

Scintillation2

Juin 2012

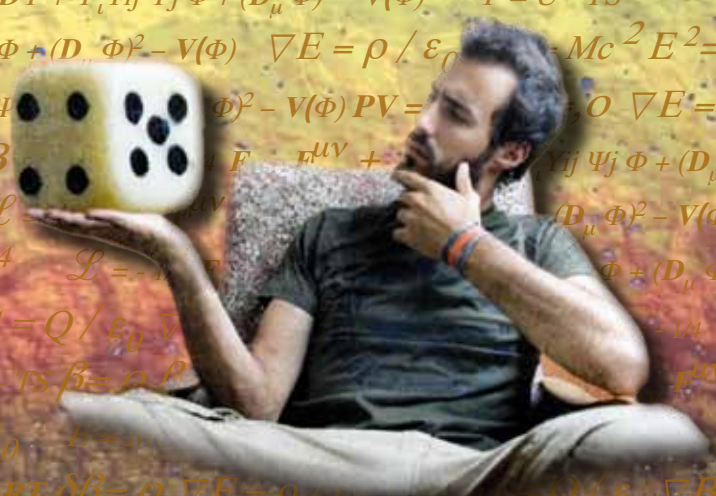
DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

Objet réel Objet pensé

Scintillations invite l'Institut de physique théorique

Je souhaite remercier très chaleureusement l'Irfu et Scintillations pour l'ouverture généreuse de ses colonnes à l'IPhT et pour ce dialogue en liberté entre nos deux instituts.

Michel Bauer



Lorsque je reviens à la DSM, en 2008, Scintillations devient le cou d'un cygne, le vecteur qui permet d'expliquer le blanc à l'aveugle, nos travaux à nos lecteurs. Au sein du comité éditorial, nous décidons de tout faire pour vous surprendre en alternant différents types de numéro. Et le cygne, devenu phénix multicolore, renaît de ses cendres. Une piste, évoquée alors, n'avait pas été exploitée : nous avons envisagé de laisser les clés de Scintillations, le temps d'un numéro, à un invité...

Ce numéro du journal est le fruit de la première de ces invitations. L'Institut de physique théorique a accepté avec enthousiasme notre sollicitation et s'est prêté au jeu des similitudes et des différences. Les articles, écrits à deux mains, traitent de nos visions respectives des interactions fondamentales et de l'histoire de l'Univers. Mais les travaux de l'IPhT ne s'arrêtent pas là et nous découvrirons une palette beaucoup plus large, s'étendant de la physique mathématique à la biologie.

Il en est un peu de même pour moi, je n'ai été que l'invité de Scintillations pendant ces quatre ans et douze numéros, invité d'un journal qui appartient à « toutes les femmes et les hommes qui sont la vraie richesse de l'Irfu ». Cela a toujours été un immense plaisir et une fierté de me mettre au service de votre travail.

Jean-Luc Sida

Scintillations accueille l'Institut de physique théorique. Ce numéro pour l'IPhT et Philippe Chomaz pour l'Irfu. Il permet de broser un

Sophie Kerhoas-Cavata : Quelles sont les principales missions de vos instituts ?

Philippe Chomaz : La mission première de l'Irfu, en termes de connaissances, est centrée sur les lois fondamentales de l'Univers. Le mot « loi » impose la théorie et nous partageons donc de nombreux sujets avec les théoriciens.

Michel Bauer : La mission de l'IPhT est plus large. Au-delà de mieux comprendre les lois qui régissent notre univers et son organisation, nous voulons accueillir et développer les savoir-faire de tous les grands sujets de la physique théorique moderne. Notre palette s'étend donc de la cosmologie à la physique des solides ou à la biologie, en passant par des expertises très théoriques comme la physique statistique et les mathématiques.

Je constate que les liens avec l'Irfu, en physique des particules et en cosmologie, se sont renforcés ces dix dernières années. Et je m'en réjouis. Il a fallu aller vers l'expérience. Des théoriciens se sont ainsi spécialisés dans des calculs qui permettront de mieux exploiter les expériences en éliminant des bruits de fond physique ou pour concocter de bonnes observables pour caractériser le plasma de quarks et de gluons ou encore pour étudier la polarisation du rayonnement du fond diffus cosmologique (CMB). Pour le moment, il n'y a pas eu d'expériences qui nous amèneraient à changer radicalement le modèle standard de la physique des particules, de faire le chemin en « sens inverse ». On travaille à théorie constante, en essayant d'optimiser et de pousser nos calculs.

SKC : Comment envisagez-vous de dépasser les limites des connaissances actuelles ?

MB : Il est vrai que tout marche trop bien dans le modèle standard (MS) et la théorie des cordes est trop loin en énergie pour être testée directement. Faut de théories intermédiaires, l'activité se recentre sur des tests du modèle standard dans ses entrailles les plus secrètes, en espérant fortement qu'il se trompe. Si les résultats du LHC consistent à trouver le Higgs et à dire qu'il est exactement comme le prédit le MS, la nature aura donné sa réponse mais, pour les théoriciens, cela ne sera pas une bonne nouvelle...

PC : On a bien cartographié, d'un point de vue expérimental, les « tests du modèle standard » de la physique des particules. On a cependant besoin de quelque chose au-delà du MS



pour que la théorie ne diverge pas. Pour avancer vers ce « quelque chose », en absence d'une découverte directe, il faudrait s'orienter vers des mesures de précisions afin d'observer des effets au-delà des prédictions du modèle standard.

De la même façon, pour la cosmologie, on a bien identifié différentes stratégies expérimentales pour remonter le temps jusqu'au fond diffus cosmologique (vers 300 000 ans après l'horizon du big bang) et mesurer les différents phénomènes incompris que nous rangeons aujourd'hui derrière les termes d'Univers sombre, d'énergie noire et de matière noire. Ce qu'il pourrait y avoir « avant le fond diffus cosmologique » est un sujet important encore en émergence.

Autres sujets connectés en émergence : la problématique de la gravité, les tests des lois fondamentales et symétries associées tel le principe d'équivalence... Ces questions nécessitent des actions corrélées car il faut intégrer expériences et théorie pour dépasser les frontières de nos connaissances.

MB : La gravité est un bon exemple et reste une des forces les plus mystérieuses. Il y a des versions de la théorie des cordes qui prédisent des modifications de la gravité à courte distance, allant du centimètre au micron. Les expériences proposées pour tester si le potentiel gravitationnel est toujours en $1/R$ sont en route et collent encore avec cette loi. Du côté des développements théoriques, concilier la mécanique quantique et la relativité générale est une préoccupation qui a quelques décennies. La théorie des cordes est de loin la théorie la plus avancée et la plus satisfaisante intellectuellement. Il y en a d'autres comme la « gravité à boucles » mais ses conséquences expérimentales sont aujourd'hui invérifiables. Que ce soit par des expériences nouvelles ou par le développement de théories, il est difficile de déplacer les limites mais c'est tout l'enjeu de la recherche fondamentale.



Michel Bauer est spécialiste de géométrie aléatoire et de théorie conforme. Il dirige l'Institut de physique théorique depuis 2011.

commence par un entretien avec les deux chefs d'Institut, Michel Bauer
panorama thématique et stratégique de leurs travaux de recherche.

PC : Par-delà la compréhension des interactions élémentaires, nous nous intéressons aussi aux structures et organisations qu'elles engendrent. Dans de nombreuses études sur l'organisation de l'Univers, nous voyons apparaître des phénomènes d'instabilités hors équilibre. Un regard théorique pourrait amener des chemins de lecture, des lois d'échelle, des invariances... qui nous aideraient beaucoup dans la compréhension de ces phénomènes. Pour favoriser ces nouvelles pistes de réflexion, nous pourrions organiser une journée commune Irfu/IPhT sur l'Univers hors équilibre.

MB : En effet, il y a une activité intense sur les sujets hors équilibre à l'IPhT mais ils sont plutôt appliqués à de tous petits systèmes comme il en existe en biologie. L'Univers hors équilibre et son évolution temporelle serait un sujet intéressant à faire « bouillir » entre théoriciens et expérimentateurs. Les lois de la physique hors équilibre sont à écrire. Je suis tout à fait d'accord avec ce projet de journée commune sur le sujet.

PC : D'une façon générale, on ne met peut-être pas assez d'énergie pour explorer des domaines non balisés, que ce soit de nouvelles idées ou des propositions pour observer des choses compliquées.



Philippe Chomaz, spécialiste de physique nucléaire, dirige l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers depuis 2008.

SKC : Quelle serait votre « liste au Père Noël » des futurs avancés ?

MB : Si on voyait une signature de la supersymétrie au LHC, cela validerait ce concept et permettrait de faire un tri dans la grande variété de modèles existants. Voir un proton se désintégrer serait bien aussi. Nous aurions un signe de l'unification des trois forces et que la quatrième prend le bon chemin.

PC : Peut être plus proche de nous, si nous avons un Higgs de 125 GeV au LHC, ce serait une réelle avancée. Ensuite, je voudrais la machine qui mettrait en évidence la physique des particules hors modèle standard. Je voudrais aussi cartographier tous les âges de l'Univers, depuis l'horizon du big bang avec tous les messagers transportant des informations sur les phénomènes physiques d'avant le CMB : les ondes gravitationnelles, les neutrinos fossiles et la nucléosynthèse primordiale. Quel superbe plan de travail ... pour les cent ans à venir.

MB : L'augmentation importante de la capacité de calcul a été une des révolutions majeures des dernières décennies, en particulier pour concevoir des instruments et développer des modèles. Nous ne nous lassons pas de

cette augmentation et un nouveau facteur 1000 serait bienvenu. J'aimerais aussi voir fonctionner un ordinateur quantique.

SKC : Comment voyez-vous évoluer vos collaborations ?

PC : Nos communautés travaillent dans un fort contexte international. Les liens se font dans ces réseaux. Mais il y a une dynamique locale qui se renforce avec l'arrivée des laboratoires d'excellence. Il y a un tiers de l'IPhT dans P2IO (*Labex du plateau de Saclay sur la physique des deux infinis et des origines, ndlr*). Localement, dans ce contexte, la science est notre pain quotidien : on a un conseil scientifique, des discussions thématiques et stratégiques, on partage des projets. Cela permet d'ajouter de la dynamique locale à la dynamique internationale qui nous fait gagner en cohésion et en profondeur.

MB : Même si les moyens sont modestes, P2IO joue le rôle de graine pour faire naître des sujets communs. Le dialogue entre les différentes composantes est extrêmement positif.

Sommaire

◀ Regards croisés	2
par Sophie Kerhoas-Cavata	
◀ La gravité, est-ce dans mes cordes ?	4
par Mariana Graña et Marc Lachieze-Rey	
◀ La ligne droite du LHC à la recherche du Higgs	6
par Maarten Boonekamp et Stéphane Lavignac	
◀ Les couleurs de l'interaction forte	8
par Laurent Schoeffel et Gregory Soyez	
◀ Le fabuleux destin d'une goutte	9
par Alberto Baldisseri et Jean-Yves Ollitrault	
◀ Illuminer les côtés sombres de l'Univers	10
par Pierre Brun et Marco Cirelli	
◀ Des étoiles aux grandes structures de l'Univers	12
par Francis Bernardeau et Frédéric Bournaud	
◀ Les autres...	14
par Marc Barthelemy	
◀ Témoignage académique	16
par Jean Zinn-Justin	



La gravité, est-ce

Toutes les interactions élémentaires sont aujourd'hui décrites tentatives actuelles pour associer gravitation et physique

L'apparente incompatibilité entre la théorie de la relativité d'Einstein et la physique quantique, les deux principaux fondements de la physique fondamentale, est un paradoxe central de nos connaissances. La théorie de la relativité générale représente l'interaction gravitationnelle comme une structure de l'espace-temps. Elle a permis d'obtenir une modélisation des phénomènes aux échelles cosmiques et de comprendre l'évolution de l'Univers. Les trois autres interactions – électromagnétique, nucléaires forte et nucléaire faible – sont décrites par des théories quantiques. Celles-ci règnent essentiellement aux échelles microscopiques, plus précisément au niveau subatomique. Comment unifier gravitation et physique quantique ? Les premières tentatives ont donné naissance à des idées aussi révolutionnaires que la mécanique quantique et la relativité le furent lors de leur apparition.

Une première approche simple tente de construire une théorie quantique de la gravitation en laissant de côté les autres interactions. Elle se décline dans plusieurs modèles qui montrent des signes de convergence encourageants. Le plus avancé, la gravité à boucles, consiste en une quantification de la relativité générale, menée de manière canonique ; c'est-à-dire selon la même procédure que celle qui fait passer l'électromagnétisme de

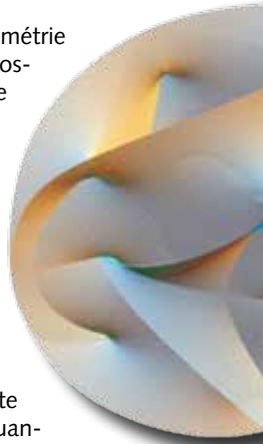
Maxwell à l'électrodynamique quantique. Le succès principal a été d'identifier les états quantiques de la géométrie de l'espace. Plusieurs années de travail ont abouti à une formulation simple et élégante, en termes de ce que l'on appelle les « réseaux de spin ». Ces réseaux peuvent se décrire comme des combinaisons de boucles.

Ceci permet de définir une véritable géométrie quantique qui, bien évidemment, ne possède plus les propriétés de la géométrie ordinaire de l'espace, tout comme une fonction d'onde, en mécanique quantique, ne montre pas les propriétés d'un corpuscule. En particulier, cette géométrie quantique ne se décrit plus en termes de points : une grandeur géométrique (volume, surface...) ne possède plus de valeur déterminée. Elle est représentée par un opérateur, dont le spectre définit la collection des résultats possibles si l'on mesure cette quantité. Ces grandeurs, et l'espace quantique lui-même, deviennent « discrets », dans le sens où une mesure ne peut donner qu'un multiple d'une certaine valeur fondamentale liée à la loi de Planck.

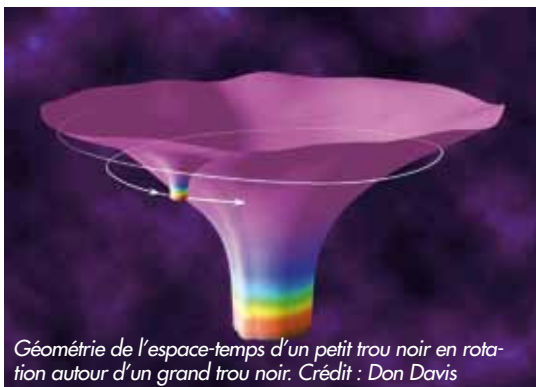
Ceci ne constitue qu'une première étape, car une théorie de la gravitation doit décrire la géométrie de l'espace-temps et non pas de l'espace seul. La caractérisation précise des états de l'espace-temps, les véritables états de la gravitation quantique, nous échappe encore, même si l'on a déjà défini un cadre pour leur description sous forme de mousse de spin (traduction littérale de *spin foam*) qui représenterait l'évolution quantique d'un réseau de spin : son « histoire » ou, en langage relativiste, sa « ligne d'univers ». Les théoriciens travaillent à les caractériser mais ils sont confrontés à bien des difficultés : équations de contrainte, calcul d'intégrales de chemin... La théorie n'est pas achevée. Dans son état actuel, elle autorise pourtant certains calculs, comme celui de l'entropie d'un trou noir et permet de construire des modèles de cosmologie quantique aux caractéristiques originales, notamment un rebond quantique à la place du big bang des modèles cosmologiques classiques !

Les questions abordées au laboratoire APC concernent les relations entre les aspects quantiques de l'espace et ceux de l'espace-temps, en relation avec l'origine même du temps. Et par des calculs de cosmologie quantique à boucles, nous essayons de calculer quelles traces observables, par exemple dans le fond diffus cosmologique, auraient pu engendrer les aspects quantiques de la gravitation.

Une autre façon d'aborder l'incompatibilité entre gravité et mécanique quantique consiste à formuler d'une façon radicalement différente les lois de la



Horizon d'un trou noir : limite maximale en deçà de laquelle le trou noir empêche tout rayonnement de s'échapper.



Géométrie de l'espace-temps d'un petit trou noir en rotation autour d'un grand trou noir. Crédit : Don Davis

Un paradoxe dans un trou noir

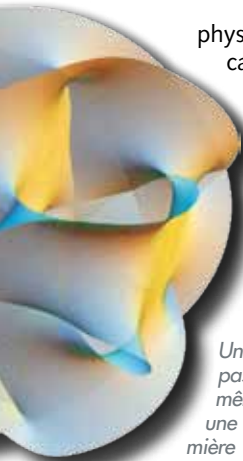
Si les théories de gravité quantique permettent de calculer l'entropie des trous noirs, la question de la perte de l'information, appelée aussi « paradoxe de Hawking », reste à résoudre. Classiquement, tout ce qui se passe avant l'horizon d'un trou noir est perdu pour notre univers (théorème de calvitie). Ce théorème implique que le trou noir émette les mêmes radiations quelque soit ce qui y rentre. Ainsi, si un état quantique pur est jeté dans un trou noir, c'est un état mélangé qui en ressortira. Ce paradoxe qui va à l'encontre des règles de la mécanique quantique, est abordé à l'IPHT dans le cadre d'une proposition récente où les trous noirs sont décrits par un ensemble de configurations qui n'ont pas d'horizon. Cette proposition résoudrait ce paradoxe, et révolutionnerait la façon de penser les trous noirs dans la gravité quantique.



dans mes cordes ?

Par Mariana Graña (IPhT) et Marc Lachièze-Rey (APC et Irfu)

par des théories quantiques, exceptée la gravitation. Les quantiques donnent naissance à des idées révolutionnaires.



Une variété de Calabi-Yau (à ne pas confondre avec le poisson du même nom, ndr) est définie comme une variété kählérienne dont la première classe de Chern est nulle (sic!). Les variétés de Calabi-Yau sont utilisées en théorie des supercordes car elles préservent une partie de la supersymétrie de la théorie originale à dix dimensions lors du processus de réduction dimensionnelle pour obtenir une théorie effective à quatre dimensions.

vibration des cordes possède les propriétés du graviton, le médiateur de la force gravitationnelle, tandis que l'on peut voir le photon comme un autre mode de vibration. La théorie unifie ainsi des particules, ou des médiateurs de force, complètement différentes car elles sont, par nature, les manifestations d'une même corde de base.

La consistance interne de la théorie exige un espace-temps à dix dimensions. Évidemment, six d'entre elles doivent être cachées, laissant apparentes les quatre dimensions d'espace-temps familières à l'observation. Les six dimensions supplémentaires doivent être recroquevillées pour former une structure si petite qu'elle ne peut pas directement être vue. Cette structure invisible est appelée l'« espace interne ». L'idée des dimensions inobservables peut être comprise en considérant l'analogie simple d'un tuyau : une surface à deux dimensions, mais qui semble unidimensionnelle si on l'observe à des échelles trop grossières pour résoudre

Radio jets émis par le trou noir central de la galaxie du Centaure. Dans cette image composite, les télescopes radio du Australian Telescope Compact Array (ATCA) sont photographiés par une nuit de pleine lune, avec, en surimpression, une image radio de Cen A avec sa taille angulaire réelle. Le CEA ne participe pas cet équipement mais cela n'enlève rien à la beauté de ce travail. Crédit (CSIRO/ATNF/Nasa)

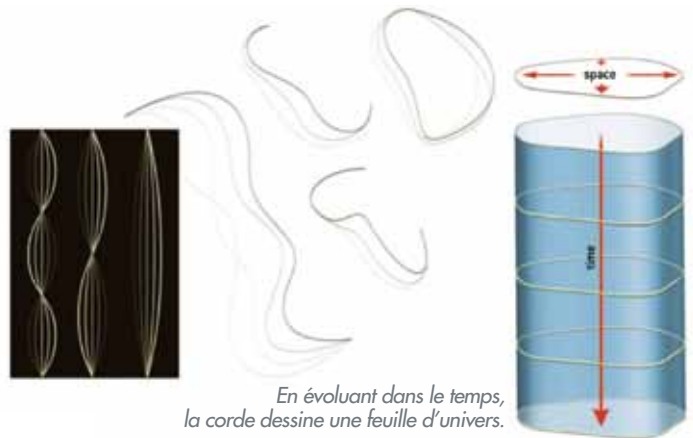


son épaisseur. Dans la théorie des cordes, la taille des six dimensions « internes » est liée à la longueur de la corde, c'est à dire 10^{-35} m (10^{20} fois plus petit que le diamètre d'un proton). La géométrie de l'espace interne déterminera le spectre des particules observées à quatre dimensions. Elle détermine aussi les données cosmologiques, cruciales pour aborder le problème de l'énergie sombre qui expliquerait l'accélération de l'expansion cosmique alors que la matière connue causerait, au contraire, une décélération.



La beauté de la théorie des cordes

Dans la théorie des cordes, les particules ne sont pas des points mais correspondent aux modes de vibration d'une corde. Ces cordes peuvent être ouvertes ou fermées, définissant l'espace de la corde. Le temps est ensuite ajouté comme une variable supplémentaire.



En évoluant dans le temps, la corde dessine une feuille d'univers.

Les travaux réalisés à l'IPhT se sont inspirés des techniques développées dans la géométrie algébrique pour étudier la forme des espaces internes et ses conséquences. La théorie permet de retrouver les particules que nous connaissons mais reproduire simultanément les données cosmologiques d'expansion accélérée reste un défi majeur sur lequel nous travaillons.

Mariana Graña, spécialiste de la théorie des cordes à l'IPhT, a reçu une Starting Independent Research Grant de l'ERC en 2011.

Marc Lachièze-Rey, DR au CNRS, associé au Sap, travaille en cosmologie et gravitation au laboratoire Astroparticules et Cosmologie de Paris 7 (APC).

La ligne droite du LHC

L'interaction faible est l'une des quatre interactions fondamentales de la nature, L'interaction faible a plusieurs propriétés uniques, parmi lesquelles sa capacité à Le mécanisme de Higgs, introduit dans le modèle standard pour mieux décrire faudrait-il le valider par la découverte de la particule qui serait la signature de

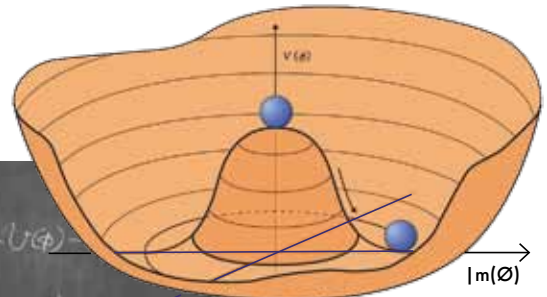
Abasse énergie, l'interaction faible, responsable notamment de la désintégration bêta, est bien décrite par une interaction ponctuelle impliquant quatre fermions (proton, neutron, électron et antineutrino pour la désintégration bêta-). A plus haute énergie, cette description doit être remplacée par une théorie dite « de jauge », dans laquelle l'interaction faible est due à l'échange d'un boson vecteur massif chargé, le boson W. Dans les années 60 et 70, les théoriciens ont unifié les interactions électromagnétique et faible dans un même cadre théorique, le modèle standard électrofaible, auquel S. Glashow, S. Weinberg et A. Salam (prix Nobel 1979) ont attaché leurs noms. Ce modèle prédisait l'existence d'une interaction faible neutre, associée à l'échange d'un autre boson de jauge massif, le Z^0 . Une première confirmation expérimentale de cette prédiction est venue de la découverte des courants neutres par l'expérience Gargamelle, au Cern, en 1973.

Les masses des bosons vecteurs W et Z expliquent à la fois la faiblesse et la portée finie de l'interaction faible tandis que le photon, de masse nulle, donne une portée infinie à l'interaction électromagnétique. D'un point de vue théorique cela signifie que la symétrie électrofaible unifiant ces deux forces doit être brisée. Cependant, la théorie

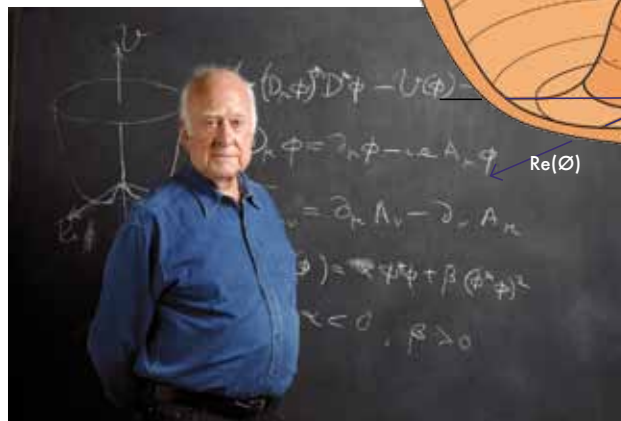
interdit l'ajout pur et simple de masses pour les bosons de jauge W et Z pour décrire l'interaction électrofaible : bien que brisée, la symétrie électrofaible doit préserver la « renormalisabilité » de la théorie, autrement dit elle doit garder son sens en présence des corrections quantiques. G. t'Hooft et M. Veltman (prix Nobel 1999)

ont montré, au début des années 70, que tel était le cas lorsque la symétrie de jauge est brisée de façon spontanée, c'est-à-dire que ce qui décrit l'interaction (son lagrangien) est invariant sous cette symétrie alors que l'état fondamental (le vide) ne l'est pas. Dans le modèle standard, cette brisure « spontanée » est réalisée par le mécanisme de Higgs qui est responsable à la fois de la masse des bosons

de jauge W et Z et de celles des quarks et des leptons. Cette formulation du modèle standard a des implications spectaculaires, avec la prédiction de masses dix à cent fois plus élevées pour le Z et le W que celles des particules connues à l'époque et surtout l'existence d'un champ scalaire fondamental massif, le boson de Higgs. La formulation théorique ne permet cependant aucun autre *a priori* sur la masse du boson de Higgs qu'une borne supérieure d'environ 1 TeV due à l'unitarité¹. Ces prédictions ont donné lieu à un vaste programme expérimental, initié dans les années 70 et se poursuivant aujourd'hui avec les expériences auprès du *Large Hadron Collider* (LHC) du Cern.



Potentiel scalaire du champ de Higgs. Dans l'état fondamental (minimum du potentiel), le champ de Higgs développe une valeur moyenne non nulle, qui brise la symétrie électrofaible.



Peter Higgs, au tableau noir devant les équations du modèle standard. Crédit : Peter Tuffey

Les premières découvertes majeures ont été réalisées au Cern, en 1983. Cette année-là, les détecteurs UA1 et UA2, construits auprès du collisionneur à protons SppS, ont mis en évidence deux nouvelles particules lourdes, baptisées W et Z, de masse environ 80 et 90 GeV. Une première étude de leurs propriétés (masse, modes de production et de désintégration) a confirmé qu'elles se comportaient suivant les propriétés des bosons de jauge de la théorie électrofaible. Confortée par ce succès, la recherche s'est poursuivie auprès du LEP (collisionneur e+e-) et de ses quatre détecteurs (Aleph, Delphi, L3 et Opal) ainsi qu'auprès du pendant américain du LEP, le SLC. Durant la première moitié des années 90, le LEP et le SLC ont produit des millions de Z, permettant une mesure très précise des paramètres fondamentaux du modèle standard. Dans un premier temps, ces mesures ont permis de prédire la masse du quark top, prédiction confirmée quelques années plus tard, en 1994, au Tevatron par la découverte directe du top. Il est alors devenu possible de prédire la masse du boson de Higgs : elle serait confinée



Stéphane Lavignac, chercheur à l'IPHT, explore la physique des neutrinos et les théories supersymétriques.

à la recherche du Higgs

Par Maarten Boonekamp (Irfu) et Stéphane Lavignac (IPHT)

les trois autres étant la gravitation, l'électromagnétique et l'interaction forte. changer la saveur des quarks et à violer la parité et la conjugaison de charge. l'interaction électrofaible, permet de donner une masse aux particules. Encore ce processus : le boson de Higgs.

dans un intervalle limité, entre 85 et 165 GeV. Le boson de Higgs reste la dernière prédiction du modèle standard à confirmer.

Les premières recherches, menées dans les années 70, cherchaient sa trace dans les désintégrations des mésons légers de l'interaction forte. Au LEP, de 1990 à 2000, le Higgs a été recherché dans les désintégrations du Z, puis dans des collisions de plus haute énergie. Au terme de cette phase, les recherches excluent que le boson de Higgs, s'il existe, ait une masse inférieure à 114 GeV, restreignant encore l'intervalle des masses possibles.

Sur les machines hadroniques (le Tevatron, entre 1985 et 2011, et maintenant le LHC), il est plus facile d'attaquer la recherche du Higgs par le haut à cause de l'énergie des collisions et de l'importance des bruits de fond à basse énergie. Le Tevatron a exclu un boson de Higgs plus lourd que 160 GeV. Le LHC, après deux ans de fonctionnement, a resserré cette borne supérieure à 130 GeV. Dans l'intervalle autorisé par les recherches directes, entre 114 et 130 GeV, les expériences du LHC ont montré fin 2011 des indications concordantes - mais non conclusives - de la présence du boson de Higgs.

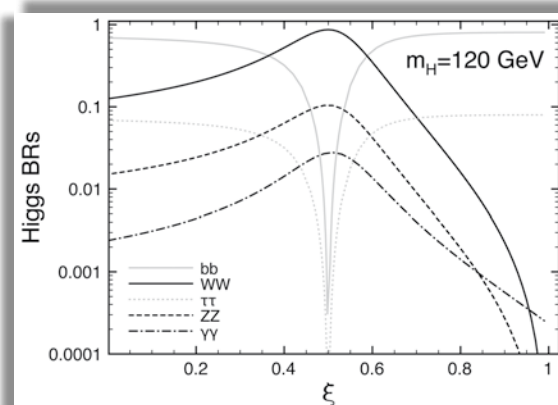


Un événement contenant deux photons dans l'état final, une des signatures possibles du boson de Higgs. Les photons sont identifiés par deux amas d'énergie dans le calorimètre.

Presque trente ans après la découverte du W et du Z, l'année 2012 sera décisive. Par rapport à 2011, le LHC promet un quadruplement de l'échantillon qui permettra de confirmer ou d'exclure avec certitude les premières indications. Dans les deux cas, une quête de plusieurs décennies s'achèvera.

S'achèvera ? Non ! Sans boson de Higgs, une reformulation importante du modèle standard serait à prévoir car, outre le fait d'être à l'origine de la masse des particules, ce mécanisme permet d'éviter que la diffusion de deux

bosons W polarisés longitudinalement viole l'unitarité à haute énergie. L'étude de la diffusion WW serait alors l'observable privilégiée pour rechercher les résonances contribuant à rendre unitaire le modèle standard.



Rapports d'embranchement du boson de Higgs en $b\bar{b}$, $W+W-$, $\tau+\tau-$, ZZ et $\gamma\gamma$, pour $m_H = 120$ GeV, dans un scénario de Higgs composite. Plus le paramètre ξ est grand, plus le caractère composite du boson de Higgs est important. Le modèle standard correspond au cas $\xi = 0$. Tiré de C. Grojean et al., JHEP 1005 (2010) 089.

Dans l'hypothèse la plus probable où l'existence d'un boson de Higgs serait confirmée, il faudra mesurer précisément sa masse, ses modes de production et de désintégration. Est-ce que les couplages du boson de Higgs sont exactement ceux prédits par le modèle standard ?

De nombreuses extensions du modèle contiennent un boson de Higgs dont les propriétés sont proches de celles du Higgs « standard » dans une partie de l'espace de leurs paramètres, sans être absolument identiques. C'est le cas, par exemple, des théories supersymétriques, qui prédisent par ailleurs un secteur de Higgs étendu et de nouvelles particules partenaires de celles du modèle standard, susceptibles d'être produites au LHC. Aucune particule supersymétrique n'a cependant été observée et on imagine des modèles encore plus originaux comme les modèles de Higgs composite.

Maarten Boonekamp, physicien des particules, s'attache à mesurer avec précision les paramètres électro-faibles dans Atlas.



1. Unitarité : principe énonçant que l'évolution d'un système au cours du temps doit être compatible avec l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique, c'est-à-dire que la somme des probabilités de tous les états finals doit être égale à 1

Les couleurs de

L'interaction forte œuvre dans tous les édifices nucléaires. Ressentie par l'interaction de quarks et de gluons au sein des nucléons. L'IPHT et

La théorie de l'interaction forte décrit la structure des nucléons, protons et neutrons, c'est à dire la structure de la matière à l'échelle du femtomètre (10^{-15} m). Notre compréhension actuelle les voit comme composés de quarks et de gluons. La théorie quantique microscopique qui régit ces particules élémentaires est la chromodynamique quantique (QCD). Conceptuellement, elle est comparable à l'électrodynamique quantique, théorie fondamentale de l'électromagnétisme décrivant les interactions entre électrons et photons. La compréhension de l'interaction forte est essentielle à toute étude de la matière nucléaire.

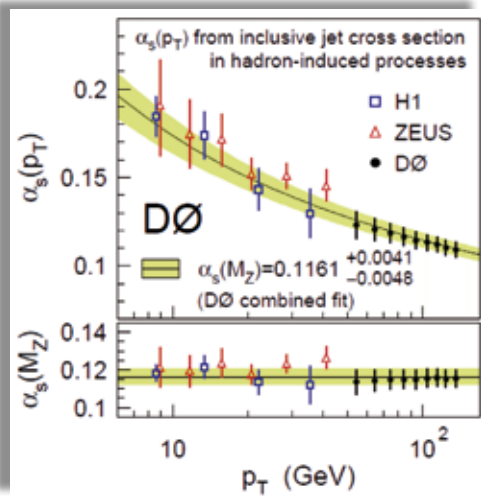
L'existence d'une structure des nucléons ainsi que l'avènement de QCD en tant que théorie de l'interaction forte est lisible dans l'histoire de la physique fondamentale

du siècle dernier. En 1933, Stern (prix Nobel en 1943) mesure le moment magnétique du proton et prouve que ce n'est pas une particule élémentaire comme l'électron. En 1964, Gell-Mann et Zweig (prix Nobel en 1969) construisent un modèle théorique du proton constitué de trois quarks (deux quarks up et un quark down) : la théorie de l'interaction forte est née. Les interactions entre ces quarks ont tout d'abord été étudiées dans le modèle des partons développé par Feynman et Bjorken en 1969, en parallèle avec la mise en évidence expérimentale de l'existence des quarks au Slac par Friedman, Kendall et Taylor (prix Nobel en 1990). Quelques années plus tard, en

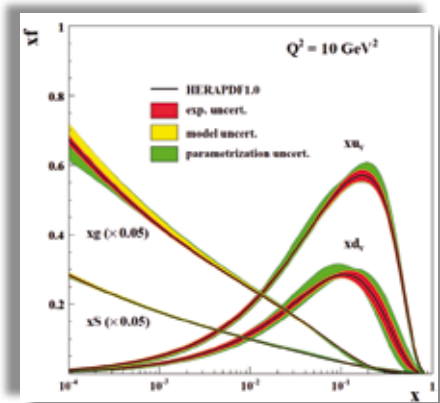
1973, Fritsch, Gross, Wilczek et Weinberg proposent la chromodynamique quantique comme théorie de l'interaction forte, introduisant le gluon comme médiateur de cette force.

Ce bref historique montre la complémentarité évidente entre les découvertes expérimentales et la description théorique. Ceci peut s'illustrer par la propriété de liberté asymptotique de QCD (Gross, Wilczek et Politzer en 1973, prix Nobel en 2004). Elle stipule qu'à haute énergie, ce qui correspond à de courtes distances, l'intensité de l'interaction entre les quarks et les gluons diminue. Cette propriété est vérifiée

expérimentalement par de nombreuses mesures donnant accès à ce paramètre fondamental de l'interaction forte. A l'inverse, l'augmentation de l'intensité de l'interaction à basse énergie est probablement reliée au problème du confinement : les quarks et les gluons ne sont jamais observés directement mais à travers leurs assemblages que l'on appelle hadrons (4^e problème du millénaire selon la fondation Clay).



Mesure de l'intensité de l'interaction forte à Hera et au Tevatron. La variable p_T mesure l'énergie à laquelle l'intensité est observée.



Distributions de partons dans le proton (xf) en fonction de la variable x , fraction de l'énergie du proton emportée par le gluon g , les quarks u et d (constituants du proton) et les autres quarks, notés S . On distingue clairement l'augmentation des densités xg et xS aux petites valeurs de x (haute énergie). Ce résultat essentiel de Hera explique le comportement des sections efficaces et la dynamique de l'interaction forte à haute énergie.

Ce lien étroit entre les approches théoriques et expérimentales a perduré depuis les premiers balbutiements sur l'interaction forte jusqu'à nos jours. Les services de l'Irfu ont contribué à de nombreuses expériences majeures en physique des hautes énergies : H1 au collisionneur Hera (l'Irfu est à l'origine de l'expérience), DØ au Tevatron ou encore Atlas et CMS au LHC. En parallèle, l'IPHT est à la pointe de l'activité théorique via ses études de la structure du proton à haute énergie, ses calculs de précision en QCD et ses techniques d'analyse de l'état final.

Prenons l'exemple de l'expérience H1 auprès du collisionneur électron-proton (ep) Hera. Cette expérience a permis une étude détaillée de la structure du proton et une compréhension précise de la dynamique de l'interaction forte. Grossièrement, les collisions ep sondent les constituants du proton. Les expériences ont montré que le contenu du proton change quand il est sondé à différentes distances ou énergies. Hera a, en particulier, mis en évidence une forte augmentation du nombre de gluons à haute énergie. Ces comportements ne pouvaient pas être expliqués avec le modèle de partons proposé par Bjorken et Feynman en 1969. La chromodynamique quantique fait beaucoup mieux aujourd'hui et l'un de ses plus grand succès est de prédire

Laurent Schoeffel, physicien des particules, est spécialisé en QCD, en particulier dans les processus de diffraction hadronique à Hera et au LHC dans Atlas.

Gregory Soyez, théoricien en physique des particules, est un spécialiste de QCD et plus particulièrement de la phénoménologie au LHC et de la physique des jets.



L'interaction forte

Par Laurent Schoeffel (Irfu) et Gregory Soyez (IPhT)

au cœur des étoiles, elle commence, au niveau le plus fondamental, l'Irfu cherche à mieux définir cette interaction fondamentale.

l'évolution des densités de quarks et gluons, indispensable pour l'analyse des expériences du LHC.

Pour conclure cette synthèse de l'histoire de l'interaction forte, tournons-nous vers l'avenir. La quête de prédictions de plus en plus précises, allant de pair avec des mesures au LHC est certainement une direction privilégiée pour l'étude de QCD. Vu que le LHC collisionne des protons, QCD y est présente à tous les niveaux, y compris dans une majorité des recherches de nouvelle physique. Mais

il y a encore beaucoup de questions ouvertes liées à notre compréhension fondamentale de l'interaction forte et donc de la physique qui s'intéresse aux constituants élémentaires de la matière. Comment expliquer le confinement ? Comment expliquer les différences de masse des hadrons ? Quel est le comportement de QCD dans sa limite à haute énergie ? Ces questions et toutes leurs déclinaisons constituent des phares pour guider les recherches à venir.

Le fabuleux destin d'une goutte.

Par A. Baldisseri (Irfu) et J-Y. Ollitrault (IPhT)

Environ un mois par an, le LHC se met au service de la physique nucléaire en accélérant deux faisceaux de noyaux d'atomes de plomb (*Pb*). Les premières collisions ont eu lieu en novembre 2010. De premiers résultats détaillés ont été présentés, dès mai 2011.

Chaque collision *Pb-Pb* crée une goutte minuscule et éphémère, qui se désagrège en quelque vingt mille particules élémentaires, en majorité des pions, dont une fraction est observée dans les détecteurs. Cette goutte a des propriétés fascinantes : c'est la première observation en laboratoire d'un fluide relativiste, semblable à celui qui a formé l'Univers, quelques microsecondes après le big bang. Alice, un des quatre détecteurs du LHC, a été conçu spécialement pour analyser les collisions *Pb-Pb*, et l'Irfu y participe, notamment à travers le spectromètre de muons. Cette équipe de huit chercheurs s'intéresse plus particulièrement à l'étude de la résonance *J/Psi*, formée d'une paire de quark-antiquark charmés, qui serait supprimée dans un plasma de quarks et de gluons. Des premiers résultats surprenants, faisant état d'une moindre suppression du *J/Psi* par rapport aux expériences à plus

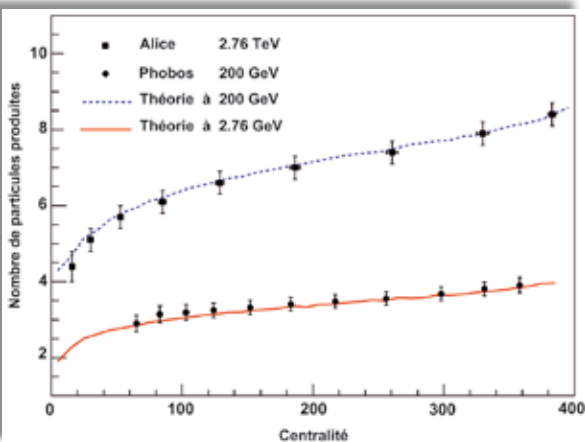
basse énergie auprès de l'accélérateur Rhic (Brookhaven, New York), viennent d'être soumis à publication

[1]. L'équipe théorique de l'IPhT compte, de son côté, une douzaine de chercheurs travaillant sur les collisions d'ions lourds, ce qui en fait une des plus grosses équipes au monde sur ce sujet. Le travail de ces théoriciens est, d'une part, d'étudier les problèmes théoriques soulevés par l'interprétation des données expérimentales concernant, par exemple, la thermalisation rapide de la goutte après la collision. D'autre part, ils établissent des prédictions quantitatives pour les expériences. L'équipe de l'IPhT a ainsi prédit correctement le nombre de particules produites par collision [2] et l'amplitude du « flot elliptique » [3], qui ont été les tous premiers résultats publiés par Alice en novembre 2010 [4].



Alberto Baldisseri, à droite, physicien nucléaire, dirige le groupe Alice qui travaille sur l'analyse des quarkonia.

Jean-Yves Ollitrault, directeur de recherche au CNRS affecté à l'IPhT, travaille sur l'interprétation théorique des collisions noyau-noyau au LHC.



Nombre de particules créées dans les collisions *Pb-Pb* en fonction de la centralité de la collision. La théorie arrive à reproduire aussi bien l'expérience Phobos à 200 MeV que les résultats d'Alice au LHC, à 2.76 TeV. (arXiv:1106.0978).

[1] arXiv:1202.1383 [2] J. Lopez Albacete et al, arXiv:1011.5161.
[3] M. Luzum, arXiv:1011.5173 [4] arXiv:1011.3916.

Illuminer les côtés

La nature de l'Univers reste mystérieuse... Pourtant, les proportions ordinaire, perdue dans un Univers sombre, correspond à moins de 4% La matière noire et l'énergie noire jouent un rôle primordial dans la

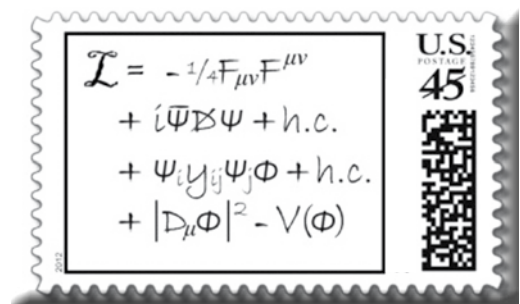
La matière noire serait composée de particules inconnues formant un halo autour des galaxies, courbant les rayons lumineux lors de leur passage à travers les amas galactiques et jouant un rôle crucial dans la formation des grandes structures de l'Univers. L'énergie noire, responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers, pourrait être la manifestation de l'énergie contenue dans le vide ou être un fluide cosmologique en évolution lente. Les théoriciens et les expérimentateurs, au CEA comme dans le monde entier, dialoguent depuis plusieurs décennies pour résoudre ces mystères et éclairer les côtés sombres de notre univers.

Marco Cirelli : Pierre, mon ami expérimentateur, que comptez vous faire pour détecter ces particules nouvelles qui constituent la matière noire ?

Pierre Brun : Attends, Marco, mon ami théoricien, avant de nous envoyer chercher une nouvelle particule, n'y auraient-ils pas d'autres possibilités ?

MC : Il semble que non. Il avait été proposé que le phénomène soit dû à de la matière normale soumise à une loi de Newton modifiée, mais ceci ne peut pas expliquer certaines observations comme celles faites lors de collisions d'amas de galaxies ou l'existence des grandes structures de l'Univers qui se forment grâce à une importante quantité de matière lourde.

problème. Un grand espoir repose sur la production de matière noire par le *Large Hadron Collider* (LHC), l'accélérateur de protons du Cern, à Genève.



Le modèle standard de la physique des particules est si élégant et compact qu'il tient sur un timbre. Pourtant, il ne rend pas compte de la matière noire et de l'énergie noire.

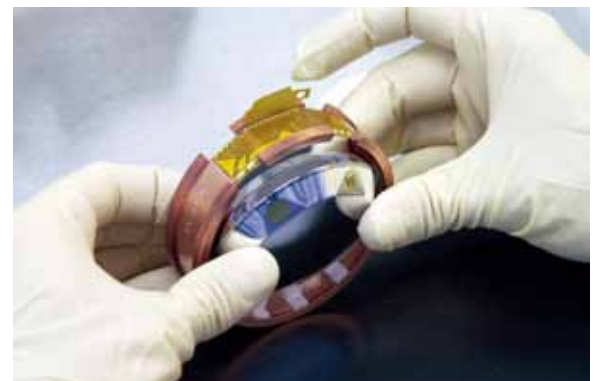
A l'échelle des galaxies, on pensait que cela pouvait aussi être dû à des objets compacts comme des planètes ou des trous noirs...

PB : Oui ! Mais certaines expériences comme Eros, dont l'Irfu faisait partie, ont montré, dans les années 90, que ces objets sont en trop petit nombre. C'est donc pour cela que vous avez inventé des nouvelles particules aux noms aussi bizarres que « neutralinos » ou « photons de Kaluza-Klein » ?

MC : Exactement. Ces particules ont leur origine en physique des particules dans des théories plus vastes, telles que la supersymétrie ou les modèles de Kaluza-Klein. Dans ce dernier cas, il existe de nouvelles dimensions de l'espace, renfermées en boucles microscopiques où quelques particules ordinaires, par exemple les photons, peuvent aller se cacher : l'énergie de ces particules cachées apparaîtrait à nos yeux comme une masse supplémentaire, ce qui a été proposé en 1999 par des chercheurs de l'IPHT. Il y a aussi des propositions moins audacieuses, tel que le modèle dit minimal, aussi avancé par l'IPHT, qui trouve une origine à la matière noire en n'ajoutant qu'une seule particule au modèle standard. Seule l'expérience dira si l'une de ces théories est la bonne. Que comptez-vous faire pour cela ?

PB : Les prochaines années sont prometteuses. Une combinaison de différentes techniques expérimentales est nécessaire et l'Irfu s'est investi à fond dans ce

Une autre perspective concerne la détection des produits issus de collisions de deux particules de matière noire dans notre galaxie. Différentes expériences pourraient détecter ces produits finaux : les télescopes à neutrinos, les télescopes à rayons gamma et les détecteurs de particules chargées embarqués sur des satellites. Un troisième axe compte sur les expériences souterraines comme Edelweiss visant à détecter un phénomène particulièrement rare : la collision d'une particule de matière noire avec un détecteur très sensible. Pour ce qui est de la matière noire, nos expériences prennent des données. Puisque tu nous dis qu'elle existe, on finira par en voir des traces !



Les cristaux de germanium d'Edelweiss, thermomètres parmi les plus sensibles au monde, pourraient permettre d'observer des particules de matière noire, les wimps.



Collision de deux amas de galaxies

En observant en rayons X ces deux amas de galaxies en collision, on détermine la distribution de la matière ordinaire, essentielle-ment du gaz interstellaire réchauffé (en rouge).

Mais les mesures de lentilles gravitationnelles montrent une grande quantité de matière non lumineuse (en bleu) avec des propriétés différentes : il s'agit de matière noire.

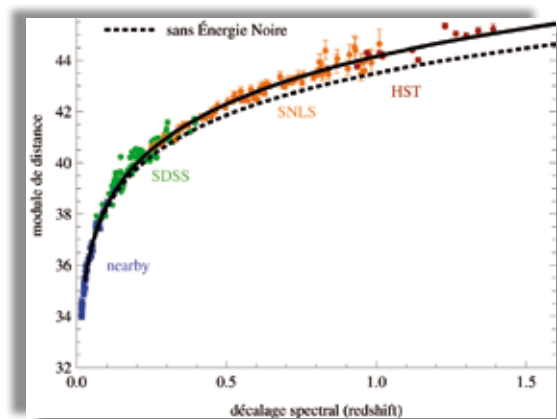
sombres de l'Univers

Par Pierre Brun (Irfu) et Marco Cirelli (IPhT)

de ses constituants sont bien connues. Quel paradoxe ! La matière du total composé de 23 % de matière noire et de 73 % d'énergie noire. structure et l'évolution de l'Univers.

MC : On l'espère bien ! Les premiers résultats de vos expériences permettent déjà d'exclure certains de nos modèles théoriques. Cela prouve que les observations sont très sensibles.

PB : Pour ce qui est de l'énergie noire par contre, la situation est plus floue. En 1998, des observations d'explosions d'étoiles lointaines ont montré que l'Univers n'est pas juste en train de s'étendre, mais que son expansion s'accélère ! Comment expliquer cela alors que la matière présente dans l'Univers devrait le pousser à se contracter puisque les masses s'attirent ?



La luminosité apparente (mesurée sur Terre) de supernovas lointaines est plus faible que prévue compte tenu de leur distance car l'expansion de l'Univers a accéléré entretemps. Les données s'expliquent en ajoutant une composante d'énergie noire. Cette découverte a valu le prix Nobel à S. Perlmutter, A. Riess et B. Schmidt, en 2011.

MC : Ceci ne peut s'expliquer qu'en rajoutant une sorte d'énergie à pression négative qui surgit du vide et repousse l'espace même. C'est ce qu'on appelle « énergie noire ».

PB : Ce n'est pas la première fois que vous associez une énergie au vide, n'est-ce pas ?

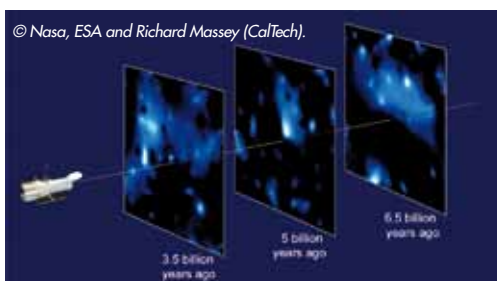
MC : Einstein, au début du XX^e siècle, introduisit une constante cosmologique pour compenser l'expansion de l'Univers, expansion prévue par les équations de la relativité générale. Il put ainsi obtenir un Univers statique. Cette constante peut s'interpréter comme une énergie du vide, présente dans tout l'Univers. Après l'observation effective de l'expansion de l'Univers par Hubble, Einstein lui-même rejeta l'idée d'Univers statique comme « sa plus grande erreur ». Les résultats de 1998, constatant que cette expansion s'accélère, ont entraîné l'introduction d'une énergie du vide dite énergie noire, susceptible d'expliquer la dynamique de l'Univers.

PB : Et donc cela revient sur le tapis ! Mais quelle est l'origine de cette énergie ?

La physique des particules prévoit bien une énergie du vide, due à l'ébullition quantique du vide, mais la

prédiction quantitative de sa valeur tombe 120 ordres de grandeur au delà de la valeur mesurée. Embarrassant ! Certains scientifiques ont proposé que cela ne soit pas une énergie propre au vide mais un champ scalaire, une « quintessence », qui imprégnerait l'espace et qui serait en évolution très lente. Certains à l'IPhT sont allés plus loin en imaginant que ce champ ait des propriétés qui changent selon son environnement. D'où son nom de champ "caméléon". Tu le vois, nous sommes un peu dans le flou, il nous faudrait de nouvelles observations.

PB : Tout cela est bien mystérieux. En tout cas, pour l'énergie noire, nous comptons bien mesurer de plus en plus précisément sa densité et ses propriétés. Les expériences auxquelles l'Irfu participe sont bien placées pour cela. Les télescopes au sol mesurent les supernovas et comptent les galaxies pour en déduire des informations sur les propriétés de cette énergie noire. De l'espace, le satellite Planck publiera bientôt ses résultats. Dans le futur, nous espérons beaucoup apprendre des données d'Euclid, expérience dans laquelle l'Irfu est un acteur de premier rang. Par exemple, l'accélération pourrait être une illusion due à une modification de la gravité à grande échelle, que l'on verra sur la croissance des structures.



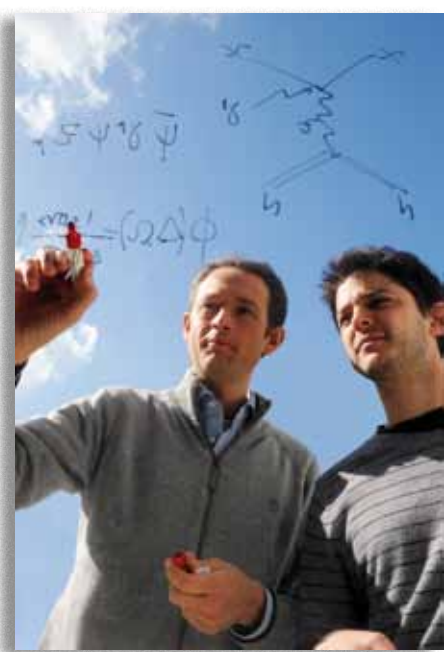
La mission spatiale Euclid cartographiera l'Univers lointain.

MC : Travaillons et attendons alors. Nous vivons tout de même dans une conjoncture intéressante : nous sommes conscients de notre ignorance de façon très quantitative !

PB : Oui, ça invite à l'humilité tout en étant très excitant. Espérons que nous verrons bientôt clair afin d'illuminer les côtés sombres de l'Univers.

Pierre Brun, à droite, chercheur en physique des astroparticules, est spécialisé dans la recherche de matière noire et de nouveaux phénomènes, en particulier avec les télescopes Hess.

Marco Cirelli, chercheur CNRS en astroparticules affecté à l'IPhT, travaille sur les aspects théoriques et phénoménologiques liés à la matière noire.

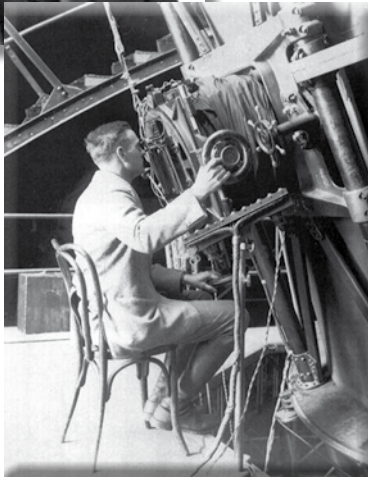


Des étoiles aux grandes

Dans les années 20, les astronomes identifient des « nébuleuses » au notre Voie lactée s'éloignent de nous : l'Univers n'est plus un champ dynamique...



Georges Lemaître



Edwin Hubble au télescope de 2,5 m du Mont Wilson (EU).

Après la découverte des galaxies, les astronomes, et pour nommer le plus connu d'entre eux, Edwin Hubble, mesurent leurs spectres et leurs distances. Ils se rendent compte qu'elles ont tendance à s'éloigner de nous. L'Univers est en expansion ! C'est à Georges Lemaître que l'on doit la mise en équation de cette expansion ainsi que sa première estimation, même si c'est le nom de Hubble que l'histoire a retenu...

Pour autant, Lemaître a posé, en 1927, les premiers jalons d'un domaine de recherche qui nous occupe encore aujourd'hui : Comment passer d'un univers homogène à un univers présentant de grands contrastes de densité, un univers où l'on rencontre des regroupements de galaxies, des étoiles... ? Il faut réconcilier l'inconciliable ; inscrire dans un même formalisme l'espace-temps homogène et

isotrope des géomètres et celui des densités et des énergies extrêmes des astrophysiciens. La clé, le mécanisme d'instabilité gravitationnelle proposé par G. Lemaître, s'appuie sur le jeu croisé de la gravité et des interactions matière-rayonnement. Il reste que beaucoup d'éléments du scénario nous échappent encore, qu'ils concernent la physique fondamentale, la physique non-linéaire ou encore l'astrophysique des objets formés.

Origines des grandes structures

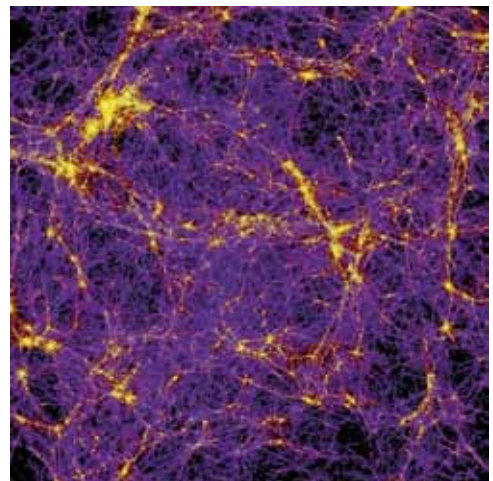
Le scénario menant à la formation des grandes structures s'est considérablement précisé au cours des dernières décennies : on comprend bien maintenant la nature des conditions initiales, on sait comment prendre en compte les différentes composantes de l'Univers et quels rôles elles jouent... Exercice à la fois de relativité générale et de physique statistique, le calcul du développement des instabilités cosmologiques en présence de matière noire est une des plus belles réalisations de la physique moderne. Il s'appuie en grande partie sur un paradigme : l'inflation, imaginée au début des années 80, qui postule une phase d'expansion accélérée de l'Univers. Cette révolution conceptuelle radicale apportée à la cosmologie moderne est bien confirmée par les observations récentes, faisant ainsi des plus grandes structures de l'Univers à la fois un

laboratoire d'étude de l'Univers primordial et de la physique « microscopique ».

Du linéaire au non-linéaire

Dans un univers dont la masse est dominée par la matière noire, la croissance des structures est gouvernée par la gravité. Tant que les fluctuations de densité sont faibles, un corpus de méthodes analytiques peut être mis en œuvre. Mais jusqu'où le développement des perturbations peut-il être suivi ? De cet ordre dépendent les contraintes sur la masse des neutrinos ou encore de subtils effets dus à des modifications de la gravité ou à la présence d'énergie noire.

Il reste que l'essentiel des observations concerne des objets qui se sont effondrés gravitationnellement. *A priori* simple, la modélisation de la formation des « halos » de matière noire représente encore aujourd'hui un défi majeur pour les simulations numériques. En effet, les halos de matière noire couvrent une immense gamme d'échelles. Les plus petits halos, mesurant à peine quelques kiloparsecs, hébergent des galaxies naines et les plus grands hébergent des super-amas de galaxies, mesurant plus d'une centaine de mégaparsecs.



Exemple de réalisation de simulation à N corps décrivant les structures de matière noire de l'Univers. Crédit projet Horizon

Aussi, si des techniques numériques permettant de modéliser précisément la physique mise en jeu sont au point depuis plusieurs décennies, ce n'est que récemment que des propriétés statistiques aussi fondamentales que la répartition des masses des structures de matière noire ont pu être appréhendées précisément dans des simulations combinant haute résolution spatiale et grands volumes simulés.

Le parsec (symbole pc) est une unité de longueur utilisée en astronomie. Son nom vient de la contraction de « parallaxe-seconde ». Un parsec vaut 3,2616 années-lumière.

structures de l'Univers

Par Francis Bernardeau (IPhT) et Frédéric Bournaud (Irfu)

delà des étoiles de notre ciel nocturne. Ces îlots d'étoiles extérieurs à d'étoiles immuable et statique mais un fluide grumeleux en évolution

Jeu croisé entre étoiles et grandes structures : dissipation et ré-injection d'énergie.

Aux plus petites échelles de la cosmologie, quelques parsecs à quelques kiloparsecs, se concentrent les baryons, composante mineure de l'énergie totale de l'Univers, mais seule composante accessible à l'observation directe. Ces baryons, composants de la matière dite « ordinaire », principalement les étoiles et le gaz interstellaire formant

L'histoire de l'Univers couvre 13.7 milliards d'années. Elle commence par une expansion pendant l'inflation suivie d'une décélération sous l'influence de la gravité. L'expansion est de nouveau en accélération à cause d'une mystérieuse énergie noire qui se met à dominer le contenu de l'Univers depuis cinq milliards d'années.

les galaxies, compliquent largement le problème de la formation des structures cosmologiques. Par défaut, les modèles ont longtemps considéré que la matière baryonique suivait de manière passive les structures de matière noire : chaque galaxie se concentre au centre d'un halo de matière noire, avec des propriétés

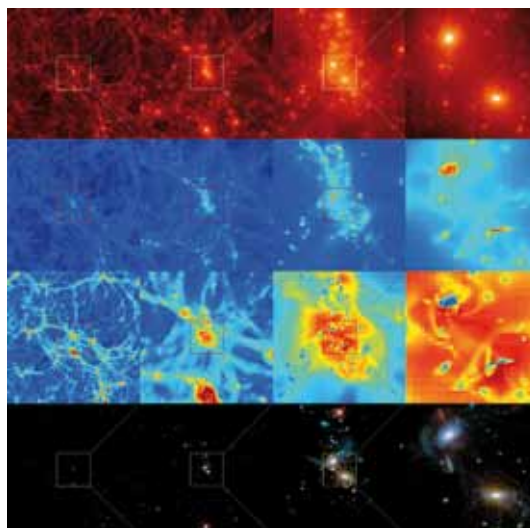
de masse, taille et moment angulaire directement liées à celles du halo. Ces modèles ont pourtant échoué à expliquer des propriétés aussi simples et générales que la répartition de la luminosité des galaxies ou le taux moyen de formation stellaire dans l'Univers. Ce taux est bien plus faible que ce qui est attendu par simple effondrement gravitationnel du gaz au sein des structures sombres. A partir des années 2000, le rôle actif des baryons dans la formation des structures est enfin pleinement pris en compte.

Dans des conditions physiques adéquates, les baryons peuvent en effet rayonner et donc, même s'ils ne représentent que peu de masse, ont la possibilité de redistribuer l'énergie, la dissipant aux coeurs des halos pour la ré-injecter plus loin. Une propriété majeure du milieu interstellaire est ainsi la présence d'une forte turbulence, souvent à des vitesses supersoniques, alimentée notamment par la contraction des baryons au sein des galaxies. De ce fait, le gaz interstellaire s'entrechoque à toutes les échelles dans les galaxies, ce qui le chauffe fortement... et conduit à le refroidir par l'émission de rayonnement. Ce refroidissement évacue continuellement de l'énergie des galaxies. Les conséquences de ce comportement dissipatif des baryons sont multiples. Il diminue fortement le moment angulaire des galaxies, par exemple, ce qui permet de concentrer encore plus le gaz interstellaire et d'auto-entretenir sa turbulence en pompant continuellement son énergie gravitationnelle.

La formation d'étoiles, à l'inverse, réinjecte de grandes quantités d'énergie dans le gaz interstellaire environnant. Les étoiles jeunes et massives ont un flux de radiation suffisamment intense pour ioniser et chasser le gaz et la poussière, phénomène qui s'amplifie lorsque les plus

massives de ces étoiles explosent en supernovas. Cette réinjection d'énergie régule la formation stellaire, en dispersant les nuages de gaz peu après leur formation. Elle peut même réguler la croissance en masse des galaxies, en éjectant les baryons des halos de matière noire dans lesquels ils s'étaient accrétés.

Ces processus expliquent de mieux en mieux les propriétés statistiques des galaxies. Pourtant, bien des mystères demeurent comme l'arrêt total de la formation stellaire dans les galaxies massives ou l'absence de refroidissement des halos de gaz chaud qui remplissent l'ensemble des amas de galaxies.



Simulation hydrodynamique de deux galaxies dans leur environnement cosmologique. Les images montrent, de haut en bas : la matière noire, la densité de gaz et sa température ainsi que la distribution des étoiles. De la gauche vers la droite : zoom sur les deux galaxies principales et leurs satellites. Crédits Y. Raseria, R. Teyssier.

Les trous noirs se mettent aussi de la partie !

Ces problèmes pourraient trouver leur solution dans de nouveaux processus à des échelles encore plus petites : la réinjection d'énergie par les trous noirs super-massifs au cœur des galaxies, les fameux « noyaux actifs ». La modélisation précise de l'alimentation des trous noirs et de la réponse des galaxies et des halos à leur activité devient l'un des enjeux majeurs pour les modèles théoriques et les simulations numériques de la formation des structures de l'Univers.

Francis Bernardeau, chercheur en cosmologie à l'IPhT, travaille sur la croissance des grandes structures de l'Univers.

Frédéric Bournaud, astrophysicien à l'Irfu, travaille sur la formation des galaxies et de leurs étoiles à l'aide de simulations numériques et d'observations infrarouges.

Les autres...

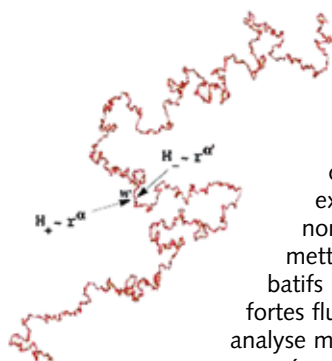
La théorie et la modélisation ont toujours été présentes au de chercheurs sollicités par leurs collègues de tous horizons Châtillon. La physique nucléaire, la neutronique et la physique heures. Suivront, dans les décennies suivantes, la théorie des champs, matière condensée et des systèmes biologiques. L'Institut de physique des sciences de la matière du CEA. En devenant en 2001 une unité de CNRS. Au delà des thèmes communs avec l'Irfu, nous étions curieux

Physique mathématique

La dynamique de systèmes très simples peut mener à des mouvements complexes. Par exemple, les trajectoires d'une particule dans un billard en forme de stade sont instables et remplissent finalement tout le billard. Ce système a un analogue quantique : une onde se propageant à l'intérieur d'une cavité (électrons dans une boîte quantique ou lumière dans une fibre optique). L'approche semi-classique permet d'analyser les modes stationnaires et leurs propriétés de localisation, d'où découlent des propriétés remarquables associées aux fonctions mathématiques. Ainsi ce vaste domaine de recherches est à la frontière entre mathématique et physique, avec des applications variées, par exemple, dans l'étude de la turbulence et de la décohérence quantique.

L'IPhT étudie en particulier deux types de systèmes simplifiés : les systèmes intégrables et les théories des champs conformes. Les systèmes intégrables, exactement solubles, possèdent un grand nombre de quantités conservées et permettent l'étude de phénomènes non-perturbatifs dans des systèmes physiques sujets à de fortes fluctuations statistiques et quantiques. Leur analyse met en évidence des structures algébriques ou géométriques remarquables dont le champ d'application s'étend de la physique aux mathématiques pures. C'est également le cas des théories conformes. En se ramenant à un petit nombre de dimensions, elles sont au cœur de la théorie des cordes et se sont révélées d'excellents outils pour étudier des systèmes critiques ou quantiques et pour caractériser certains processus universels de croissance stochastiques et fractals.

L'étude quantitative de ces problèmes requiert des outils mathématiques sophistiqués (théorie des champs, symétries conformes, modèles intégrables...) dont beaucoup ont été développés au sein de l'Institut de physique théorique. Ainsi des solutions exactes, obtenues pour des systèmes idéalisés loin de l'équilibre, ont permis de construire l'équivalent de potentiels thermodynamiques ; la transition vitreuse a été caractérisée par une échelle intrinsèque de longueur ; les transitions de phase dans des systèmes désordonnés (verres de spin, colloïdes, polymères) ainsi que leur dynamique sont



Multifractalité des polymères dans le plan étudiée dans le cadre d'une théorie des champs conforme.



Évolution du réseau viaire d'une région urbaine, entre 1833 et 2007. A gauche, les cartes et photo satellite et, à droite, la représentation correspondante en terme de réseau qui permet l'étude du système à l'aide des outils de la physique statistique.

Par delà l'ordre et l'équilibre

La physique statistique sait bien rendre compte des phénomènes à l'équilibre. Nombre de systèmes physiques ne sont cependant ni ordonnés ni à l'équilibre et demandent une description statistique. La construction d'une théorie générale des processus hors équilibre représente un problème crucial de la physique statistique. Il n'existe aucun cadre général pour décrire les systèmes complexes en évolution temporelle, qui échangent de l'énergie, de la matière, de la charge ou de l'information avec leur environnement. Or de tels flux d'échange existent dans de nombreux systèmes, naturels ou artificiels : la matière vivante ou les réseaux complexes en sont des exemples distingués.

explorées par des techniques originales de renormalisation. Ces apports théoriques sont appliqués avec succès à des problèmes interdisciplinaires comme l'informatique théorique (algorithmes d'optimisation, codes correcteurs d'erreurs) ou la biologie (modèles d'évolution, repliement de protéines). L'étude des réseaux et de leur dynamique conduit à des résultats fondamentaux en épidémiologie, afin de mieux contrôler la propagation des maladies infectieuses. Plus généralement, les méthodes de la physique statistique sont bien adaptées à certains problèmes sociétaux : description et optimisation des réseaux de transport économiques et humains, analyse

CEA, indispensables à ses travaux de recherche. Dès 1947, un groupe développent leur penchant pour l'abstraction et la modélisation au Fort de statistique s'imposent comme les thèmes principaux de ses premières la physique des particules et l'astrophysique puis la physique de la théorique, localisé à l'Orme des Merisiers, est rattaché à la Direction recherche associée, cet institut a officiellement scellé ses liens avec le de découvrir la palette des expertises maîtrisées par l'IPhT.

mathématique du tissu urbain, ouvrant ainsi des champs nouveaux et prometteurs.

Matière condensée

Les travaux entrepris à l'IPhT sur la physique de la matière condensée traitent de phénomènes quantiques spectaculaires qui se passent à l'échelle macroscopique, lorsque la température est suffisamment basse. La supraconductivité : conduction de courant électrique sans résistance, la superfluidité : écoulement sans frottement, l'effet Kondo : augmentation de la résistance d'un solide quand on baisse sa température, ou encore l'effet Hall quantique fractionnaire dans lequel les porteurs de charge se fractionnent sous l'effet des interactions et des fortes fluctuations quantiques, sont autant d'exemples de ces phénomènes remarquables et mystérieux.



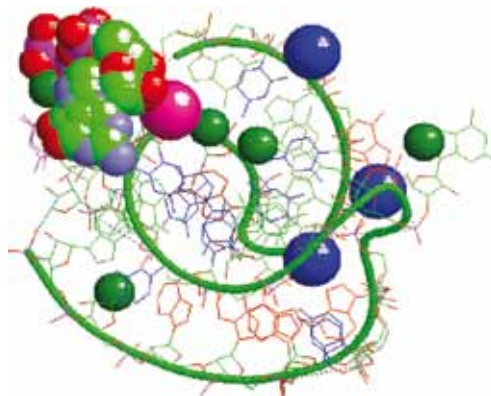
Capture par un aimant d'un disque supraconducteur sous l'effet Meissner.

Suite à leur observation expérimentale, ces phénomènes sont étudiés théoriquement par des méthodes de théorie des champs, associées à des techniques numériques avancées. Les modèles, bien définis à l'échelle microscopique, sont encore mal compris à l'échelle macroscopique lorsque les interactions entre les électrons deviennent trop fortes. Des composés complexes de spins frustrés, ainsi que des systèmes hors équilibre sont aussi étudiés en profondeur.

Matière molle et systèmes biologiques

Les polymères constituent une réalisation physique de processus stochastiques tels que les mouvements browniens ou les marches aléatoires auto-évitantes. D'autres types de processus stochastiques contrôlent le fonctionnement des moteurs moléculaires ou le repliement des protéines.

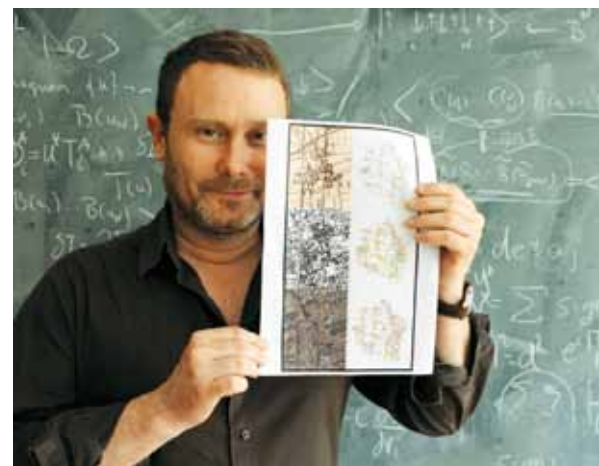
Certains aspects universels des membranes (films flexibles, membranes biologiques) sont en relation avec les géométries aléatoires étudiées en théorie des cordes et en gravité quantique. Lorsque les objets sont chargés (polyélectrolytes, membranes chargées) ou possèdent des degrés de liberté internes, leurs propriétés physiques et géométriques sont profondément modifiées : de nou-



Interaction d'une protéine avec un ARN

velles phases apparaissent. La physique des polymères aléatoires régit les interactions complexes entre monomères chimiquement différents dans les polymères biologiques. On peut ainsi étudier la dénaturation de l'ADN ou le repliement des protéines et de l'ARN. Pour ce dernier, la classification des formes possibles peut se faire à l'aide d'outils de la topologie (genre, caractéristique d'Euler) et cela conduit à l'élaboration d'algorithmes puissants de prédiction de structure. Par ailleurs, la plupart des bio-polymères portent des charges, et l'interaction coulombienne détermine leurs propriétés universelles d'association et de solvatation dans la cellule.

Marc Barthelemy, s'est spécialisé dans la physique statistique des réseaux. Il a accepté d'être le rédacteur en chef invité et de représenter l'Institut de physique théorique pour ce numéro spécial.



Témoignage académique

Par Jean Zinn-Justin

Le Service de physique théorique (SPhT devenu aujourd'hui IPhT) a été créé en 1963 bien que la physique théorique exista auparavant au CEA au sein du service de physique mathématique. Il comprenait alors une trentaine de physiciens. Je l'ai rejoint en octobre 1964 lors de la préparation de mon DEA. De mémoire, le SPhT pouvait se diviser en quatre thèmes : la physique nucléaire, le groupe le plus nombreux, incluant le chef de service Claude Bloch, la physique des des particules, la physique mathématique et la physique statistique.

La physique nucléaire était centrée sur le spectre des noyaux au-delà du modèle en couches ou du champ moyen et sur les réactions nucléaires. La physique statistique est ainsi apparue au SPhT, par l'application de méthodes issues de la théorie des champs au problème à N corps. La physique des particules était dominée par la phénoménologie des interactions fortes, interactions supposées ne pas pouvoir être décrites par la théorie des champs. Un physicien s'intéressait à l'électrodynamique quantique. La physique mathématique comprenait aussi des thèmes inspirés par les interactions fortes comme la théorie de la matrice S et la théorie axiomatique des champs. Le SPhT avait là deux manques graves : les interactions faibles et, du point de vue méthodologique, la théorie quantique des champs. Par ailleurs, l'astrophysique était absente. Le chef de service voulait alors renforcer la physique nucléaire, étant pessimiste sur l'avenir de la physique des particules et réticent sur la physique mathématique.

Les rencontres expérimentateurs-théoriciens en physique des particules et nucléaire étaient régulières, les sujets de recherche étant communs. Un premier schisme se produisit en 1968 avec le déménagement du SPhT à l'Orme des Merisiers. Il était prévu que toute la physique fondamentale s'établirait à l'Orme mais les difficultés financières combinées aux réticences de certains chercheurs, tels les physiciens des particules, en ont décidé autrement. Cette situation, qui affecte aussi l'animation scientifique de l'Irfu aujourd'hui, perdure. En conséquence, les rencontres se sont espacées. Pourtant, nombre de chefs du SPhT étaient conscients de la nécessité de proposer un support théorique à la physique expérimentale. Ainsi, durant mon mandat de chef du SPhT, mon adjoint ou moi-même avons participé à tous les CSTS des trois services de physique de l'Irfu. Cela me sera très utile plus tard, mais je ne le savais pas encore...

A cette évolution géographique néfaste est venu s'ajouter un éloignement thématique. Contrairement à ce que croyait le premier chef de service, la physique nucléaire théorique était proche de son apogée. Ceci provoqua un désintérêt croissant des étudiants et la majorité des théoriciens nucléaires se convertirent à la physique hadronique naissante. Quand je devins chef du SPhT, la situation était critique, le dernier théoricien de la structure nucléaire étant proche de la retraite. Devenu chef du Dapnia, je soutiendrai les efforts de Nicolas Alamanos pour faire revivre la théorie nucléaire à Saclay. Pour ce qui concerne la physique des particules, certains rendez-vous ont été manqués dans les années 1970. Ensuite, la disparition des dispositifs expérimentaux à Saclay a éloigné les expérimentateurs. Les résultats du LHC pourraient ouvrir la voie à des contacts accrus, une opportunité à ne pas manquer cette fois. En astrophysique, le SPhT a pris le train avec un peu de retard et cette activité n'y a pas, à mon sens, la place qu'elle pourrait y avoir. Les évolutions de ces disciplines mériteraient une discussion stratégique approfondie entre l'Irfu et l'IPhT.



Directeur de la publication : Philippe Chomaz **Directeur scientifique :** Vanina Ruhlmann-Kleider **Secrétariat :** Maryline Besson

Rédacteur en chef : Jean-Luc Sida

Rédacteur invité : Marc Barthelemy (IPhT)

Mise en page : Christine Marteau

Impression : Idées fraîches

Comité éditorial : Maryline Besson, Étienne Burtin, Rémi Chipaux, Olivier Corpace, Antoine Drouart, Pascal Gallais, Christian Gouiffès, Fabien Jeanneau, François Paul Juster, Sophie Kerhoas-Cavata, Emmanuelle de Laborderie, Pierre Manil, Jacques Marroncle, Vanina Ruhlmann-Kleider, Yves Sacquin, Corinne Salmon, Angèle Sené, Didier Vilanova.

Crédits Photo : CEA - Cern - Deviantart - ESA - Imag'In Irfu (Alain Porcher - Jean-Luc Sida)

Abonnement : Sophie Durand Tél : 01 69 08 75 57 ou sophie.durand@cea.fr **Dépôt légal :** juin 2012

ISSN 1268-7855