

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 52 (1994)
Heft: 261

Artikel: Les défis communs à la cosmologie et à la physique des particules [Schluss]
Autor: Guarinos, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-898780>

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: 12.01.2026

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



Les défis communs à la cosmologie et à la physique des particules (suite et fin)

J. GUARINOS

Rappels de la 1^{re} partie

Dans le précédent numéro d'ORION, nous avons vu que deux grands édifices de la physique moderne, tous deux élaborés dans le premier tiers du XX^e siècle, servent de cadres théoriques généraux pour la compréhension des phénomènes de la nature: la relativité et la mécanique quantique.

La relativité regroupe en réalité deux théories distinctes. La première a été formulée par Einstein en 1905. C'est la relativité restreinte, qui repose également sur des travaux réalisés par des grands noms de la physique des XIX^e et XX^e siècles. Cette théorie est à l'origine de l'utilisation du concept d'espace-temps dans la physique moderne. La relativité générale, second volet de la relativité, fut élaborée dans le but d'étendre le domaine de validité des principes qui avaient conduit à la théorie de 1905. A la différence de cette dernière, la relativité générale est l'œuvre d'un seul homme: Albert Einstein, qui créa de toutes pièces, en 1916, cet élégant édifice théorique. La relativité générale est considérée comme la meilleure théorie actuelle de la gravitation.

La mécanique quantique, entièrement dévolue à l'infiniment petit, est une œuvre collective, à laquelle les principales contributions furent apportées dans les années 1920. Ses conséquences heurtent souvent le sens commun. Rappelons-nous par exemple que la mécanique quantique abandonne le déterminisme, lequel est un des fondements de la mécanique classique, y compris la relativité. Pourtant, en dépit de son approche probabiliste de l'évolution des systèmes, la mécanique quantique parvient à prédire les résultats expérimentaux avec une précision remarquable. C'est cette fiabilité à toute épreuve qui explique que la mécanique quantique soit devenue incontournable dans la physique moderne.

La relativité générale est le cadre théorique sous-jacent à la cosmologie, tandis que la mécanique quantique est l'outil qui a permis le développement de la physique atomique et de la physique des particules. Il convient toutefois de se souvenir de l'apport fondamental de la relativité restreinte à la physique des particules, depuis les travaux de Dirac. Dans le numéro précédent, nous avions conclu notre exploration de la physique moderne par un exemple frappant de la convergence de la physique des particules et de la cosmologie: il s'agit des expériences réalisées en 1989, au CERN, et qui ont montré que la désintégration du boson Z° confirme le modèle du Big Bang, c'est-à-dire le modèle adopté par la grande majorité des physiciens et astronomes pour expliquer la structure de l'Univers.

2^e partie: Vers une théorie globale de l'univers

Dans les pages qui suivent, nous allons voir que les points de convergence de la physique des particules et de la cosmologie sont nombreux. Nous verrons notamment que l'un d'entre eux

est la quête d'une description par une même théorie de la gravitation et des trois autres interactions fondamentales de la nature. Il s'agit probablement du plus formidable défi de la physique actuelle, qui résiste depuis plusieurs décennies à la sagacité des physiciens les plus prestigieux. Une des clefs de cette énigme est la réconciliation de la relativité générale avec la mécanique quantique, une réconciliation nécessaire à la bonne compréhension des mécanismes physiques qui ont prévalu au tout début de l'histoire de notre Univers.

Mais avant de montrer quelles sont les pistes explorées par les physiciens pour tenter d'unifier toutes les interactions de la nature, examinons plus en détail chacune de ces forces élémentaires. Nous avions vu que les particules qui composent la matière ne peuvent interagir que sous l'effet de quatre forces fondamentales, lesquelles possèdent des caractéristiques fort éloignées les unes des autres: il s'agit de l'interaction gravitationnelle, de l'interaction nucléaire forte, de l'interaction nucléaire faible et de l'interaction électromagnétique.

Des interactions d'intensités et de portées extrêmement différentes

Puisque, dans la nature, l'interaction gravitationnelle semble dominer toutes les autres, on pourrait penser que c'est la plus intense. C'est totalement faux. C'est même exactement le contraire: la gravitation est infiniment faible, comparée aux trois autres forces élémentaires. Les raisons pour lesquelles ses effets dominent ceux des autres interactions sont multiples. L'accumulation d'un nombre infiniment grand de particules entrant dans la composition des corps, ajoutée au fait que, contrairement aux autres interactions, la gravitation est *toujours attractive*, explique que la force résultant de la combinaison de toutes les interactions gravitationnelles soit considérable. Il reste cependant à comprendre pourquoi, à l'échelle de grandeur qui est la nôtre, les autres interactions sont dominées par la gravitation. Il y a deux grandes raisons à cela. Tout d'abord, deux des trois autres forces, l'interaction faible et l'interaction forte, toutes deux beaucoup plus intenses que la gravitation, ont un rayon d'action extrêmement limité. Tandis que la gravitation s'exerce jusqu'à des distances astronomiques, l'interaction forte n'a plus aucun effet en dehors du noyau atomique. Quant à l'interaction faible, sa portée est encore bien plus réduite. Voilà donc deux forces élémentaires qui, dès que l'on sort du domaine de la physique nucléaire ou de celui de la physique des particules, cessent de s'exercer. Mais il reste encore l'interaction électromagnétique, dont les effets peuvent être ressentis, eux aussi, à longue distance, et dont l'intensité est incomparablement plus importante que celle de la gravitation. La raison pour laquelle son influence est totalement négligeable à nos ordres de grandeur vient du fait que, comme nous l'avons vu, tous les atomes (ou presque) sont électriquement neutres. L'interaction électromagnétique s'exerce à l'intérieur de chaque atome, mais ne peut pas entrer en action entre les atomes. La matière qui nous entoure et dont nous sommes faits est neutre. Il ne



pourra donc y avoir, entre la pomme de Newton et notre planète ou entre la Terre et la lune, qu'une seule interaction: la gravitation universelle.

L'interaction forte, ciment du noyau atomique

L'interaction forte est la force la plus intense. Dans ce qui suit, elle servira d'étalon pour les autres interactions. Nous venons de voir que son rayon d'action est limité à des distances inférieures aux dimensions du noyau. En fait, sa «portée» est de l'ordre de la taille du proton. Dans la première partie, nous avions introduit la notion de *couleur* qui est à l'interaction forte ce que la charge électrique est à l'électromagnétisme. L'interaction forte lie les quarks en *baryons*, groupements de quarks dont la couleur totale est blanche. Les baryons se subdivisent eux-mêmes en deux catégories, étant donné qu'il existe deux façons de réaliser une combinaison de couleurs dont la «somme» soit nulle, c'est-à-dire blanche. Les *hadrons*, sont obtenus par la réunion de trois quarks de couleurs différentes, la combinaison de rouge, de vert et de bleu permettant d'obtenir du blanc, exactement comme les régions colorées en blanc de l'écran couleur de votre téléviseur se révèlent constituées de minuscules points rouges, verts et bleus, si vous les examinez de près. La couleur blanche des *mésions*, l'autre catégorie de baryons, provient de la combinaison d'un quark avec un antiquark, «l'anticouleur» de ce dernier compensant la couleur du premier. Les mésions sont instables et ont une durée de vie extrêmement courte. La couleur toujours blanche des baryons doit être rapprochée de l'impossibilité des quarks d'être isolés: aucune particule ne peut exister à l'état libre si elle porte une couleur, ou bien si la somme des couleurs des particules dont elle est elle-même éventuellement constituée n'est pas nulle, c'est-à-dire blanche.

Les nucléons sont des hadrons et sont donc formés de trois quarks liés entre eux, et qui changent sans cesse de couleur. Cette liaison s'effectue par l'intermédiaire de gluons, qui sont des bosons, eux-mêmes porteurs d'une couleur et d'une anticolleur, combinées de telle manière que le gluon ne soit pas «blanc» (par exemple bleu et anti-rouge). Les gluons sont continuellement échangés entre les quarks. Ils n'ont ni charge électrique, ni masse. L'interaction forte explique la cohésion du noyau: deux hadrons qui se trouvent à proximité immédiate l'un de l'autre, comme c'est le cas lorsque deux nucléons cohabitent dans un même noyau atomique, modifient leur distribution interne des couleurs, de façon que la force résultante conduise à leur attraction mutuelle, selon un mécanisme assez complexe que nous n'exposerons pas ici. Rappelons que l'interaction forte n'a aucun effet sur les leptons. La description des mécanismes de l'interaction forte est l'objet de la théorie de la *chromodynamique quantique*, dont la mise au point ne date que de 1973.

L'électromagnétisme, ciment des atomes et des molécules

L'interaction électromagnétique nous est plus familière. Depuis les travaux que James Clerk Maxwell réalisa vers 1865, nous savons que les phénomènes électriques et magnétiques sont les manifestations d'une seule et même force: l'interaction électromagnétique. Celle-ci ne peut agir que sur les particules électriquement chargées, quelle que soit leur couleur ou leur saveur. On a vite constaté que l'électron et le proton y sont sensibles. En revanche, le neutron se montre incapable de subir l'interaction électromagnétique. A première vue, puisqu'il est neutre, cela n'a rien d'étonnant. Mais n'avons-nous pas vu, dans la première partie, que le neutron est constitué de quarks, particules chargées? Souvenons-nous en effet que le neutron et

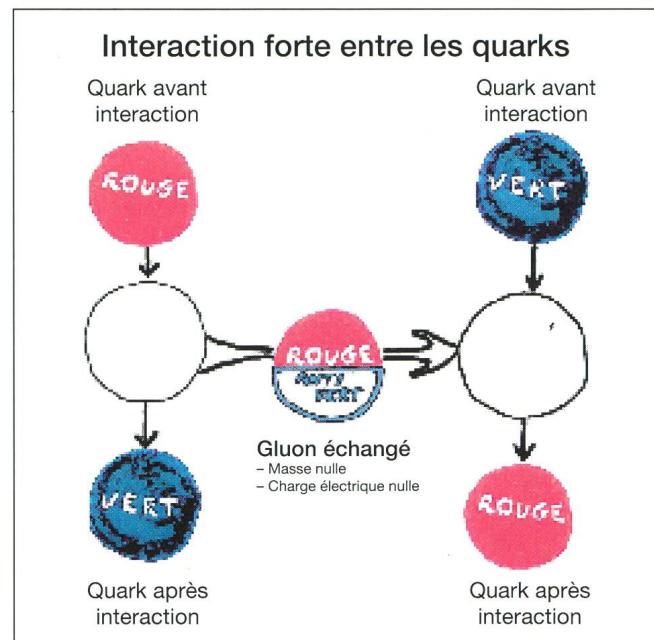


Fig. 1: L'interaction forte qui lie les quarks à l'intérieur des baryons fait appel à un boson intermédiaire: le gluon. C'est la couleur qui joue le rôle de charge vis-à-vis de l'interaction forte, un peu comme la charge électrique régit l'interaction électromagnétique. Mais il y a une différence fondamentale: tandis que le photon est électriquement neutre, le gluon est lui-même porteur d'une charge de couleur. En fait, il transporte une couleur et une anticolleur, cette dernière ne compensant pas la première (par exemple bleu et anti-bleu n'est pas une combinaison admise). C'est ce qui explique que, contrairement à l'interaction électromagnétique qui ne change pas la charge électrique des particules qui la subissent, l'interaction forte modifie la couleur des particules qu'elle fait interagir. Les gluons ne peuvent être échangés qu'entre particules colorées, lesquelles sont comme «collées» entre elles par cet échange de gluons.

le proton sont des assemblages différents de deux sortes de quarks, le quark up et le quark down. Si le neutron n'est pas soumis à l'interaction électromagnétique, c'est parce qu'il est constitué d'une combinaison de trois quarks dont la somme des charges électriques est nulle: il faut deux quarks down et un quark up pour faire un neutron. En revanche, le proton, constitué de deux quarks up et d'un quark down, possède bien la charge +1.

L'interaction électromagnétique est fondamentale dans la structure la plus élaborée de la matière, celle qui constitue les objets, les plantes, les animaux (dont nous-mêmes) ainsi que les astres: en effet, c'est la structure planétaire des atomes – les électrons répartis sur des orbites stables autour du noyau – qui permet la formation de molécules; or cette structure n'est possible que grâce à l'interaction électromagnétique qui s'exerce entre les électrons, chargés négativement, et le noyau, auquel les protons confèrent une charge électrique positive. L'interaction électromagnétique est cent fois plus faible que l'interaction forte, mais possède un rayon d'action infinitement plus long. Rappelons que c'est un photon que deux particules élémentaires de charges électriques non nulles échangent lorsqu'elles interagissent électromagnétiquement. Précisons également que si l'interaction électromagnétique se manifeste grâce aux charges électriques des deux particules interagissantes, elle ne modifie aucune de ces deux charges. Cela vient du



fait que les photons sont des bosons dépourvus de charge électrique. Leur masse est également nulle. C'est l'*electrodynamique quantique*, que nous avons déjà évoquée dans la première partie, qui permet d'étudier l'interaction électromagnétique et qui en fixe les propriétés.

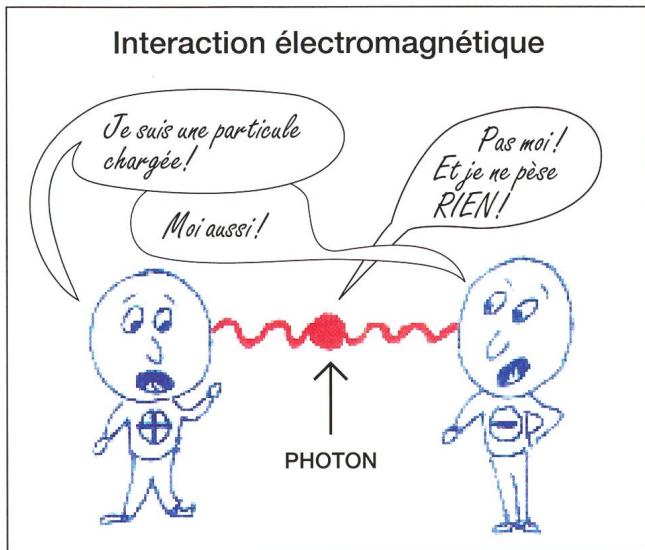


Fig. 2: C'est le photon qui transmet l'interaction électromagnétique. Soumises à cette force élémentaire, deux particules portant des charges électriques de même signe se repoussent. En revanche, si les charges sont de signes opposés, comme c'est le cas dans notre exemple, les deux particules s'attirent. Il suffit que la charge électrique d'une seule des deux particules soit nulle pour qu'aucun photon ne puisse être échangé: dans ce cas, il n'y a pas d'interaction électromagnétique.

L'interaction faible: la seule qui puisse modifier la saveur

L'*interaction faible* se manifeste avec une intensité environ dix mille milliards de fois plus faible que l'*interaction forte*. Son rayon d'action est environ mille fois plus court que celui de cette dernière: il est de l'ordre de la taille du quark! Malgré tout cela, l'*interaction faible* est à l'origine de nombreux phénomènes, et notamment de la désintégration β des noyaux atomiques, la forme la plus courante de la radioactivité. Au cours de ces réactions nucléaires, un neutron se transforme en proton, avec libération d'un électron et de son antineutrino (radioactivité β^-), ou bien un proton se transforme en neutron, avec libération d'un positron et du neutrino associé à l'électron (radioactivité β^+). Ces deux exemples de manifestations de l'*interaction faible* illustrent bien les propriétés de cette dernière: elle agit sur la saveur, à l'intérieur de doublets¹. En effet, pour modifier un proton en neutron ou vice versa, il suffit de modifier un quark up en quark down, ou vice versa. Ce sont bien de telles transformations, qui voient un quark se transformer en son partenaire dans le même doublet, que l'*interaction faible* provoque dans le cas de la radioactivité β . D'autres manifestations de cette interaction montrent qu'elle peut aussi changer un électron en neutrino, prouvant ainsi que la force faible concerne également les doublets de leptons. L'*interaction faible* est donc de nature à pouvoir changer la saveur d'une particule. Ce faisant, elle peut aussi modifier sa

¹ Nous avons vu dans la 1^{re} partie que chacune des trois familles de particules élémentaires est constituée d'un doublet de leptons et d'un doublet de quarks.

charge électrique. Un changement de charge fera intervenir un boson chargé (W^+ ou W^-), tandis que la conservation de la charge mettra en jeu un boson neutre (Z^0). Notons cependant que la saveur n'est pas toujours modifiée et ajoutons que l'*interaction faible* n'affecte pas la couleur. Enfin, il faut remarquer que, contrairement aux autres bosons intermédiaires, les particules W^+ , W^- et Z^0 ont des masses non nulles, et même importantes (comparées à celles des autres particules), puisqu'elles sont de l'ordre de cent fois celle du proton.

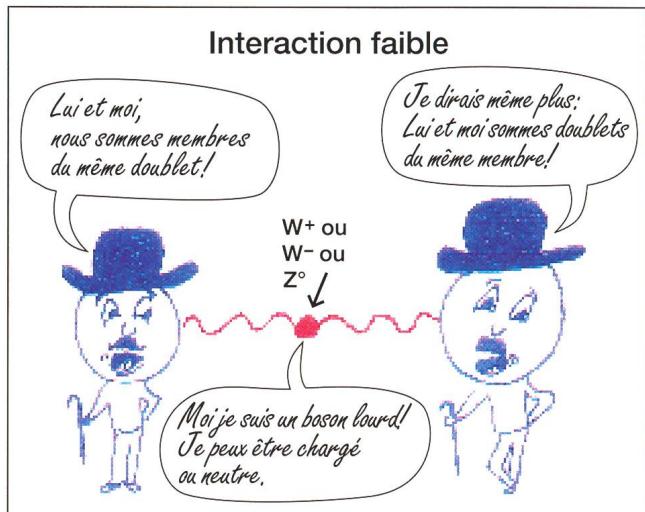


Fig. 3: L'*interaction faible*, responsable notamment de la radioactivité β , concerne les quarks et les leptons. Elle s'exerce toujours à l'intérieur d'un doublet et peut modifier la saveur des particules. Si le changement de saveur est accompagné d'une modification de la charge électrique, l'*interaction faible* fait intervenir un boson virtuel chargé. Dans le cas contraire, c'est un boson neutre qui est émis. Il existe donc trois bosons intermédiaires différents qui transmettent l'*interaction faible*. Tous trois possèdent une masse, ce qui réduit la portée de l'*interaction*.

La gravitation: si faible, et pourtant si présente...

L'*interaction gravitationnelle* est la plus évidente de toutes les forces élémentaires qui gouvernent l'Univers: c'est elle qui régit les mouvements des astres et des satellites artificiels, c'est elle qui nous maintient «prisonniers» du sol de notre planète. C'est aussi grâce à la gravitation que les étoiles se forment et que la cohésion des galaxies est assurée. Pourtant, malgré tous ses effets spectaculaires, l'*interaction gravitationnelle* est, de très loin, la plus faible des forces élémentaires de la nature: le rapport entre l'intensité de l'*interaction forte* et celle de l'*interaction gravitationnelle* est de 10^{-38} , c'est-à-dire un centième de milliardième de milliardième de milliardième de milliardième! Cependant, nous venons de le voir, le rayon d'action de la gravitation est infini, comparé à celui des interactions faible et forte. A la différence de toutes les autres forces fondamentales, la gravitation concerne de la même façon toutes les particules élémentaires. Elle est toujours attractive et on ne lui connaît pas d'écran possible, capable de «masquer» l'influence d'une masse sur une autre du point de vue gravitationnel. Le boson intermédiaire de la gravitation prévu par la théorie, le graviton, est supposé de masse et de charge électrique nulles. En raison de l'infinité faiblesse de son intensité par rapport à celle des autres interactions, la gravitation ne joue aucun rôle et peut être totalement négligée

en physique des particules. Nous verrons pourtant qu'il n'en a pas toujours été ainsi dans l'histoire de l'Univers. Il s'agit justement de l'un des problèmes qui intéressent à la fois les physiciens des particules et les spécialistes de la cosmologie.

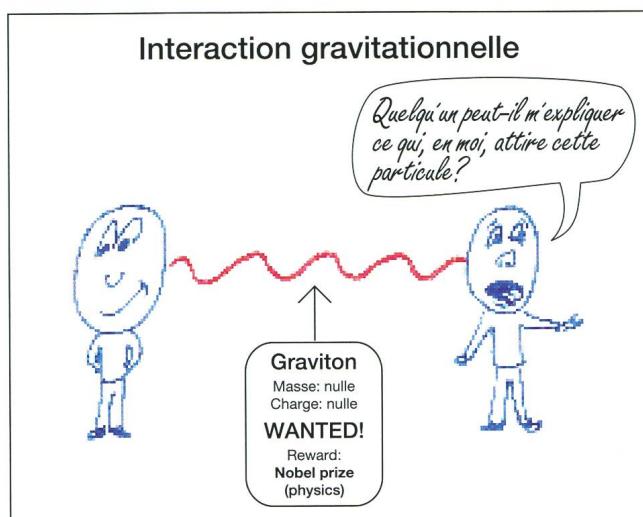


Fig. 4: C'est le graviton qui serait le boson intermédiaire responsable de la transmission de la force de gravitation. La gravitation affecte de la même façon toutes les particules. C'est une force toujours attractive et dont le rayon d'action est considéré comme infini. En revanche, son intensité est extrêmement faible, ce qui rend difficile la détection du graviton. On attribue à ce dernier une masse et une charge électrique nulles mais il n'a encore jamais pu être observé.

Masses des bosons vecteurs et portées des interactions

La raison pour laquelle les portées des quatre interactions fondamentales sont si différentes est liée à la masse des bosons intermédiaires qui les transmettent. Souvenons-nous que ces particules, virtuelles, n'existent que pendant un intervalle de temps tel que le principe d'incertitude de Heisenberg ne soit pas violé. C'est-à-dire que, selon le deuxième énoncé de ce principe, qui relie l'énergie à la durée de vie, un boson intermédiaire ne peut exister que pendant un intervalle de temps n'excédant pas une valeur inversement proportionnelle à la fluctuation d'énergie occasionnée par son irruption soudaine. Donc, d'après le célèbre principe d'équivalence entre masse et énergie, plus la masse d'un boson intermédiaire est élevée, plus brève est son existence; et, par conséquent, plus courte est la distance qu'il peut parcourir. Ceci explique la portée «infinie» des interactions électromagnétique et gravitationnelle, le photon ayant une masse nulle et le graviton étant supposé de masse nulle aussi. Le même raisonnement explique également la portée extrêmement réduite de l'interaction faible, dont les bosons médiateurs, W^+ , W^- et Z^0 , sont chacun à peu près aussi lourds qu'une centaine de protons. Qu'en est-il de l'interaction forte? Un problème se pose: nous savons que sa portée est très limitée, et pourtant le gluon, son boson intermédiaire, est dépourvu de masse. En réalité, comme nous l'avons déjà mentionné, l'interaction forte s'exerce à plusieurs niveaux. Le premier niveau est situé à l'intérieur des baryons: les gluons lient les quarks entre eux, lesquels ne peuvent exister à l'état libre. Le second niveau concerne l'interaction entre baryons. Nous avons dit que l'interaction forte est responsable de la cohésion du noyau. Mais le processus qui lie les nucléons entre eux est beaucoup plus complexe que le

simple échange de gluons. Si l'on prend, par exemple, l'interaction entre un proton et un neutron, les processus qui se déroulent au niveau des quarks qui les constituent aboutissent à l'échange, entre les deux nucléons, d'un méson pi, ou pion. Bien entendu, comme pour tous les mésons, la masse du pion n'est pas nulle. Voilà qui explique la portée réduite de l'interaction forte.

Une fois de plus, le principe d'incertitude de Heisenberg, l'un des grands principes de la mécanique quantique, s'est révélé d'un grand secours pour comprendre les mécanismes intimes de la matière. Il nous a également fourni l'une des raisons pour lesquelles les quatre forces élémentaires de la nature sont si différentes, notamment en ce qui concerne leurs intensités et

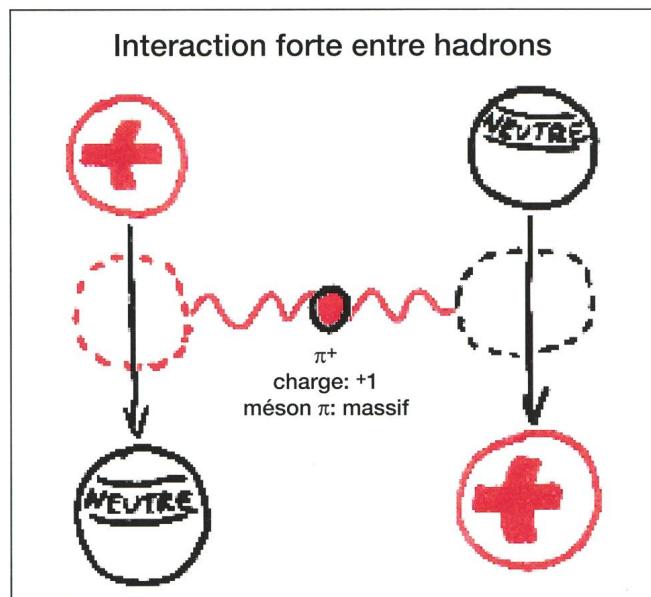


Fig. 5: La force qui lie les hadrons entre eux dérive des interactions entre quarks. C'est donc l'interaction forte qui assure la cohésion du noyau atomique. Mais au niveau des hadrons, les particules virtuelles échangées sont des mésons. Un méson étant constitué d'un quark et d'un antiquark, sa masse n'est pas nulle. C'est ce qui explique la très courte portée de la force de liaison entre les nucléons. Dans cet exemple, un proton se change en neutron en émettant un méson pi positif, lequel transforme le neutron voisin en proton. C'est cet échange continual de mésons pi qui est à l'origine de la cohésion du noyau. Ces interactions ne doivent pas être confondues avec la radioactivité β , dont la conséquence sur les nucléons (transformation définitive d'un proton en neutron ou vice versa) est le fait de la transformation d'un quark up en quark down (ou vice versa) par interaction faible.

rayons d'action. Et pourtant, malgré ces différences considérables, la grande idée qui agite les milieux de la physique théorique depuis des décennies est la recherche d'une théorie unitaire, qui unifierait dans un seul et même formalisme les quatre interactions fondamentales. Des grands noms de la physique, comme Einstein ou Heisenberg, ont cherché pendant de longues années, sans succès, à établir une telle théorie.

En fait, l'un des obstacles à cette unification est que, parmi les autres interactions, la gravitation semble constituer un cas à part. En particulier, elle résiste, pour le moment, à toute «description quantique», rendant ainsi difficile son intégration dans un formalisme global, né des propriétés quantiques de la matière aux échelles atomique, nucléaire et sub-nucléaire. En



effet, bien que révolutionnaire et extrêmement troublante à plus d'un titre, la relativité générale reste une théorie «classique», en ce sens qu'elle adopte une conception déterministe de l'évolution temporelle des systèmes qu'elle considère, en opposition formelle avec la démarche probabiliste de la mécanique quantique. Ce qui ne l'empêche pas d'être une théorie extraordinairement féconde décrivant très bien la gravitation universelle. Par conséquent, les physiciens ont provisoirement renoncé à intégrer la gravitation dans la plupart de leurs tentatives d'unification. Pour le moment, ils cherchent surtout à expliquer les forces forte, faible et électromagnétique à l'aide d'une seule et unique théorie. C'est ce que l'on appelle la «Grande Unification». Un premier pas important dans cette direction a pu être accompli lorsque les interactions électromagnétique et faible ont toutes deux pu être unifiées dans une même théorie, dite *théorie électrofaible*.

La théorie électrofaible

La théorie électrofaible combine les deux interactions en un seul et même formalisme, et permet de décrire correctement à la fois l'électromagnétisme et la radioactivité. Ce sont les physiciens Steven Weinberg et Abdus Salam qui ont apporté, vers la fin des années 1960, les contributions les plus décisives à cet important progrès théorique. Achevée au début des années 1970, la théorie électrofaible traite des interactions électromagnétique et faible comme d'une seule et même force fondamentale, qui pourrait se manifester de deux façons différentes: elle pourrait revêtir l'aspect de l'électromagnétisme, ou bien s'identifier à l'interaction faible. Mais, dans une expérience faisant intervenir une plus grande quantité d'énergie, on n'aurait plus, en réalité, qu'une seule interaction: l'*interaction électrofaible*. En d'autres termes, l'existence de deux manifestations possibles de l'interaction électrofaible est due au fait que nous observons les effets de cette interaction à des niveaux d'énergie auxquels elle présente deux facettes: l'une est l'interaction faible et l'autre est l'électromagnétisme.

En réalité, la faiblesse apparente de l'intensité de l'interaction faible résulte de la très courte portée de cette dernière. Si on arrive à rapprocher suffisamment deux particules, les intensités des interactions électromagnétique et faible, qui varient avec la distance, deviennent comparables. C'est à ce moment-là qu'il y a unification des deux forces. Pour arriver à rapprocher les deux particules interagissantes, suffisamment pour que cette unification puisse se réaliser, il faut fournir une énergie très importante. C'est pour cela qu'il a fallu attendre 1983 pour que les bosons médiateurs de l'interaction faible, prévus par la théorie unifiée, puissent être observés, au CERN.

La description mathématique des interactions faible et électromagnétique en une seule et même théorie a pu être obtenue grâce aux considérations de symétrie qui s'étaient déjà avérées si fructueuses pour révéler l'existence des quarks. Lorsque les trois bosons médiateurs de l'interaction faible furent enfin observés, avec les masses que la théorie leur attribuait, les physiciens eurent une éclatante confirmation du bien-fondé de la théorie électrofaible. Plus encore, cette détection conforta les théoriciens dans le sentiment que les idées qui avaient présidé à l'unification de l'interaction électromagnétique et de l'interaction faible constituent des pistes qu'il convient d'explorer davantage. Ces idées peuvent être résumées en disant qu'une interaction fondamentale doit être considérée comme la réaction de la nature pour préserver une symétrie donnée, lorsqu'un certain paramètre est modifié de façon inégale en tout point de l'espace. Par exemple, l'interaction électromagnétique se manifeste dès qu'une

caractéristique (la phase) de la fonction d'onde qui décrit une particule chargée est modifiée, et son action a pour effet de rétablir une symétrie qui, sans cela, n'aurait plus existé. L'interaction faible résulte du même genre de nécessité. Salam et Weinberg ont donc réussi à expliquer de façon similaire l'existence d'une interaction pouvant se manifester soit comme la force électromagnétique, soit comme la force faible. La symétrie qui est à l'origine de la théorie électrofaible est celle-là même qui a abouti au regroupement des fermions en trois familles. La raison pour laquelle on ne peut «voir» la nature identique des deux interactions qu'à des énergies élevées tient au fait que cette symétrie n'existe qu'à de telles énergies. Aux énergies plus basses, elle cesse d'exister. On parle alors de *brisure spontanée de la symétrie*. C'est donc cette brisure de symétrie qui provoque la différenciation des interactions électromagnétique et faible aux énergies usuelles.

Brisure de symétrie et mécanisme de Higgs

L'unification de l'interaction électromagnétique et de l'interaction faible réalisée dans le cadre de la théorie électrofaible n'est pourtant que partielle. En particulier, il reste à expliquer pourquoi les trois bosons médiateurs de l'interaction faible sont massifs, alors que le médiateur de l'électromagnétisme, le photon, est dépourvu de masse. Le physicien Peter Higgs a proposé, en 1963, un mécanisme qui expliquerait cela. En fait, la théorie électrofaible part du principe que le *mécanisme de Higgs*, c'est ainsi qu'on le nomme, fonctionne dans la nature et qu'il y joue même un rôle fondamental: c'est en effet ce mécanisme qui serait à l'origine de la brisure de symétrie dont nous venons de parler. Ce mécanisme ferait appel à un boson intermédiaire virtuel, que l'on a évidemment nommé *boson de Higgs*, et qui serait associé à un *champ de Higgs*, comme le photon est associé au champ électromagnétique. C'est ce boson ou ce champ (n'oublions pas que la dualité onde-corpuscule est une caractéristique fondamentale de la mécanique quantique) qui conférerait une masse aux bosons W^+ , W^- et Z^0 , en même temps qu'il briserait la symétrie électrofaible. La «massification»² des bosons vecteurs de l'interaction faible serait donc une conséquence directe de la brisure spontanée de cette symétrie. Et le mécanisme de Higgs serait ainsi responsable de l'indiscernabilité des bosons vecteurs de l'interaction faible et du photon à très haute énergie, c'est-à-dire à une énergie suffisamment élevée pour que la symétrie électrofaible soit conservée.

En réalité, les physiciens attribuent au mécanisme de Higgs bien davantage que la différenciation entre les bosons vecteurs de la force faible et le photon: par exemple, le boson de Higgs expliquerait également le fait que, à «basse énergie», les quarks up et down soient différenciés, ce qui signifie que c'est la distinction entre le proton et le neutron qui est attribuée au mécanisme de Higgs. Plus fondamentalement, les physiciens pensent que le mécanisme de Higgs est à l'origine des masses de toutes les particules qui ne peuvent voyager à la vitesse de la lumière³. Tout cela explique que, même si la détection des bosons W^+ , W^- et Z^0 – avec les caractéristiques qui leur avaient

²Le mot massification est employé ici dans un sens qui ne lui a pas été prévu dans le dictionnaire. Il est vrai que l'on n'a pas l'habitude de s'interroger sur les raisons pour lesquelles la matière possède une masse...

³Rappelons que seules les particules dépourvues de masse, comme le photon, peuvent voyager à la vitesse de la lumière. Pour les autres, il faudrait fournir une énergie infinie pour parvenir à leur communiquer une telle vitesse. C'est un résultat fondamental de la relativité restreinte.



été prédites par la théorie – est une confirmation éclatante de la théorie électrofaible, le modèle actuel des interactions fondamentales ne sera véritablement confirmé que lorsque le boson de Higgs aura été détecté. Tentons d'illustrer simplement les principales idées sous-jacentes au mécanisme de Higgs et à cette mystérieuse brisure de symétrie responsable de la masse des particules. Nous y parviendrons à l'aide d'une image... bien éloignée de la physique des particules!

Imaginons un gigantesque ballon pneumatique, une sphère gonflable dont la valve soit reliée en permanence à un compresseur. Admettons que ce ballon pneumatique, de plusieurs mètres de diamètre, possède un petit trou qui laisse échapper l'air qu'il renferme. L'action du compresseur maintient le ballon gonflé, ce qui lui confère une *symétrie sphérique* parfaite. Bien entendu, il faut fournir une certaine énergie au compresseur pour qu'il puisse fonctionner et empêcher le ballon de se dégonfler à cause du petit trou. Si vous posez un chat sur ce ballon, et si la toile est assez solide pour résister aux griffes du chat, vous pourrez voir ce dernier circuler très rapidement à la surface de la sphère gonflée: le chat n'aura aucun mal à progresser sur une surface régulière et dure. Nous avons donc un système symétrique, dont l'énergie est celle du compresseur, et dans lequel le chat circule sans entrave, c'est-à-dire aussi vite que son organisme le lui permet.

Imaginons maintenant que l'alimentation électrique du compresseur soit défectueuse et que son mauvais fonctionnement ait pour effet de fournir au compresseur une énergie moins importante que celle pour laquelle il est prévu. Le compresseur ne pourra plus assurer un débit d'air suffisant. À cause du petit trou, le ballon va donc se dégonfler. Ce faisant, il perdra sa forme sphérique, détruisant ainsi sa symétrie. Le chat va devoir se mouvoir dans un milieu mou, qui s'enfoncera constamment sous ses pattes, rendant sa progression difficile et pénible: bref, le chat va circuler beaucoup moins vite que si le ballon était gonflé. Nous avons un système dont l'énergie a diminué (ce qui fait que le compresseur n'assure plus le même débit d'air), entraînant ainsi une *brisure de la symétrie* initiale du système. Ceci a eu pour conséquence de rendre plus difficile le mouvement du chat, lequel s'en trouve ralenti.

Poursuivons notre raisonnement par une autre analogie. Vous connaissez peut-être la devinette suivante, que se racontent souvent les enfants: comment faire pour éviter de se faire manger par un lion, lorsqu'on marche en pleine savane africaine? La réponse est: il faut toujours prendre avec soi une enclume, comme ça, si un lion survient, il suffit de lâcher l'enclume pour courir plus vite! Cette petite preuve de la capacité des enfants à pratiquer un certain humour absurde a aussi le mérite de rappeler qu'une masse peut ralentir le mouvement⁴. Ainsi, le chat qui, sur le ballon dégonflé, se meut avec difficulté, ne progressera pas plus rapidement s'il était sur un ballon gonflé mais avec un poids attaché à lui. En somme, la brisure de symétrie du ballon mime, en quelque sorte, un soudain accroissement de la masse du chat. Il en est de même des particules soumises au champ de Higgs: lorsque l'énergie des interactions est inférieure à un seuil critique, le champ de Higgs perd sa symétrie, ce qui confère une masse aux particules. Or, le champ de Higgs est partout.

Pour résumer, les physiciens pensent que si l'on pouvait atteindre des énergies de collisions extrêmement élevées, comme celles qu'a connues l'Univers dans ses premiers

instants, on pourrait constater que tous les quarks et tous les leptons, ainsi que tous les bosons intermédiaires, ont une masse nulle. Ce sont différentes brises spontanées de symétrie qui, par le mécanisme de Higgs, ont conféré aux particules leurs différentes masses.

Comme on peut s'en douter, la détection du boson de Higgs se heurte au problème... de sa propre masse! Pour l'instant, on sait simplement que les collisionneurs actuels ne permettent pas d'atteindre des énergies suffisantes pour le mettre en évidence: on n'a encore jamais observé de boson de Higgs. Il est possible que le LHC (Large Hadron Collider), dont la mise en service par le CERN est prévue pour le début du siècle prochain, permette enfin de détecter cette particule indispensable à la validation du modèle actuel des interactions fondamentales. Ainsi, on saurait si le mécanisme de Higgs est bien à l'origine des masses, donc de l'Univers que nous connaissons. Le LHC emprunterait un tunnel de 27 km de circonférence qui abrite déjà le collisionneur d'électrons et de positrons du CERN. Il constituerait le plus puissant collisionneur de hadrons du monde.

L'unification des interactions forte et électrofaible

La théorie électrofaible représente un premier pas prometteur vers la Grande Unification. Fondées sur les mêmes idées, où la notion de symétrie est primordiale, des pistes sérieuses vers l'unification des interactions forte et électrofaible sont explorées depuis plusieurs années. Comme nous l'avons vu, en raison des différences fondamentales qui la distinguent, la gravitation reste encore quelque peu à l'écart de ces tentatives. De nombreux indices semblent indiquer qu'une théorie unifiée des interactions électrofaible et forte doit pouvoir être construite. Les leptons et les quarks possèdent en effet d'étranges ressemblances qui ne peuvent se justifier, pense-t-on, que parce qu'à haute énergie, ces particules se comportent de façon identique et sont soumises à un seul type d'interaction. L'une des étranges ressemblances entre les leptons et les quarks fait référence à leurs charges électriques. Aucune théorie actuelle ne peut expliquer pourquoi les hadrons, groupements de trois quarks, ont une charge électrique qui est un multiple de celle des leptons chargés. Ce fait remarquable, qui explique la neutralité de la matière, ne peut s'expliquer que par la présence d'un certain lien de parenté entre leptons et quarks, signe de l'existence d'une symétrie permettant de les unifier.

La Grande Unification s'obtiendrait donc par l'intermédiaire d'une symétrie «englobant» les deux autres symétries ayant porté leurs fruits en physique des particules: la symétrie de couleur, SU(3), qui décrit les mécanismes de l'interaction forte, et la symétrie électrofaible, que les physiciens et mathématiciens désignent sous le nom de SU(2) x U(1). Une telle symétrie, dite de Grande Unification, permettrait de décrire l'interaction forte et l'interaction électrofaible comme les deux facettes d'une seule et unique force élémentaire. Cette dernière ne distinguerait ni les leptons des quarks, ni les gluons des photons et bosons médiateurs de l'interaction faible. Mais tout ceci n'apparaîtrait qu'à des énergies supérieures à un seuil, celui où la symétrie de Grande Unification commencerait d'exister. Aux énergies inférieures, cette symétrie se briserait spontanément, rendant ainsi la force nucléaire forte et la force électrofaible discernables. Comme pour la symétrie électrofaible, ce seuil serait atteint lorsque les deux interactions, forte et électrofaible, ont des intensités comparables, ce qui, d'ailleurs, le situerait à un niveau d'énergie beaucoup plus élevé que celui auquel apparaît la symétrie électrofaible. Les physiciens pensent en effet qu'en augmentant suffisamment l'énergie des

⁴ Même en l'absence du champ de pesanteur terrestre, la masse de l'enclume augmenterait l'inertie du promeneur, c'est-à-dire la résistance qui s'opposerait à toute modification de son mouvement.



collisions de particules, on peut amener au même niveau d'intensité les interactions électrofaible et forte. Ceci serait possible parce que, contrairement à ce qui se passe avec les autres forces fondamentales, l'intensité de l'interaction forte diminue avec la distance, donc avec l'énergie de collision. C'est pour cette raison que les quarks, qu'il est impossible d'extirper des baryons dans lesquels ils se trouvent liés par l'interaction forte, jouissent d'une certaine liberté de mouvement à l'intérieur de ces mêmes baryons.

Résumons. Les physiciens pensent qu'au fur et à mesure que l'énergie diminue, des brisures de symétrie apparaissent spontanément, tout comme, sous l'effet d'une baisse de la température, l'eau se transforme spontanément en glace. La première de ces brisures de symétrie sépare d'abord l'interaction forte de l'interaction électrofaible. Puis, à une énergie inférieure, survient la seconde brisure de symétrie, appelée aussi transition électrofaible. C'est elle qui divise l'interaction électrofaible en deux forces fondamentales, la plus intense étant à l'origine de l'électromagnétisme et la plus faible à l'origine de la radioactivité.

La désintégration du proton

Si la symétrie de Grande Unification existe, alors il est possible que les quarks puissent se changer en leptons et vice versa, ce qu'aucune des théories actuelles de chacune des interactions fondamentales ne prévoit. Une transformation de ce genre pourrait affecter les quarks à l'intérieur des protons. Actuellement, le proton est considéré comme stable, heureusement pour nous: à peu près la moitié de notre corps est constituée de protons! Mais il semble qu'une théorie unifiant la chromodynamique quantique, qui régit l'interaction forte, et la théorie électrofaible implique que le proton peut se désintégrer. Rassurons-nous, même dans ce cas, la théorie prévoit que sa durée de vie moyenne dépasse de plusieurs ordres de grandeur l'âge de l'Univers... Par conséquent, on pourrait se dire que le premier candidat proton au suicide n'est pas près de se manifester. Et pourtant, depuis plus de trente ans, plusieurs expériences ont été et sont menées à travers le monde pour tenter de surprendre la désintégration d'un proton. Pourquoi? Réfléchissons: ce n'est pas parce que l'espérance de vie des êtres humains est supérieure à 70 ans que la mortalité infantile n'existe pas! Par conséquent, il ne doit pas être nécessaire d'attendre que s'écoule un temps plusieurs fois plus long que l'âge de l'Univers, pour espérer assister à la mort d'un proton, si celui-ci est mortel! Il faut, en revanche, surveiller une énorme quantité de protons afin de réduire le temps d'attente et d'espérer voir plusieurs de ces désintégrations, lesquelles, si elles sont possibles, sont effectivement extrêmement rares. La fiabilité de l'estimation de la durée de vie moyenne du proton, dont dépendent les modèles d'unification entre les interactions forte et électrofaible, s'améliore avec le nombre d'événements sur lequel elle est fondée.

Fortes de ces considérations statistiques, des équipes de physiciens, travaillant parfois au sein de collaborations internationales, ont relevé le défi. Enterrées dans d'anciennes mines ou sous la montagne, comme par exemple dans les tunnels du Mont-Blanc ou du Fréjus, ces équipes guettent, en Europe ou ailleurs, le moindre signe indicateur de la possible désintégration d'un proton. Le fait que ces équipes travaillent loin des regards du reste des hommes ne procède pas d'une volonté de cacher au commun des mortels l'horrible vérité selon laquelle les protons dont nous sommes constitués peuvent mourir du jour au lendemain... Non, cette «manie» d'aller s'enterrer se justifie par le souci de se mettre à l'abri des

rayons cosmiques et des particules secondaires créées par ces derniers lorsqu'ils rencontrent l'atmosphère. Il faut en effet être sûr qu'un événement candidat correspond bien à la désintégration d'un proton, et non à l'effet d'un rayon cosmique, lequel peut simuler à la perfection l'événement recherché. Pour l'instant, les résultats – négatifs – de ces expériences indiquent que, si le proton n'est pas stable, sa durée de vie moyenne est supérieure à... dix mille milliards de milliards de fois l'âge de l'Univers! Voilà de quoi rassurer ceux qui se faisaient du souci pour leurs protons... Voilà aussi de quoi inciter les physiciens théoriciens à rejeter les modèles les plus simples d'unification entre les interactions forte et électrofaible, lesquels prévoyaient que l'on aurait déjà dû assister à la mort d'un proton.

L'intérêt que les physiciens portent aux théories de Grande Unification est d'autant plus vif qu'elles permettraient d'expliquer ni plus ni moins que l'existence de... l'Univers lui-même! Plus exactement, elles expliqueraient l'existence de matière dans cet univers. En effet, nous avons vu que toute création d'un lepton ou d'un quark est accompagnée de la création de l'antilepton ou de l'antiquark qui lui correspond. D'une manière générale, la physique des particules prévoit que l'existence de matière doit être assortie de l'existence de la même quantité d'antimatière. Or, les observations montrent que notre Univers n'est formé que de matière. La question qui se pose n'est pourtant pas de savoir où est passée l'antimatière. En fait, toute la matière et toute l'antimatière qui peuplaient l'Univers auraient dû s'annihiler mutuellement il y a bien longtemps. Par conséquent, ce qui est surprenant, c'est qu'il reste encore de la matière après que toute l'antimatière ait été annihilée. Les théories de Grande Unification fournissent une explication à cela: les bosons responsables de la transformation des quarks en leptons (et vice versa) auraient une plus grande tendance à se désintégrer en matière qu'en antimatière. Il se serait donc formé davantage de matière que d'antimatière. Ces bosons, qui n'existaient qu'à des énergies extraordinairement élevées, auraient une masse de l'ordre d'un million de milliards de fois celle du proton...

Supersymétrie et supergravitation

En fait, les théories qui, depuis quelques années, sont les plus étudiées pour tenter d'unifier dans une même description globale l'interaction électrofaible et l'interaction forte sont nommées *théories supersymétriques*. La symétrie mathématique sur laquelle elles sont bâties permet d'envisager d'établir un lien de parenté entre, d'une part les fermions que sont les leptons et les quarks, et d'autre part les bosons intermédiaires qui les font interagir. Mais elles recèlent également l'espoir d'unifier enfin la gravitation avec les trois autres forces fondamentales. Une théorie unifiant les quatre interactions élémentaires est appelée *Théorie de Tout*. Les espoirs les plus grands sont actuellement représentés par la supersymétrie, dont les idées principales, élaborées dans le cours des années 1970, laissent penser que la réconciliation entre la mécanique quantique et la gravitation passe par l'établissement d'une théorie supersymétrique de cette dernière. C'est ce qu'on appelle la *supergravitation*. Les physiciens ont en effet remarqué que la supersymétrie, telle qu'elle est formulée pour relier les fermions aux bosons intermédiaires, est une symétrie liée à la structure de l'espace-temps. Le lien avec la gravitation, que la relativité générale présente comme une déformation de l'espace-temps, est donc tout trouvé. Le chemin qui reste à parcourir avant la première Théorie de Tout est néanmoins encore très long...



Les théories supersymétriques peuvent être soumises à des tests. Outre des prédictions comme la désintégration du proton, l'existence prévue de nouvelles particules constitue une bonne raison de soumettre la théorie au verdict de l'expérience. La supersymétrie prévoit en effet l'existence de «partenaires supersymétriques» associés à chacune des particules élémentaires connues, fermions ou bosons. Ces partenaires posséderaient exactement les mêmes caractéristiques quantiques que les particules auxquelles ils sont associés, à l'exception de l'une d'entre elles, le *spin*, que l'on peut grossièrement assimiler aux différents modes de rotation d'une particule sur elle-même. Ces partenaires supersymétriques ont des noms étranges: aux quarks correspondent les squarks; aux leptons sont associés les sleptons (par exemple le partenaire de l'électron est le sélectron); au photon correspond le photino, au gluon le gluino... On trouve aussi le wino, le zino, et même le higgsino. Pour l'instant, aucune de ces contreparties supersymétriques des particules élémentaires n'a pu être détectée. Si elles existent, leurs masses doivent être extrêmement élevées...

Selon la théorie, si la gravitation est de nature supersymétrique, alors on doit pouvoir mettre en évidence des effets bizarres, qu'aucune autre théorie n'avait permis d'imaginer. L'un de ces effets étranges est par exemple le fait que, d'après la supergravitation, l'interaction gravitationnelle n'aurait pas exactement la même intensité selon qu'elle s'exerce entre deux corps constitués de matière ou qu'elle intervient entre de la matière et de l'antimatière. Des expériences sont prévues pour mettre en évidence l'accélération de l'antimatière dans le champ de pesanteur terrestre, accélération que la supergravitation prédit plus élevée que celle subie par la même masse de matière. Pour cela, il faut assembler des atomes d'antimatière, ce qui n'a encore jamais pu être réalisé. Et pour pouvoir créer un atome d'antimatière, il faut évidemment pouvoir disposer d'un grand nombre d'antiprotons, lesquels n'ont qu'extrêmement peu de chances de survivre longtemps dans notre monde de matière, où les protons prêts à les annihiler sont légion. Il faut en outre que ces antiprotons soient ralentis à des énergies assez faibles pour qu'ils puissent capturer un positron et former le plus simple des antiatomes: l'antihydrogène. Il n'y a pas si longtemps, tout cela était impossible. Mais les physiciens et ingénieurs du CERN ont mis au point des méthodes qui ont permis de venir à bout d'une grande partie de ces difficultés. A la fin de l'année dernière, une équipe de physiciens américains travaillant au CERN a réussi à sauver de l'annihilation et à ralentir un million d'antiprotons. Bientôt, les physiciens pourraient bien réaliser une version moderne surprenante de l'expérience que Galilée réalisa il y a bien longtemps, du haut de la tour de Pise...

Gravitation quantique et Univers primitif

Nous avons évoqué le fait qu'à une énergie donnée, à la portée des collisionneurs de particules actuels, les interactions électromagnétique et faible deviennent comparables en intensité et se fondent en une seule force élémentaire. Nous avons aussi évoqué la possibilité que le même phénomène unifie cette force dite électrofaible et l'interaction forte, à une énergie supérieure. Il semble également que, à une énergie encore plus formidablement élevée, la gravitation, qui augmente quand la distance diminue, devienne d'intensité comparable à celles des trois autres interactions... Bien entendu, malgré cela, le fait que la gravitation, comme nous l'avons dit, ne soit pas encore descriptible à l'aide des principes de la mécanique quantique est un obstacle de taille à son unification – sur le papier – avec les autres forces fondamentales de la nature. Pourtant, le seuil énergétique qui verrait l'intensité de la gravitation devenir

comparable à celles des autres forces a une signification. Il délimite en effet le domaine dans lequel la relativité générale perd sa validité. A ce niveau d'énergie, les collisions amènent les particules à des distances telles que les effets quantiques ne peuvent plus être négligés quand on parle de gravitation. Ce n'est pas tout: pour des énergies aussi élevées, la physique des particules ne peut plus ignorer la gravitation, dont la «meilleure» théorie, la relativité générale, est incompatible avec la mécanique quantique. Bref, à de tels niveaux d'énergie, ce qui manque aux physiciens, c'est une théorie quantique de la gravitation, dont nous avons vu que la supergravitation est une possibilité. Ce seuil énergétique, appelé *énergie de Planck* en l'honneur du physicien, est donc la limite du domaine de validité de la physique actuelle.

Une théorie quantique de la gravitation n'est pas seulement nécessaire pour l'unification de toutes les forces de la nature. Elle est aussi indispensable à la compréhension des phénomènes qui se sont déroulés au tout début de l'Univers, quand celui-ci était encore tellement petit que l'énergie moyenne qui l'emplissait était supérieure à l'énergie de Planck. On peut calculer que l'Univers était alors plus jeune que 10^{-43} seconde, c'est-à-dire plus jeune qu'un dix millionième de milliardième de milliardième de milliardième de seconde... Cette limite temporelle est appelée *époque de Planck*. Elle correspond à une taille maximale de l'Univers de 10^{-32} millimètre, c'est-à-dire un cent millième de milliardième de milliardième de milliardième de millimètre! Cette longueur, que l'on nomme *distance de Planck*, correspond aussi à la distance minimale à laquelle on peut rapprocher deux particules sans rentrer dans le domaine où

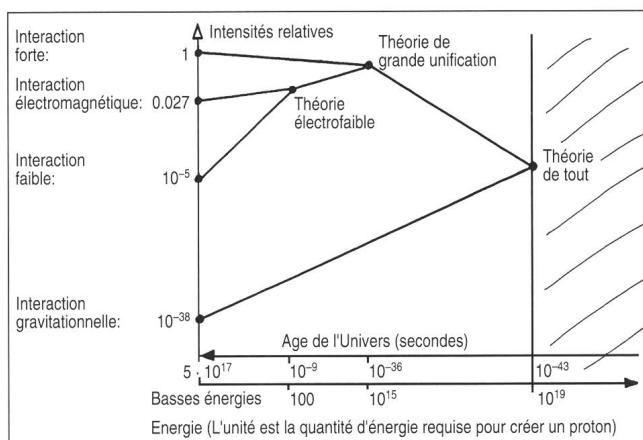


Fig. 6: Aux énergies usuelles, quatre interactions fondamentales gouvernent la matière. Mais les physiciens pensent qu'elles ne constituent que différentes facettes d'une même force, laquelle ne se montrerait qu'à de très hautes énergies, impossibles à produire. Au moment du Big Bang, les conditions de cette «unification» étaient réunies. Très vite, des «brisures de symétrie» ont différencié les différentes facettes de cette force unique initiale, jusqu'à en faire apparaître quatre, dès le premier milliardième de seconde. Aujourd'hui, on peut montrer que l'électromagnétisme et l'interaction faible s'unissent en une seule force dès que leurs intensités deviennent comparables, les expériences ayant confirmé la théorie. La prochaine étape de l'unification des forces de la nature par les physiciens englobera les interactions forte et électrofaible dans la même théorie. Mais les énergies concernées seront d'un tout autre ordre de grandeur... Quant à l'intégration de la gravitation à ce processus d'unification, elle nous conduit aux frontières de la physique actuelle. On ne sait pas ce qui se passe quand l'intensité de la gravitation devient comparable à celles des autres forces...



une théorie quantique de la gravitation est nécessaire pour comprendre ce qui se passe. L'énergie qui permet un tel rapprochement n'a donc existé qu'aux tout premiers instants de l'Univers, avant l'époque de Planck.

Nous pouvons à présent comprendre la raison fondamentale pour laquelle la physique des particules et la cosmologie se sont rejoindes: unifier les particules élémentaires et les interactions fondamentales revient à recréer les conditions de l'Univers primitif, quand la température et l'énergie étaient aussi formidablement élevées que l'Univers était incroyablement jeune et petit. La connaissance des mécanismes intimes de la matière s'apparente donc à la détermination de ce que furent les tout premiers instants de notre Univers, détermination si indispensable à la compréhension de la structure et de la nature de ce dernier.

De la matière cachée dans l'Univers

Dans la première partie, nous avons vu qu'il existe une relation directe entre la masse et la courbure de l'espace-temps. Nous avons vu aussi que l'Univers est en expansion. L'effet de la masse totale de l'Univers est de freiner cette expansion. La question qui se pose est de savoir si cette masse est suffisante pour freiner l'expansion au point de la transformer en recontraction, ou non...

On peut calculer la *densité critique* de l'Univers: c'est la valeur de la densité moyenne en dessous de laquelle l'expansion de l'Univers va continuer éternellement, aboutissant ainsi à la mort lente d'un Univers dilaté à l'extrême. Dans ce cas, on dit que l'Univers est «ouvert». La densité critique est aussi la valeur de la densité moyenne au-dessus de laquelle l'expansion va se ralentir jusqu'à s'inverser. Dans ce dernier cas, on parle de «Big Crunch», contraction de l'Univers qui finit dans une gigantesque implosion. On dit aussi que l'Univers est «fermé». Que dit-on si, fait extraordinaire, la densité de l'Univers vaut *exactement* la densité critique? Dans ce cas, l'expansion compense exactement la courbure causée par la masse totale de l'Univers. On dit alors que l'Univers est «plat».

Les calculs indiquent que la densité critique de l'Univers est voisine de $2 \cdot 10^{-29}$ g/cm³, c'est-à-dire deux centièmes de milliardième de milliardième de milliardième de gramme par centimètre cube... Si l'on tient compte de toute la masse visible dans l'Univers, on arrive pourtant à une valeur de sa densité moyenne encore 100 fois inférieure à la densité critique, ce qui prouve l'immensité du vide que l'on trouve *dans* les galaxies et *entre* les galaxies. Mais voilà: les observations astronomiques et les calculs des astrophysiciens indiquent que nous ne voyons pas toute la masse présente dans les galaxies ou autour d'elles. En effet, même indétectable, la matière, quelle qu'elle soit, trahit toujours son existence par son influence gravitationnelle sur les astres qui l'entourent. Or les astrophysiciens ont indirectement détecté la présence de matière invisible, grâce au fait que cette dernière modifie les mouvements des étoiles dans les galaxies et des galaxies dans les amas de galaxies. Il semblerait que la matière *visible* ne représente, en fait, que 10% de la matière *existante*, voire moins. C'est le problème de la *masse manquante*, dite aussi *matière cachée* ou encore *matière noire*.

Par conséquent, la densité moyenne de l'Univers ne serait pas inférieure à un dixième de la densité critique... Des observations récentes semblaient même indiquer que l'Univers est plat, ce qui représenterait un hasard extraordinaire. Mais ce serait aussi un problème embarrassant pour les astrophysiciens: leurs calculs ne permettent tout de même pas d'arriver à une densité de l'Univers qui soit égale à la valeur critique! Il existe cependant une théorie, dite théorie de l'*Univers inflationnaire*, qui pourrait expliquer, sans recours au hasard, que l'Univers soit plat. Selon

cette théorie, l'Univers aurait subi, au tout début de son existence, une croissance extraordinairement rapide. Pendant un temps extrêmement bref, il se serait dilaté à une vitesse exponentielle. C'est ce que l'on appelle *l'inflation*. La théorie de l'inflation, qui s'est développée dans les années 1980, est satisfaisante à plus d'un titre: elle permettrait de répondre à plusieurs questions intrigantes, parmi lesquelles «pourquoi l'Univers semble-t-il plat?» et «pourquoi l'Univers semble-t-il si parfaitement homogène?». Mais cette théorie n'est pas encore complètement convaincante. En tout cas, si l'Univers est effectivement plat, comme l'inflation le prévoit et comme certaines observations semblent l'indiquer, cela signifie que l'Univers est rempli d'une très grande quantité de matière que les astrophysiciens ne peuvent détecter; voire, dont les physiciens ignorent l'existence...

La matière cachée: naines brunes ou WIMPs?

En fait, les astronomes savent que la matière baryonique, celle qui est constituée de baryons, peut prendre certaines formes difficilement détectables par leurs instruments. Les naines brunes par exemple, ces étoiles avortées en raison de leur masse insuffisante, sont trop petites et trop sombres pour pouvoir être observées. Pourtant, si les galaxies en sont remplies⁵, le supplément de masse sera important. Trois candidats naines brunes ont été trouvés à la fin de l'année dernière par deux équipes internationales réunissant des physiciens des particules et des astrophysiciens. La façon dont chacune de ces deux équipes a procédé mérite d'être contée. Pour détecter les naines brunes, les scientifiques utilisent la capacité de la matière à courber les rayons lumineux, selon l'effet prévu par la relativité générale. Si une naine brune se trouve sur la ligne de visée d'un astre plus lointain, les photons émis par cet astre dans notre direction seront déviés au voisinage de la naine brune, un peu comme les rayons lumineux sont déviés lors du passage à travers une loupe. Il s'ensuivra un effet de *lentille gravitationnelle* qui se traduira par une brusque augmentation de l'éclat de l'astre lointain. C'est ce qui a pu être observé en direction des trois candidats retenus. Les observations de ces deux équipes se poursuivent.

Afin de rendre compte de l'existence de matière cachée, certains physiciens des particules proposent des candidats plus «exotiques». Ce sont les WIMPs (Weakly Interactive Massive Particles), particules massives interagissant faiblement. Ces particules auraient une toute petite masse, suffisante toutefois pour apporter une contribution significative à la densité de l'Univers. Mais le fait que ces particules interagissent extrêmement peu avec la matière les rendrait très difficilement détectables. Le neutrino est un candidat parfait pour les WIMPs. On sait que, si sa masse n'est pas nulle, elle est extrêmement faible. On sait notamment que la masse du neutrino électronique est inférieure au dix millième de celle de l'électron, la plus légère des particules élémentaires massives connues. Seulement voilà: étant donné le nombre extrêmement élevé des neutrinos qui parcouruent l'Univers, il suffirait que leur masse soit comprise entre un cent millième et un dix millième de celle de l'électron pour que l'Univers soit fermé... Les autres candidats avancés par les physiciens des particules pour expliquer la masse cachée de l'Univers sont les fameux partenaires supersymétriques. On pense notamment aux photinos qui, s'ils existent, peuplent en grand nombre l'Univers. Quoi qu'il en soit, le problème de la masse

⁵ En fait, les naines brunes seraient distribuées dans de gigantesques halos entourant chaque galaxie.



manquante est de taille à stimuler les recherches des physiciens des particules et des astrophysiciens – théoriciens, observateurs et expérimentateurs – pendant encore de longues années. En outre, rien n'indique que cette matière cachée soit d'une seule espèce...

L'Univers: le plus grand laboratoire de physique des particules

C'est bien avant qu'apparaisse le problème de la masse manquante que les messagers errants de l'Univers ont commencé à stimuler la physique des particules... En fait, cette dernière, ainsi que la physique des hautes énergies, ont pris leur essor avec l'étude du rayonnement cosmique. Ce dernier possède deux composantes: la composante primaire, qui nous vient directement du cosmos, et la composante secondaire, qui résulte de l'interaction entre la composante primaire et l'atmosphère terrestre. Les rayons cosmiques furent détectés pour la première fois en 1903 mais ce n'est que vers 1910 que leur origine cosmique fut établie. En 1932, le positron, ou antiélectron, fut découvert dans le rayonnement cosmique. En 1936, c'est le muon que l'on y détecta. En 1947, ce fut au tour d'un méson, le méson pi, d'être découvert, lui aussi dans les rayons cosmiques. Mais, à partir du milieu des années 1950, les accélérateurs de particules supplantèrent les observatoires de rayons cosmiques en altitude, comme ceux du Pic du Midi (France) ou du Jungfraujoch (Suisse), ainsi que les ballons stratosphériques. Cependant, depuis les années 1970, il y a un regain d'intérêt pour l'étude du rayonnement cosmique, grâce notamment à la possibilité d'analyser la composante primaire à l'aide de satellites ou de laboratoires spatiaux. En outre, c'est dans les rayons cosmiques qu'ont été détectées les particules les plus énergétiques.

L'intérêt des physiciens des particules pour l'astrophysique est d'autant plus vif qu'ils ont réalisé depuis longtemps que l'observation de l'Univers peut, dans certains cas, remplacer les tests qu'ils ne pourront jamais effectuer dans les collisionneurs de particules. En effet, certaines particules, dont l'existence est prédictive par différentes théories sur les interactions fondamentales, n'ont pu être créées que lors du Big Bang, seul événement ayant «libéré» l'énergie requise pour leur création. Par conséquent, il est possible que ces particules subsistent, sous une forme ou sous une autre, dans le cosmos. L'Univers devient donc, dans ce cas, le plus grand laboratoire de physique des particules...

Citons un exemple: des recherches comme celles visant à mettre en évidence l'existence de *monopôles magnétiques* dans l'Univers font appel à l'observation de la composante primaire du rayonnement cosmique. Le monopôle magnétique est une curiosité prévue par l'électrodynamique quantique, mais aussi par le mécanisme de Higgs dans le cadre de l'une des théories de grande unification actuellement explorées. Un monopôle magnétique serait comparable à un aimant à un seul pôle, ce qui est inconcevable dans la physique classique. Pour le moment, on n'en a encore jamais observé. Il est vrai que la théorie lui prévoit une masse énorme, sans commune mesure avec celles des particules élémentaires.

Parfois, les physiciens des particules tentent de réaliser, avec leurs instruments, ce qui existe peut-être aussi dans l'infini du cosmos. Par exemple, aux tout premiers instants de l'Univers aurait existé, l'espace de quelques microsecondes, un *plasma de*

quarks et de gluons, c'est-à-dire un groupement de quarks et de gluons totalement libérés de la contrainte de former des ensembles «blancs» au sens de la chromodynamique quantique. Ce plasma aurait rempli tout l'Univers, jusqu'à ce que la température et la densité baissent suffisamment pour que les quarks se voient obligés de se regrouper en baryons. En fait, la théorie prévoit qu'un tel état de la matière est possible dès que la densité d'énergie atteint un certain seuil. C'est pourquoi des expériences sont menées dans ce sens, ou sont prévues de l'être, dans des accélérateurs de protons ou d'ions⁶ lourds. Pour l'instant, ces tentatives se sont soldées par des échecs. Certains astrophysiciens pensent aussi que les conditions de pression et de température régnant au cœur de certaines étoiles pourraient être telles qu'un plasma de quarks et de gluons pourrait s'y être formé.

La détection des ondes gravitationnelles, qui reste encore un défi technologique, est attendue avec autant d'impatience de la part des astrophysiciens que de celle des physiciens des particules. Jusqu'ici, seules des preuves indirectes de leur existence ont pu être recueillies, par l'observation de pulsars binaires. Les pulsars sont des étoiles entièrement constituées de neutrons et dont la densité est extrêmement élevée. Un pulsar binaire est formé d'un pulsar autour duquel gravite une autre étoile, de masse à peu près comparable. L'intensité très élevée du champ de gravitation régnant entre les deux astres est responsable de leur rapprochement, que l'on peut mesurer grâce aux signaux radio émis par le pulsar. De telles observations ont permis de confirmer les prédictions de la relativité générale. Mais la détection directe des ondes gravitationnelles pourrait être facilitée grâce à la formidable intensité du champ gravitationnel que représente l'effondrement d'un trou noir sur lui-même sous l'effet de sa propre pesanteur.

L'astrophysique des neutrinos

Un apport important de l'astrophysique à la physique des particules a été l'observation des neutrinos en provenance de la supernova SN 1987A. Une supernova est une gigantesque explosion d'étoile, laquelle rejette ainsi dans le milieu interstellaire toute la matière qui la constituait. Les astrophysiciens ont pu constater que tous les neutrinos émis lors de l'explosion de la supernova SN 1987A, survenue en 1987, étaient parvenus sur Terre en même temps, en dépit de leurs énergies différentes. Or, on sait que seules les particules de masse nulle peuvent voyager à la même vitesse quelle que soit leur énergie, cette vitesse étant celle de la lumière. Compte tenu des incertitudes observationnelles ou expérimentales, l'observation des neutrinos émis par cette supernova a donc permis de mettre une limite très faible à la masse des neutrinos, en admettant que celle-ci ne soit pas nulle. En dehors de la connexion avec le problème de la masse manquante, c'est la physique des particules qui peut bénéficier d'une telle observation: en effet, les possibilités, pour un neutrino membre d'une famille donnée, de se transformer en un neutrino appartenant à une autre famille de leptons, sont très dépendantes de la valeur de sa masse. Or, il est important de savoir si ces transformations, que l'on n'a encore jamais observées, sont possibles.

Enfin, citons l'éénigme des neutrinos solaires, qui excite l'imagination des physiciens depuis plusieurs années. Cela fera bientôt 60 ans que les réactions thermonucléaires qui sont à l'origine de la formidable énergie rayonnée par les étoiles ont été décrites pour la première fois. On a donc essayé de vérifier si le soleil, astre tout ce qu'il y a de plus commun, obéit au schéma admis. Or, le nombre de neutrinos détectés en provenance du soleil reste obstinément inférieur à celui qui est

⁶ Un ion positif est un atome auquel l'absence d'un ou de plusieurs électrons a conféré une charge électrique positive. Un ion négatif possède au contraire davantage d'électrons que de protons.



calculé à l'aide de la théorie. Et cette théorie, qui décrit les réactions de fusion entre noyaux atomiques dans le cœur du soleil, donne toute satisfaction par ailleurs. Comme les procédés expérimentaux semblent pouvoir être mis hors de cause, on peut en conclure que le nombre des neutrinos qui nous parviennent est effectivement inférieur à celui des neutrinos qui sont produits au cœur du soleil. Si tel est bien le cas, il y a donc un mystère que les physiciens des particules doivent éclaircir. La transformation des neutrinos d'une famille donnée en neutrinos d'une autre famille pourrait être une explication. Ce serait alors la preuve que le modèle des interactions fondamentales sur lequel les physiciens se sont mis d'accord est encore plus incomplet qu'ils ne le soupçonnent...

Ce ne sont que des modèles...

Tout ce que nous venons de voir, tant dans la première partie que dans les pages qui précèdent, nous a amenés au cœur de la matière. À travers des images destinées à gommer la complexité parfois extrême des phénomènes décrits, nous avons aussi pu entrevoir quelles sont les pistes qu'exploreraient les physiciens et astrophysiciens pour répondre aux grandes questions qui se posent à eux. Nous avons vu qu'ils ont construit des modèles à l'aide desquels ils tentent de donner une explication, au moins partielle, à des phénomènes aussi fondamentaux que l'origine des masses des particules, ou encore qui visent à indiquer ce que sera le destin de l'Univers ou à décrire ce que furent ses premiers instants.

Tout cela est bien ambitieux. Mais ne perdons jamais de vue que ce ne sont que des *modèles*: ils sont forcément imparfaits et provisoires. Leur mérite est de bien rendre compte des observations et des résultats expérimentaux disponibles à une certaine époque. Mais dès qu'une observation ou une expérience vient contredire les prédictions d'un modèle, il faut le réviser, voire en chercher un autre. La théorie d'Isaac Newton décrivait parfaitement la gravitation

universelle... jusqu'à ce qu'elle soit remplacée par la théorie d'Albert Einstein, plus précise et dont le domaine de validité est beaucoup plus vaste. Cependant, la théorie de Newton reste la plus utile lorsque le degré de précision extrême atteint par la théorie einsteinienne est superflu. Ainsi, de nombreux modèles restent utiles même après que leurs limites aient été mises en évidence. En fait, lorsque les physiciens élèvent un modèle au rang de «modèle standard» (le Big Bang par exemple), ou lorsqu'ils adoptent une théorie, ils savent que ce modèle ou cette théorie ne sont que provisoires... ce qui n'enlève rien à leur utilité! Au contraire: c'est de la remise en question des théories en vigueur et de la volonté de perfectionner les modèles, que naissent les progrès de la science. Les physiciens et astrophysiciens savent donc pertinemment que ces théories et modèles ne décrivent qu'imparfaitement la nature, dont ils ne constituent que les meilleures approximations jusqu'à nouvel ordre. À ce propos, il est utile de rappeler que la validité du modèle actuel des interactions fondamentales est subordonnée à l'existence du quark top, lequel résiste, pour l'instant, à toutes les tentatives de mise en évidence.

Terminons ce long voyage au cœur de la matière et de l'Univers en précisant un point important: même les théories avancées pour donner une explication aux phénomènes non encore expliqués par les modèles courants ne sont pas censées répondre à toutes les questions. Par exemple, si le mécanisme de Higgs se révélait être celui qui explique le mieux l'origine des masses, il resterait encore à comprendre comment le boson de Higgs peut acquérir une masse et pourquoi celle-ci possède la valeur qui lui serait observée. En d'autres termes, chaque réponse appelle d'autres questions. Mais n'est-ce pas justement la certitude qu'il subsiste toujours des questions sans réponse qui motive la curiosité humaine?

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

Astrowerkstatt

Nochmals der Mond

H. JOST-HEDIGER

Im Orion Nummer 255 haben wir die Beobachtung von einigen Phänomenen des Mondumlaufes um die Erde behandelt. Heute wollen wir nun untersuchen, zu welchen praktischen Ergebnissen man bei der Beobachtung des Mondlaufes kommt und wie genau diese Ergebnisse sind.

Da mich aus Leserkreisen keine Ergebnisse erreicht haben, nahm ich die Auswertung anhand von Mondbeobachtungen einer Klasse von 18 15jährigen Schülerinnen und Schülern vor. Die Klasse hatte die Aufgabe, die Phasen des Mondes und den Stand des Mondes am Himmel inklusive Zeit an 5 Tagen zu beobachten. Da für diese Aufgabe ca. 6 Wochen zur Verfügung standen, haben wir Ergebnisse einer ganzen Lunation.

Grundlage bilden die Aufzeichnungen auf einem Formular des Planetariums Luzern. Diese Zeichnungen, welche teilweise sehr gewissenhaft und genau gezeichnet, teilweise aber

offenbar auch Kollegen abgezeichnet oder schlicht erfunden waren, wollen wir nun auswerten. Bild 1 zeigt eine besonders schöne Zeichnung von Anja.

Phasengestalt des Mondes

Bei der Auswertung der Phasengestalt fällt sofort auf, dass einige Kinder den beleuchteten Teil des Mondes, andere Kinder aber den unbeleuchteten Teil des Mondes mit dem Bleistift schwarz eingefärbt haben. Wir müssen also, um herauszufinden, welche Hälfte beleuchtet ist, entweder alle Zeichnungen vergleichen oder doch das Jahrbuch etwas zu Hilfe nehmen. Um die Phase des Mondes zu bestimmen, müssen wir nur den Durchmesser der Mondscheibe in den Zeichnungen kennen und dann die Strecke des beleuchteten Teils messen. Die Phase berechnet sich dann als «Phase =