

Contribution to Prospectives 2020 – GT01

Phénoménologie des recherches de Nouvelle Physique aux collisionneurs

A. Arbey, G. Cacciapaglia, A. Deandrea, F. Mahmoudi

*Univ Lyon, Univ Claude Bernard Lyon 1, CNRS/IN2P3, Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon,
F-69622 Villeurbanne, France*

ABSTRACT

Après la découverte du boson de Higgs, la mise en évidence de Nouvelle Physique est l'un des enjeux principaux des collisionneurs et expériences de physique des particules et astroparticules, présents et futurs. Dans ce document, nous présentons les challenges théoriques et phénoménologiques pour la découverte de la nouvelle physique au LHC et aux futurs collisionneurs.

1 Introduction

La recherche de Nouvelle Physique (NP) est l'une des grandes priorités des collisionneurs actuels. Alors qu'aucun phénomène de Nouvelle Physique n'a été sans ambiguïté mis en évidence, une future génération de collisionneurs est déjà à l'étude, et il est très possible que le nouveau Run du LHC à haute luminosité apporte de nouvelles informations sur la physique Au-delà du Modèle Standard.

Du point de vue de la théorie, les modèles au-delà du Modèle Standard sont pour autant absolument nécessaires, pour expliquer entre autres la nature de la matière noire, de l'énergie noire, l'unification des interactions fondamentales, la masse du boson de Higgs, la masse des neutrinos, ... Une vaste liste de scénarios de nouvelle physique a été développée, et nous pouvons déterminer un certain nombre de classes génériques de modèles :

- extensions simples du Modèle Standard (2HDM, modèles simplifiés de matière noire, ...)
- modèles supersymétriques (MSSM, NMSSM, ...)
- modèles à dimensions supplémentaires (petites, grandes, courbées, ...)
- modèles composites pour le secteur électrofaible
- modèles inspirés de la gravité (supergravité, théorie des cordes, ...)
- ...

avec des superpositions possibles entre ces classes.

Ces modèles ont des propriétés différentes, mais reposent sur des méthodes de détection similaires pour leur mise en évidence. D'une part, aux collisionneurs, la recherche de signaux avec énergie transverse manquante est l'un des principaux vecteurs de recherche directe. D'autre part, la physique de précision à basse énergie et aussi aux collisionneurs, comme par exemple les mesures de précision des couplages du boson de Higgs et des autres propriétés des particules connues, peut aussi permettre la mise en évidence de nouvelle physique.

Dans la suite, nous allons considérer deux cas différents : d'une part, des scénarios accessibles aux collisionneurs actuels, mais qui n'ont pourtant pas été découverts ; d'autre part, des scénarios de nouvelle physique accessible à plus haute énergie.

2 Nouvelle physique à la portée des collisionneurs actuels

Si la nouvelle physique est présente à des échelles de masse bien au-delà des capacités de nos collisionneurs, il est évident qu'une détection directe y est impossible. Pour autant, il est possible que cette nouvelle physique existe à une échelle de masse à la portée de nos collisionneurs, mais qu'elle nous échappe. Différentes raisons peuvent être responsables de cette situation :

- des spectres de masse des particules compressés (c-à-d que les nouvelles particules ont des masses proches les unes des autres), menant à des sections efficaces ou des largeurs de désintégrations basses à cause de la cinématique des processus. Cela peut amener à des vertex de désintégration déplacés (éventuellement à l'extérieur des détecteurs), des jets ou particules de basse impulsion (en dessous de la sensibilité des détecteurs), voire des particules neutres à longue durée de vie qui échappent complètement à la détection dans les collisionneurs,
- la nouvelle physique pourrait être une extension uniquement du secteur électrofaible (comme souvent invoqué dans le cadre de la matière noire), la rendant très difficilement accessible aux collisionneurs hadroniques (donc au LHC),
- les nouvelles particules pourraient être plus généralement faiblement couplées au Modèle Standard, nécessitant une plus grande luminosité,
- la nouvelle physique accessible aux collisionneurs actuels pourrait apparaître uniquement comme des petites modifications de couplages du Modèle Standard (par exemple violation de CP, couplages modifiés du Higgs, ...),
- les particules pourraient être non-standard, avec des masses ou couplages extrêmement faibles, des effets non-perturbatifs, des couplages gravitationnels (par exemple, particules du type axions, gravitons de Kaluza-Klein, gravitinos, ...).

Nous considérons maintenant plus précisément ces différents cas.

2.1 Spectres de masse compressés

Dans le cas où les masses des nouvelles particules sont très proches les unes des autres, la détection devient extrêmement difficile. Pourtant, ce genre de cas est extrêmement fréquent, les exemples des plus communs étant le (N)MSSM (certains charginos et neutralinos sont toujours compressés), ou les théories à une dimension supplémentaire dont l'échelle de masse des particules est déterminée par la compactification. Pour espérer trouver ces particules :

- il pourrait être nécessaire de modifier les triggers au LHC,
- il peut être nécessaire d'avoir des détecteurs différents (par exemple MATUSLA qui pourra découvrir des particules avec des durées de vie plus longues qui se désintègrent actuellement en dehors d'ATLAS et CMS),
- dans le cas des jets et particules à faible impulsion, des collisionneurs leptoniques pourraient s'avérer nécessaires pour un meilleur contrôle du bruit de fond,
- les expériences de détection de matière noire pourraient mettre en évidence plus rapidement ce type de nouvelle physique, et montrer le chemin à suivre pour la voir aux collisionneurs,
- il se peut que ce type de nouvelle physique ne soit visible facilement qu'aux échelles cosmologiques (par la densité relique, dans le fond de rayonnement cosmologique, lors de la nucléosynthèse primordiale, ...), et seule la complémentarité entre collisionneurs et ces autres méthodes de détection permettra de mettre la nouvelle physique en évidence.

2.2 Extensions du secteur électrofaible

Dans le cas où la nouvelle physique est une extension du secteur électrofaible du Modèle Standard, il semble difficile de la découvrir sans un nouveau collisionneur leptonique. Cependant, il est probable qu'elle modifie les couplages du secteur électrofaible du Modèle Standard et qu'elle impacte les processus impliquant des bosons de Higgs ou Z ou W , qu'il faudrait donc mesurer avec plus de précision.

2.3 Modèles composites

Les modèles composites sont principalement étudiés avec l'approche du lagrangien effectif de type chiral, ce qui permet une bonne paramétrisation aux énergies actuellement à l'étude aux collisionneurs, sauf si des particules légères et difficilement détectables sont présentes dans le spectre des masses. Pour aller au delà de cette limite et pour ouvrir la voie à l'étude à plus haute énergie, des modèles plus détaillés et avec une dynamique spécifique (par exemple en termes de fermions constituants fondamentaux) sont également étudiés. Ces modèles ont des signatures spécifiques à la fois en termes d'impact sur la physique aux énergies actuelles du LHC (mais typiquement avec des petites modifications des couplages, ou avec des nouvelles particules légères difficiles à détecter, ou violations spécifiques dans le secteur de la saveur des quarks et des leptons) et aussi à plus haute énergie où des nouvelles particules sont attendues (nouveaux états liés lourds qui ne sont pas protégés par des symétries approchées).

2.4 Nouvelle physique faiblement couplée au Modèle Standard

Plus généralement, si les couplages de la nouvelle physique au Modèle Standard sont faibles, il faut s'intéresser aux recherches indirectes de nouvelle physique, telles que, comme nous venons de la dire, l'étude des couplages des bosons de Higgs ou Z , mais aussi la mesure des observables de précision, de physique des saveurs, ... Il est aussi important d'étudier les mécanismes de formation de la matière noire pour orienter les recherches directes. Enfin, une augmentation de la luminosité pourrait être suffisante pour sa mise en évidence. Par contre, si la nouvelle physique est très légère, un collisionneur leptonique serait nécessaire.

2.5 Couplages du Modèle Standard modifiés

Si la nouvelle physique modifie effectivement les couplages du Modèle Standard, il faut augmenter la précision de la mesure de ces couplages. En particulier, concernant la violation de CP, il faut continuer à chercher ces violation de CP dans le secteur des tops et des bottoms, mais aussi essayer de mesurer les moments magnétiques dipolaires des particules et noyaux. Enfin, les mesures de précision, par exemple du moment magnétique anomal du muon, peuvent apporter de précieuses informations sur ce type de nouvelle physique.

2.6 Particules non-standard

Dans le cas de particules avec des propriétés inhabituelles, il est difficile d'avoir des méthodes de détection génériques, il peut être nécessaire de concevoir des expériences spécifiques ou envisager des nouvelles stratégies pour les triggers implémentés pour sélectionner les données aux collisionneurs. Cependant, il est là encore très important de s'intéresser aux observables indirectes, par exemple à la désintégration des mésons B vers des particules légères et invisibles en plus de particules du Modèle Standard (plus facilement mesurable aux usines à B).

3 Nouvelle physique à haute énergie

Si la nouvelle physique est inaccessible aux collisionneurs actuels car elle est trop massive, la meilleure approche est la recherche de petites déviations dans les données de plus basse énergie combinée avec des approches théoriques, avec des besoins d'idées nouvelles pour essayer de la comprendre, en particulier :

- quels sont les liens de la nouvelle physique avec la cosmologie et le problème de la matière noire ?
- quelles théories peuvent expliquer asymétrie baryonique de l'univers ?
- comment modéliser la baryogénèse et la leptogénèse ?
- la nouvelle physique est-elle liée au secteur des neutrinos ?
- quels liens avec la Grande Unification, la gravité quantique, les théories des cordes, ... ?

De manière générale :

- même si les nouvelles particules sont lourdes, elles peuvent avoir des effets indirects d'ors et déjà détectables avec les recherches indirectes actuelles, éventuellement avec un plus grand nombre d'évènements et une meilleure précision (physique des saveurs, tests électrofaibles de précision, physique du Higgs, recherche de matière noire, ...),
- il est nécessaire d'avoir des collisionneurs à plus haute énergie,
- il serait bon d'avoir à la fois des collisionneurs hadroniques et des collisionneurs leptoniques,
- il faut comprendre l'origine de la masse des neutrinos et l'origine plus profonde de la masse électrofaible (au-delà de la paramétrisation actuelle avec le potentiel de Higgs).

4 Conclusion

La nouvelle physique est nécessaire, et la recherche dans les collisionneurs et avec les expériences actuelles doit continuer. Même si nous n'avons pas encore mis en évidence d'effets de cette nouvelle physique, elle peut être accessible à la génération actuelle d'expériences, et il est impératif d'étudier les recoins difficiles d'accès des espaces des paramètres. Évidemment, il est important de continuer le développement de nouveaux collisionneurs, détecteurs et expériences. Du point de vue de la théorie, il est aussi important d'étudier de nouvelles idées, et mettre au point de nouveaux tests. Et dans tous les cas, il faut garder à l'esprit que la complémentarité entre recherches directes, recherches indirectes et recherches cosmologiques et astrophysiques, peut être la clé pour comprendre ce qu'est la nouvelle physique, et que seule l'interaction entre théoriciens et expérimentalistes nous permettra de la découvrir.