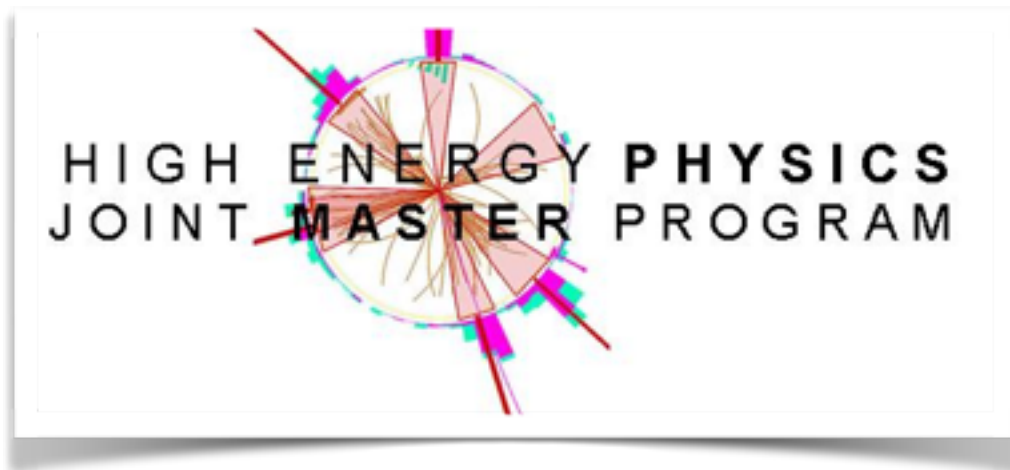
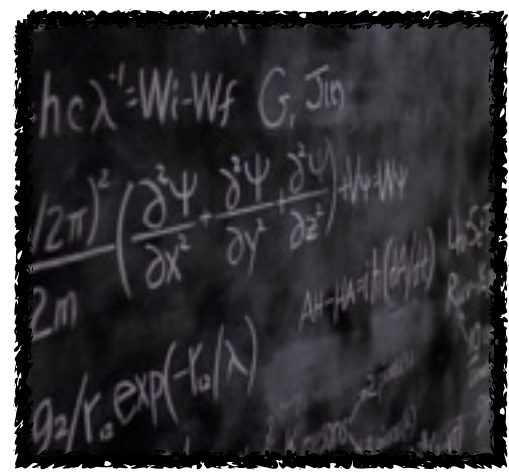
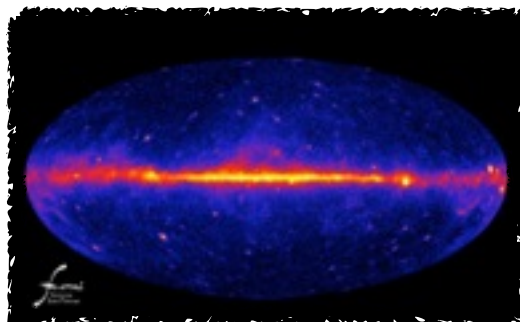
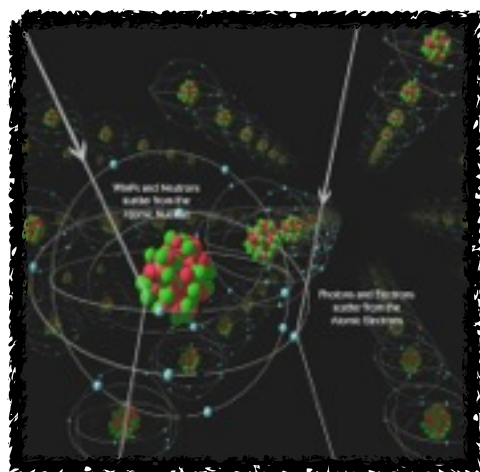


# Projet de module du master « Physique des hautes énergies » de l'Ecole Polytechnique



Phénoménologie de la matière noire et de la physique  
au delà du modèle standard



proposé par Yann Mambrini et Adam Falkowski  
[http://www.ymambrini.com/My\\_World/Physics.html](http://www.ymambrini.com/My_World/Physics.html)



# But pédagogique du module

Ce cours que nous proposons pour le master M1 « Physique des hautes énergies » de l'école polytechnique couvre les thématiques liées à l'aspect phénoménologique de la physique des particules au delà du modèle Standard, et comble donc l'espace entre les traitements théoriques et les aspects purement phénoménologiques du Modèle Standard déjà traités dans d'autres modules du Master, se reposant sur les acquis de chacune de ces disciplines.

Les cours seront présentés de façon cohérente en suivant une logique « thermique » ou historique, partant des mécanismes de reheating, histoire thermique de la matière noire, caractéristiques de la nucléosynthèse. Nous nous concentrerons ensuite sur la présence locale et globale de la matière noire, ses modes de détections directes et indirectes, et sa présence en physique des collisionneurs. Nous nous pencherons alors sur la recherche de la nouvelle physique au LHC et ILC, et ses conséquences sur la physique du Higgs et les processus rares avant de mettre en avant la complémentarité de chacun de ces modes de détection dans la recherche de nouvelle physique.

L'axe principal sera fondamentalement phénoménologique. Nous insisterons sur la complémentarité entre la construction de modèles de hautes énergies type  $SO(10)$ , SUSY ou extra  $U(1)$  et le calcul d'observables physiques telles que le taux de détection directe, l'influence sur des processus rares, la largeur du Higgs ou les recherches en accélérateurs (énergie manquante, monojet..)

Les deux intervenants, Adam Falkowski et Yann Mambrini sont des spécialistes internationaux du domaine ayant chacun plus de 50 publications dans les revues à comité de lecture et 2000 citations dans les domaines de la matière noire (dont beaucoup en seul auteur) et de la physique des accélérateurs au delà du Modèle Standard. Ils ont chacun travaillé dans un spectre de modèle très large, allant de la supersymétrie, les théories inspirées de cordes, modèles d'unification de type  $SO(10)$ , asymmetric dark matter, extra  $U(1)$ , couplages non-standard au Higgs, anomalies et détection indirectes de type rayonnements synchrotron, ou antimatière. Chacun de leurs travaux insiste sur le lien entre la construction d'un modèle fondamental et les calculs phénoménologiques menant à des études mêlant la complémentarité entre chacun des modes de détection.

Le module se décompose en 8 cours de 3h30 (1h30 de cours et 2h de TD) structurés de la manière suivante :

1) Histoire thermique de la matière noire

Reheating, equation de Boltzmann, découplage thermique, limite Lee-Weinberg, warm/cold dark matter, influence sur la BBN.

2) Modèles de la matière noire et leurs signatures

Supersymétrie (neutralino gravitino), dark portal (extra  $U(1)$ ), Higgs portal, axion/axino, neutrino stérile, approche effective.

3) Modes de détection de la matière noire

Détection directe, détection indirecte, pertes d'énergies, propagation dans la galaxie, détection de l'antimatière, simulations à N-corps, structure du noyau, radiation synchrotron.

4) Recherche de nouvelle physique au LHC

Signature énergie manquante, monojet, dilepton, dijet, différence modèle effectif/modèle microscopique, complémentarité détection matière noire, perspective ILC.

5) Physique non-Standard du Higgs

Alternatives au scénario du Higgs standard, désintégration invisible, déviation aux couplages fermioniques/vectoriels, stabilisation du potentiel, Coleman-Weinberg, couplage quartic.

6) Physique au delà du modèle standard et processus rares

$g-2$ , contraintes électrofaibles,  $b \rightarrow s\gamma$ , largeur du Z

7) Status expérimental

Etude des projets en cours et futurs projets, complémentarité. XENON, LUX, ICECUBE, ATC, TA, HESS, FERMI.

8) Histoire des révolutions scientifiques

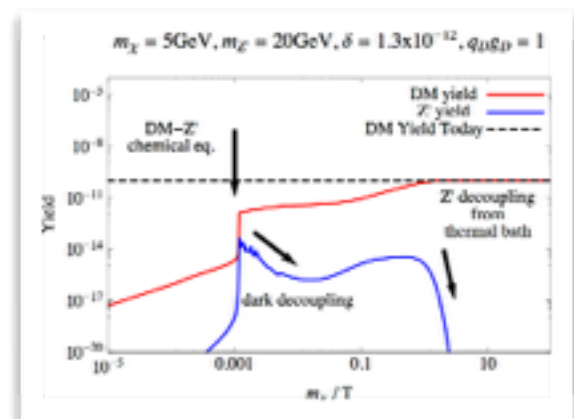
voir: [http://www.ymambrini.com/My\\_World/Books.html](http://www.ymambrini.com/My_World/Books.html)

# 1) Histoire thermique de la matière noire

Le but de ce cours est de comprendre les différents mécanismes qui aboutissent au calcul de la densité relicue de matière noire. Il est présenté de manière pédagogique, en suivant l'évolution thermique de l'Univers. L'étudiant devra pouvoir combiner les principes de la thermodynamique primordiale et de l'expansion afin de résoudre in fine l'équation de Boltzmann

## Apprentissage physique

- Evolution thermique de l'Univers
- Principe de découplage
- Equilibre chimique/thermique/cinématique
- BBN



Exemple d'évolution thermique  
[Mambrini et al. 1306.4677]

## Apprentissage technique

- Calcul des dépendances en températures des densités d'énergie, constante de Hubble, sections efficaces
- Moyenne thermique des observables physiques
- Equation de Boltzmann dans le cadre cold et warm dark matter

## TD (2h)

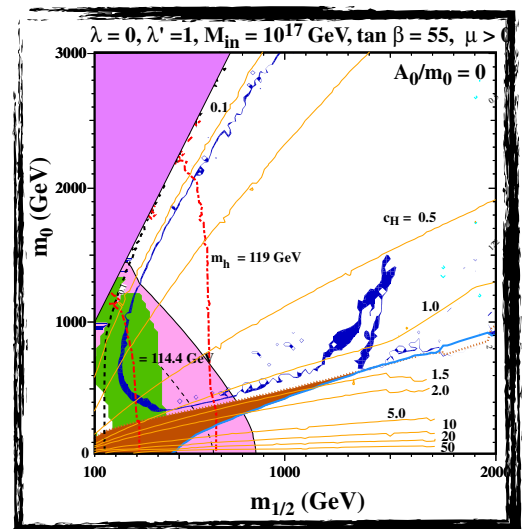
Résolution analytique et numérique de l'équation de Boltzmann dans le cadre d'un modèle de matière noire minimal (opérateur effectif électrofaible) et application au calcul de la limite Lee-Weinberg. Extension dans le cadre de modèles étendus. Le but du TD est de former l'étudiant à des outils techniques propres au milieu confiné dans un plasma et de comprendre les subtilités du découplage thermique et ses conséquences sur la densité relicue suivant la nature de la matière noire.

## 2) Modèles de matière noire et leurs signatures

Cette partie du module a pour objectif de familiariser l'étudiant avec l'étendu des modèles de matière noire développés ces dernières années. Des extensions les plus « complexes » (de type supergravité) aux extensions les plus minimales (Higgs-portal ou extra Z') le cours se basera sur la construction de Lagrangiens respectant les conditions de symétries et l'application au calcul de processus concret: section efficace d'annihilation.

### Apprentissage physique

- Construction de Lagrangien d'extensions du Modèle Standard
- Reconnaître les termes importants pour les analyses phénoménologiques
- Comprendre les différences fondamentales entre chacune des extensions
- Motivations plurielles de chacune d'entre elles



Exemple de modèle type SUGRA  
Dudas, Mambrini et al. 1209.0499

### Apprentissage technique

- Construire les invariants de Lorentz et un Lagrangien de Jauge
- Brisures de symétries multiples
- Calculer une section efficace à partir d'un Lagrangien défini
- L'appliquer à la résolution de l'équation de Boltzmann étudiée lors du premier cours.

### TD (2h)

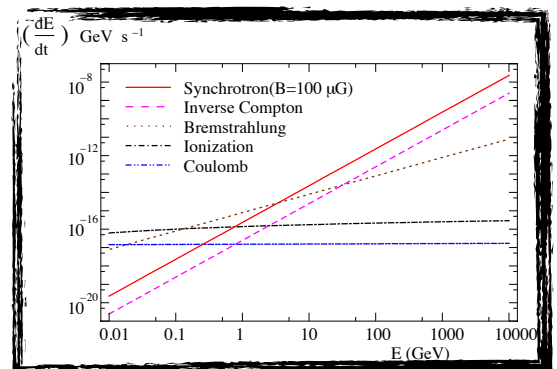
Calcul complet de la densité de matière noire dans le cadre d'un modèle explicite (SM étendu à un groupe de Jauge abélien), des conditions pour construire celui-ci à la résolution de l'équation de Boltzmann et au calcul de la densité actuelle.

### 3) Modes de détection de la matière noire

Le but de ce troisième cours est de donner à l'étudiant les moyens de comprendre les techniques de détection actuelles et les manières de les aborder du point de vue du calcul des observables physiques qui leur sont liées. Il nous semble que deux cours pourraient être nécessaire pour traiter ce sujet tant il fait appel à de nombreuses notions complémentaires.

#### Apprentissage physique

- Interaction matière-noyau
- Interaction matière-milieu galactique
- Interaction matière-fond diffus
- Perte d'énergie
- Collisions élastiques/inélastiques



*Exemple de pertes d'énergie lors de propagation dans le milieu interstellaire  
Mambriani et al. 1206.2352*

#### Apprentissage technique

- Apprendre les phénomènes de propagation d'une particule dans un milieu donné dans les expériences de détection indirecte
- Comprendre la structure du noyau lors des interactions de détection directe
- Comprendre la distribution de vitesse du halo local
- Calcul d'un flux de photons, intégrale sur la ligne de visée tenant compte la distribution galactique (NFW/Einasto..) de matière noire
- Comprendre les phénomènes de perte d'énergies (synchrotron, bremsstrahlung, inverse Compton, Coulomb)

#### TD (2h)

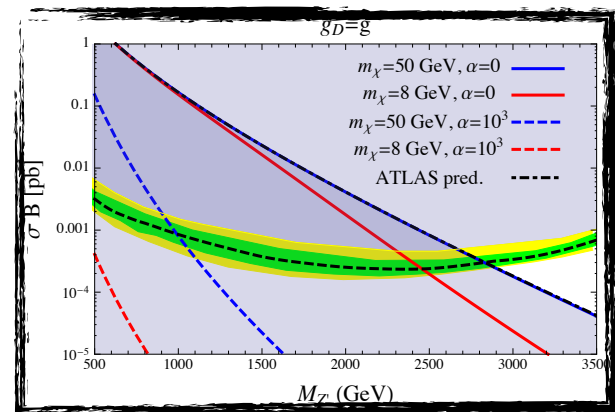
Calcul concret d'un flux de photon sur la terre issus de deux processus : annihilation directe et rayonnement synchrotron.

## 4) Recherche de nouvelle physique au LHC

Dans ce cours, l'étudiant se familiarisera avec les méthodes de détection de nouvelle physique au LHC, tout en projetant les études sur un ILC. Partant des données actuelles (run à 8 TeV) on montrera comment extrapoler les calculs pour le futur run du LHC (14 TeV, 100 fb<sup>-1</sup>)

### Apprentissage physique

- Enjeu d'un accélérateur (rappel historique)
- Signatures caractéristiques: supersymétrie, Z' ou matière noire
- Connaissance des limites actuelles
- Complémentarité avec les expériences de détection directe
- Prospective



Exemple de recherche de Z' au LHC  
Mambrini et al. 1401.0221

### Apprentissage technique

- Calcul de sections efficaces de production
- Analyse d'un background
- Exemple concret: limite sur la masse du Z' via dilepton
- Influence de l'énergie manquante: monojet et dijet
- Différence model effectif/model microscopique (influence du pole)

### TD (2h)

L'étudiant devra retrouver à partir d'un signal simulé de détection de nouvelle physique, les caractéristiques de la (ou des) particules découvertes. 2 cas seront étudiés: découverte d'un Z' au LHC à 14 TeV dans le canal dilepton et découverte d'un scalaire chargé sous SU(3) (supersymétrie?) dans un canal di-jet.



## 5) Physique non-standard du Higgs

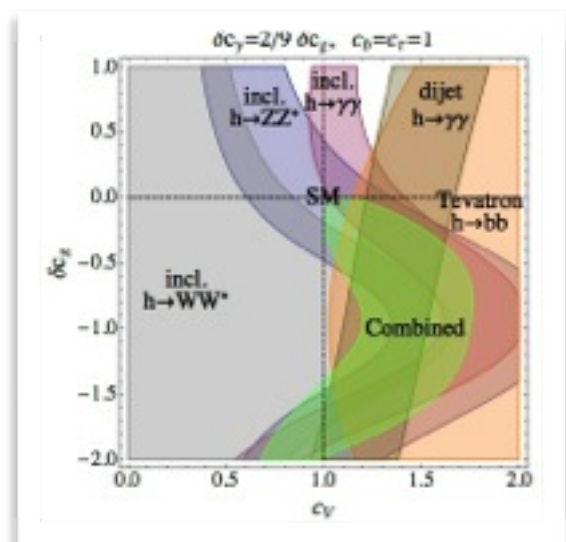
Dans cette partie du module, où l'étudiant sera censé déjà connaître les bases de la physique du Higgs et du mécanisme de brisure de symétrie, on étendra l'étude à un secteur de Higgs plus complexe (Higgs doublet, Higgs-portal) et se penchant sur la possibilité de déviation à la mesure des couplages du Higgs aux fermions ou bosons de Jauge, et la stabilité du potentiel de Higgs (limite perturbative).

### Apprentissage physique

- Extension du domaine de brisure électrofaible
- Stabilité du potentiel de Higgs
- Signatures typiques d'extensions populaires
- Conséquences phénoménologiques

### Apprentissage technique

- Construction d'un Lagrangien étendu du secteur scalaire
- Equation du groupe de renormalisation et potentiel scalaire
- Coleman-Weinberg
- Calcul d'observables (largeur invisibles, rapport d'embranchements non-standard)
- Calcul du taux de production au LHC



Exemple d'analyse du couplage du Higgs, Falkowski et al. 1202.3144

### TD (2h)

Dans ce TD l'étudiant sera confronté à une extension du secteur scalaire (« two Higgs-doublet »). Après avoir trouvé les paramètres fondamentaux pour une étude phénoménologique (tel  $\tan\beta$  par exemple) il devra proposer et reconstruire pas à pas les signatures typiques possibles observables aux futurs collisionneurs.

# 6) Physique au delà du Modèle Standard

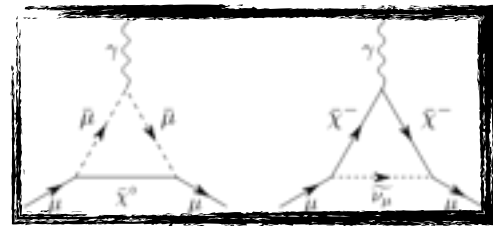
et

## processus rares

Dans ce cours, nous fournirons à l'étudiant tous les outils nécessaires pour comprendre et analyser les données fournies par les collaborations travaillant sur les désintégrations rares ou les mesures de moment anomal. La partie technique est un peu plus importante dans ce cours que dans les précédents.

### Apprentissage physique

- Diagrammes de Feynman
- Mesures expérimentales actuelles (déviations standard à  $g-2$ )
- Conséquences en supersymétrie ou physique du  $Z'$



*Diagramme contribuant au moment anomal du muon*

### Apprentissage technique

- Calcul de boucles
- Approximations et découplages
- Calcul de temps de vie et de moments

### TD (2h)

Ce TD sera consacré à l'étude du cas concret du calcul du moment anomal du muon  $g-2$ , et des conséquences sur des extensions supersymétriques et minimale si cette déviation est toujours confirmée.

## 7) Statut expérimental

Ce cours est plus « reposant » techniquement parlant auprès des étudiants. Nous rappellerons l'historique des modes de détection des particules « au de la » du modèle standard au cours du siècle précédent et surtout brosserons un panorama complet des expériences de détection directe et indirecte en cours, de leurs résultats actuels, et de leur perspectives dans l'avenir proche. Nous discuterons aussi les avantages et inconvénients des nouveaux projets tels ILC sur la détection de matière noire ou l'étude de la supersymétrie. Nous mettrons en avant les problèmes techniques et coûts envisagés pour chacun de ces grands instruments. Le but est vraiment d'ouvrir l'étudiant sur les 10-20 prochaines années de recherches dans le domaine de la physique des hautes énergies.



### Apprentissage physique

- Interaction avec l'environnement
- Budgets
- Collaborations internationales
- Futur de la discipline

### Apprentissage technique

- Aucun

### TD (2h)

Dans ce TD, nous donnerons aux étudiants la possibilité de proposer un type expérimental nouveau pour la détection de physique au delà du modèle Standard au vu des acquis qu'il aura appris durant les précédents cours. Il faudra imaginer une méthode de détection nouvelle, évaluer son cout, et les difficultés techniques qu'il pourra rencontrer.

## 8) Histoire des révolutions scientifiques

Ce cours est à notre point de vue fondamental puisque nous retracerons les plus grandes découvertes du siècle dernier replacées dans leur contexte historique. Le but est de montrer aux étudiants les aléas de la recherche, les allers et retours, les conflits, les doutes, et erreurs. Trois thèmes seront abordés: la découverte de la radioactivité, l'avènement de la physique quantique et la découverte des premières particules élémentaires. Attention, le cours n'est pas un cours d'histoire des sciences, mais d'histoire scientifiques des sciences. En effet, il sera basé sur les articles historiques de l'époque, et les calculs seront re-dérivés à partir des connaissances de l'époque. Un des intervenants a déjà écrit un livre sur le sujet que l'on peut trouver ici:



[http://www.ymambrini.com/My\\_World/Books.html](http://www.ymambrini.com/My_World/Books.html)

### Apprentissage physique

- & Désintégration radioactive
- & Principe thermodynamique du corps noir
- & Diffraction Rutherford
- & Electromagnétisme classique et relativiste

### Apprentissage technique

- & Retrouver la distribution de Planck
- & Calculer la diffusion des particules dans un champs nucléaire
- & Retrouver une masse de particule au travers d'une courbure

### TD (2h)

Nous donnerons la photo de la chambre à bulle obtenue par Anderson en 1931 afin que l'étudiant retrouve les caractéristiques du positron (masse et charge) de la même façon et avec les mêmes outils qu'avait Anderson à la même époque.