs charges électriques sont égales et négatives) et trois leptons électriquement neutres: les *neutrinos*. Les leptons chargés sont l'électron, dont la charge électrique sert d'unité pour toutes les particules, le *muon* et le lepton *tau*. Chacun des trois neutrinos est associé à l'un des leptons chargés. L'électron est un constituant essentiel de la matière: il entre dans la composition des atomes et est à la base des phénomènes chimiques (formation des molécules) et électriques (un électron est un «grain» de courant électrique). Les quarks sont, quant à eux, porteurs de charges électriques fractionnaires. Seuls les quarks up et down rentrent dans la composition des noyaux atomiques.

Un examen de cette table montre une très grande disparité dans les masses de ces particules. Une tendance est toutefois évidente: si l'on excepte les neutrinos, dont la masse, à supposer qu'elle ne soit pas nulle (ce dont personne n'est sûr), est si faible qu'elle échappe pour le moment à toute tentative d'évaluation, on constate que la masse des particules augmente toujours lorsque l'on progresse horizontalement vers la droite sur chaque ligne de la table 1. Autrement dit, pour les leptons chargés comme pour les quarks de charge $-1/3$ ou encore les quarks de charge $+2/3$, la masse augmente chaque fois que l'on passe d'une famille à une autre famille de rang plus élevé. Prenons

Figure 1b. Davantage de données ont été recueillies. La détection de particules de masses E_1/c^2 est confirmée. Celle des particules de masses E_0/c^2 semble plutôt attribuable à une fluctuation du bruit. Plus de données sont nécessaires pour être fixé sur ce qui se passe à l'énergie E_2 .



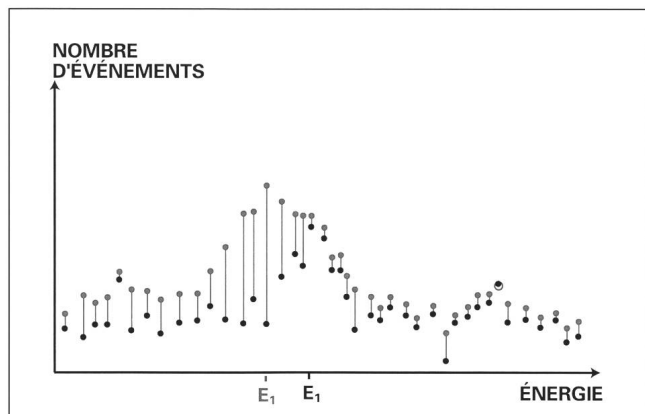


Figure 1c. Autre évolution possible de la situation décrite dans la figure 1a: la détection des particules de masses voisines de E_1/c^2 n'était pas due à une fluctuation du bruit, mais l'accroissement des données montre que leur masse doit être révisée.

On observe que le pic de cette courbe est plus large et moins pointu que dans le cas de la figure 1b. Les détections sont donc plus «étalées» de part et d'autre du nombre maximal de détections. Cela signifie que l'incertitude sur la masse est plus importante. En vertu du principe d'incertitude de Heisenberg. (Cf. article dans ORION N° 260), on peut en conclure que la durée de vie de la particule de masse égale à environ E_1/c^2 est inférieure à celle à laquelle la figure 1b permettait d'attribuer une masse de E_1/c^2 .

l'exemple des leptons chargés. La masse du muon, membre de la deuxième famille, est environ 200 fois supérieure à celle de l'électron, son correspondant dans la première famille. Mais c'est la particule tau, dans la troisième famille, qui possède la masse la plus élevée: environ 3500 fois celle de l'électron. Pour mieux comprendre la subdivision en familles, ajoutons que l'augmentation de la masse avec le passage d'une famille à l'autre s'accompagne d'une diminution de la durée de vie, c'est-à-dire de l'intervalle de temps moyen pendant lequel la particule existe, avant qu'elle ne se désintègre. Reprenons l'exemple des leptons chargés: tandis que l'électron est stable, ce qui signifie que sa durée de vie est infinie (à moins qu'il ne fasse partie des victimes de nos collisionneurs de particules!), le muon possède une durée de vie de seulement deux micro-secondes (2 milliardièmes de seconde). Mais le tau, lui, ne survit pas plus de 4 millièmes de milliardième de seconde! Autrement dit, plus les particules sont massives, plus elles sont éphémères.

En fait, seuls les membres de la première famille peuvent être considérés comme les constituants de la matière stable que nous observons autour de nous. Les membres des deux autres familles ne se rencontrent que lorsque l'énergie qui caractérise le milieu ambiant peut entretenir leur existence ou encore lorsque, ponctuellement, un événement crée suffisamment d'énergie pour que, momentanément, ces particules existent. Ceci explique que l'on puisse tout de même observer les membres des deuxième et troisième famille dans les rayons cosmiques (ou dans les gerbes issues du bombardement de l'atmosphère terrestre par le rayonnement cosmique), ou encore dans les collisionneurs de particules, lesquels transforment de l'énergie cinétique en masse, en vertu du principe d'équivalence entre la masse et l'énergie. Dans l'Univers actuel, seuls les quarks up et down entrent dans la constitution de la matière. Lorsque d'autres quarks sont momentanément créés, ils se désintègrent très vite en particules plus légères, pour finalement donner naissance à des quarks up et down: les particules instables se désintègrent toujours spontanément en particules plus légères. Quoi qu'il en soit, c'est donc le

mécanisme qui assigne une masse aux quarks up et down ainsi qu'à l'électron et, s'ils ne sont pas dépourvus de masse, aux neutrinos (lesquels sont stables), c'est donc ce mécanisme que l'on doit comprendre si l'on veut expliquer le fait que la matière possède une masse.

Des particules introuvables mais qui restent «disponibles»

Le modèle du Big Bang nous enseigne que la température de l'Univers subit une décroissance continue depuis l'explosion initiale, une décroissance proportionnelle à son expansion. Cette diminution de la température s'accompagne d'une diminution de la densité d'énergie dans l'Univers: puisque l'Univers se dilate, l'énergie libérée lors du Big Bang se répand dans un volume en constante augmentation, d'où une densité d'énergie qui diminue sans cesse. Les calculs montrent qu'au tout début de l'Univers, pendant une fraction du premier milliardième de seconde après le Big Bang, la température était telle que toutes les 12 particules pouvaient coexister. En outre, à cette époque, les quarks n'étaient pas tenus de former des associations (en protons ou en neutrons par exemple) pour avoir le droit d'exister. Puis, très vite, l'énergie moyenne de chaque parcelle de l'Univers diminuant avec la température de ce dernier, les particules de masses «élevées» ont cessé d'exister et les quarks se sont groupés. Peu à peu, l'Univers a commencé de se façonner en quelque chose de structuré qui ressemble à notre Univers actuel, âgé de 12 à 18 milliards d'années. Mais entre temps, il a fallu que les atomes neutres se forment, ce qui a pris environ 300 000 ans depuis le Big Bang...

Les quarks strange, charm, bottom et top n'existent donc plus dans l'Univers actuel, descendu à un niveau d'énergie moyenne insuffisant pour autoriser leur existence. Mais, comme le muon et le lepton tau, ils restent «disponibles» dès qu'un événement crée localement une quantité d'énergie suffisante pour que, convertie en matière par la relation d'Einstein liant la masse et l'énergie, elle soit au moins équivalente à la masse de l'une de ces particules.

En fait, même si, dans l'Univers actuel, les quarks top (par exemple) n'existent plus «à l'état naturel», la nécessité de postuler leur existence dans le schéma de construction de la matière est indiscutable. En effet, sans entrer dans les détails compliqués des modes de désintégration des particules élémentaires, on peut énoncer la règle suivante: la durée de vie d'une particule ou d'un boson intermédiaire est une fonction décroissante du nombre de façons dont elle peut se désintégrer. Ce nombre dépend directement du nombre de types de particules auxquelles la désintégration de la «particule mère» peut donner naissance. Plus il existe de particules en lesquelles cette dernière peut se désintégrer, plus sa durée de vie est courte.

Un avis de recherche pour le quark top

C'est ainsi que des expériences menées en 1989 près de Genève au CERN, le laboratoire européen de physique des particules, ont pu déterminer que la durée de vie du boson Z^0 , vecteur de l'interaction nucléaire faible, n'est compatible qu'avec l'existence de trois types de neutrinos, pas un de plus ni un de moins. En outre, des considérations de symétries (bien mises en évidence par la table 1) ont permis d'en déduire que le nombre de neutrinos donne le nombre de familles de particules, chaque famille étant constituée de deux leptons et de deux quarks. Par conséquent, d'après les résultats du CERN, l'Univers s'est créé à partir de trois familles de particules, ce qui donne six leptons et six quarks. Il était donc crucial de pouvoir détecter ce qui semble bien être la dernière brique



élémentaire de la matière qui résistait encore aux recherches des physiciens: le quark top. Même si cette brique ne se trouve plus à l'état naturel dans l'Univers. La découverte du quark top confirmera les idées que les physiciens ont conçues au sujet de la structure de la matière, idées regroupées et mises en équations dans ce que l'on appelle le modèle standard. En revanche, si le quark top n'est pas observé, c'est le modèle standard tout entier qu'il faudra revoir... Le quark top comblerait un vide important dans la table 1: sans lui, la troisième famille est incomplète; sans lui, les quarks et les leptons ne sont plus en nombres égaux, ce que la théorie exige. Bref, c'est la survie du modèle standard qui repose sur l'existence du quark top.

Sur la piste du quark top

Actuellement, seul le *Tevatron*, un collisionneur de protons-antiprotons du laboratoire Fermi («*Fermilab*»), près de Chicago, aux Etats-Unis, autorise tous les espoirs de découvrir le quark top. S'il ne permet pas d'y parvenir, ce sera alors au futur collisionneur du CERN, le «*Large Hadron Collider*», que cet honneur reviendra. Le *Tevatron*, un anneau de 6.3 km de circonférence et auquel deux équipes internationales de plusieurs centaines de chercheurs chacune travaillent, permet d'obtenir des énergies de 1.8 TeV (prononcer «Téraélectrons-volts») à chaque collision d'un proton avec un antiproton. Un TeV vaut 1000 GeV (Gigaélectrons-volts) et un GeV signifie 10^9 eV. Par conséquent, 1.8 TeV vaut 1800 milliards d'électrons-volts. Un électron-volt est l'énergie acquise par un électron accéléré sous une tension de 1 volt. Pour mieux fixer les idées, la masse d'un proton convertie en énergie (par la fameuse relation $E = mc^2$) devient égale à 940 MeV/c² (Méga électrons-volts divisés par le carré de la vitesse de la lumière), soit 940 millions d'électrons-volts, si l'on pose que c égale 1 (la vitesse de la lumière, de 300 000 km/s, devient alors l'unité de vitesse).

Un antiproton possède la même masse que le proton mais une charge électrique opposée, ce qui permet de l'accélérer dans le sens inverse du sens de parcours du proton dans l'anneau. A chacune de ces collisions, l'énergie totale créée lors du choc frontal du proton et de l'antiproton est en réalité partagée par plusieurs «systèmes» quark-antiquark: n'oublions pas que le proton est un sac¹ de trois quarks séparés par un vide immense, et que l'antiproton est un sac de trois antiquarks séparés par le même vide. Notez que, par souci de simplicité, nous laissons de côté les gluons qui lient les quarks entre eux et qui viennent encore compliquer le résultat des collisions! Les produits des collisions globales proton-antiproton ne sont pas simples à analyser, pas plus que l'énergie de chaque collision quark-antiquark, ou «événement», ne se déroule à une énergie bien définie à l'avance. Si un proton heurte un antiproton avec une énergie cinétique de 1.8 TeV, c'est-à-dire si chacun des deux faisceaux que l'on accélère l'un vers l'autre acquiert, par sa vitesse, une énergie de 900 GeV, on peut dire que les collisions entre un quark et un antiquark se produiront à une énergie moyenne de 300 GeV.

Si le *Tevatron* échoue dans sa quête du quark top, le LHC constituera probablement la solution du problème: il permettra

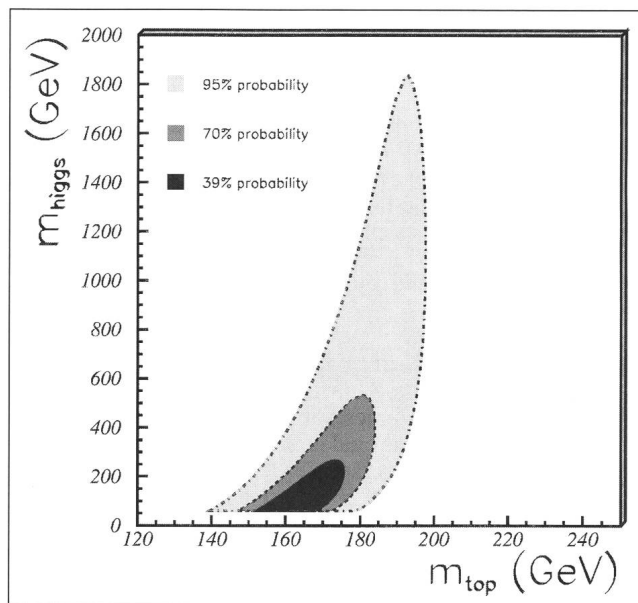


Figure 2. (Cf. texte). Graphique aimablement fourni par Alessandra Caner (CERN/CDF-Fermilab) et Michael Koratzinos (CERN).

en effet d'obtenir des collisions proton-antiproton de 14 TeV, autorisant des interactions entre quarks et antiquarks à des niveaux d'énergie de l'ordre du TeV. C'est plus qu'il n'en faut pour le quark top dont la masse se situerait entre 130 et 200 GeV/c², d'après les expériences menées au CERN et à Fermilab: d'une part, aucun quark top n'a pu être mis en évidence en dessous de 130 GeV/c²; d'autre part, d'après la théorie, une masse supérieure à 200 GeV/c² (presque équivalente à la masse du noyau d'un atome de plomb) ne permettrait pas d'observer certains taux de réactions de désintégration radioactive, avec les valeurs qui sont mesurées par l'expérience. Autrement dit, si le quark top possédait une masse supérieure à 200 GeV/c², certaines réactions de désintégration se produiraient plus souvent qu'elles ne le font.

Des indications de l'existence du quark top...

Le 26 avril dernier, l'équipe CDF (pour «Collider Detector at Fermilab»), qui rassemble 440 chercheurs de plusieurs pays, a annoncé avoir observé au *Tevatron* plusieurs événements semblant indiquer la matérialisation puis la désintégration d'un quark top. Cependant, avant de crier victoire, il faudra attendre encore quelques mois. Examinons les faits.

A partir de 16 millions d'événements susceptibles d'impliquer un quark top et qui furent enregistrés pendant une série d'expériences menées au *Tevatron* entre 1992 et 1993 et comprenant pas moins de 1000 milliards de collisions, 12 candidats quarks top ont été isolés. Ils correspondent au scénario suivant, prévu par le modèle standard: lors d'une collision proton-antiproton, un quark top est créé en même temps que son antiparticule (un antiquark top), lesquels se désintègrent en un quark bottom, un boson W^+ , un boson W^- (tous deux messagers de l'interaction nucléaire faible) et un antiquark bottom. C'est donc l'observation de ces quatre produits de la désintégration d'un quark top et de son antiparticule, qui permet de soupçonner l'existence préalable et extrêmement brève d'un «doublet top-antitop». Ces produits vont eux-mêmes se désintégrer pour finalement aboutir à la matérialisation de particules stables. Mais auparavant, on aura retracé leur parcours grâce à des détecteurs

¹ Le fait de souvent trouver le proton décrit comme un sac de quarks doit être attribué à la manière dont ces derniers sont confinés à l'intérieur du proton: la force qui les lie entre eux augmente avec la distance de telle façon qu'ils jouissent d'une grande liberté de mouvement à l'intérieur du proton, tout en étant incapables de s'en échapper. Tout se passe donc comme si les quarks étaient enfermés dans un sac, à l'intérieur duquel ils pourraient s'agiter.

extrêmement sophistiqués, de façon à pouvoir calculer l'énergie cinétique de chacun d'eux. Un simple calcul permet ensuite d'en déduire la masse de la particule qui leur a donné naissance en se désintégrant.

Sur la base des 12 candidats retenus, la masse calculée pour le quark top est de $174 \text{ GeV}/c^2$, avec une incertitude de $16 \text{ GeV}/c^2$. Le quark top semble donc presque aussi lourd que le noyau d'un atome de platine! Jusque-là, tout est correct: cette valeur est bien comprise entre les bornes inférieure et supérieure qui avaient été établies auparavant. D'où vient donc la prudence avec laquelle les physiciens, y compris ceux de l'équipe CDF, accueillent ou annoncent ces résultats?

... mais pas encore de preuve!

La raison en est simple. Si un institut de sondage interroge un échantillon de 10 personnes sur leur intention de vote aux prochaines élections nationales, le résultat de ce sondage, même s'il montre que 8 personnes donnent la même réponse, ne pourra pas être considéré comme une indication fiable. Si le même sondage est effectué sur un échantillon de 1000 personnes, son résultat pourra sérieusement être considéré comme un élément d'appréciation... sans pour autant effacer l'incertitude qui pèse sur lui. Plus le nombre de personnes interrogées augmentera, plus cette incertitude se réduira. Elle ne deviendra cependant nulle que lorsque tous les électeurs potentiels auront été interrogés!

Cette image illustre la difficulté des physiciens engagés dans la quête du quark top: 12 candidats, ce n'est pas suffisant pour décider si, oui ou non, on a bien mis en évidence le quark top. Il faudra donc encore analyser des millions d'événements (intervenus lors de milliards de collisions) pour que le nombre de candidats retenus devienne réellement significatif. Plus la masse du quark top est élevée, plus les collisions quark-antiquark atteignant une énergie suffisamment élevée pour autoriser sa matérialisation sont rares et, par conséquent, plus le taux de production du quark top est bas. Hélas, une masse de $174 \text{ GeV}/c^2$, qui donne une masse de $348 \text{ GeV}/c^2$ pour la paire top-antitop, ne permet pas d'espérer un grand nombre d'événements candidats en scrutant les produits «d'à peine» 1000 milliards de collisions (proton-antiproton) se produisant au niveau d'énergie fourni par le Tevatron...

Ces considérations statistiques suffisent-elles à expliquer la volonté des physiciens d'observer davantage de détections avant qu'ils s'estiment en mesure d'affirmer tenir la preuve définitive de l'existence du quark top? La question peut se poser: il reste en effet à expliquer pourquoi le recours à la statistique est nécessaire pour interpréter les résultats. Après tout, pourrait-on rétorquer, ne suffit-il pas d'observer le cas d'une seule personne qui s'enrhume par une belle journée de printemps pour en déduire que le rhume peut s'attrapper même lorsqu'il ne fait pas froid? Eh bien la réponse est non! Ce serait négliger la possibilité que l'on ait observé un cas de rhume des foins! Les symptômes sont les mêmes, mais la cause est différente: le rhume des foins «mime» les symptômes du rhume de cerveau, mais ce n'est pas la même affection de l'organisme. De la même façon, beaucoup d'autres événements peuvent «imiter la signature du quark top», sans impliquer la présence de celui-ci. Voilà pourquoi on parle de *candidats* et non de détections.

L'apparition d'un W^+ , d'un bottom, d'un W^- et d'un antibottom peut être causée par d'autres phénomènes que la désintégration d'un top et d'un antitop (Cf. figure 3). On regroupe ces autres phénomènes sous l'appellation de «bruit», car ils empêchent la détection du phénomène recherché un peu comme un bruit de fond peut empêcher d'entendre un son

particulier que l'on guette. Plus l'intensité de ce son est faible, plus on a de difficultés à l'isoler du bruit de fond et à le détecter, le son ne se détachant pas assez du bruit de fond. Mais si le même son (par exemple la même note) est émis plusieurs fois en même temps, sa détection sera grandement facilitée. Pour la détection du quark top, c'est un peu la même chose: si l'on détecte un grand nombre d'événements identiques survenus exactement à la même énergie, il sera plus difficile d'attribuer ces événements à une fluctuation du bruit un peu plus marquée qu'en moyenne. Par conséquent, la marche à suivre est toute tracée: il faut continuer à analyser un grand nombre de collisions. S'il se confirme que des événements candidats se produisent toujours à la même énergie et à un taux que le bruit seul n'explique pas, cela signifiera que l'on aura enfin détecté le quark top, et que celui-ci possède la masse correspondant à l'énergie à laquelle se sont produits tous ces événements (divisée par le carré de la vitesse de la lumière).

Deux autres cas de figure sont possibles (Cf. les figures 1a, 1b et 1c). Première possibilité: il se confirme qu'un nombre «anormalement élevé» d'événements se produisent, mais l'accumulation de nouveaux événements candidats déplace quelque peu le «pic» de la courbe donnant le nombre de candidats en fonction de l'énergie. Dans ce cas, le quark top aura bien été découvert, mais sa masse sera révisée. Le dernier cas est le moins favorable: l'accumulation de nouvelles données ne confirme tout simplement pas la réalité du phénomène, et la «détection» du quark top n'était qu'une fluctuation du bruit. C'est ce qui est arrivé il y a une dizaine d'années au CERN, lorsqu'une équipe avait détecté une série d'événements à des énergies comprises

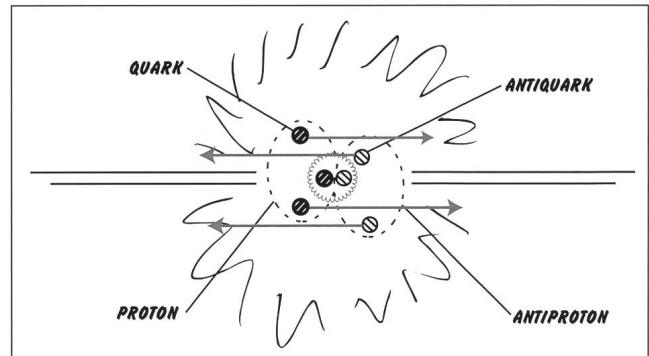


Figure 3a.

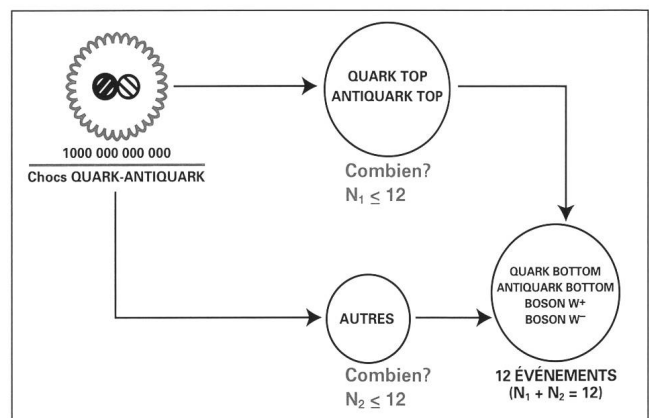


Figure 3b. Combien des 12 événements retenus sont-ils attribuables à la désintégration d'un quark top et d'un quark antitop? (Cf. texte)



entre 30 et 50 GeV et que, de nouvelles données s'accumulant, les physiciens avaient vu le pic se «fondre» peu à peu dans le bruit...

Un nombre de candidats à la fois trop faible et trop élevé

Il est donc clair que, du point de vue de la fiabilité des statistiques, 12 candidats tops, ce n'est pas assez. Mais d'autres problèmes viennent compliquer la tâche des physiciens de l'équipe CDF. En effet, d'après la théorie, 1000 milliards de collisions proton-antiproton à 1.8 TeV ne devraient donner lieu qu'à la matérialisation de 4 ou 5 tops, pas davantage: 12 candidats, c'est un peu trop. Et ce n'est pas tout: l'autre équipe engagée dans la quête du quark top au Tevatron, l'équipe D0, ne semble pas confirmer les résultats de CDF. Pour cette équipe, qui souffre également d'un nombre encore trop faible d'événements observés, seulement 7 candidats ont été retenus, avec un plus grand risque que ceux-ci proviennent d'une fluctuation du bruit.

Alors, douze candidats, c'est trop ou ce n'est pas assez? La question n'est pas exactement là. Ce qu'il faut, c'est augmenter le nombre de collisions analysées. C'est ce nombre qui n'est pas encore assez élevé. Les physiciens des deux équipes devront donc encore patienter quelques mois. Lorsqu'ils auront engrangé suffisamment de données et qu'ils les auront passées au «peigne fin», à l'aide de leurs puissants ordinateurs, leurs résultats convergeront probablement, et seront vraisemblablement conformes à la théorie. Alors, et alors seulement, ils sauront. Ils sauront si le quark top existe ou non et, s'il existe, ils connaîtront sa masse. Dans ce cas, la table 1 sera alors complète et le modèle standard sera conforté dans sa place de «meilleur descripteur de la matière». Mais une question restera ouverte: celle de l'assignation de la masse aux particules élémentaires. La notion de matière est indissociable de la notion de masse parce que les constituants fondamentaux de la matière possèdent chacun une masse. Même certains messagers des interactions (les bosons W^+ , W^- et Z^0) possèdent une masse. Rien pourtant n'explique la diversité des masses des particules élémentaires, ni le fait que certains bosons vecteurs (le photon par exemple, qui transmet l'interaction électromagnétique) soient dépourvus de masse. Pourquoi et par quel mécanisme certaines particules «acquièrent-elles» une masse? Pourquoi d'autres particules échappent-elles à ce mécanisme? Ce sont les questions sur lesquelles les physiciens expérimentateurs se pencheront dans un proche avenir, afin de tester la validité des idées émises par les théoriciens. Leur instrument sera probablement le LHC du CERN. Et les résultats concernant la masse du quark top leur seront utiles.

Prochaine étape: le boson de Higgs

Pourquoi la masse? La réponse à cette question fait appel au fameux «mécanisme de Higgs» (Cf. ORION n° 261, page 86), imaginé par le physicien Peter Higgs. Pour exister, ce mécanisme requiert l'existence d'une particule appelée «boson de Higgs» qui, en interagissant avec les particules élémentaires et leurs messagers, les bosons vecteurs, leur confère une masse.

Bien que la théorie sous-jacente au modèle standard, et c'est une de ses faiblesses, ne permette pas de calculer la masse du boson de Higgs, des considérations basées sur sa cohérence interne indiquent qu'il est peu vraisemblable que le boson de Higgs ait une masse très supérieure à 1 TeV/c² soit 1000 GeV/c². L'expérience, quant à elle, permet d'être formel sur un point: s'il existe, le boson de Higgs n'a pas une masse inférieure à 60 GeV/c². Sinon, on l'aurait déjà observé. Les résultats expérimentaux permettent en outre de mettre des bornes à la masse du boson de Higgs, en fonction de la masse du quark top. La figure 2 montre

un diagramme illustrant cette relation, ainsi que l'incertitude qui la caractérise. Ce diagramme présente trois contours, englobant trois surfaces correspondant chacune à une probabilité différente que le point expérimental reliant la masse du top à la masse du boson de Higgs soit situé à l'intérieur de la surface en question. S'agissant de résultats expérimentaux, la coupure brutale en dessous de 60 GeV/c² est clairement visible, mais on a laissé la surface gris claire aller bien au delà de la limite de 1 TeV/c², dont la théorie aurait beaucoup de mal à s'accommoder d'un dépassement.

Pour interpréter correctement la figure 2, il suffit de comprendre que:

- Si l'on considère tous les points situés à l'intérieur de la surface noire, il y a 39 chances sur 100 pour que la masse du top et la masse du boson de Higgs aient les valeurs qui correspondent à l'emplacement de l'un de ces points.
- Si l'on considère tous les points situés à l'intérieur des surfaces gris foncée ou noire, il y a 70 chances sur 100 pour que la masse du top et la masse du boson de Higgs aient les valeurs qui correspondent à l'emplacement de l'un de ces points.
- Si l'on considère tous les points situés à l'intérieur des surfaces gris claire, gris foncée ou noire, il y a 95 chances sur 100 pour que la masse du top et la masse du boson de Higgs aient les valeurs qui correspondent à l'emplacement de l'un de ces points.

Autrement dit, si l'on veut réduire les risques d'erreur, on est obligé d'admettre une très grande incertitude sur la masse du boson de Higgs, en admettant que l'on connaisse la masse du top. Si cette dernière s'avère être de 174 GeV/c², les «pronostics» suivants peuvent être faits: il y a 39 chances sur 100 pour que la masse du boson de Higgs soit comprise entre 130 et 280 GeV/c²; il y a 70 chances sur 100 pour qu'elle soit comprise entre 70 et 450 GeV/c²; et il y a 95 chances sur 100 pour qu'elle soit comprise entre 70 et 860 GeV/c².

Quoi qu'il en soit, lorsqu'il fonctionnera, dans quelques années, le LHC donnera probablement le verdict. A moins que des problèmes de financement ne viennent contrarier la construction du collisionneur, dont l'installation est prévue dans le tunnel de 27 km de circonférence qui, sous la frontière franco-suisse, tout près du Jura, abrite déjà le collisionneur électrons-positrons du CERN. A moins que le mécanisme de Higgs ne soit finalement pas la bonne solution pour expliquer la masse. L'Homme est encore loin d'avoir percé tous les secrets de la matière et de l'Univers, et ses succès actuels ne doivent pas lui faire perdre de vue toutes les vastes zones d'ignorance qui émaillent son savoir.

Heureusement, les difficultés rencontrées par les physiciens dans leurs tentatives de tester ou de valider le modèle standard sont là pour le leur rappeler. Le 26 avril, certains d'entre eux ont cru voir quelques quarks top. Mais ils savent pertinemment que si «voir c'est croire», «croire voir» n'est qu'un encouragement à mieux regarder. Alors, le quark top existe-t-il vraiment et a-t-il une masse de 174 GeV/c²? La réponse définitive viendra probablement dans quelques mois.

Remerciements

Pour les informations et explications dont ils ont bien voulu le faire bénéficier, l'auteur tient à remercier *Michael Koratzinos*, du CERN (DELPHI/LEP) et de l'Université d'Oslo, ainsi qu'*Alessandra Caner*, du CERN, qui a notamment participé aux travaux d'analyse de l'équipe CDF du Tevatron, à *Fermilab*.

JACQUES GUARINOS
Observatoire de Genève
et Institut d'Astronomie de l'Université de Lausanne