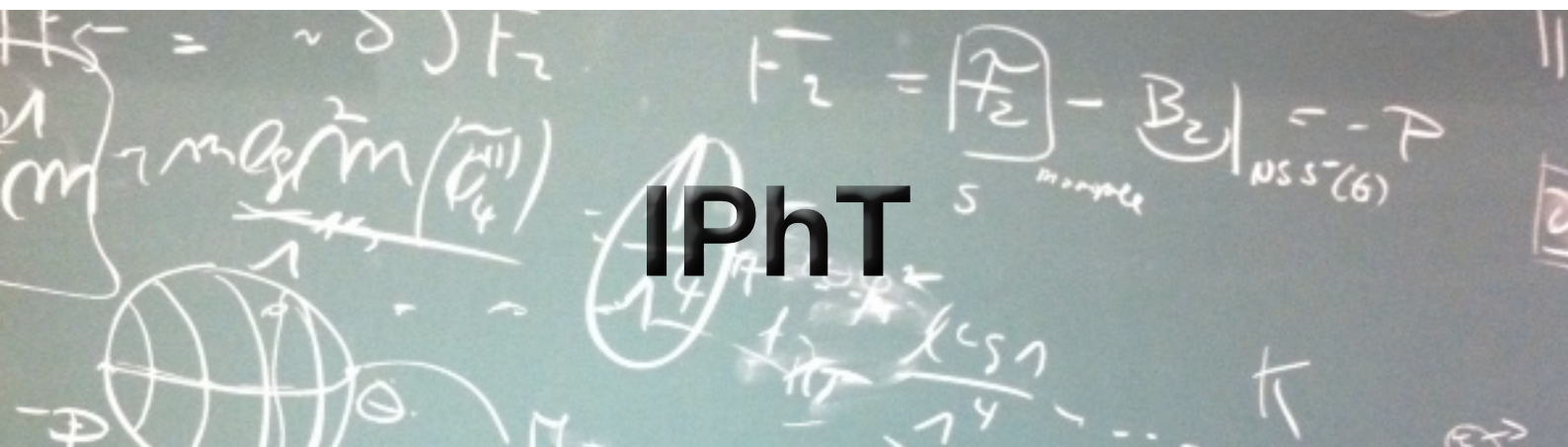


Institut de Physique Théorique



De nombreuses recherches sont poursuivies au sein de l'Institut de Physique Théorique. Elles vont de l'étude des interactions fondamentales, visant en particulier à décrire l'univers primordial, jusqu'à l'élaboration de modèles pour comprendre certaines structures biologiques. Elles passent aussi par l'étude mathématique de systèmes complexes en physique statistique et en théorie des champs. Sous la diversité des systèmes étudiés se cache en réalité une unité profonde entre les divers formalismes mathématiques utilisés pour les décrire.

Commissariat à l'énergie atomique
et aux énergies alternatives
Direction de la Recherche Fondamentale
Saclay

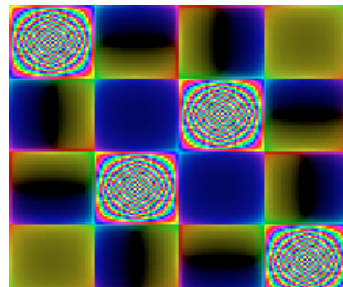
Physique mathématique

Chaos quantique Systèmes dynamiques Théorie des champs

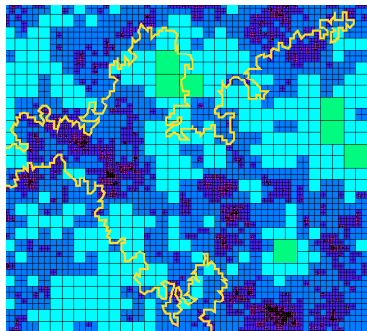
Des systèmes dynamiques très simples peuvent mener à des comportements complexes aux temps longs. Par exemple, la plupart des trajectoires d'une particule confinée dans un billard en forme de stade sont instables, et visitent tout le billard. Ce système a un analogue quantique: une onde se propageant à l'intérieur d'une cavité de même forme. L'approche semi-classique permet d'analyser les propriétés de localisation des modes stationnaires, en tenant compte des propriétés aux temps longs du système classique. De tels modèles mathématiques simples permettent d'appréhender des systèmes physiques divers: électrons

dans une cavité mésoscopique bidimensionnelle, propagation de lumière dans une fibre optique, cavités acoustiques, ou bien la propagation d'ondes sismiques. D'un point de vue théorique, pour les systèmes avec un nombre infini de degrés de liberté, le groupe de renormalisation est un outil de choix pour démontrer de façon simple et rigoureuse des propriétés des théories des champs perturbatives. Ainsi ce vaste domaine de recherches est à la frontière entre mathématiques et physique, avec des applications nombreuses et variées, allant de la turbulence à la décohérence quantique.

dans une cavité mésoscopique bidimensionnelle, propagation de lumière dans une fibre optique, cavités acoustiques, ou bien la propagation d'ondes sismiques. D'un point de vue théorique, pour les systèmes avec un nombre infini de degrés de liberté, le groupe de renormalisation est un outil de choix pour démontrer de façon simple et rigoureuse des propriétés des théories des champs perturbatives. Ainsi ce vaste domaine de recherches est à la frontière entre mathématiques et physique, avec des applications nombreuses et variées, allant de la turbulence à la décohérence quantique.



La physique statistique repose sur un comptage précis des différents états et configurations d'un système, ce qui traduit son lien intime avec la combinatoire. La relation entre les phénomènes critiques sur des réseaux bidimensionnels (2D) réguliers et leur version "gravitationnelle" sur des réseaux aléatoires est la clef de la résolution de nombreux problèmes de physique statistique (polymères, particules à cœur dur) et de mathématique (problème des trois couleurs, problème des méandres). Ce lien a été reconsidéré de



façon rigoureuse à travers l'approche probabiliste continue

Théories conformes Systèmes intégrables

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 qui sont au cœur de la théorie des cordes et qui se sont aussi

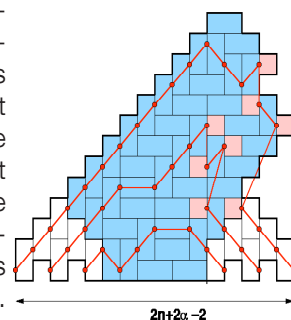
Les systèmes intégrables possèdent un grand nombre de quantités conservées

à la gravité quantique. L'étude des matrices aléatoires a permis de découvrir de

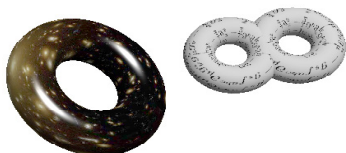
Physique statistique combinatoire

nouveaux invariants de géométrie algébrique énumérative, des invariants de noeuds, et de façon plus générale permet d'étudier les développements asymptotiques des systèmes intégrables. L'approche combinatoire est une alternative aux approches traditionnelles de théorie des champs ou de matrices aléatoires. Par exemple le découpage de graphes en arbres fournit un moyen puissant d'étude de la statistique des distances internes sur les réseaux aléatoires.

révélées d'excellents outils pour étudier les systèmes critiques 2D ou les systèmes quantiques 1D. Ils sont aussi bien utilisés pour caractériser certains processus universels de croissance stochastique et fractale. Les modèles intégrables apparaissent également dans l'étude des théories de jauge supersymétriques, où ils permettent d'explorer le régime de couplage fort et de prouver que ces théories sont duales à des théories des cordes dans des espaces courbes.



La longueur d'onde de De Broglie d'une particule qui se déplace dans une région où la densité d'énergie est très grande, près d'un trou noir par exemple, peut devenir du même ordre de grandeur que le rayon de courbure de l'espace-temps. Des phénomènes quantiques viennent alors modifier les lois de la gravité classique. La description de tels phénomènes



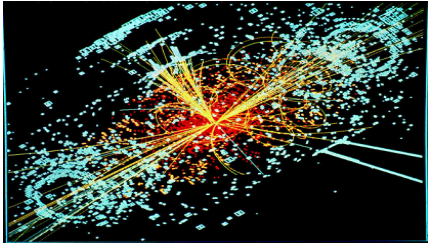
est l'objet de la théorie des cordes, qui apporte une description unifiée de la gravité et de la mécanique quantique. Les travaux réalisés dans notre Institut ont su tout à la fois s'inspirer des techniques

développées en géométrie algébrique et mettre à profit l'expertise acquise en supergravité pour essayer de résoudre les problèmes de gravité quantique, comme le paradoxe de l'information ou l'origine microscopique de l'entropie des trous noirs. Enfin, la correspondance jauge/gravité est utilisée pour étudier des systèmes à couplage fort comme le plasma quarks-gluons ou des modèles de matière condensée.

Théorie des cordes Gravité quantique

Physique des particules - Astrophysique

Le Modèle Standard décrit les constituants élémentaires de la matière (quarks et leptons) et leurs interactions. Il a été testé avec une précision remarquable dans les expériences menées auprès des accélérateurs de particules au cours des trente dernières années. Un élément-clé de cette théorie,



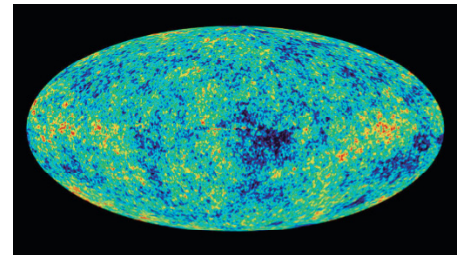
le boson de Higgs, dont les interactions avec les autres particules sont à l'origine de leurs masses, fait l'objet d'études approfondies au Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) au CERN. Malgré ses succès expérimentaux, le Modèle Standard échoue cependant à rendre compte d'observations telles que l'existence de la matière noire, l'asymétrie matière-antimatière, l'accélération de l'expansion de l'Univers ou la petitesse des masses des neutrinos. D'un point de vue théorique, il laisse ouvertes un certain nombre

de questions, comme celle de l'instabilité, au niveau quantique, de la hiérarchie entre l'échelle électrofaible et l'échelle de Planck associée à la force gravitationnelle. La physique au-delà du Modèle Standard a pour ambition de répondre à ces questions, que ce soit dans le cadre de théories plus fondamentales prédisant l'existence de nouvelles particules et interactions, ou bien en employant des techniques indépendantes des modèles pour extraire des données expérimentales (collisions à haute énergie, rayons cosmiques, observations cosmologiques, oscillations de neutrinos, désintégrations rares...) des informations sur la physique sous-jacente. Ces approches complémentaires nous permettent d'explorer la dynamique de la brisure de la symétrie électrofaible, la nature et les propriétés de la matière noire, l'origine des masses des neutrinos, ou encore la nature de l'énergie noire.

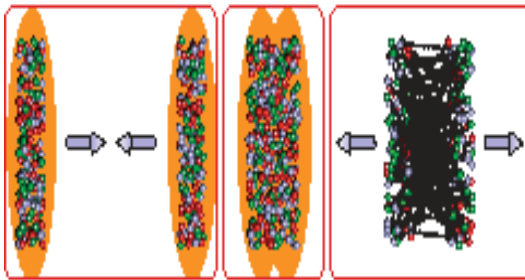
Modèle standard & au-delà

Cosmologie La cosmologie a pour ambition de retracer l'histoire de notre univers depuis le Big-Bang pour en comprendre le contenu aussi bien que la manière dont la matière se structure à grande échelle. Les objets astrophysiques observés aujourd'hui (galaxies, amas de galaxies...) sont le fruit de l'effondrement gravitationnel des petites irrégularités de densité qui ont pris naissance dans l'univers primordial. Nos travaux vont donc de l'étude de l'univers primordial (propriétés statistiques des fluctuations initiales, production d'ondes gravitationnelles ou de champs magnétiques, ...) jusqu'à la dynamique gravitationnelle des grandes structures dans l'univers récent (évolution de la distribution spatiale des galaxies, ...). Ces prédictions théoriques sont confrontées aux observations pour contraindre les scénarios cosmologiques possibles (mesures des fluctuations de température du fond diffus cosmologique, de la distribution des amas de galaxies, de la distorsion des

images des galaxies lointaines par le champ gravitationnel). Au-delà de la compréhension de ces mécanismes, la cosmologie observationnelle soulève de nombreux problèmes pour la physique des particules élémentaires. Cela a naturellement conduit à un rapprochement entre ces deux thématiques. Nature de la matière noire ou de l'énergie sombre, origine de l'asymétrie matière-antimatière, nature de l'inflation et structure de l'espace-temps sont autant de questions auxquelles les physiciens tentent de répondre.



La chromodynamique quantique (QCD) est la théorie fondamentale qui sous-tend l'interaction nucléaire forte. Elle régit les interactions à courte portée entre les quarks et les gluons, qui sont les constituants des protons et des neutrons. La QCD explique le confinement des quarks et des gluons dans



ces particules. La compréhension des interactions fortes est cruciale pour l'analyse des données amassées par les expériences réalisées au Large Hadron Collider (LHC) au CERN. Les interactions fortes possèdent la propriété remarquable de devenir plus faibles à courte distance, ce qui permet l'usage de méthodes perturbatives pour étudier les processus à haute énergie. Au contraire, elles deviennent plus fortes à

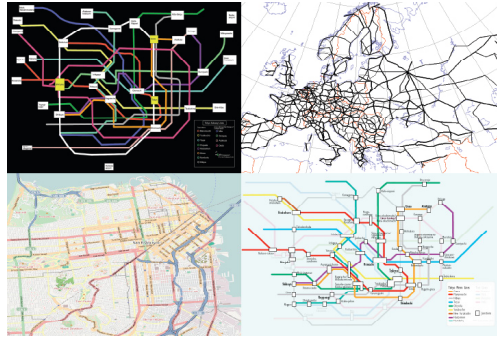
grande distance. Ce régime de couplage fort suggère l'emploi de théories effectives, ainsi que de théories voisines possédant

des symétries attendues comme la supersymétrie maximale, ou encore de théories des cordes duales. La QCD requiert aussi des techniques non-perturbatives dans des situations qui impliquent un grand nombre de particules, même à couplage faible. Cela se produit dans la fonction d'onde d'un proton ou d'un noyau: la densité de gluons y augmente rapidement avec l'énergie jusqu'à saturer, une situation qui peut être traitée dans le cadre du condensat coloré vitreux. A haute température, la matière nucléaire subit une transition de déconfinement pour former un plasma de quarks et de gluons. Ses propriétés peuvent être étudiées dans les collisions de noyaux ultra-relativistes au LHC et au Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) à Brookhaven.

Chromodynamique quantique Physique hadronique

Physique statistique - Matière condensée

La construction d'une théorie globale des processus hors d'équilibre représente un problème ouvert crucial de la physique statistique. Il n'existe en effet 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. L'IPhT joue un rôle majeur dans les recherches liées à ces questions-clés de la physique actuelle. 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 du laboratoire. Ainsi des solutions exactes, obtenues

pour des systèmes idéalisés loin de

Systèmes désordonnés & systèmes hors d'équilibre

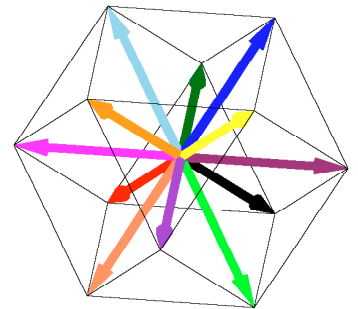
l'équilibre, ont permis de construire l'équivalent de potentiels thermodynamiques; la transition vitreuse a été caractérisée par une échelle intrinsèque de longueur; les transitions de phase dans des systèmes désordonnés (verres de spin, colloïdes, polymères) ainsi que leur dynamique sont explorées par 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 mathématique du tissu urbain), ouvrant ainsi des champs nouveaux et prometteurs.

Systèmes quantiques & matière condensée

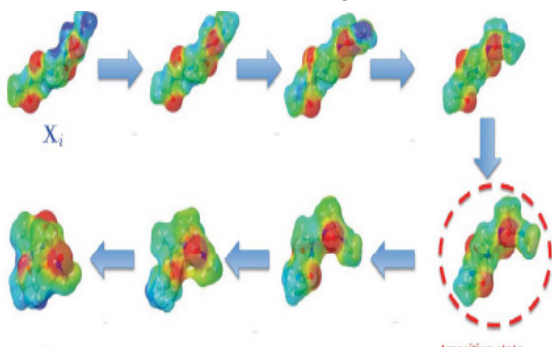
La physique de la matière condensée traite

de phénomènes quantiques spectaculaires qui se passent à l'échelle macroscopique, lorsque la température est suffisamment basse. La supraconductivité, ou conduction de courant électrique sans résistance, la superfluidité, ou écoulement sans frottement, l'effet Kondo, 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 fascinants. Suite à leur observation expérimentale, ces phénomènes quantiques 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. Enfin, des problèmes de magnétisme à basse dimension, ainsi que des systèmes quantiques hors d'équilibre sont aussi étudiés en détail à l'Institut.



Les polymères constituent une réalisation physique de processus stochastiques tels que les mouvements browniens ou les marches aléatoires auto-évitant. 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 nouvelles phases apparaissent.

Matière molle & systèmes biologiques

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 biopolymères portent des charges, et l'interaction coulombienne détermine leurs propriétés universelles d'association et de solvation dans la cellule.

Institut de Physique Théorique

D'hier à aujourd'hui ...



Les recherches en physique théorique au CEA remontent à ses origines. Dès 1947, au sein des Services de Physique et de Chimie du Fort de Châtillon, deux ans à peine après la création du CEA, un groupe de chercheurs sollicités par leurs collègues de tous horizons développent leur penchant pour l'abstraction et la modélisation. Ainsi Jacques Yvon n'hésite pas à considérer une pile plane infinie et sans réflecteur ! Déjà un après-midi par semaine est consacré à la Physique Théorique pure ; s'y joignent en 1950 Claude Bloch et Philippe Meyer. La physique nucléaire théorique et, à travers la neutronique, la physique statistique s'imposent comme des thèmes principaux.

En 1959, l'équipe de Physique Théorique ne s'est pas encore émancipée du Service de Physique Mathématique dont la mission principale au sein du Département d'Etude des piles est la conception théorique et numérique des réacteurs. Cette équipe publie des articles sur la physique nucléaire, le problème à N corps et la supraconductivité. Très vite, la physique des particules fait une entrée substantielle.

Le Service de Physique Théorique (SPhT), créé le 21 février 1963, a un effectif d'une vingtaine d'agents CEA. A la même époque apparaissent des doctorants et, en 1964, commence le recrutement de physiciens CNRS. Peu après le déménagement à l'Orme des Merisiers en 1968, la théorie quantique des champs s'impose comme un thème majeur de recherche dans le laboratoire. Suivront, dans les décennies suivantes, les théories conformes et les modèles de matrices, la physique des particules, l'astrophysique et la théorie des cordes, puis la physique de la matière condensée et des systèmes biologiques.

Le 1er janvier 2008, le Service de Physique Théorique accède à un nouveau statut et devient l'Institut de Physique Théorique (IPhT). Au total, plus de 500 personnes ont à ce jour partagé la vie de l'Institut, sans compter les nombreux visiteurs de tous pays : chercheurs éminents dont l'apport s'avère très stimulant et brillants postdocs étrangers, ils contribuent fortement à l'animation scientifique et à l'établissement de liens durables avec des laboratoires du monde entier. Forts du succès de l'Institut, nombre de ses chercheurs ont essaimé vers de prestigieuses universités et organismes de recherche en France et à l'étranger.

Presque 11 000 publications, environ 150 livres et plus de 250 thèses et habilitations sont sortis de nos murs. S'ajoutent à cette production l'organisation et l'animation scientifique de congrès et séminaires internationaux et de nombreuses écoles d'été (l'IPhT a notamment contribué fortement à l'essor de l'Ecole des Houches). Poursuivant une tradition qui remonte à A. Abragam, C. Bloch, A. Herpin, A. Messiah et M. Trocheris, les théoriciens de l'IPhT enseignent au sein du laboratoire et également dans les Grandes Ecoles et les Universités françaises et étrangères. Leurs cours sont également diffusés sur la chaîne YouTube IPhT-TV. Bon nombre de ces cours ont été publiés et sont maintenant devenus des classiques de la littérature scientifique (Messiah, Mehta, Itzykson-Zuber, des Cloizeaux-Jannink, Gaudin, Blaizot-Ripka, Negele-Orland, Zinn-Justin, Balian, Itzykson-Drouffe, Di Francesco-Mathieu-Sénéchal, etc).

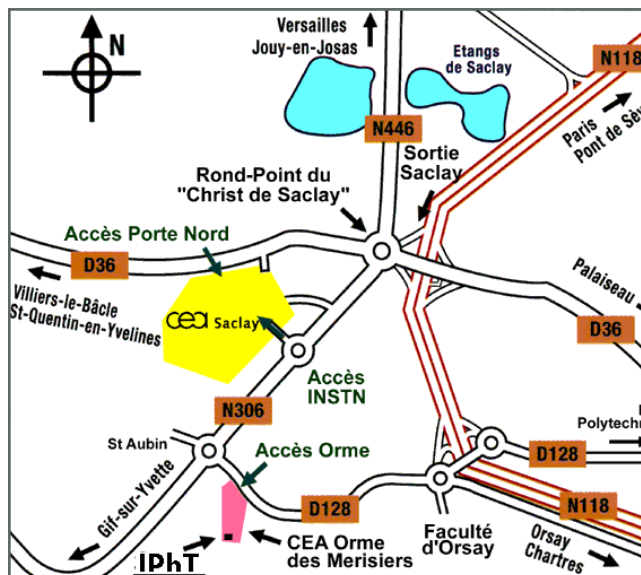
Prix et distinctions scientifiques émaillent l'histoire de l'IPhT. On en compte au total plus d'une centaine, dont une dizaine de récompenses étrangères, une dizaine de médailles du CNRS, de très nombreux prix de l'Académie des sciences et de la Société française de physique. Des membres de l'IPhT ont siégé ou siègent dans les Académies des Sciences en France et à l'étranger et un grand nombre d'entre eux sont lauréats de bourses de l'ERC (European Research Council).

Au CEA, l'IPhT est rattaché à la Direction de la Recherche Fondamentale (DRF) et au CNRS à l'Institut de Physique (INP). En devenant URA (Unité de Recherche Associée), puis en 2015 l'UMR 3681 (Unité Mixte de Recherche), l'Institut a officiellement scellé ses liens avec le CNRS, auquel appartient un tiers de son effectif. L'Institut accueille aussi des universitaires et des chercheurs d'autres laboratoires et sa participation à de nombreux réseaux de recherche européens et programmes d'échange internationaux facilite les collaborations avec des chercheurs étrangers. Dans un premier temps au service d'autres activités, la physique théorique est maintenant reconnue comme thème de recherche indépendant. Non programmé au sein du CEA naissant, ce qui est aujourd'hui l'Institut de Physique Théorique s'est développé à partir d'une nécessité ressentie d'abord par ses membres, puis par ses tutelles. Son succès est né de conjonctions imprévisibles d'idées nouvelles et de compétences pluridisciplinaires que l'Institut a su cultiver depuis plus de 50 ans.





En RER



En voiture

Institut de Physique Théorique
Centre CEA de Saclay
Orme des Merisiers
91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Tél : +33(0)1-69-08-73-85

www.ipht.fr



Commissariat à l'énergie atomique
et aux énergies alternatives
Direction de la Recherche Fondamentale
CEA/DRF/IPhT



Centre national de la recherche scientifique
Institut de Physique
CNRS/INP/UMR 3681