

Intelligent detection layers for advanced tracking in high-energy physics

Résumé de la thèse de doctorat

Benjamin Boitrelle

Sous la direction de :

Jérôme Baudot : Directeur de thèse à l'Université de Strasbourg

Ingrid Maria Gregor : Encadrante au laboratoire d'accueil au DESY de Hambourg

1 Contexte de la thèse

Le 4 juillet 2012 au CERN à Genève (Suisse), les collaborations ATLAS et CMS ont annoncé les premiers résultats d'analyse des données acquises grâce au plus grand accélérateur de particules du monde, le Large Hadron Collider (LHC). Les deux expériences ont présenté la découverte de la signature d'une particule compatible au boson prédit par le mécanisme de la brisure de la symétrie électro-faible de Brout-Englert-Higgs, le boson de Higgs. Bien que l'augmentation de l'énergie de collision du LHC pourrait permettre une meilleure compréhension de cette nouvelle particule et de contraindre encore plus les limites du Modèle Standard, voire de découvrir des traces de physique au delà de cette théorie, la complexité des événements générés limite l'accès à certains paramètres fondamentaux. En effet, les protons sont des particules composites, c'est-à-dire constituées d'un assemblage de particules, dont leur structure cache les paramètres fondamentaux de la collision.

Un nouveau grand projet en physique des hautes énergies est à l'étude : l'International Linear Collider (ILC). Ce collisionneur linéaire de 31 kilomètres de long permettra d'améliorer la précision des mesures grâce à la collision d'électrons et de protons pour des énergies comprises entre 250 GeV et 1 TeV. En effet, les électrons et positrons sont des particules fondamentales qui permettent de contrôler précisément l'énergie de collision et de sélectionner les processus à étudier grâce à la polarisation de ces dites particules. Il devrait permettre de mieux caractériser les particules déjà connues, comme le boson de Higgs grâce à son couplage avec les fermions, mais aussi d'étudier la matière noire. Pour cela la partie centrale du détecteur dédiée à la reconstruction du vertex doit avoir à la fois une excellente résolution spatiale et un budget de matière ne dépassant pas quelques millièmes de la longueur de radiation. Ce sous-détecteur, appelé détecteur de vertex, doit être optimisé afin de permettre la trajectométrie dans un milieu hautement dense en particules et de différencier la trajectoire des quarks b et c .

La collaboration PLUME, qui implique l'IPHC de Strasbourg, le DESY à Hambourg et l'université de Bristol, met en place les outils permettant de surmonter ces défis grâce à une conception innovante d'échelles de trajectométrie double face pixelisée, appelée PLUME¹. Ce type d'objet est équipé de six capteurs à pixels CMOS ultra fins, alignés l'un à côté de l'autre, sur chaque face d'un support mécanique très léger et tente d'atteindre un record au niveau du budget de matière en se rapprochant de 0.3% de X_0 . Pour chaque trajectoire, deux positions seront mesurées, une par face. Elles permettront d'évaluer le point d'intersection de la particule avec le détecteur, mais aussi son mouvement et son origine. Si les outils permettant cette double mesure sont maîtrisés et optimisés, cela augmentera considérablement les capacités de trajectométrie de ce type d'instrument.

1. Pixelated Ladder with Ultra low Material Embedded

2 Étude de la désintégration du boson de Higgs

Afin de comprendre les paramètres du système de détection, j'ai démarré une analyse de physique concernant la désintégration du boson de Higgs en deux paires de quarks charmé et anti-charmé à une énergie de centre de masse de 350 GeV. L'état final qui m'a intéressé est celui où le Higgs et deux neutrinos sont produits, soit par Higgstrahlung, soit par fusion de bosons W. L'étude m'a d'abord permis de comprendre l'avantage de la polarisation des électrons et positrons sur le canal de physique que l'on souhaite étudier. Par exemple, la contribution la fusion de boson W est atténuée lorsque les électrons sont droits et les positrons gauches. Par exemple

3 Préparation d'une campagne de tests sous faisceaux

Comme décrit en introduction, l'objectif de la collaboration PLUME est d'atteindre un budget de matière se rapprochant de 0.3% de X_0 pour une résolution spatiale meilleure que 3 microns. Chaque module doit être validé en laboratoire afin de s'assurer que le processus de fabrication n'altère pas les capteurs utilisés. Après inspection visuelle afin de vérifier l'alignement de chaque capteur l'un par rapport à l'autre et qu'aucun capteur, ni aucune connexion n'est été endommagé pendant l'assemblage, chaque échelle est testée électriquement. La consommation des capteurs et le contrôle JTAG est vérifié pour chaque capteur, pour ensuite évaluer les seuils des comparateurs qui vont permettre de discriminer le signal du bruit. Il est important de déterminer leur point de fonctionnement optimal, leur bruit et leur offset. Une analyse permet enfin de déterminer le taux de fantôme de chaque capteur et de vérifier qu'ils détectent correctement une source radioactive.

Je me suis aussi occupé de préparer un faisceau test avec des échelles déjà testées au CERN avec des pions de 120 GeV. Les caractéristiques du faisceau à bas énergie du DESY (jusqu'à 6 GeV) permettent de vérifier que la structure de notre échelle est compatible avec des particules de basse énergie. Pour cela, il a fallu préparer le système d'acquisition, ainsi que la mécanique. Le faisceau test s'est déroulé du 11 au 22 avril 2016.

Les MIMOSA-26 sont des détecteurs monolithiques complexes. Le traitement des données est directement intégré dans les photocytes qui collectent les charges. Il permet de numériser directement le signal, grâce à des discriminateurs et de réduire la bande-passante de transmission des données par le biais d'un système de suppression de zéro (ne prend pas en compte les zéros envoyés par les pixels, qui ne représentent pas un signal physique intéressant). Cette méthode permet d'enregistrer les informations individuelles de plus de un million d'impacts/cm²/s sur un capteur contenant plus de 500000 pixels sur une surface de 2 cm².

Bien que de nouveaux modules atteignant une longueur de radiation de seulement 0.35 % aient été construits et testés, le planning ne m'a pas permis de les tester sous faisceau au DESY.

4 Publications et conférences

Conférences :

- Beam Telescope and Test Beam, Janvier 2015, DESY - Hambourg : présentation orale
- Linear collider Whistler, B.C, Canada, Novembre 2015 : présentation orale

5 Formations

- Linear Collider Physics School² au DESY à Hambourg du 7 au 9 octobre 2013
- 7th Detector Workshop of the Terascale Alliance³ à Göttingen du 3 au 5 mars 2014
- Introduction to Terascale 2014⁴ au DESY à Hambourg du 17 au 21 mars 2014

2. <https://indico.desy.de/conferenceDisplay.py?confId=7513>

3. <https://indico.desy.de/conferenceDisplay.py?confId=9389>

4. <https://indico.desy.de/conferenceDisplay.py?confId=9263>

- Linear Collider School 2014⁵ à Frauenthiemsee du 11 au 15 août 2014
- Cours d'allemand au DESY, septembre 2013 à février 2014 (3 heures par semaine)
- Cours d'allemand avec la PIER school (1 heure 30 par semaine)

5. <https://indico.desy.de/conferenceDisplay.py?confId=9329>