

**Titre:** Tests de NRQCD de précision avec la production de charmonium et nouvelle technique de l'alignement temporel avec l'expérience LHCb

**Mots clés:** QCD, Quarkonium, Physique des saveurs, Analyse des données, Alignement temporel, Détecteur.

**Résumé:** Depuis la découverte de l'état  $J/\psi$  en 1974, le quarkonium est devenu un outil essentiel pour les études de la chromodynamique quantique (QCD). Il permet de tester toute la gamme d'énergie de la dynamique QCD. Cependant, le mécanisme de production du quarkonium reste l'un des problèmes les plus difficiles à résoudre. Les études les plus précises utilisent des désintégrations expérimentalement propres avec un état final de dimuon, ce qui est possible pour les charmonia de  $J^{PC} = 1^{--}$ , comme les états  $J/\psi$  et  $\psi(2S)$ . La reconstruction des autres états n'est accessible que par leurs désintégrations radiatives ou hadroniques. L'expérience LHCb est bien placée pour ces études grâce à sa reconstruction précise des vertex, son système performant d'identification des particules et de déclenchement, qui permettent de réduire le bruit de fond combinatoire élevé. Une théorie effective des champs, la QCD Non-Relativiste (NRQCD), suppose un lien entre les observables

de production des différents états du quarkonium. Par conséquent, une étude simultanée de tous les états liés peut fournir un test rigoureux de la NRQCD. Cette thèse présente une étude de la production de charmonium à  $\sqrt{s} = 13$  TeV, où les états sont reconstruits via leur désintégration en  $p\bar{p}$ . Elle comprend la première étude de l'hadroproduction des  $\eta_c(2S)$  et  $h_c$ , l'étude de la section efficace différentielle en  $y$  de production des  $\eta_c(1S)$ , qui peut potentiellement améliorer l'incertitude d'échelle, et la section efficace différentielle en  $p_T$  de production des  $\eta_c(1S)$  dans un nouveau domaine en  $p_T$  étendu. Les résultats sont comparés aux prédictions théoriques. En plus, la nouvelle technique S-shape d'alignement temporel de l'expérience de LHCb est présentée. La méthode proposée est mise en œuvre à l'aide d'un nouveau luminomètre de LHCb, PLUME. La méthode est validée avec des données de LHCb recueillies en 2022 pendant l'opération de mise en route de LHCb.

**Title:** Charmonia production for precision NRQCD and new time alignment technique of the LHCb experiment.

**Keywords:** QCD, Quarkonium, Flavor physics, Data analysis, Time alignment, Detector

**Abstract:** Since the discovery of the  $J/\psi$  state in 1974, quarkonium has become an essential tool for studying Quantum chromodynamics (QCD). Depending on the chosen observable, it allows probing the whole energy range of the QCD dynamics. However, the quarkonium production mechanism remains one of the most challenging problems. The most precise studies employ decays into experimentally clean dimuon final state, which is possible for  $J^{PC} = 1^{--}$  charmonia, such as  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  states. Reconstruction of the other states is accessible only via their radiative or hadronic decay. The LHCb experiment is well positioned for these studies due to its precise vertex reconstruction, powerful particle-identification performance and flexible trigger system, which allow for suppressing high combinatorial background. An effective field theory, Non-Relativistic QCD (NRQCD), gives a

link between the production observables of the different quarkonium states. Therefore, a simultaneous study of all linked states can provide a stringent test of NRQCD. This thesis presents a study of charmonium production at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, where states are reconstructed via their decay to  $p\bar{p}$ . It includes the first study of the  $\eta_c(2S)$  and  $h_c$  hadroproduction, the study of the  $y$ -differential production cross-section of the  $\eta_c(1S)$ , which can potentially improve the scale uncertainty, and the  $\eta_c(1S)$   $p_T$ -differential production cross-section in a new extended  $p_T$ -range. The results are compared to the theoretical predictions. In addition, the new time-alignment S-shape technique of the LHCb experiment is presented. The proposed method is implemented using a new LHCb luminometer PLUME. The method is validated using the LHCb data collected in 2022 during the LHCb commissioning period.