




Activités de recherche

Mes activités de recherche concernent la phénoménologie de la physique des hautes énergies et se concentrent principalement autour de trois thématiques:

-  Les extensions supersymétriques du Modèle Standard.
-  La recherche de la matière noire (détection directe et indirecte).
-  La Construction d'extensions minimales du Modèle Standard.

Chacune de ces thématiques demande un travail et un type de raisonnement bien particulier que je vais détailler ici.

PLAN

- 1) Le Contexte
- 2) Etude phénoménologique de modèles de type «supersymétrie»
- 3) Constructions et analyses d'extensions du Modèle Standard
- 4) Recherche de la matière noire
- 5) Scénarios non-thermiques
- 6) 5 articles représentatifs

1.) Le contexte

La physique des particules élémentaires connaît une mutation importante depuis quelques années. En effet, des découvertes importantes ont eu lieu (boson de Higgs, masse des neutrinos..) mais en même temps, certaines questions fondamentales subsistent toujours (unification des constantes de couplages, description microscopique de la gravitation, origine et nature de la matière noire, existence de particules supersymétriques, inflation..). Dans tous les cas, la certitude est que le Modèle Standard de la physique des particules, décrit par le groupe de Jauge $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ n'est qu'un modèle effectif d'une théorie plus fondamentale. En effet, la gravité existe, les neutrinos sont massifs et la matière noire (qu'elle soit chaude [warm], froide [cold], aux interactions faibles [WIMP], ou super-faibles [FIMP], thermique ou non-thermique, axionique ou massive [WIMPZILLA]) est présente dans l'univers (même dans les modèles de types MOND sa présence reste nécessaire).

Il est donc évident que la physique des hautes énergie doit relever ces défis, si possible de façon complémentaire. En effet, la supersymétrie (SUSY) par exemple est intimement liée à l'unification des couplages, alors que sa version locale (la supergravité) permet la description d'une théorie cohérente de la gravité, qui s'étend même au concept de cordes. De la même façon, les différents types de mécanismes de see-saw décrivant les modèles de masse des neutrino sont naturellement motivés par les modèles d'unifications de type $SO(10)$ ou E_6 , et permettent même parfois une solution au problème de la matière noire au travers d'un neutrino stérile. Il en va de même pour les modèles d'inflation dont le mécanisme de reheating a des conséquences très fortes sur la densité de matière noire locale. Je décris par la suite chacune de mes activités de recherche séparément, gardant à l'esprit la synergie entre chacune d'entre elles.

2.) Etudes phénoménologiques de modèles de type supersymétrie

Je précise «de type» supersymétrique puisque la supersymétrie (et son étude) est multiple. En effet, elle peut être vue de manière effective, en introduisant «à la main» les termes de masse et en faisant une analyse phénoménologique à l'aveugle de la théorie. Cette approche a l'avantage certain d'éviter de rentrer dans le détail de la construction du modèle et du problème complexe de la brisure de la supersymétrie. Cependant l'inconvénient est une simplification nécessaire au vu du nombre de paramètres libres (126) du modèle. J'ai travaillé durant ma thèse avec Abdelhak Djouadi sur la recherche de

particules supersymétriques dans ce contexte. Dans [1] pour la recherche du stop et [2] la recherche de chargino/neutralino par exemple.

L'étude peut aussi se faire dans le cadre de constructions plus motivées comme KKLT qui sont des modèles inspirés de théorie des cordes où les champs dits de modules (pouvant s'interpréter comme des dimensions supplémentaires) sont stabilisés en respectant une constante cosmologique quasi-nulle. Nous avons mené une telle étude lors de mon séjour à DESY avec Adam Falkowski et Oleg Lebedev [3]. Nous avons par la suite avec Emilian Dudas construit des modèles où ces mêmes champs de modules étaient stabilisés de façon dynamiques [4] au travers de la brisure d'un groupe de jauge $U(1)$ supplémentaire.

La découverte du boson de Higgs le 4 juillet 2012 fut à la fois un événement historique et également une source d'interrogation. Pourquoi 126 GeV? Cette particule BEH (Brout-Englert-Higgs) est-elle standard? possède-t-elle des couplages à la matière noire? Mais surtout, dans le cadre de modèles supersymétriques, 126 GeV est relativement lourd, et pousse le spectre de masse SUSY au delà de 3-5 TeV. Avec Andrei Linde, Emilian Dudas et Keith Olive, nous avons montré dans une série d'articles ([5] par exemple) que de tels contraintes dans des modèles de type supergravité sont malheureusement quasiment indétectables au LHC ou dans les expériences de détections directes de matière noire.

En conclusion, la supersymétrie, et plus encore son extension locale la supergravité sont parmi les plus belles constructions modernes en physique des hautes énergies. Malheureusement, il semblerait que son échelle de masse soit au delà des possibilités de détections actuelles. Mais ne perdons pas espoir, le nouveau run du LHC à 14 TeV peut nous réserver d'aussi belles surprises (sinon plus belles) que la découverte du boson de Higgs.

3.) Construction et analyse d'extensions du Modèle Standard

La supersymétrie (SUSY), tout aussi séduisante soit-elle, n'est pas le seul moyen d'étendre le Modèle Standard de la physique des particules. SUSY étend la notion d'espace temps (tout comme les dimensions supplémentaires et ses modes de Kaluza-Klein) ce qui explique son lien étroit avec la gravité qui est elle-même une géométrisation de l'espace-temps. Il existe deux autres façons d'intégrer de la nouvelle physique dans le Modèle Standard: soit en étendant la structure de jauge (groupe de grande unification ou extra $U(1)/Z'$ par exemple) soit en augmentant son contenu en matière (neutrino droit, nouvelle génération de fermions, extra-scalaire neutre sous $SU(3) \times SU(2) \times U(1) \dots$). Il est

possible de résoudre le problème de la matière noire également de cette manière. C'est ce que je me suis efforcé de faire durant ces 4 dernières années.

Je me suis tout d'abord concentré sur des modèles avec une extension du groupe de Jauge du Modèle Standard par un extra $U(1)$. Il était assez naturel de me diriger vers ce thème de recherche puisque la stabilisation dynamique des champs de modules dans les modèles de type cordes que je construisais à l'époque avec Emilian Dudas nécessitait l'introduction d'un champ de Jauge supplémentaire, au travers d'un nouveau boson Z' . Si l'on suppose (ce qui est le cas dans les «intersecting branes») qu'il existe des particules chargées sous ce nouveau groupe de jauge mais neutres sous la Modèle Standard, la plus légère d'entre elle devient un candidat matière noire tout à fait valide.

J'ai donc dans un premier temps [6] regardé si un Z' quasi-invisible (parce que se désintégrant principalement en matière noire) existait, il pourrait parfaitement être le médiateur entre l'univers sombre et l'univers visible et expliquer les événements de détection directe observés dans les expériences telles DAMA, CoGENT, CRESST ou CDMS. Un couplage de l'ordre de 10^{-3} pour une masse $M_{Z'}$ de l'ordre de 20 GeV respectait parfaitement les données expérimentales, WMAP incluses.

Par la suite, avec Emilian Dudas dans un premier temps, puis tout seul dans un second temps, je me suis intéressé aux couplages possibles de ce Z' avec les bosons de jauge du Modèle Standard. En effet, au travers de boucles (introduites pour soigner les anomalies) des couplages de type $Z'Z\gamma$, $Z'ZZ$ ou $Z'\gamma\gamma$ sont générés mécaniquement [7,8]. Une des conséquences immédiates est l'existence de processus du type $\psi\psi \rightarrow Z' \rightarrow Z\gamma$, ψ étant le candidat matière noire, qui fournissent un signal très clair dans les détecteurs satellites ou télescopes : une raie monochromatique de photon. L'originalité de ces travaux datant de 2009, c'est qu'une raie aurait-elle été détectée par le satellite FERMI (signal toujours en débat actuellement) ce qui nous a permis de généraliser notre étude en l'appliquant sur un signal physique concret dans [9]. Nous avons récemment regardé avec Lucien Heurtier, thésard au CphT les possibilités de tester de tels couplages dans le cas non-abélien générant des couplages de type gluon-gluon- Z' qui peuvent être testés au LHC comme nous l'avons montré dans [10]. Je travaille en ce moment avec Michel Tütgat de l'ULB à Bruxelles sur une étude détaillée d'un Z' invisible et en particulier des possibilités de détection au LHC (à partir d'un signal type monojet) comparées aux projections de sensibilité des futures expériences de détection directes. Il me semble que la recherche d'un Z' invisible est une des prochaines étapes de recherche de physique au delà du Modèle Standard au LHC.

Une seconde possibilité est l'introduction d'une particule scalaire (neutre suivant $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$) couplant au boson de Higgs. Cette extension est la plus minimale (un couplage au W^+ ou photon est exclu parce que ψ est électromagnétiquement neutre et un couplage au Z est exclu depuis des années par les expériences de détections directes). J'ai regardé seul dans un premier temps [11] puis avec A. Djouadi, O. Lebedev et J. Quevillon dans un deuxième temps [12], et enfin avec A. Falkowski dans un troisième temps

[13] l'influence d'un candidat matière noire sur la physique du Higgs au LHC et en particulier sur sa largeur invisible. Notre conclusion est que si une matière noire de masse raisonnable (< 1 TeV) couple uniquement au boson de Higgs, elle aurait dû être observée dans les expériences de détection directe qu'elle soit fermionique, bosonique ou vectorielle. Les dernières données de l'expérience LUX confirment ce résultat important : la matière noire ne couple pas (uniquement) au boson de Higgs. Sa physique n'est donc pas minimale.

4.) Recherche de la matière noire

Les modes de recherche de la matière noire sont complexes et de différents types. Des expériences sont consacrées à la détection directe via la mesure de l'énergie de recul d'un noyau cible, alors que certains télescopes terrestres mesurent les douches Cherenkov produites par l'entrée dans l'atmosphère de photons énergétiques et que des satellites cartographient le ciel galactique. J'ai travaillé au cours de ces dernières années dans chacun de ces modes de détections

J'ai d'abord travaillé avec Carlos Munoz de l'Universidad Autonoma de Madrid sur les possibilités de détection de la matière noire supersymétrique (neutralino) dans les expériences satellitaires de type FERMI dans [14] pour les rayonnements gamma et [15] pour la détection indirecte. Les conclusions étaient qu'une bonne partie (près de 80%) de l'espace SUSY est testable. Ceci dépend bien évidemment de la répartition de la matière noire au sein de notre galaxie. Cette distribution nous est donnée à partir de simulations à N-corps. Nous nous sommes donc intéressés à des profils de type «compression adiabatique» où l'on tient compte des effets baryoniques sur la répartition spatiale de la matière noire. Nos résultats concernant les modèles SUSY sont présentés dans [16] ou des extensions minimales dans [17] alors que tout dernièrement nous avons fait une étude complètement modèle-indépendant avec l'équipe de FERMI dans [18]. Nous avons notamment montré dans cette première étude du centre galactique que cette région peut être aussi intéressante voire plus que les galaxies naines grâce aux processus de compression adiabatique qui augmentent le signal.

Je me suis aussi récemment intéressé à des radio-mesures qui permettent de cartographier le ciel à des ondes de l'ordre du GHz, permettant de restreindre les effets de l'annihilation de la matière noire via le rayonnement synchrotron. En effet, les produits de l'annihilation électrons, muons ou même quarks, vont rayonner des photons entre 0.5 et 10 GHz (dépendant de la masse de la matière noire). Nous avons également appliqué notre étude à des extensions minimales du Modèle Standard (extension en contenu en matière ou groupe de Jauge) dans [19] et avons montré que ce mode de détection est tout à fait compétitif avec la détection d'antimatière ou de photons de hautes énergies mesurées par

FERMI. Depuis Novembre 2013 nous sommes avec Alexandre Pukhov et Geneviève Bélanger d'Annecy, en train de coder ces interactions dans le software public «MicroMEGAs». Ce travail devrait faire l'objet d'une publication début 2014.

5.) Scénarios non-thermiques

Depuis cette années, je me suis concentré sur l'analyse de scénarios non-thermique, où la matière noire n'est pas (ou très peu) en équilibre thermique avec le Modèle Standard. Cela peut être le cas d'axions ou de FIMP («Freeze In Massive Particle»). Ces scénarios sont très intéressants car ils ouvrent la voie à des possibilités très riches et pourraient expliquer l'absence de signal dans les expériences de détection de matière noire actuelle. J'ai publié deux articles sur le sujet cette année, dans les modèle de type unification ($SO(10, E6..)$) dans [19] et dans des modèles avec Z' supplémentaire dans [20]. C'est une voie dans laquelle je pense me diriger dans les prochaines années. Je travaille en ce moment en effet sur des effet de thermalisation de l'Univers à l'époque du préheating et ses conséquences possibles sur la matière noire avec Keith Olive de Minneapolis.

Pour plus d'information sur mes activités de recherches, conférences, cours et vulgarisation, vous pouvez visiter:

http://www.ymambrini.com/My_World/Physics.html

J'organise également tous les lundi depuis 2009 le «Magic Monday Journal Club» au LPT d'Orsay. Vous pouvez y avoir accès à :

http://www.ymambrini.com/My_World/MMJC.html

6.) Cinq articles représentatifs

J'inclus dans cette section cinq articles que je considère représentatif de mes différents type d'études

Pour la phénoménologie des modèles supersymétriques en accélérateurs

«Decays of the lightest top squark», C. Boehm, A. Djouadi, Y. Mambrini, Published in Phys.Rev. D61 (2000) 095006

Pour l'étude des modèles de type supergravité/cordes

SUSY phenomenology of KKLT flux compactifications ,Adam Falkowski, Oleg Lebedev, Yann Mambrini, Published in JHEP 0511 (2005) 034

Pour l'étude de signaux de détection indirecte (raie monochromatique gamma)

«Extra U(1) as natural source of a monochromatic gamma ray line», Emilian Dudas, Yann Mambrini, Stefan Pokorski, Alberto Romagnoni, Published in JHEP 1210 (2012) 123

Pour la détection directe de la matière noire

«The Kinetic dark-mixing in the light of CoGENT and XENON100», Yann Mambrini, Published in JCAP 1009 (2010) 022

Pour la complémentarité matière noire/recherche au LHC

«Implications of LHC searches for Higgs--portal dark matter», Abdelhak Djouadi, Oleg Lebedev, Yann Mambrini, Jeremie Quevillon, Published in Phys.Lett. B709 (2012) 65-69

- [1] «Decays of the lightest top squark», C. Boehm, A. Djouadi, Y. Mambrini, Published in *Phys.Rev. D*61 (2000) 095006;
- [2] «Chargino and neutralino decays revisited», A. Djouadi, Y. Mambrini, M. Muhlleitner, Published in *Eur.Phys.J. C*20 (2001) 563-584;
- [3] SUSY phenomenology of KKLT flux compactifications, Adam Falkowski, Oleg Lebedev, Yann Mambrini, Published in *JHEP* 0511 (2005) 034;
- [4] «Moduli stabilization with positive vacuum energy», E. Dudas, Y. Mambrini, Published in *JHEP* 0610 (2006) 044;
- [5] «Strong moduli stabilization and phenomenology», Emilian Dudas, Andrei Linde, Yann Mambrini, Azar Mustafayev, Keith A. Olive, Published in *Eur.Phys.J. C*73 (2013) 2268
- [6] «The Kinetic dark-mixing in the light of CoGENT and XENON100», Yann Mambrini, Published in *JCAP* 1009 (2010) 022;
- [7] «(In)visible Z-prime and dark matter», E. Dudas, Y. Mambrini, S. Pokorski, A. Romagnoni, Published in *JHEP* 0908 (2009) 014;
- [8] «A Clear Dark Matter gamma ray line generated by the Green-Schwarz mechanism», Y. Mambrini, Published in *JCAP* 0912 (2009) 005;
- [9] «Extra U(1) as natural source of a monochromatic gamma ray line», Emilian Dudas, Yann Mambrini, Stefan Pokorski, Alberto Romagnoni, Published in *JHEP* 1210 (2012) 123;
- [10] «Extra U(1), effective operators, anomalies and dark matter», Emilian Dudas, Lucien Heurtier, Yann Mambrini, Bryan Zaldivar, e-Print: arXiv:1307.0005 [hep-ph];
- [11] «Higgs searches and singlet scalar dark matter: Combined constraints from XENON 100 and the LHC», Y. Mambrini Published in *Phys.Rev. D*84 (2011) 115017;
- [12] «Implications of LHC searches for Higgs--portal dark matter», Abdelhak Djouadi, Oleg Lebedev, Yann Mambrini, Jeremie Quevillon, Published in *Phys.Lett. B*709 (2012) 65-69;
- [13] «Direct Detection of Higgs-Portal Dark Matter at the LHC», Abdelhak Djouadi, Adam Falkowski, Yann Mambrini, Jeremie Quevillon, Published in *Eur.Phys.J. C*73 (2013) 2455;
- [14] «A Comparison between direct and indirect dark matter search», Y. Mambrini, C. Munoz, Published in *JCAP* 0410 (2004) 003;
- [15] «GLAST versus PAMELA: A Comparison between the detection of gamma rays and positrons from neutralino annihilation», Y. Mambrini, C. Munoz, E. Nezri, Published in *JCAP* 0612 (2006) 003;
- [16] «Adiabatic compression and indirect detection of supersymmetric dark matter» Y. Mambrini, C. Munoz, E. Nezri, F. Prada, Published in *JCAP* 0601 (2006) 010;
- [17] «Antimatter signals of singlet scalar dark matter», A. Goudelis, Y. Mambrini, C. Yaguna, Published in *JCAP* 0912 (2009) 008;
- [18] «Constraints on WIMP Annihilation for Contracted Dark Matter in the Inner Galaxy with the Fermi-LAT», German A. Gomez-Vargas, Miguel A. Sanchez-Conde, Ji-Haeng Huh,

Miguel Peiro, Francisco Prada, Aldo Morselli, Anatoly Klypin, David G. Cerdeno, Yann Mambrini, Carlos Munoz, e-Print: arXiv:1308.3515;

[19] «Gauge Coupling Unification and Non-Equilibrium Thermal Dark Matter», Yann Mambrini, Keith A. Olive, Jeremie Quevillon, Bryan Zaldivar, Published in Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 241306;

[20] «Thermal and non-thermal production of dark matter via Z'-portal(s)», Xiaoyong Chu, Yann Mambrini, Jérémie Quevillon, Bryan Zaldivar, e-Print: arXiv:1306.4677.