

# Thesis defence Pavel OSKIN

## Study of the bottomonium decays at the Belle and Belle II experiments

Abstract:

Bottomonium is a bound state of  $b\bar{b}$  quarks. Since the  $b$  quark is heavy, the bottomonium is an approximately non-relativistic system, and therefore is well described by potential models. The models give accurate predictions for their masses, their annihilation widths and the widths of the radiative and hadronic transitions. A breakdown of the potential models happened in 2008, when both the Belle and BaBar experiments observed unexpected pattern of hadronic transitions from the  $\Upsilon(4S)$  and  $\Upsilon(5S)$  states. It was found that the dipion transitions from the  $\Upsilon(5S)$  state are strongly enhanced compared to the theoretical expectations, which corresponds to a violation of the OZI rule. It was also found that the  $\eta$  transitions are not suppressed compared to the dipion transitions. This corresponds to a strong violation of the heavy quark spin symmetry, since the  $\eta$  transitions involve spin flip of  $b$  quark. Subsequently, other transitions with anomalous properties were discovered. Anomalous properties of the states indicate that their structure could be more complex than a pair of  $b\bar{b}$  quarks. It has been observed that only states above the  $B\bar{B}$  threshold exhibit unexpected properties, which indicates that the states could be «dressed» with a molecular component of on-shell  $B\bar{B}$  mesons. Other proposed exotic structures include hybrids, compact tetraquarks, and hadroquarkonia. Two charged states,  $Z_b(10610)$  and  $Z_b(10650)$ , have been observed; corresponding minimal quark content is exotic. Since their masses are very close to the  $B\bar{B}^*$  and  $B^*\bar{B}$  thresholds, they are likely molecular states. Investigation of the highly-excited bottomonium-like states is important for understanding the strong interaction in a non-perturbative regime. In this work we study various hadronic transitions from the  $\Upsilon(4S)$ ,  $\Upsilon(10753)$ , and  $\Upsilon(5S)$  states, which helps to determine their structure. The state  $\Upsilon(10753)$  has recently been observed by the Belle experiment in the energy dependence of the  $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1, 2, 3$ ) cross sections. To confirm and study the new state, Belle II performed an energy scan in the corresponding energy region collecting four data samples with total integrated luminosity of  $19 \text{ fb}^{-1}$ . We use these data to search for the  $\Upsilon(10753) \rightarrow \eta b(1S)\omega$  and  $\Upsilon(10753) \rightarrow \chi_{bJ}(1P)\omega$  transitions. We also use the  $711 \text{ fb}^{-1}$  and  $121 \text{ fb}^{-1}$  data samples collected by Belle at  $\Upsilon(4S)$  and  $\Upsilon(5S)$ , respectively, to search for the  $\Upsilon(4S) \rightarrow \eta b(1S)\omega$  and  $\Upsilon(5S) \rightarrow \eta b(1S,2S)\omega$  transitions. Finally, we use the  $\Upsilon(5S)$  and scan data samples of Belle to search for the  $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K^+K^-$  transition and to measure energy dependence of the  $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(1S)K^+K^-$  cross section.

## Étude des désintégrations du bottomonium dans les expériences Belle et Belle II

Résumé :

Le bottomonium est un état lié des quarks  $b\bar{b}$ . Comme le quark  $b$  est lourd, le bottomonium est un système approximativement non relativiste, et est donc bien décrit par les modèles potentiels. Ces modèles donnent des prédictions précises pour leurs masses, leurs largeurs d'annihilation et les largeurs des transitions radiative et hadronique. Toutefois les expériences Belle et BaBar découvrent en 2008 que les transitions dipioniques de l'état  $\Upsilon(5S)$  sont mesurées à un taux plus beaucoup plus élevé que celui prédit par ces modèles, une violation de la règle OZI. Tandis que les transitions  $\eta$  ne sont pas supprimées par rapport aux transitions dipioniques, une violation importante de la symétrie de spin du quark lourd car les transitions  $\eta$  impliquent un retournement de spin du quark  $b$ . Par la suite, d'autres transitions aux propriétés anormales seront découvertes. Les propriétés anormales de ces états indiquent que leur structure pourrait être plus complexe qu'une paire de quarks  $b\bar{b}$ . Il est aussi observé que seuls les états au-dessus du seuil  $B\bar{B}$  présentent des propriétés inattendues, ce qui indique que ces états pourraient être en fait « habillés » avec une composante moléculaire de mésons  $B\bar{B}$  on-shell. D'autres explications exotiques sont aussi proposées comme hybrides, tétraquarks compacts et hadroquarkonia. Deux états chargés,  $Z_b(10610)$  et  $Z_b(10650)$ , ont été observés ; la teneur minimale en quarks correspondante est exotique. Comme leurs masses sont très proches des seuils  $B\bar{B}^*$  et  $B^*\bar{B}^*$ , ce sont probablement des états moléculaires. L'étude des états de type bottomonium hautement excités est cruciale pour comprendre l'interaction forte dans un régime non perturbatif. Dans ce travail, nous étudions diverses transitions hadroniques à partir des états  $\Upsilon(4S)$ ,  $\Upsilon(10753)$  et  $\Upsilon(5S)$ , ce qui aide à déterminer leur structure. L'état  $\Upsilon(10753)$  a été récemment observé par l'expérience de Belle en étudiant la dépendance en énergie des sections efficaces  $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1, 2, 3$ ). Pour confirmer et étudier ce nouvel état, Belle II a effectué un scan dans la région d'énergie correspondante. Nous utilisons ces données pour rechercher les transitions  $\Upsilon(10753) \rightarrow \eta b(1S)\omega$  et  $\Upsilon(10753) \rightarrow \chi_{bJ}(1P)\omega$  et les échantillons de données  $711 \text{ fb}^{-1}$  et  $121 \text{ fb}^{-1}$  collectés par Belle à  $\Upsilon(4S)$  et  $\Upsilon(5S)$ , respectivement, pour rechercher les transitions  $\Upsilon(4S) \rightarrow \eta b(1S)\omega$  et  $\Upsilon(5S) \rightarrow \eta b(1S,2S)\omega$ . Enfin, avec les échantillons de données  $\Upsilon(5S)$  et le scan de Belle nous recherchons la transition  $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K^+K^-$  et sa section efficace  $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(1S)K^+K^-$ .