

## 1. Nature de la thématique :

La physique théorique est par essence multidisciplinaire : les physiciens théoriciens de la Vallée d'Orsay partagent une culture scientifique et des outils communs (théorie des champs, méthodes mathématiques et numériques, approches perturbatives et non-perturbatives). Cette multidisciplinarité facilite l'émergence et la diffusion de nouvelles idées (par exemple, l'application de la théorie des champs effective à la physique nucléaire). La physique théorique établit également des ponts entre différents domaines de la physique, mais aussi plus largement entre différentes disciplines scientifiques (incluant la biologie et la chimie).

Dans l'ensemble de nos laboratoires, le rôle de la physique théorique est essentiel, car l'interprétation des nombreux résultats expérimentaux nécessite une expertise théorique avancée. De fait, une fraction importante des activités théoriques de la Vallée est tournée vers la phénoménologie. La théorie fournit un cadre d'interprétation des mesures expérimentales, leur donne une cohérence, et contribue à indiquer des directions de recherches futures. De plus, presque tous les domaines de recherche expérimentale des laboratoires de la Vallée sont représentés dans nos équipes théoriques, ce qui est un atout considérable. Outre les problématiques en lien direct avec les expériences, nous poursuivons des travaux plus formels en lien avec des questions de physique fondamentale (théories de gravitation modifiée et quantification de la gravitation; physique statistique (transitions de phase et systèmes hors-équilibre; théorie à  $N$  corps). La théorie est également présente à l'interface physique-biologie-médecine, sous la forme de physique statistique pour la biologie et de modélisation en médecine. Les objets biologiques - systèmes hors d'équilibre- sont des problèmes intéressants pour la physique statistique qui permet par ailleurs de décrire le comportement de systèmes complexes à grand nombre d'acteurs en interaction, de la croissance de tumeurs au trafic intracellulaire. Là encore, les interactions avec les expérimentateurs locaux est fondamentale.

Plus généralement, les outils de la physique théorique nous permettent de nous attaquer à une grande variété de problèmes physiques dépassant le périmètre des sujets de cœurs durs de nos laboratoires. À ce titre, elle fournit une approche transverse à la physique de la matière condensée et de l'univers. Les aspects les plus abstraits de la physique théorique lui donnent des points de contact naturels avec nos collègues mathématiciens. Finalement, l'interface avec la biologie et la médecine offre une ouverture vers les sciences du vivant.

Les équipes de physique théorique de la Vallée sont reconnues internationalement pour leur expertise dans des domaines très divers. La qualité de la recherche en physique théorique de nos équipes est attestée par de nombreuses publications dans des journaux prestigieux, par un taux important de citations ainsi que de nombreuses invitations dans des conférences internationales. Les théoriciens de la Vallée sont aussi fortement intégrés dans la communauté européenne et internationale notamment par leur participation à des réseaux de recherche européens, et à des programmes bilatéraux avec d'autres équipes en Europe, en Asie, en Amérique latine et aux USA.

## 2. Contexte :

L'activité en physique théorique possède des spécificités par rapport aux projets expérimentaux : les équipes sont plus petites (voire réduites à une seule personne), sur des projets plus courts (ou du moins, segmentés en sous-projets courts donnant lieu à publication), avec une variabilité thématique importante (en termes de discipline et de niveau d'abstraction). Des moyens techniques lourds sont par ailleurs parfois nécessaires pour les aspects de simulations numériques, mais une physique

théorique dynamique s'appuie en premier lieu et de façon cruciale sur des moyens humains (doctorants, post-doctorants, visiteurs). L'ensemble de ces caractéristiques permet aux théoriciens de s'adapter rapidement à un nouveau contexte scientifique, du fait de l'apparition de concepts théoriques originaux ou de résultats expérimentaux nouveaux.

La légèreté de leurs outils de travail permet aux théoriciens de la Vallée d'être mobiles thématiquement et géographiquement, travaillant avec un large éventail de collaborateurs issues d'institutions internationales qui témoigne de l'attractivité de nos équipes. Il existe aussi naturellement de nombreux contacts au niveau national. Au-delà du périmètre des laboratoires concernés par la refondation, les équipes de théoriciens ont des interactions importantes avec d'autres laboratoires du périmètre Paris-Saclay. On peut citer en particulier le LPTMS, l'IAS, des équipes de l'IPhT, du CPhT, du SPhN, ainsi que des équipes de l'IRFU (SPhN, SPP) et du LLR.

Au niveau de la Vallée, des collaborations existent entre plusieurs équipes de théoriciens. On peut citer des collaborations entre les équipes du LPT et du LAL (physique de la saveur, théories au-delà du Modèle Standard), entre les équipes du LPT et de l'IPNO (en physique des particules, plus précisément en QCD perturbative, dans les théories effectives aussi bien dans le cadre du Modèle Standard qu'au-delà). D'autres, entre les équipes de physique statistique du LPT et d'IMNC (en particulier concernant les problèmes de physique du transport aux échelles intra- et supra-cellulaires) sont en train de s'établir. Il n'existe pas pour le moment de collaborations inter-laboratoires entre théoriciens pour les équipes de physique mathématique, cosmologie/gravitation et physique nucléaire.

Par ailleurs, il existe aussi une interaction très active entre les différents groupes théoriques et des équipes expérimentales parmi les laboratoires de la Vallée, en particulier en physique des particules, en astroparticules, en physique nucléaire et hadronique, et à l'interface physique statistique-biologie-médecine. Cela résulte naturellement de la large fraction de phénoménologues dans la communauté théoricienne de la Vallée et la proximité des thématiques de ces théoriciens et des expérimentateurs. Ces connexions ont été renforcées par les appels à projets LABEX soutenant des activités conjointes théorie/expérience. Il faut toutefois souligner que des études phénoménologiques compétitives au niveau mondial requièrent un investissement constant dans l'amélioration des techniques de calculs ainsi que dans les développements théoriques les plus récents. Notons également que le spectre théorique de la Vallée ne s'arrête pas là; d'autres thématiques ont une vocation moindre à l'interaction avec l'expérience (physique mathématique). Certaines thématiques telles que cosmologie et gravitation sont à mi-chemin entre ces deux positionnements : si les théoriciens de la Vallée concernés ont globalement une approche assez formelle de ces thématiques, ce positionnement peut à terme évoluer sous l'effet des données expérimentales (Planck, plus récemment Virgo).

### 3. Objectifs:

Les activités de recherche des équipes théoriques de la Vallée couvrent un large spectre de thématiques, souvent en lien avec les programmes expérimentaux présents et futurs :

- **Physique nucléaire** (structure et réactions nucléaires avec des approches fonctionnelles d'énergie et *ab initio*, systèmes à  $N$  corps fortement corrélés, dynamique hors d'équilibre, astrophysique nucléaire et étoiles à neutrons)

[Théorie: IPNO / Expérience : CSNSM, IPNO]

- **Chromodynamique quantique et interaction forte** (QCD sur réseau, physique hadronique, calculs de précision, physique des jets et des saveurs lourdes, QCD à haute énergie et haute densité, collisions d'ions lourds ultra-relativiste et étude du déconfinement)

[Théorie: IPNO, LPT / Expérience : IPNO, LAL]

- **Physique de la saveur** : matrice CKM, physique des neutrinos, désintégrations rares et signaux de nouvelle physique, construction d'une théorie effective de la saveur au delà du Modèle Standard

[Théorie: IPNO, LAL, LPT / Expérience : IPNO, LAL, CSNSM]

- **Physique électrofaible et au-delà du Modèle Standard** : physique du boson de Brout-Englert-Higgs, supersymétrie et grande unification, construction de modèles explicites au delà du Modèle Standard, détection directe de matière noire aux collisionneurs, physique des neutrinos et leptogenèse

[Théorie: IPNO, LAL, LPT / Expérience : CSNSM, IPNO, LAL]

- **Cosmologie et astroparticules** : Conséquences observationnelles de la matière noire, baryogenèse, inflation et énergie noire, Univers primordial et grandes structures, trous noirs et gravité analogue

[Théorie: LPT / expérience : CSNSM, IPNO, LAL]

- **Physique mathématique** : gravité quantique et approches tensorielles, géométrie non-commutative, groupes quantiques, intégrabilité, asymptoticité des séries perturbatives

[Théorie: IPNO, LPT]

- **Physique statistique** : étude des systèmes hors équilibre et des transitions de phase aussi bien pour des questions fondamentales que pour des applications diverses, notamment en biologie et en médecine

[Théorie: IMNC, LPT / expérience : IMNC]

Du fait de la mobilité et de la réactivité des théoriciens, il est difficile de faire des prévisions détaillées d'axes forts pour les années à venir. L'objectif de chacun est avant tout l'excellence. Toutefois, quelques pistes peuvent être ouvertes.

Une fraction importante de ces thèmes de recherche se rattache directement à des activités expérimentales présente dans la Vallée, par exemple au LHC (physique du Higgs et recherche de nouvelle physique, QCD perturbative et à haute énergie, collisions d'ions lourds, physique de la saveur), dans les expériences d'astroparticules (recherche directe et indirecte de matière noire, recherche d'ondes gravitationnelles) et de cosmologie (étude du fond diffus cosmologique et de la physique de l'univers primordial avec Planck), expériences de physique nucléaire à ALTO et au GANIL (notamment étude de noyaux exotiques) et de physique des neutrinos. Les activités à l'interface avec la biologie et la santé s'appuient sur des expériences de biologie ou des données cliniques.

L'avenir à court terme sera orienté par les résultats de ces différentes expériences qui stimuleront l'activité dans ces thématiques : la mise en place du LHC à haute luminosité et des mises à niveau de ces détecteurs (productions de nouvelles particules lourdes, mesures des couplages du boson de Higgs, déconfinement des quarks et des gluons), le démarrage de Belle-II (déviations dans le secteur du  $b$  et production de quarkonia lourds), Virgo-Ligo (astronomie des ondes gravitationnelles), la poursuite des programmes de GANIL et d'ALTO (noyaux exotiques), JLab-12 GeV (femtoscopie 3D des nucléons), les expériences sur les neutrinos, les recherches de la matière noire, etc. En physique statistique et modélisation pour la biologie, la proximité de biologistes à l'IMNC et à l'Institut Curie (hors projet refondation mais proche géographiquement) est également un atout et des projets communs sur le développement tumoral sont en cours de discussion. D'autre part, le développement d'un axe de radiobiologie expérimentale (rayonnements ionisants sur des populations de cellules) dans l'axe "Biologie-Santé" pourrait profiter d'une approche théorique. Il est toutefois important de rappeler que, même dans ces activités phénoménologiques, théorie et expérience se nourrissent l'une l'autre, et que les théoriciens ne seront pas seulement les interprètes des nouvelles données,

mais qu'ils constitueront aussi une force de proposition pour les futures expériences, citons par exemple l'émergence d'un programme sur cible fixe au LHC (spin du proton, effets nucléaires froids) au départ de nos laboratoires.

Pour les activités plus formelles, il est encore plus difficile de prévoir les axes les plus prometteurs, mais l'étude théorique de la gravité (modifications, quantification, systèmes analogues) sera certainement un axe fort. De même les activités plus orientées vers la résolution numérique (QCD sur réseau, simulations de physique statistique, calculs haute performance) doivent continuer à se développer, en bénéficiant des infrastructures locales (Virtual Data) et nationales (IDRISS, GENCI).

#### **4. Organisation:**

La structure de la physique théorique dans la Vallée est parcellaire, avec une grande variabilité de structure et de situations. En effet, les activités de physiques théoriques dans la Vallée se font actuellement

- dans 4 laboratoires, à savoir un laboratoire dédié (LPT), 1 groupe dans un laboratoire (IPN), 1 équipe dans un laboratoire (IMNC) et 1 personne seule (LAL)
- répartis dans 2 instituts du CNRS (INP et IN2P3) et dans 3 départements de l'université Paris Saclay (P2I, PhOM, SPU)
- avec des chercheurs appartenant à 2 sections du CoNRS (01 et 02), mais des enseignants-chercheurs d'une seule section du CNU (29)
- dont les projets s'inscrivent dans 2 LABEX (P2IO, PALM)

Une telle organisation très dispersée n'empêche pas les collaborations entre théoriciens de différents laboratoires. Elle a même, dans certains cas, permis de soutenir la physique théorique en multipliant les guichets. Il est toutefois à noter que beaucoup de théoriciens de la Vallée ne connaissaient pas l'ensemble des activités menées par leur collègues avant une matinée commune organisée en juin malgré une proximité géographique évidente. De surcroît, elle pose une évidente question de lisibilité et de visibilité pour l'extérieur, en particulier pour les étudiants, doctorants, post-doctorants, mais aussi pour les financements sur contrat. Il pourrait à ce titre être intéressant d'avoir une organisation<sup>1</sup> plus visible et plus structuré pour la physique théorique dans la Vallée, permettant par des actions communes et visibles de renforcer les liens entre les théoriciens ainsi qu'avec les expérimentateurs intéressés par la phénoménologie.

Cela ne doit toutefois pas se faire au prix d'une restriction de la liberté thématique des théoriciens, d'un affaiblissement des liens avec les différentes tutelles concernées, ou d'une perte de contact avec l'environnement expérimental immédiat de la Vallée : ces aspects sont essentiels pour conserver la richesse, la diversité et le dynamisme de la physique théorique de la Vallée, allant d'aspects très formels à la modélisation expérimentale, depuis des activités en lien direct avec les autres laboratoires de la Vallée jusqu'à d'autres sujets de recherche plus éloignés.

#### **5. Formation et valorisation:**

Les différentes équipes ont une implication importante dans la formation. En particulier, en ce qui concerne les filières les plus proches de la recherche, cela concerne les M2 NPAC, ICFP et PHE et à l'interface physique-biologie, le M2 SBCP. Ceci fournit un vivier très important d'étudiants en thèse. Il est donc essentiel de préserver, voire d'accentuer cette implication, en particulier dans le premier semestre de formation, au moment où les étudiants effectuent leur choix de sujet de thèse. La dispersion des théoriciens est une fois encore un atout (pour obtenir des financements sur plusieurs écoles doctorales EDPIF et PHENIICS, pour établir des co-tutelles entre laboratoires) et une fragilité

---

<sup>1</sup>: dans une UMR Théorie-Expérience, une UMR Théorie, une Fédération de Recherche, etc.

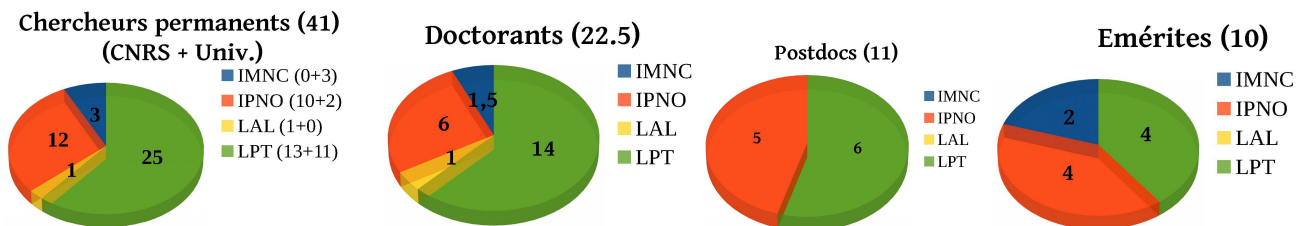
(pour attirer les étudiants les plus brillants, qui ont du mal à identifier les sujets abordés dans les différentes équipes de physiciens théoriciens).

La valorisation immédiate des recherches menées en physique théorique est difficilement envisageable, hormis sur des "niches" spécifiques : participation à l'architecture d'ordinateurs, mise au point et valorisation des logiciels de traitement d'image pour la modélisation en médecine.

En revanche la valorisation dans le cadre de la formation par la recherche en vue d'une insertion en dehors du monde académique offre de nombreuses pistes qu'il convient de creuser : simulation numérique et calcul intensif, data mining, industrie nucléaire, ...

## 6. Eléments statistiques

Les ressources humaines actuelles se répartissent comme suit :



D'ici deux ans, 4 chercheurs et enseignants chercheurs du LPT prendront leur retraite ainsi que 3 membres du groupe de physique théorique de l'IPNO. L'équipe de l'IMNC compte également un praticien hospitalier. Pour le LPT, la situation des ITA est comme suit : 7 permanents, dont une secrétaire très proche de la retraite, et une gestionnaire à deux ans de la retraite. Pour l'IPNO, l'IMNC et le LAL, le décompte est plus complexe car les groupes/équipes sont intégrées dans leur laboratoires respectifs. Jusqu'à cette année, le groupe de physique théorique de l'IPNO a bénéficié d'une assistante spécifique.

En terme de répartition thématiques, le LPT est organisé historiquement en 4 équipes : (a) physique des particules : 11 permanents (qui couvrent à la fois la physique du Modèle Standard et au-delà), (b) physique statistique : 6 permanents, (c) cosmologie, gravitation : 4 permanents, (d) physique mathématique : 4 permanents. A priori, les équipes ne souhaitent pas modifier cette organisation thématique dans le futur, car elle est cohérente sur le plan scientifique. On notera que ces équipes sont très souvent composées de plusieurs micro-équipes, jusqu'à un seul permanent.

Le groupe de physique théorique de l'IPNO, bien qu'également organisé historiquement en deux thématiques, physique nucléaire et physique hadronique, fonctionne essentiellement comme un groupe unique, avec toutefois deux séries de séminaires hebdomadaires. A l'IMNC, les théoriciens travaillent dans une équipe et, au LAL, la seule chercheuse permanente est considérée comme constituant un "groupe de physique".

Dans les 5 dernières années, le nombre de thèse soutenues se répartit comme suit:

- 30 au LPT
- 1 + 0.5 au LAL
- 1 à l'IMNC
- 4 (+ 2 x 0.5) à l'IPNO