



การเกิดเคออนนิควิโคลด์จากการชนกันของโปรตอนชนโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV  
และ ทองชนทองที่ระดับพลังงาน 130 GeV



ณัฐภัทร ทองอยู่

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2566  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การเกิดเคออนนิควิลด์จากการชนกันของโปรตอนชนโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV  
และ ทองชนทองที่ระดับพลังงาน 130 GeV



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2566  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การเกิดเคออนนิกนิวไคลด์จากการชนกันของโปรตอนชนโปรตอนที่ระดับพลังงาน  
7 TeV และ ทองชนทองที่ระดับพลังงาน 130 GeV"

ของ ณัฐภัทร ทองอยู่

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

### คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อายุทศ ลิ้มพิรัตน์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรรรัตน์ ศรีสวัสดิ์)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิวาณี ขำล้ำเลิศ)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทีพานิส ชาชีโย)

อนุมัติ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์ )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การเกิดเคออนนิกนิวโคลด์จากการชนกันของโปรตอนชนโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV และ ทองชนทองที่ระดับพลังงาน 130 GeV
ผู้วิจัย	ณัฐภัทร ทองอยู่
ประธานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.พรรัตน์ ศรีสวัสดิ์
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. ฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2566
คำสำคัญ	เคออนนิกนิวโคลด์, นิวโคลด์แปลก, การกระเจิงของฮาดรอน, การชนกันของไอออนหนัก

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการศึกษาการชนกันของไอออนหนักออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกใช้แบบจำลอง The parton and hadron cascade model (PACIAE) ในการศึกษาการเกิดของอนุภาคเคออน ( $K^+$ ,  $K^-$ ) และ โปรตอน ( $p$ ,  $\bar{p}$ ) ที่ศูนย์กลางการชนกันของอนุภาค 0 – 10% ในการชนกันของ p+p ที่พลังงาน 7 TeV, แรพิดิตี  $|y| < 0.5$  และโมเมนตัมตามขวาง  $0.2 < p_T < 6.0$  GeV/c และการจำลองการชนกันของ Au+Au ที่พลังงาน 130 GeV, แรพิดิตี  $|y| < 0.5$  และโมเมนตัมตามขวาง  $0.3 < p_T < 6.0$  GeV/c จากการเปรียบเทียบผลการทำนายการเกิดของอนุภาคเคออนและโปรตอนกับข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ ALICE (CERN, Switzerland) และ STAR ที่ (Brookhaven National Laboratory, USA) พบว่าการเกิดของอนุภาคเคออนและโปรตอนให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี

ในส่วนที่สองคือการนำการเกิดของอนุภาคเคออนและโปรตอนจากส่วนแรกมาใช้ในการทำนายการเกิดของเคออนนิกนิวโคลด์  $K^+p$ ,  $K^+p^-$ ,  $K^-pp$  และ  $K^+p^-p^-$  ที่  $\Delta m = 0.005 - 0.05$  GeV โดยใช้แบบจำลอง PACIAE + Dynamically Constrained Phase – space Coalescence (DCPC) โดยผลรวมของการเกิดเคออนนิกนิวโคลด์  $K^+p$  กับ  $K^+p^-$  จากการชนกันของอนุภาค p+p ที่พลังงาน 7 TeV มีค่าสอดคล้องกับการเกิด KN โดย KN เกิดจากการสลายตัวของ  $\Lambda(1405)$  และ  $\bar{\Lambda}(1405) \approx 10^{-3}$  ตัวในช่วงของการกระเจิงของฮาดรอน ส่วนการทำนายการเกิดของเคออนนิกนิวโคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+p^-p^-$  จากการชนกันของ Au+Au ที่พลังงาน 130 GeV มีอัตราการเกิดเคออนนิกนิวโคลด์ของ  $K^-pp \approx 28.63 \times 10^{-4}$  ตัวซึ่งแตกต่างจากอัตราการเกิด  $K^+p^-p^- \approx 19.38 \times 10^{-4}$  ตัวจึงคาดว่า  $K^-pp$  และ  $K^+p^-p^-$  เป็นผลมาจากการจับคู่กันระหว่าง 1 เคออนกับ 2 โปรตอน โดยตรงโดยไม่ได้เกิดขึ้นจาก จับคู่กันของ  $\Lambda(1405)$  กับ 1 โปรตอน



<b>Title</b>	THE PRODUCTION OF KAONIC NUCLEI IN THE COLLISIONS OF P + P AT 7 TEV AND AU + AU AT 130 GEV
<b>Author</b>	Natthaphat Thongyoo
<b>Advisor</b>	Associate Professor Pornrad Srisawad, Ph.D.
<b>Academic Paper</b>	M.S. Thesis in Physics, Naresuan University, 2023
<b>Keywords</b>	Kaonic nuclei, exotic nuclei, hadron rescattering, heavy ions collision

### ABSTRACT

This thesis was divided into 2 parts. The first part studies the collision of heavy ions by The parton and hadron cascade model (PACIAE). The production of Kaon particles ( $K^+$ ,  $K^-$ ) and protons ( $p$ ,  $\bar{p}$ ) at centrality 0 – 10% in p+p collision at 7 TeV, rapidity  $|y| < 0.5$  and transverse momentum  $0.2 < p_T < 6.0$  GeV/c and Au+Au collision at 130 GeV, rapidity  $|y| < 0.5$  and transverse momentum  $0.3 < p_T < 6.0$  GeV/c. The comparison of the measured Kaon and proton production with the experiment data from ALICE (CERN, Switzerland) and STAR (Brookhaven National Laboratory, USA) and the results were consistent with the experiments very well.

The second part is predictions of yields of kaonic nuclei  $K^-p$ ,  $K^+p$ ,  $K^-pp$  and  $K^+p\bar{p}$  at  $\Delta m = 0.005 - 0.05$  GeV by PACIAE + Dynamically Constrained Phase – space Coalescence (DCPC) model. The combined yield of kaonic nuclei  $K^-p$  and  $K^+p$  in p+p collision at 7 TeV is consistent with KN. KN is decay from  $\Lambda(1405)$  and  $\bar{\Lambda}(1405) \approx 10^{-3}$  in the hadron rescattering period. The predictions of kaonic nuclei  $K^-pp$  and  $K^+p\bar{p}$  in Au+Au collision at 130 GeV have the yield of kaonic nuclei  $K^-pp \approx 28.63 \times 10^{-4}$  is different to  $K^+p\bar{p} \approx 19.38 \times 10^{-4}$ . We expect the  $K^-pp$  and  $K^+p\bar{p}$  are the coupling of 1 kaon particle with 2 protons directly without coupling of 1  $\Lambda(1405)$  with 1 proton.

## ประกาศขอบคุณการ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก รศ. ดร. พรรรัตน์ ศรีสวัสดิ์ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และคณะกรรมการวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย รศ. ดร. आयुทธ ลิ้มพิรัตน์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร. จิราณี ขำกล้าเลิศ และ รศ. ดร. ทีปานิส ซาซียอ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ จากใจจริง

ขอขอบคุณอย่างสูงสำหรับคำแนะนำและความรู้ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จาก Prof. Dr. Yupeng Yan สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขอขอบคุณ ดร. กฤติยา ไตม่วง ดร. ปนัดดา สิทธิเขตกรณ์ ดร. สุกัญญา สมบุญ และ ผศ. พชร ธีช ไชยมงคล สำหรับการให้การช่วยเหลือและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จได้ถ้าขาดการช่วยเหลือในส่วนนี้

ขอขอบคุณพ่อ แม่และครอบครัวสำหรับความรักและความห่วงใยพร้อมทั้งการดูแลและสนับสนุนในทุกด้านเสมอมาจนถึงปัจจุบัน

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณนิสิตปริญญาเอก และปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและเป็นเพื่อนที่ดีพร้อมทั้งช่วยให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง

ณัฐภัทร ทองอยู่

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุุณูปการ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
1.3 ความสำคัญของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและแบบจำลองที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อนุภาคมูลฐาน .....	5
2.2 อนุภาคเคออน (K).....	6
2.3 อนุภาคโปรตอน (p).....	7
2.4 นิวไคลด์ของอนุภาคแปลกและเคออนนิกนิวไคลด์ (Exotic and Kaonic nuclei).....	8
2.5 $K^-p$ bound state .....	9
2.6 $K^-pp$ bound state.....	10
2.7 $\Lambda(1405)$ .....	11



2.8 โมเมนตัมสัมพัทธ์ (Relative momentum) .....	12
2.9 แบบจำลอง PACIAE .....	13
2.10 โปรแกรม Dynamically Constrained Phase Space coalescence (DCPC).....	17
2.11 พารามิเตอร์ในแบบจำลอง PACIAE .....	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	21
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	26
4.1 ผลการจำลองการเกิดอนุภาคเดี่ยว $K^+$ , $K^-$ , $p$ และ $\bar{p}$ จากการชนกันของโปรตอน กับโปรตอนที่พลังงาน 7 TeV .....	26
4.2 ผลการจำลองการเกิดเคออนนิคนิวไคลด์ $K^+p$ และ $K^+\bar{p}$ จากการชนกันของ โปรตอนกับโปรตอนที่พลังงาน 7 TeV .....	28
4.3 ผลการจำลองการเกิดอนุภาคเดี่ยว $K^+$ , $K^-$ , $p$ และ $\bar{p}$ จากการชนกันของทองกับ ทองที่พลังงาน 130 GeV .....	33
4.4 ผลการจำลองการเกิดเคออนนิคนิวไคลด์ $K^+pp$ และ $K^+\bar{p}\bar{p}$ จากการชนกันของ ทองกับทองที่พลังงาน 130 GeV .....	34
บทที่ 5 บทสรุป .....	38
สรุปผลการวิจัย.....	38
บรรณานุกรม .....	41
ภาคผนวก.....	46
ประวัติผู้วิจัย .....	52

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แสดงองค์ประกอบและมวลของอนุภาค $K^-$ , $K^+$ , $K^0$ และ $\bar{K}^0$ .....	6
ตาราง 2 แสดงพารามิเตอร์ในการจำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV แรพิดิตี $ y  < 0.5$ .....	20
ตาราง 3 แสดงพารามิเตอร์ในการจำลองการชนกันของทอังก์ทอังก์ที่ระดับพลังงาน 130 GeV แรพิดิตี $ y  < 1.0$ .....	20
ตาราง 4 แสดงพารามิเตอร์ในการจำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนและการชนกันของทอังก์ทอังก์.....	26
ตาราง 5 แสดงอัตราการเกิดของ $K^+$ , $K^-$ , $p$ และ $\bar{p}$ ที่เป็นผลผลิตจากการจำลองการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV เปรียบเทียบกับข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ ALICE .....	27
ตาราง 6 แสดงอัตราการเกิดเคออนนิคินิวไคลด์ $K^+p$ และ $K^+\bar{p}$ จากการชนกันของโปรตอนกับโปรตอน 7 TeV จำนวน 1,000,000 ครั้ง จากแบบจำลอง PACIAE+DCPC ที่ $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$ GeV.....	28
ตาราง 7 แสดงอัตราการเกิดเคออนนิคินิวไคลด์ $K^+p$ และ $K^+\bar{p}$ จากการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนที่ $\Delta m = 0.020$ GeV และจำนวน 100,000 – 5,000,000 ครั้ง ที่พลังงาน 7 TeV จากแบบจำลอง PACIAE + DCPC.....	30
ตาราง 8 แสดงอัตราการเกิดของ $K^+$ , $K^-$ , $p$ และ $\bar{p}$ ที่เป็นผลผลิตจากการจำลองการชนกันของทอังก์ทอังก์ที่ระดับพลังงาน 130 GeV เปรียบเทียบกับข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ STAR [51] .....	33
ตาราง 9 แสดงอัตราการเกิดเคออนนิคินิวไคลด์ $K^+pp$ และ $K^+\bar{p}\bar{p}$ จากการชนกันของทอังก์ทอังก์ที่พลังงาน 130 GeV จำนวน 10,000 ครั้ง จากแบบจำลอง PACIAE + DCPC ที่ $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$ GeV.....	34

ตาราง 10 อัตราการเกิดเคออนนิควิลด์  $K^-pp$  และ  $K^+p\bar{p}$  จากการชนกันของ  
 โพรตอนกับโปรตอนจำนวน 10,000 – 30,000 ครั้งี่พลังงาน 130 GeV จากแบบจำลอง  
 PACIAE + DCPC .....36



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 แสดงควาร์กที่เป็นองค์ประกอบของ Standard Model [9].....	5
ภาพ 2 องค์ประกอบอนุภาคเคออน [10].....	7
ภาพ 3 แสดงมวลยังผลของโปรตอนและแอนติโปรตอนในรูปของพลังงานจลน์ในสสารนิวเคลียร์ที่ความหนาแน่นอิ่มตัว [17].....	8
ภาพ 4 โครงสร้างของคอนนิกนิวไคลด์ $K^+p$ [19].....	10
ภาพ 5 โครงสร้างของคอนนิกนิวไคลด์ $K^+pp$ [20].....	11
ภาพ 6 พารามิเตอร์ตกกระทบในการชนกันของนิวเคลียส A กับ นิวเคลียส B.....	13
ภาพ 7 ตัวอย่างการใส่ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดสำหรับการจำลองการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนที่ ตำแหน่ง A คือจำนวนการชนของอนุภาค B คือ เลขมวลและเลขอะตอมของโปรตอน C คือ แรพิดิตี D คือ โมเมนตัมตามขวางของเคออน.....	22
ภาพ 8 ตัวอย่างการใส่ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดสำหรับการจำลองการชนกันของทองกับทองที่ ตำแหน่ง A คือจำนวนการชนของอนุภาค B คือ เลขมวลและเลขอะตอมของทอง C คือ แรพิดิตี D คือ โมเมนตัมตามขวางของเคออน.....	23
ภาพ 9 แผนผังการจำลองการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนโดยใช้แบบจำลอง PACIAE+DCPC.....	24
ภาพ 10 แผนผังการจำลองการชนกันของทองกับทองโดยใช้แบบจำลอง PACIAE+DCPC.....	25
ภาพ 11 เปรียบเทียบอัตราการเกิดของอนุภาค $K^+$ , $K^-$ , $p$ และ $\bar{p}$ ระหว่างข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ ALICE กับแบบจำลอง PACIAE.....	27
ภาพ 12 เปรียบเทียบอัตราการเกิดของคอนนิกนิวไคลด์ $K^+p$ และ $K^+\bar{p}$ ที่.....	29
ภาพ 13 อัตราการเกิดของคอนนิกนิวไคลด์ $K^+p$ และ $K^+\bar{p}$ จากการชนของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนจำนวน 100,000 – 5,000,000 ครั้ง.....	31

ภาพ 14 การเปรียบเทียบอัตราการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  ที่พลังงาน 7 TeV ระหว่างโมเมนตัมสัมพัทธ์ที่ 0.00 – 4.00 GeV/c และการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  โดยไม่มีโมเมนตัมสัมพัทธ์.....32

ภาพ 15 เปรียบเทียบอัตราการเกิดของอนุภาค  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  และ  $\bar{p}$  ระหว่างข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ STAR กับแบบจำลอง PACIAE .....33

ภาพ 16 เปรียบเทียบอัตราการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  ที่.....35

ภาพ 17 แสดงอัตราการเกิดเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  จากการชนกันของทองกับทองจำนวน 10,000 – 30,000 ครั้ง ที่พลังงาน 130 GeV จากแบบจำลอง DCPC.....37



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ทฤษฎีการเกิด “บิกแบง” (Big Bang Theory) [1] เป็นทฤษฎีทางดาราศาสตร์ที่กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของเอกภพในปัจจุบัน โดยประมาณ 15,000 ล้านปีก่อนเอกภพเป็นเพียงจุดที่มีขนาดเล็กกว่าอะตอมหลังจากนั้นเอกภพได้ระเบิดออกในเวลาเพียงเสี้ยววินาที แรงระเบิดทำให้เกิดอนุภาคมูลฐานต่างๆ ต่อมาเมื่อเอกภพเริ่มเย็นตัวลงอนุภาคมูลฐานจึงรวมตัวกันกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและกลายเป็นอะตอมของธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบของดาวฤกษ์ในกาแล็กซี (Galaxy) ในอดีตนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าอะตอมคือหน่วยย่อยที่สุดของสสาร ต่อมานักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบว่ามีโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอนที่เป็นองค์ประกอบของอะตอม โดยในปัจจุบันได้มีการค้นพบอนุภาคที่มีขนาดเล็กยิ่งกว่า โปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน คือ ควาร์ก (Quark) เลปตอน (Leptons) และโบซอน (Bosons) โดยนักวิทยาศาสตร์ได้ร่วมกับสถาบันวิจัย European Organization for Nuclear Research (CERN) ซึ่งเป็นองค์การความร่วมมือระหว่างประเทศแห่งทวีปยุโรปเพื่อวิจัยและพัฒนาทางด้านนิวเคลียร์เพื่อค้นคว้าหาอนุภาคชนิดใหม่โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคขนาดใหญ่โดยมี Large Hadron Collider (LHC) [2] เป็นเครื่องมือหลักในการเร่งพลังงานและปฏิกิริยาของอนุภาคและอะตอมของธาตุขนาดใหญ่จากนั้นจึงกำหนดให้อนุภาคและอะตอมพุ่งชนกันภายในเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อศึกษาวัฏจักรการเกิดของอนุภาคชนิดใหม่ และยังรวมไปถึงการศึกษาอนุภาคมูลฐานที่เกิดขึ้นในช่วงต้นของวัฏจักรการเกิดของอนุภาคหลังจากการชนกันของอนุภาคและอะตอมของธาตุขนาดใหญ่ โดยคาดว่าจะสามารถค้นพบอนุภาคที่เป็นหน่วยย่อยที่สุดและจุดกำเนิดของอนุภาคต่างๆในเอกภพ สถาบันวิจัย CERN ตั้งอยู่บริเวณอุโมงค์ใต้ดินระหว่างประเทศฝรั่งเศสและสวิตเซอร์แลนด์ซึ่งมีสถานีสังเกตการณ์และตรวจวัดการชนกันของอนุภาคทั้งหมด 4 สถานีหลัก คือ สถานีตรวจวัดอนุภาคแอตลาส (ATLAS) สถานีตรวจวัดอนุภาคซีเอ็มเอส (CMS) สถานีตรวจวัดอลิซ (ALICE) และสถานีตรวจวัดอนุภาคแอลเอชซีบี (LHCb) โดยสถานีตรวจวัดแต่ละแห่งมีหน้าที่ในการสังเกตการณ์และตรวจวัดคุณสมบัติของอนุภาคชนิดใหม่ที่แตกต่างกัน ในปัจจุบันอนุภาคที่ค้นพบเป็นชนิดล่าสุดจากสถาบันวิจัย CERN คือ อนุภาคฮิกส์โบซอน (Higgs Boson)

ในปี ค.ศ. 1920 นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบว่ามีโปรตอนเป็นองค์ประกอบของอะตอมทุกชนิด โดยโปรตอนประกอบไปด้วย อัปควาร์ก จำนวน 2 ตัว และ ดาวน์ควาร์ก จำนวน 1 ตัว และในปี ค.ศ. 1950 ได้มีการค้นพบ อนุภาคเคออน (K) โดยอนุภาคเคออนสามารถแบ่งย่อยตามองค์ประกอบ

ภายในได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่  $K^+$  ประกอบไปด้วยอัปควาร์ก กับ แอนติ-สเตรนจ์ควาร์ก ( $u + \bar{s}$ ),  $K^-$  ประกอบไปด้วยสเตรนจ์ควาร์ก กับ แอนติ-อัปควาร์ก ( $s + \bar{u}$ ),  $K^0$  ประกอบไปด้วยดาว์นควาร์ก กับ แอนติ-สเตรนจ์ควาร์ก ( $d + \bar{s}$ ) และ  $\bar{K}^0$  ประกอบไปด้วยสเตรนจ์ควาร์ก กับ แอนติ-ดาว์นควาร์ก ( $s + \bar{d}$ ) โดยอนุภาคเคออนเป็นอนุภาคที่จัดอยู่ในกลุ่มของเมซอน (Mesons) เนื่องจากเป็นอนุภาคที่ประกอบไปด้วยควาร์กจำนวน 2 ตัวเป็นองค์ประกอบ และมีค่าสปิน (spin) เท่ากับ 0 มีอายุเฉลี่ยของอนุภาค (Mean Lifetime) เท่ากับ  $(1.2380 \pm 0.0020) \times 10^{-8}$  วินาที โดยมีมวลของอนุภาคเคออนบวกและเคออนลบ ( $K^+, K^-$ ) มีค่าเท่ากับ  $493.677 \pm 0.016 \text{ MeV}/c^2$  [3] และ มวลของอนุภาคเคออนและแอนติ-เคออนธรรมชาติ ( $K^0, \bar{K}^0$ ) มีค่าเท่ากับ  $497.611 \pm 0.013 \text{ MeV}/c^2$  [4] นอกจากนี้ อนุภาคเคออนยังคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากอนุภาคชนิดอื่นๆ เนื่องจากอนุภาคเคออนมีการเกิดแบบอันตรกิริยาแบบแรง (Strong Interaction) ที่ระดับพลังงานสูงแต่มีการสลายตัวแบบอันตรกิริยาแบบอ่อน (Weak Interaction) ที่ระดับพลังงานต่ำซึ่งไม่สอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์พลังงาน จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาวัฏจักรการเกิดและคุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคเคออนเป็นพิเศษในระดับเหนือสัมพัทธภาพ (Ultra – Relativistic) ซึ่งมีความร้อนและความหนาแน่นสูงอันเนื่องมาจากการชนของไอออนของธาตุหนักที่ความเร็วของสสารหรืออนุภาคที่พุ่งชนกันมีความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วของแสง นอกจากนี้อนุภาคเคออนยังเป็นอนุภาคที่สามารถพบได้ในบริเวณแกนกลางของดาวฤกษ์ที่มีพลังงานและแรงดันสูงจนสสารไม่สามารถคงตัวเป็นอะตอมได้ เกิดเป็นสถานะที่เรียกว่า ควาร์กกลูออนพลาสมา (Quark Gluon Plasma) ในสถานะดังกล่าว ควาร์กจะแตกตัวออกจากกันเนื่องจากพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างควาร์กมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่กระตุ้นให้ควาร์กแตกตัวออกจากกัน ซึ่งเป็นสถานะที่แรกเริ่มของเอกภพหลังจากมีการระเบิดของบิกแบง โดยในขั้นถัดมาเมื่อพลังงานในระบบลดต่ำลงจนถึงจุดที่มีค่าน้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างควาร์ก ควาร์กจึงสามารถกลับมารวมตัวกันใหม่ได้อีกครั้ง สถานะนี้ถูกเรียกว่า ฮาดรอนไนเซชัน (Hadronization) ในขั้นตอนนี้จะพบอนุภาคมูลฐานต่างๆ เกิดขึ้นรวมไปถึงอนุภาคเคออนที่เราต้องการที่จะศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ [5, 6]

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดของอนุภาคเคออนบวก เคออนลบ โปรตอนและแอนติโปรตอน ( $K^+, K^-, p$  และ  $\bar{p}$ ) ที่เกิดจากการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับอนุภาคโปรตอน ( $p + p$ ) ที่ระดับพลังงาน 7 TeV และการชนกันของทองคำกับทอง ( $Au + Au$ ) ที่ระดับพลังงาน 130 GeV นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการศึกษาและทำนายอัตราการเกิดของผลผลิตจากอนุภาคเคออนบวกและเคออนลบที่เกิดการรวมตัวกับอนุภาคโปรตอนและแอนติ-โปรตอนกลายเป็นเคออนนิกนิวไคลด์ ( $K^-p, K^+\bar{p}, K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}\bar{p}$ ) โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนและอะตอมของทองโดยใช้แบบจำลอง The parton and hadron cascade model (PACIAE) [7] ในการจำลองการเกิดของอนุภาคเคออนบวกและเคออนลบ

โดยนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงจากห้องปฏิบัติการ ALICE และ STAR และใช้แบบจำลอง PACIAE + DCPC [8] ในการศึกษาและทำนายการเกิดของเคออนนิควิลด์

## 1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเกิดของอนุภาคเคออนบวก เคออนลบ โปรตอนและแอนติโปรตอน
2. เพื่อทดสอบและปรับปรุงแบบจำลอง PACIAE + DCPC ให้มีประสิทธิภาพในการจำลองการเกิดของอนุภาคเคออนบวก เคออนลบ โปรตอนและแอนติโปรตอนให้ได้ผลใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงจากห้องปฏิบัติการมากที่สุด
3. เพื่อศึกษาและทำนายการเกิดของเคออนนิควิลด์  $K^-p$ ,  $K^+\bar{p}$ ,  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}\bar{p}$

## 1.3 ความสำคัญของการวิจัย

อนุภาคเคออนบวกและเคออนลบเป็นอนุภาคที่มีความแตกต่างจากอนุภาคชนิดอื่นๆ ในขั้นตอนการรวมตัวกันของควาร์กที่เป็นองค์ประกอบของอนุภาคเคออนบวกและเคออนลบ โดยอนุภาคเคออนบวกเกิดขึ้นโดยใช้พลังงานในการรวมตัวกันของอัปควาร์ก กับ แอนติ-สเตรนจ์ควาร์ก แบบอันตรกิริยาแบบแรงแต่มีการสลายตัวแบบอันตรกิริยาแบบอ่อน ส่วนอนุภาคเคออนลบเกิดขึ้นโดยใช้พลังงานในการรวมตัวกันของสเตรนจ์ควาร์ก กับ แอนติ-อัปควาร์ก แต่มีการสลายตัวแบบอันตรกิริยาแบบอ่อนเช่นเดียวกับอนุภาคเคออนบวกซึ่งเป็นการเกิดและสลายตัวที่อยู่นอกเหนือจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน ทำให้อนุภาคเคออนบวกและเคออนลบถูกเรียกว่า อนุภาคแปลก (Exotic Particle) นักวิทยาศาสตร์จึงได้ทำการวิจัยและศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคเคออนเพื่อศึกษาหาคำตอบ และไขข้อสงสัย ถึงสาเหตุของวิธีการเกิดของอนุภาคเคออนที่แตกต่างจากอนุภาคชนิดอื่น โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งในการศึกษาการเกิดของอนุภาคเคออนบวกและเคออนลบรวมถึงการทำนายเคออนนิควิลด์  $K^-p$ ,  $K^+\bar{p}$ ,  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}\bar{p}$  ที่เป็นผลผลิตของอนุภาคเคออนบวกและเคออนลบ

การศึกษานิวเคลียสเคออนบวก เคออนลบ และ การทำนายเคออนนิควิลด์  $K^-p$ ,  $K^+\bar{p}$ ,  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}\bar{p}$  ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้แบบจำลอง PACIAE + DCPC แทนที่การทดลองโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคจากห้องปฏิบัติการเนื่องจากเครื่องเร่งอนุภาคมีราคาสูง ใช้เวลานานในเตรียมการทดลอง และใช้บุคลากรในการปฏิบัติการจำนวนมาก แต่การใช้แบบจำลอง PACIAE + DCPC มีราคาในการปฏิบัติการถูกกว่าเครื่องเร่งอนุภาค ใช้เวลาในการเตรียมการทดลองที่น้อยกว่าเครื่องเร่งอนุภาค และมีความยืดหยุ่นในการปรับรูปแบบของการชนกันของอนุภาครวมไปถึงค่าระดับพลังงานในการชนในแต่ละครั้งโดยแบบจำลอง DCPC ได้ถูกพัฒนาขึ้นให้มีความสามารถในการจำลองเคออนนิควิลด์  $K^-p$ ,  $K^+\bar{p}$ ,  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}\bar{p}$  รวมถึงสามารถวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากที่ได้จากการ



ทำนายการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$ ,  $K^+p$ ,  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  ได้ พร้อมทั้งยังสามารถนำไปปรับแต่งและต่อยอดโปรแกรมสำหรับเคออนนิกนิวไคลด์ชนิดต่างๆได้ในอนาคต

#### 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาอนุภาคเคออนบวก เคออนลบ โปรตอนและแอนติโปรตอนที่เกิดขึ้นหลังจากการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอน ที่ระดับพลังงาน 7 TeV โดยใช้แบบจำลอง PACIAE เป็นเครื่องมือในการจำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอน พารามิเตอร์ตกกระทบ 0 - 3 fm ค่าแรพิดิตี (Rapidity) ( $y$ ) ที่  $|y| < 0.5$  โมเมนตัมตามขวางของอนุภาค ( $p_T$ ) ที่  $0.2 < p_T < 6.0$  GeV/c และพารามิเตอร์  $parj(1) = 0.085$ ,  $parj(2) = 0.305$  และ  $parj(3) = 0.450$
2. ศึกษาอนุภาคเคออนบวก เคออนลบ โปรตอนและแอนติโปรตอนที่เกิดขึ้นหลังจากการชนกันของทองกับทองที่ระดับพลังงาน 130 GeV โดยใช้แบบจำลอง PACIAE เป็นเครื่องมือในการจำลองการชนกันของทองกับทอง พารามิเตอร์ตกกระทบ 0 - 3 fm ค่าแรพิดิตี  $|y| < 1.0$  โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคที่  $0.2 < p_T < 1.0$  GeV/c และพารามิเตอร์  $parj(1) = 0.180$ ,  $parj(2) = 0.390$  และ  $parj(3) = 0.650$
3. ทำนายอัตราการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  จากการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอน ที่ระดับพลังงาน 7 TeV โดยใช้แบบจำลอง PACIAE + DCPC เป็นเครื่องมือในการทำนายเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  ที่มีมวลของแต่ละเคออนนิกนิวไคลด์ = 1.425 GeV มวลที่เปลี่ยนแปลงของเคออนนิกนิวไคลด์  $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$  GeV รัศมีของเคออนนิกนิวไคลด์ = 1.36 fm ที่จำนวนการชนกันของอนุภาค (Event) ตั้งแต่ 100,000 - 5,000,000 ครั้ง และโมเมนตัมสัมพัทธ์ (Relative Momentum)  $1.00 \leq \Delta p \leq 2.00$  GeV/c ที่จำนวนการชนกันของอนุภาค 1,000,000 ครั้ง
4. ทำนายอัตราการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  จากการชนกันของทองกับทอง ที่ระดับพลังงาน 130 GeV โดยใช้แบบจำลอง PACIAE + DCPC เป็นเครื่องมือในการทำนายเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  ที่มีมวลของแต่ละเคออนนิกนิวไคลด์ = 2.352 GeV มวลที่เปลี่ยนแปลงของเคออนนิกนิวไคลด์  $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$  GeV รัศมีของเคออนนิกนิวไคลด์ = 1.90 fm ระยะทางนับจากศูนย์กลางของเคออนนิกนิวไคลด์ (Centrality) = 0 - 6 % ที่จำนวนการชนกันของอนุภาค (Event) ตั้งแต่ 5,000 - 30,000 ครั้ง

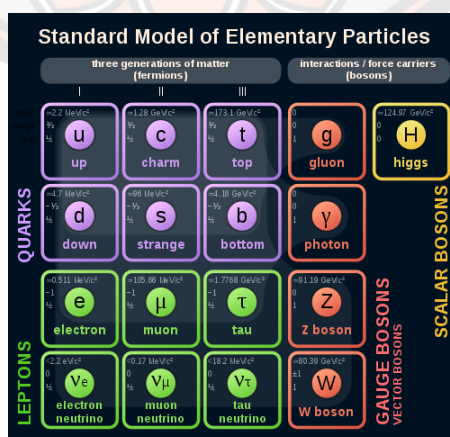
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและแบบจำลองที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ทฤษฎีและแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทดลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV เพื่อศึกษาการเกิดของเคออนนิควิลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  และศึกษาการชนกันของทอว์กับทอว์ที่ระดับพลังงาน 130 GeV เพื่อศึกษาการเกิดของเคออนนิควิลด์  $K^-pp$  และ  $K^+pp$

#### 2.1 อนุภาคมูลฐาน

เป็นอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของอนุภาคอื่นทั้งหมดไม่สามารถถูกทำให้เล็กลงได้อีก โดยอนุภาคมูลฐานนั้นมีหลายชนิดจึงได้มีการจัดจำแนกชนิดของอนุภาคมูลฐาน เรียกว่า แบบจำลองมาตรฐาน (Standard Model) แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับจากนักฟิสิกส์อนุภาคโดยทั่วไป โดยมาจากทฤษฎีที่มีการทดสอบและยืนยันถึงความถูกต้องจากการทดลองมากมาย และสามารถนำไปอธิบายหรือทำนายปรากฏการณ์ต่างๆ ในระดับอนุภาคมูลฐานได้อย่างแม่นยำ แบบจำลองมาตรฐานจึงถือได้ว่าเป็นแม่แบบพื้นฐานในการศึกษา ค้นคว้า วิจัย ต่อยอด ความรู้ในสาขานี้ตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน โดยอนุภาคมูลฐานในทฤษฎี Standard Model ซึ่งมี 3 ประเภทใหญ่ ได้แก่ ควาร์ก เลปตอน และ โบซอน ดังภาพ 1



ภาพ 1 แสดงควาร์กที่เป็นองค์ประกอบของ Standard Model [9]

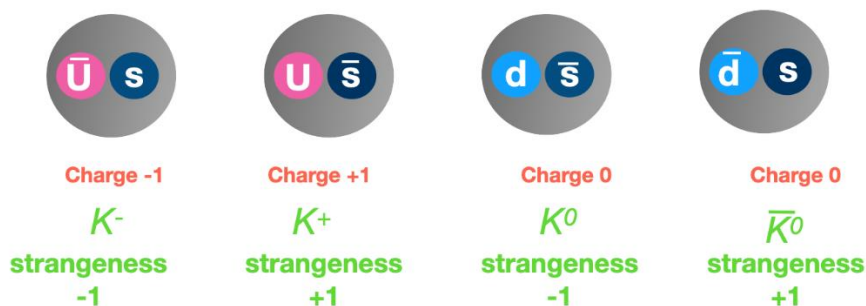
ควาร์ก คือ ชื่อเรียกอนุภาคมูลฐานที่เป็นหน่วยเล็กที่สุดของสสารตามทฤษฎีใหม่ขององค์ประกอบของสสาร ควาร์กถูกค้นพบจากการทดลองยิงอนุภาคโปรตอนชนอนุภาคโปรตอนแล้วได้ผลผลิตเป็นควาร์ก ควาร์กไม่สามารถถูกแยกจากกันเป็นอิสระ เนื่องจากมีกลูออน (Gluon) ที่นำพาอันตรกิริยาแบบแรงทำหน้าที่เชื่อมควาร์กเข้าด้วยกัน ปัจจุบันมี การค้นพบควาร์ก 6 ตัว คือ Up Quark, Down Quark, Strange Quark, Charmed Quark, Bottom Quark และ Top Quark โดยอนุภาคเคออนเกิดจากการรวมกันของ Anti-Strange Quark กับ Up Quark หรือ Strange Quark กับ Anti-Up Quark อนุภาคโปรตอนเกิดจากการรวมกันของ Up Quark 2 ตัว รวมกับ Down Quark 1 ตัว

## 2.2 อนุภาคเคออน (K)

การเกิดอนุภาคเคออนเกิดจากการรวมตัวกันของ Strange Quark หรือ Anti-Strange Quark รวมเข้ากับ Up Quark หรือ Down Quark ดังภาพ 2 โดยอนุภาคเคออนแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ  $K^-$ ,  $K^+$ ,  $K^0$  และ  $\bar{K}^0$  อนุภาคเคออนถูกเรียกว่า อนุภาคแปลก (Strange Particles) เพราะคุณสมบัติที่ไม่ปกติทั้งในกระบวนการเกิด และกระบวนการสลายตัว โดยคุณสมบัติที่ผิดปกติจากอนุภาคชนิดอื่นโดย อนุภาคแปลกจะเกิดเป็นคู่เสมอ ตัวอย่างเช่น เมื่ออนุภาคโปรตอน 1 ตัวชนกับอนุภาคโปรตอนอีก 1 ตัว จะได้ผลผลิตเป็นอนุภาคแปลกที่เป็นกลางขึ้น 2 ตัวเสมอ คุณสมบัติแปลกอย่างที่สองของอนุภาคชนิดนี้คือ อนุภาคแปลกจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้อันตรกิริยาแบบแรง (Strong Interaction) แต่มีการสลายตัวโดยใช้อันตรกิริยาแบบอ่อน (Weak Interaction) [11, 12] ซึ่งแตกต่างจากอนุภาคปกติกล่าวคือ เมื่ออนุภาคถูกสร้างขึ้นด้วยแรงแบบใดก็ตาม ต้องใช้แรงแบบเดิมในการสลายตัวเท่านั้น โดยคุณสมบัติของอนุภาคเคออน ดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงองค์ประกอบและมวลของอนุภาค  $K^-$ ,  $K^+$ ,  $K^0$  และ  $\bar{K}^0$

อนุภาค	องค์ประกอบ	มวล (MeV)
$K^-$	$s + \bar{u}$	$493.677 \pm 0.013$
$K^+$	$\bar{s} + u$	$493.677 \pm 0.013$
$K^0$	$\bar{s} + d$	$497.648 \pm 0.022$
$\bar{K}^0$	$s + \bar{d}$	$497.648 \pm 0.022$



ภาพ 2 องค์ประกอบอนุภาคเคออน [10]

### มวลยังผลของอนุภาคเคออน (Effective mass of kaon particle)

ในปี ค.ศ. 1980 ถึงช่วงต้นของปี 1990 ได้มีการคำนวณพลังงานศักย์เฉลี่ยของอนุภาค  $K^-$  มีค่า  $-0.10$  GeV และอนุภาค  $K^+$  มีค่า  $+0.02$  GeV โดยสามารถคำนวณ The effective chiral Lagrangian ได้ดังสมการ

$$m_K^* = \sqrt{m_K^2 - \frac{\Sigma_{KN}}{f_2\pi} \rho_s + V_\mu V^\mu} \quad (2.2.1)$$

โดย  $m_K^*$  คือ มวล effective ของอนุภาคเคออน (GeV)  
 $m_K$  คือ มวล bare ของอนุภาคเคออน = 0.493 GeV  
 $f_2\pi$  คือ ค่าคงที่การสลายตัวของอนุภาคเคออน = 93 MeV  
 $\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของสเกลาร์แบรียออน ( $\text{fm}^{-3}$ )  
 $V_\mu$  คือ ศักย์เวกเตอร์ (GeV)  
 $\Sigma_{KN}$  คือ เคออน-นิวคลีออนในเทอมของ  $\Sigma$

มวลยังผลของอนุภาค  $K^-$  มีค่า  $0.493 - 0.10 = 0.393$  GeV และมวลยังผลของอนุภาค  $K^+$  มีค่า  $0.493 + 0.02 = 0.513$  GeV จาก The effective chiral Lagrangian [13]

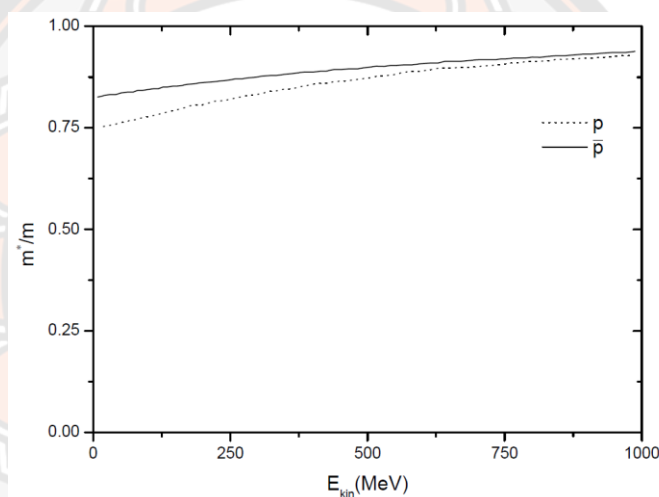
### 2.3 อนุภาคโปรตอน (p)

โปรตอน (Proton) คืออนุภาคมูลฐานของอะตอม เป็นองค์ประกอบของนิวเคลียสในอะตอม โปรตอนจะรวมตัวกับนิวตรอนอยู่ตรงกลางของนิวเคลียส เรียกว่า นิวคลีออน โปรตอนมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นบวกมีค่าประจุเท่ากับ  $+1$  มีมวลอยู่ที่  $938.272 \text{ MeV}/c^2$  และมีขนาดของ

ประจุ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมป์ จำนวนโปรตอนที่มีอยู่ในอะตอมจะมีจำนวนเท่ากับอิเล็กตรอนในโมเลกุลที่เสถียร โปรตอนมีสัญลักษณ์เป็น  $p$  หรือ  $p^+$  มีคุณสมบัติทางประจุไฟฟ้าเป็นบวก โปรตอนมีค่าชีวิตเฉลี่ย (Mean Life Time) มากกว่า  $2.1 \times 10^{29}$  ปี ที่ระดับพลังงานและอุณหภูมิสูง อนุภาคโปรตอนจะไม่จับกับนิวคลีออนหรืออิเล็กตรอนเราเรียกโปรตอนนี้ว่า โปรตอนอิสระ เป็นอนุภาคที่เสถียรซึ่งจะไม่สลายตัวไปเป็นอนุภาคอื่นตามธรรมชาติ [14, 15, 16]

### มวลยังผลของอนุภาคโปรตอนและแอนติโปรตอน

มวลยังผลของโปรตอนและแอนติโปรตอนที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมและพลังงาน ณ จุดกึ่งกลางของโปรตอนกับแอนติโปรตอน ดังภาพ 3



ภาพ 3 แสดงมวลยังผลของโปรตอนและแอนติโปรตอนในรูปของพลังงานจลน์ในสารนิวเคลียร์ที่ความหนาแน่นอิ่มตัว [17]

## 2.4 นิวไคลด์ของอนุภาคแปลกและเคออนิกนิวไคลด์ (Exotic and Kaonic nuclei)

นิวไคลด์ของอนุภาคแปลก คือ นิวไคลด์ที่มีอัตราส่วนของนิวตรอนต่อโปรตอนมากกว่าหรือน้อยกว่านิวไคลด์ที่พบได้ตามธรรมชาติ การศึกษาสารนิวเคลียร์ในสภาวะรุนแรงจนนิวเคลียสเกิดความแตกต่างจากนิวเคลียสในธรรมชาติ เช่น อนุภาคแปลกในสภาวะที่อุณหภูมิ และความดันสูงอย่างสุดขีด (มากกว่าสภาวะปกติ 2 - 3 เท่า) อนุภาคแปลกมีหลากหลายชนิด เช่น เคออนิกไฮโดรเจน (Kaonic hydrogen) ไพออนิกไฮโดรเจน (Pionic hydrogen) และเคออนิกนิวไคลด์ (Kaonic nuclei) ซึ่งมีความสำคัญต่อการศึกษาในทางฟิสิกส์นิวเคลียร์ และฟิสิกส์ดาราศาสตร์ เนื่องจากอนุภาคแปลกสามารถพบได้ในดาวฤกษ์ในระบบสุริยะ

เคออนนิกนิวไคลด์ คือ นิวไคลด์ของอนุภาคแปลกที่มีอนุภาคเคออนลบจับตัวกับอนุภาคโปรตอนหรืออนุภาคนิวตรอนตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป จากการสังเกตขนาด และพลังงานระหว่างอนุภาคเคออนกับนิวเคลียสของเคออนนิกนิวไคลด์มีความใกล้เคียงกับไฮโดรเจน แต่ในระยะที่สั้นมากๆ ระหว่างอนุภาคเคออนกับนิวเคลียสจะมีค่าพลังงานเท่ากับศูนย์ ความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคเคออนและนิวเคลียสสามารถศึกษาได้จากความสัมพันธ์ด้านล่างนี้

## 2.5 $K^-p$ bound state

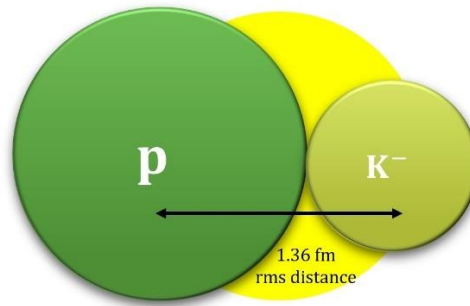
ในทางทฤษฎีการมีอยู่ของเคออนนิกนิวไคลด์เกิดจากการทำนายถึงความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคเคออนกับนิวเคลียสซึ่งเรียกว่า อันตรกิริยาของ  $\bar{K}N$  โดยมีความเกี่ยวข้องกับอนุภาค  $\Lambda(1405)$  ตามสมมติฐานของ Ansatz กล่าวไว้ว่าการสั่นพ้อง (Resonance) ของ  $\Lambda(1405)$  คือ bound state ของ  $K^-p$  ที่มีพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding Energy) มีค่า  $B_K = 27$  MeV และ ความกว้างของการกระจายของอนุภาคหลังจากการชนกันของอนุภาค (Width) มีค่า  $\Gamma = 40$  MeV นักวิทยาศาสตร์ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับ  $\Lambda(1405)$  ซึ่งท้ายที่สุดได้มีการตีความไว้ว่า  $\Lambda(1405)$  คือ bound state ของ อันตรกิริยา  $\bar{K}N$  ที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวที่ 27 MeV [18]

### โครงสร้างของ $K^-p$

โครงสร้างของ  $K^-p$  ที่ได้จากการคำนวณมีโครงสร้างดังภาพ 4 โครงสร้างมีลักษณะคล้ายกับอะตอมของไฮโดรเจนโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคเคออนกับอนุภาคโปรตอน

$$\Lambda^* = K^-p \quad (2.5.1)$$

โดยอนุภาคเคออน 1 ตัวได้ยึดเหนี่ยวเข้ากับอนุภาคโปรตอน 1 ตัว มีอันตรกิริยาแบบแรงเป็นเครื่องยึดเหนี่ยวอนุภาคทั้ง 2 เข้าไว้ด้วยกันที่พลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 27 MeV และระยะวัดจากจุดกึ่งกลางของอนุภาคทั้ง 2 มีค่าเท่ากับ 1.36 fm



ภาพ 4 โครงสร้างของคอนนิกนิวไคลด์  $K^-pp$  [19]

## 2.6 $K^-pp$ bound state

ในทางทฤษฎีการมีอยู่ของคอนนิกนิวไคลด์เกิดจากการทำนายถึงความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคเคออนกับนิวเคลียส คือ อันตรกิริยาของ  $\bar{K}N$  ดังสมการ 2.6.1

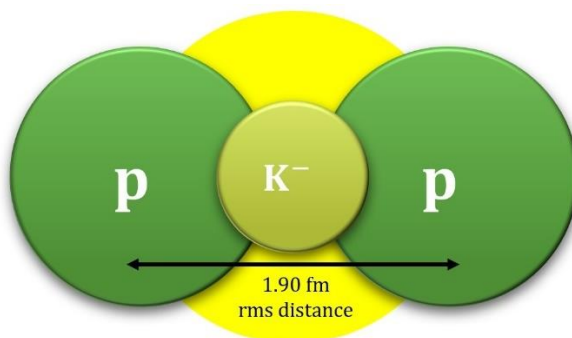
$$p + p \rightarrow K^+ + \Lambda^* + p$$

$$p + p \rightarrow K^+ + \Lambda^* p \quad (2.6.1)$$

$$p + p \rightarrow K^+ + K^- pp$$

โดยการทำนายกล่าวว่า bound state ของ  $K^-pp$  เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของ  $\Lambda^*$  กับ  $p$  อิสระ 1 ตัวโดยที่  $\Lambda^*$  คือ  $K^-p$  ทำให้เกิดขึ้นเป็นคอนนิกนิวไคลด์  $K^-pp$  โครงสร้างของ  $K^-pp$  มีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีอนุภาคเคออนลอบอยู่บริเวณศูนย์กลางของอะตอมทำให้อนุภาคเคออนมีบทบาทสำคัญในการสร้างพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแกร่งกับโปรตอนอื่นๆ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อันตรกิริยาแบบแรงระหว่างอนุภาคเคออนกับอนุภาคโปรตอนโดยรอบเป็นจุดสำคัญที่ทำให้เกิด  $K^-pp$

นอกจากนี้การทำนายที่สองเกี่ยวกับการเกิด  $K^-pp$  กล่าวว่า  $K^-pp$  อาจเกิดขึ้นจากจับตัวกันของอนุภาคเคออนกับอนุภาคโปรตรอนอิสระโดยมีอันตรกิริยาแบบแรงเป็นเครื่องยึดเหนี่ยวอนุภาคทั้งหมดเข้าไว้ด้วยกัน กล่าวคือ  $K^-pp$  อาจเกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของอนุภาคอิสระ 3 ตัว ได้แก่  $K^-$  1 ตัวกับ  $p$  2 ตัว ซึ่งไม่ได้เกิดจากการรวมตัวกันของ  $\Lambda^*$  กับ  $p$  ดังสมการ 2.6.1 แต่อย่างไร



ภาพ 5 โครงสร้างของคอนนิกนิวไคลด์  $K^-pp$  [20]

## 2.7 $\Lambda(1405)$

จากการศึกษาอนุภาคแปลก ( $K$ ,  $K^-$ ,  $K^0$ ,  $\bar{K}^0$ ) ในช่วงเริ่มแรกนักวิจัยสันนิษฐานว่า  $\Lambda(1405)$  คือ  $K^-p$  ที่พลังงานยึดเหนี่ยว  $B_K = 27$  MeV และความกว้าง  $\Gamma = 40$  MeV [21, 22, 23] จากการแลกเปลี่ยนเมซอน [24] และปฏิกิริยาแบบแรงของ  $\bar{K}N$  จาก chiral SU(3) เรียกว่า Chiral-strong model [25] นิวเคลียสของคอนนิกนิวไคลด์ ที่เกิดขึ้นจาก strange quark ที่พบได้มากที่สุดคือ  $K^-p$  โดยมีแรงยึดเหนี่ยวทางแม่เหล็กไฟฟ้าในนิวเคลียสระหว่างโปรตอนและแอนติคอน ในการทดลองหาจำนวนของ  $K^-p$  [26] พบว่ามีค่าสอดคล้องกับ  $\Lambda(1405)$  ที่อยู่ในรูปของ quasi-bound state ของ  $K^-p$  และยังพบว่า  $K^-$  ถูกดูดกลืนโดย  $^3\text{He}$  และ  $^4\text{He}$  โดย  $K^-p$  มีมวลและความกว้างของ  $M \sim 1405.5$  MeV และ  $\Gamma \sim 24$  MeV ตามลำดับ นอกจากนี้รังสี X rays ของ  $K^-p$  ยังสามารถตรวจวัดได้จากการทดลองของ KEK [27] โดย KEK ศึกษาเกี่ยวกับสถานะพื้นฐาน (bound state) ของคอนนิกนิวไคลด์ โดยใช้  $\Lambda(1405)$  ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 27 MeV [27]  $\Lambda(1405)$  มีการสลายตัวอยู่ทั้งหมด 4 แบบ คือ  $\Sigma\pi$ ,  $\Lambda\gamma$ ,  $\Sigma^0\gamma$  และ  $\bar{K}N$  [28]

ในทางทฤษฎี  $\Lambda(1405)$  ถูกศึกษาใน chiral SU(3) [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38] โดยนักวิทยาศาสตร์ได้ศึกษาโครงสร้าง  $\Lambda(1405)$  เปรียบเทียบกับ  $N(1535)$  [39] อย่างไรก็ตาม  $\Lambda(1405)$  อธิบายได้ด้วยสถานะไดนามิกของการกระเจิงของเมซอน-แบรีออน ในขณะที่  $N(1535)$  ประกอบไปด้วยควาร์กที่มีขนาดใหญ่ 3 ตัว

โครงสร้างของ  $\Lambda(1405)$  ยังคงไม่เป็นที่แน่ชัดในปัจจุบัน [40] จากหัวข้อ “The  $\Lambda(1405)$ ” โดย Dalitz ใน RPP Edition 2000 [41] แสดงให้เห็นถึง  $\Lambda(1520)$  ถูกศึกษาโดยมีพื้นฐานมาจาก  $\bar{K}N$  กับ  $\Lambda(1405)$  นอกจากนี้ พลังงานในบริเวณที่ศึกษาการกระเจิงของ  $\Lambda(1405)$  จากห้องปฏิบัติการ [42] พบว่าการสั่นพ้องของ  $\Lambda(1405)$  เกิดขึ้นจากการกระเจิงของเมซอน - แบรีออน [43, 44, 45] โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\bar{K}N$  และ  $\bar{K}NN$  กับ  $\Lambda(1405)$



## 2.8 โมเมนตัมสัมพัทธ์ (Relative momentum)

โปรแกรม PACIAE+DCPC ในการศึกษาการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนและทอว์กับทอว์ที่พลังงาน 7 TeV และ 130 GeV ตามลำดับ เพื่อหาอัตราการเกิดเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$ ,  $K^+p$ ,  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  ในขั้นตอนของการจำลองการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์ โปรแกรม PACIAE+DCPC มีปัจจัยในการจำลองเคออนนิกนิวไคลด์ 2 แบบ คือ

1. ระยะห่างระหว่างแต่ละอนุภาคในเคออนนิกนิวไคลด์ โดยระยะห่างของเคออนกับโปรตอนในเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p \sim 1.36$  fm ระยะห่างของเคออนกับโปรตอนใน  $K^-pp$  และ  $K^+pp \sim 1.35$  fm ระยะห่างของโปรตอนกับโปรตอนใน  $K^-pp$  และ  $K^+pp \sim 1.90$  fm ดังภาพ 4 และ 5

2. มวลรวมของอนุภาคเคออนกับโปรตอนในเคออนนิกนิวไคลด์แต่ละตัว โดยมวลของ  $K^-p$  และ  $K^+p$  มีมวลอยู่ที่  $\sim 1425.5$  MeV มวลของ  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  มีมวลอยู่ที่  $\sim 2352$  MeV เนื่องจากโปรแกรม PACIAE+DCPC มีปัจจัยในการจำลองการเกิดเคออนนิกนิวไคลด์เพียง 2 แบบ ดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งอาจจะไม่เพียงพอสำหรับการตรวจวัดจำนวนของเคออนนิกนิวไคลด์ที่เกิดขึ้นในระบบ เราจึงได้เพิ่มโมเมนตัมสัมพัทธ์เพื่อเป็นปัจจัยที่ 3 ทำให้การจำลองอัตราการเกิดเคออนนิกนิวไคลด์มีความแม่นยำมากขึ้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การเพิ่มโมเมนตัมสัมพัทธ์ยังคงมีขอบเขตการใช้งานเพียง เคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  จากโปรแกรม PACIAE+DCPC โดยวิธีการคำนวณโมเมนตัมสัมพัทธ์ของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.8.1

$$\Delta p = \sqrt{(p_{Kx} - p_{px})^2 + (p_{Ky} - p_{py})^2 + (p_{Kz} - p_{pz})^2} \quad 2.8.1$$

- เมื่อ  $\Delta p$  คือ โมเมนตัมสัมพัทธ์ของเคออนนิกนิวไคลด์ (GeV/c)  
 $p_{Kx}$  คือ โมเมนตัมของอนุภาคเคออนในแนวแกน x (GeV/c)  
 $p_{px}$  คือ โมเมนตัมของอนุภาคโปรตอนในแนวแกน x (GeV/c)  
 $p_{Ky}$  คือ โมเมนตัมของอนุภาคเคออนในแนวแกน y (GeV/c)  
 $p_{py}$  คือ โมเมนตัมของอนุภาคโปรตอนในแนวแกน y (GeV/c)  
 $p_{Kz}$  คือ โมเมนตัมของอนุภาคเคออนในแนวแกน z (GeV/c)  
 $p_{pz}$  คือ โมเมนตัมของอนุภาคโปรตอนในแนวแกน z (GeV/c)

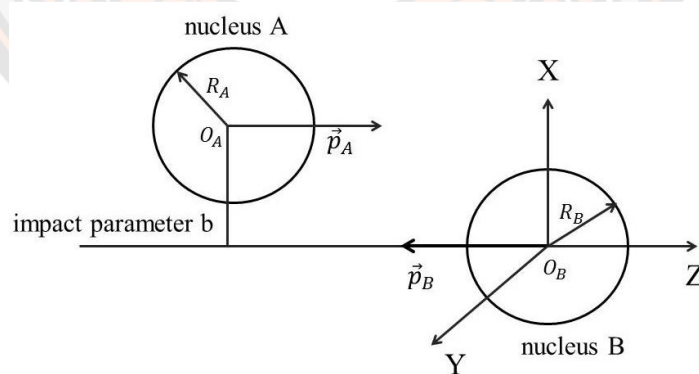
## 2.9 แบบจำลอง PACIAE

แบบจำลอง Parton and hadron cascade model (PACIAE) อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลอง PYTHIA 6.4 [46] โดยใช้ทฤษฎีมอนติคาร์โลในการอธิบายความสัมพันธ์ของแต่ละอนุภาคที่ได้จากการชนกันของฮาดรอนกับฮาดรอนในระดับที่เรียกว่าฮาดรอนิก ในแบบจำลองมีการชนกันของอนุภาคแบบสมมาตรและกระจายอนุภาคสำหรับการชนรอบศูนย์กลางของเป้าหมายโดยมีการระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ ( $g$ ) ของอนุภาคทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ณ จุดศูนย์กลางสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์โดยอ้างอิงได้จากพารามิเตอร์ตกกระทบ (Impact parameter) ( $b$ ) โดยความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคกับพารามิเตอร์ตกกระทบสามารถคำนวณได้จาก

$$b = \sqrt{g} b_{\max} \quad (2.9.1)$$

$$b_{\max} = R_A + R_B \quad (2.9.2)$$

โดย  $b_{\max}$  คือ ระยะห่างระหว่างรัศมี ( $R$ ) ของนิวเคลียสของทั้ง 2 ตัว ณ ศูนย์กลางการชนมีค่าพารามิเตอร์ตกกระทบ เท่ากับ 0 และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบจะยิ่งมีค่ามากขึ้นเมื่อการชนออกห่างจากจุดศูนย์กลาง ระยะห่างระหว่างรัศมีคำนวณได้จาก  $R = r_0 A^{1/3}$  โดย  $r_0$  คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของรัศมีของพารามิเตอร์ (rms) และ  $A$  คือ เลขอะตอมของธาตุที่ชนกัน



ภาพ 6 พารามิเตอร์ตกกระทบในการชนกันของนิวเคลียส A กับ นิวเคลียส B

พารามิเตอร์ตกกระทบในการชนกันของนิวเคลียสชนนิวเคลียสจะเกิดการซ้อนทับกันของนิวเคลียสทั้งสอง โดยเราเรียกการซ้อนทับกันของนิวเคลียสนี้ว่า  $N_{\text{part}}$  และเรียกนิวเคลียสด้านนอกว่า  $N_{\text{spec}}$  โดย  $N_{\text{part}}$  [47] สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$N_{part}(b) = N_{part}^A(b) + N_{part}^B(b), \quad (2.9.3)$$

$$N_{part}^A(b) = \rho_A \int dV \theta\left(R_A - \left(x^2 + (b-y)^2 + z^2\right)^{1/2}\right) \theta\left(R_B - \left(x^2 + y^2\right)^{1/2}\right), \quad (2.9.4)$$

$$N_{part}^B(b) = \rho_B \int dV \theta\left(R_B - \left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{1/2}\right) \theta\left(R_A - \left(x^2 + (b-y)^2\right)^{1/2}\right), \quad (2.9.5)$$

$$\text{โดย } \theta(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.9.6)$$

$\rho_A$  และ  $\rho_B$  คือ ความหนาแน่นของนิวเคลียส A และ B ตามลำดับ จากข้อมูลของห้องปฏิบัติการ STAR ได้รายงานถึงจำนวนนิวเคลียสที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง Glauber [48, 49] ความหนาแน่นของนิวเคลียสปกติ มีค่า  $\rho_A = \rho_B = \rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$

$N_{spec}$  สามารถคำนวณได้จาก

$$N_{spec}^A = A - N_{part}^A, \quad (2.9.7)$$

$$N_{spec}^B = B - N_{part}^B, \quad (2.9.8)$$

การชนกันแบบนิวคลีออน-นิวคลีออนแบบสมมาตรจะเกิดการกระจายของอนุภาคแบบสุ่มในพื้นที่ทับซ้อน ส่วนในมุมมองจากด้านภายนอกเข้ามาจะมองเห็นเป็นการกระจายแบบสม่ำเสมอตามแบบของ Woods-Saxon มีทั้งหมด  $4\pi$  แบบ

$$\rho(r) = \rho_0 \left(1 + \exp\frac{r-R}{d}\right)^{-1}, \quad (2.9.9)$$

$$f(\theta, \phi) = \frac{1}{4\pi}, \quad (2.9.10)$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะการกระจาย มีค่าประมาณ 0.54 fm สำหรับการกระจายของอนุภาคและหลักการชนกันของอนุภาค สันนิษฐานว่าอนุภาคเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับโมเมนตัมในขณะที่อนุภาคอื่นๆ มีการชนกันอย่างต่อเนื่อง

$$\vec{r}_i = \vec{R}_i + \vec{\beta}_i(t - T_i), \quad (2.9.11)$$

โดย  $\vec{R}_i$  และ  $T_i$  แทนตำแหน่งตั้งสี่ของอนุภาค,  $\vec{\beta}_i$  คือความเร็วของอนุภาค  $i$ -th ณ จุดล่าสุดที่เกิดการชนกันของอนุภาค, ภาพหน้าตัดเฉลี่ย ( $D$ ) ระหว่างอนุภาค  $i$  และ  $j$  สามารถคำนวณได้จาก

$$D \leq \sqrt{\frac{\sigma_{total}}{\pi}}, \quad (2.9.12)$$

โดย  $\sigma_{total}$  คือ ภาพตัดขวางเฉลี่ยในหน่วย  $\text{fm}^2$  การคำนวณภาพหน้าตัดเฉลี่ยระหว่างอนุภาค  $i$  และ  $j$  ในระบบศูนย์กลางมวล (center of mass system, cms)

$$\vec{r}_i^* = \vec{R}_i^* + \vec{\beta}_i^*(t^* - T_i^*), \quad (2.9.13)$$

$$\vec{r}_j^* = \vec{R}_j^* + \vec{\beta}_j^*(t^* - T_j^*), \quad (2.9.14)$$

ระยะห่างสัมพัทธ์กำลังสองระหว่าง  $i$  และ  $j$  เขียนได้เป็น

$$d^2(t^*) = (\Delta \vec{R}^*)^2 + 2\Delta \vec{R}^* \Delta \vec{\beta}^* \left[ t^* - \frac{1}{\Delta \vec{\beta}^*} (\vec{\beta}_j^* T_j^* - \vec{\beta}_i^* T_i^*) \right] + (\Delta \vec{\beta}^*)^2 \left[ t^* - \frac{1}{\Delta \vec{\beta}^*} (\vec{\beta}_j^* T_j^* - \vec{\beta}_i^* T_i^*) \right]^2 \quad (2.9.15)$$

โดย

$$\Delta \vec{R}^* = \vec{R}_j^* - \vec{R}_i^*, \Delta \vec{\beta}^* = \vec{\beta}_j^* - \vec{\beta}_i^*, \quad (2.9.16)$$

ระยะห่างที่ใกล้ที่สุดระหว่างอนุภาคกำหนดโดย

$$\frac{\partial(d^2(t^*))}{\partial t^*} = 0 \quad (2.9.17)$$

เวลาที่ใช้ในการชนกันของอนุภาคที่โมเมนตัมระหว่าง  $i$  และ  $j$

$$t_{ij}^* = \frac{-\Delta\vec{R}^* \Delta\vec{\beta}^* + \Delta\vec{\beta}^* \left( \Delta\vec{\beta}_j^* T_j^* - \Delta\vec{\beta}_i^* T_i^* \right)}{\left( \Delta\vec{\beta}^* \right)^2} \quad (2.9.18)$$

แทนสมการ 2.9.18 และระยะห่างที่ใกล้ที่สุดระหว่างอนุภาคใน 2.9.15 ได้

$$D = \left[ \left( \Delta\vec{R}^* \right)^2 + \Delta\vec{R}^* \Delta\vec{\beta}^* \left( t_{ij}^* - \frac{1}{\Delta\vec{\beta}^*} \left( \vec{\beta}_j^* T_j^* - \vec{\beta}_i^* T_i^* \right) \right) \right]^{1/2} \quad (2.9.19)$$

ซึ่งแบบจำลอง PACIAE มีการทำงาน 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเริ่มต้นพาร์ตอน (The parton initialization) ในแบบจำลอง PACIAE การเริ่มต้นพาร์ตอนเริ่มจากการชนกันของนิวเคลียส-นิวเคลียส จะถูกพิจารณาในระดับนิวคลีออน-นิวคลีออนโดยแบบจำลอง PYTHIA ต่อมาที่การชนกันของฮาดรอน-ฮาดรอน จะถูกพิจารณาในระดับพาร์ตอน-พาร์ตอน
2. วิวัฒนาการพาร์ตอน (The parton evolution) ขั้นตอนวิวัฒนาการพาร์ตอนหรือการกระเจิงพาร์ตอน (The parton rescattering) โดยจำนวนพาร์ตอนที่กระเจิงในควาร์ก-กลูออน พลาสมาจะนำมาคำนวณภาคตัดขวางของพาร์ตอนโดยใช้วิธีการมอลติคาร์โล
3. ฮาดรอนไนเซชัน (The hadronization) ในขั้นตอนนี้ฮาดรอนจะถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการ Monte Carlo Colesence Model และ String fragmentation เกิดเป็นฮาดรอนทั้งชนิดเมซอนและแบรีออนขึ้น
4. วิวัฒนาการฮาดรอน (The hadron evolution) ขั้นตอนที่วิวัฒนาการฮาดรอน ที่เกิดขึ้นมีการชนกันของสองฮาดรอน ซึ่งการกระเจิงอนุภาคและแอนติอนุภาค จะถูกพิจารณาในขั้นตอนนี้แบบจำลอง PACIAE 2.0 มีทั้งหมด 3 แบบ คือ

1. คือแบบจำลอง PACIAE 2.0a เพื่อศึกษาการชนกันของโปรตอน-โปรตอน ( $p + p$ ) หรือการชนกันของอิเล็กตรอน-โพสิตรอน ( $e^- + e^+$ )
2. แบบจำลอง PACIAE 2.0b คือแบบจำลองเพื่อศึกษาการชนกันของนิวเคลียส-นิวเคลียส ( $A + B$ ) หรือศึกษาการชนกันของโปรตอน-นิวเคลียส ( $p + A$ )
3. แบบจำลอง PACIAE 2.0c คือแบบจำลองเพื่อศึกษาการชนกันของนิวเคลียส-นิวเคลียส ( $A + B$ ) หรือศึกษาการชนกันของโปรตอน-นิวเคลียส ( $p + A$ ) และศึกษาการชนกันของอิเล็กตรอน-นิวเคลียส ( $e + A$ )

งานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลอง PACIAE 2.0 b จะกำหนดให้โมเมนตัมตามขวาง ( $p_T$ ) โดยส่วนประกอบของโมเมนตัมตามขวาง คือ โมเมนตัมแนวแกน  $x$  ( $p_x$ ) และโมเมนตัมแนวแกน  $y$  ( $p_y$ ) ในรัศมีวงกลมของโมเมนตัมตามขวาง แบบจำลอง PACIAE 2.0 b ประกอบไปด้วยไฟล์โปรแกรมหลัก 8 ไฟล์ ดังนี้ [7]

1. paciae\_20b\_hyper.f จะเป็นขั้นตอนของการเริ่มพาร์ตอน (The parton initialization)
2. parcas\_20b.f จะเป็นขั้นตอนของวิวัฒนาการพาร์ตอน (The parton evolution)
3. sfm\_20b.f จะเป็นขั้นตอนของฮาดรอนไนเซชัน (The hadronization)
4. coales\_20b.f จะเป็นขั้นตอนของฮาดรอนไนเซชัน (The hadronization)
5. hadcas\_20b.f จะเป็นขั้นตอนของวิวัฒนาการฮาดรอน (The hadron evolution)
6. p20b.f เป็นไฟล์โปรแกรมสำหรับการกำจัดหรือลดลงของอนุภาคแปลก หรือควาร์กแปลกและเพื่อการอนุรักษ์ค่าประจุในการกระจายตัวสตริง
7. usu.dat เป็นไฟล์โปรแกรมเพื่อใส่ค่าเงื่อนไขหรือพารามิเตอร์ต่างๆ ในการจำลองการชนกันของนิวเคลียส
8. a.out เป็นไฟล์โปรแกรมสำหรับปรับปรุงโปรแกรมในการชนกันของนิวเคลียส-นิวเคลียส

## 2.10 โปรแกรม Dynamically Constrained Phase Space coalescence (DCPC)

ใช้ศึกษาการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  ในการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV และการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  ในการชนกันของทองกับทองที่ระดับพลังงาน 130 GeV โดยใช้ข้อมูลจากแบบจำลอง PACIAE จำนวนการเกิดของอนุภาคเดียวในแบบจำลอง DCPC สามารถอธิบายได้โดย

$$Y_1 = \int_{H \leq E} \frac{d^3q d^3p}{h^3}, \quad (2.10.1)$$

- เมื่อ  $Y$  คือ อัตราการเกิดของอนุภาค (ตัว)  
 $H$  คือ Hamiltonian  
 $E$  คือ พลังงาน (GeV)  
 $q$  คือ ตำแหน่งของอนุภาค  
 $p$  คือ โมเมนตัมของอนุภาค (GeV/c)  
 $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ =  $4.1357 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$

สำหรับเคอนนิคนิวไคลด์  $K^-p$  คำนวณได้จากสมการการปริพันธ์

$$Y_{Kp} = \int \dots \int \delta_{12} \frac{d\vec{q}_1 d\vec{p}_1 d\vec{q}_2 d\vec{p}_2}{h^6}, \quad (2.10.2)$$

สำหรับเคอนนิคนิวไคลด์  $K^-pp$  คำนวณได้จากสมการการปริพันธ์

$$Y_{Kpp} = \int \dots \int \delta_{123} \frac{d\vec{q}_1 d\vec{p}_1 d\vec{q}_2 d\vec{p}_2 d\vec{q}_3 d\vec{p}_3}{h^9}, \quad (2.10.3)$$

ดังนั้น จำนวนเคอนนิคนิวไคลด์ของ  $K^-$ ,  $p$  และ  $p$  สามารถคำนวณได้ในแบบจำลอง DCPC

$$\text{เมื่อ } \delta_{123} = \begin{cases} 1 & \text{if } 1 \equiv K, 2 \equiv p, 3 \equiv p \\ & m_0 - \Delta m \leq m_{inv} \leq m_0 + \Delta m \\ & q_{12} \leq D_0, q_{13} \leq D_0, q_{23} \leq D_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.10.4)$$

- เมื่อ  $m_{inv}$  คือ มวลขณะอนุภาคหยุดนิ่ง (GeV/c<sup>2</sup>)  
 $m_0$  คือ มวลที่เหลือของเคอนนิคนิวเคลียส (GeV/c<sup>2</sup>)  
 $\Delta m$  คือ มวลที่ไม่เสถียร (GeV/c<sup>2</sup>)  
 $D_0$  คือ ระยะห่างเฉลี่ยระหว่าง  $K^-$  กับ  $p$  (fm)

มวลขณะอนุภาคหยุดนิ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$m_{inv} = \sqrt{(E_K + E_p + E_p)^2 - (\vec{p}_K + \vec{p}_p + \vec{p}_p)^2} \quad (2.10.5)$$

- เมื่อ  $E_K$  คือ พลังงานของเคออน (GeV)  
 $E_p$  คือ พลังงานของโปรตอน (GeV)  
 $\vec{p}_K$  คือ โมเมนตัมของเคออน (GeV/c)  
 $\vec{p}_p$  คือ โมเมนตัมของโปรตอน (GeV/c)  
 $m_{inv}$  คือ มวลอนุภาคขณะหยุดนิ่ง (GeV/c<sup>2</sup>)

พลังงานของอนุภาคเคออนและอนุภาคโปรตอนคำนวณได้จาก

$$E_K = \sqrt{p_K^2 + m_K^2}, \quad (2.10.6)$$

$$E_p = \sqrt{p_p^2 + m_p^2}, \quad (2.10.7)$$

- เมื่อ  $m_0$  คือ มวลที่เหลือของเคออนนิควิเคลียส (GeV/c<sup>2</sup>)  
 $\Delta m$  คือ มวลที่ไม่เสถียร (GeV/c<sup>2</sup>)  
 $\vec{p}_K$  คือ โมเมนตัมของเคออน (GeV/c)  
 $\vec{p}_p$  คือ โมเมนตัมของโปรตอน (GeV/c)  
 $m_K$  คือ มวลของเคออน (GeV/c<sup>2</sup>)  
 $m_p$  คือ มวลของโปรตอน (GeV/c<sup>2</sup>)

## 2.11 พารามิเตอร์ในแบบจำลอง PACIAE

พารามิเตอร์ของแบบจำลอง PACIAE คือจำนวนที่ทำหน้าที่ควบคุมปัจจัยในการเกิดอนุภาคเคออนและอนุภาคโปรตอน พารามิเตอร์ในแบบจำลอง PACIAE มีทั้งหมด 3 ชนิด คือ parj(1), parj(2) และ parj(3) ในการจำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV เพื่อคำนวณอัตราการเกิดเฉลี่ยของอนุภาค  $K^+$ ,  $K^-$ , p และ  $\bar{p}$  มีค่าดังตาราง 2



ตาราง 2 แสดงพารามิเตอร์ในการจำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 Tev แรพิติตี้  $|y| < 0.5$

K factor		parj(1)		parj(2)		parj(3)	
Default	PACIAE	Default	PACIAE	Default	PACIAE	Default	PACIAE
1	3	0.1	0.085	0.3	0.305	0.4	0.450

การจำลองการชนกันของทอว์กับทอว์ที่ระดับพลังงาน 130 GeV เพื่อคำนวณอัตราการเกิดเฉลี่ยของอนุภาค  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  และ  $\bar{p}$  มีค่าดังตาราง 3

ตาราง 3 แสดงพารามิเตอร์ในการจำลองการชนกันของทอว์กับทอว์ที่ระดับพลังงาน 130 Gev แรพิติตี้  $|y| < 1.0$

K factor		parj(1)		parj(2)		parj(3)	
Default	PACIAE	Default	PACIAE	Default	PACIAE	Default	PACIAE
1	3	0.1	0.180	0.3	0.390	0.4	0.650

โดย K factor คือ ปัจจัยการเกิดของอนุภาคเคออน, พารามิเตอร์ parj(1) คือ การเปรียบเทียบจำนวนของ diquark - antidiquark ที่ถูกกำจัดออกจากแบบจำลองกับจำนวนของ quark - antiquark ที่ยังเหลืออยู่ในแบบจำลอง PACIAE, parj(2) คือ การเปรียบเทียบจำนวนของ strange quark ที่ถูกกำจัดออกจากแบบจำลองกับจำนวนของ up quark - down quark ที่ยังเหลืออยู่ในแบบจำลอง PACIAE, parj(3) คือ การเปรียบเทียบจำนวนของ strange diquark กับ strange quark ที่ถูกกำจัดออกจากแบบจำลอง PACIAE

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

เนื่องจากในอดีตที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการชนกันของไอออนหนักเพื่อศึกษาสมบัติของอนุภาคต่างๆในช่วงเริ่มแรกของการเกิดการระเบิดของบิกแบงซึ่งเชื่อว่าเป็นการก่อกำเนิดของเอกภพของเรา โดยการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การวิจัยจากห้องปฏิบัติการจริง เช่น CERN และการวิจัยโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ เช่น แบบจำลอง PACIAE, QMD และ UrQMD เป็นต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นหนึ่งในงานวิจัยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยใช้แบบจำลอง PACIAE+DCPC ในการจำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV และการจำลองการชนกันของทองคำทองคำที่ระดับพลังงาน 130 GeV โดยวิธีการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

1. จำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบ 0 ถึง 3 fm ( $0 < b < 3.0$ ) ค่าแรพิดิตี  $|y| < 0.5$  โมเมนตัมตามขวางที่  $0.2 < p_T < 6.0$  GeV/c และ พารามิเตอร์  $parj(1) = 0.085$ ,  $parj(2) = 0.305$  และ  $parj(3) = 0.450$  ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่มีการกำหนดเหล่านี้จะถูกใส่ในไฟล์ข้อมูลสำหรับใช้ในการทดลองการชนในแบบจำลอง PACIAE จากนั้นนำผลผลิตจากการจำลองการชน อนุภาค  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  และ  $\bar{p}$  เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงจากห้องปฏิบัติการ ALICE ดังตาราง 5

2. นำอนุภาค  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  และ  $\bar{p}$  จากการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนทำนายอัตราการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+\bar{p}$  โดยใช้แบบจำลอง DCPC เป็นเครื่องมือในการทำนายเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+\bar{p}$  ที่มีมวลของแต่ละเคออนนิกนิวไคลด์ = 1.425 GeV มวลที่เปลี่ยนแปลงของเคออนนิกนิวไคลด์  $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$  GeV รัศมีของเคออนนิกนิวไคลด์ = 1.36 fm และจำนวนการชนกันของอนุภาคตั้งแต่ 100,000 - 5,000,000 ครั้ง

3. คำนวณหาโมเมนตัมสัมพัทธ์ของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+\bar{p}$  ที่จำนวนการชน 1,000,000 ครั้ง และ  $\Delta m = 0.020$  GeV เพื่อกำหนดช่วงของโมเมนตัมสัมพัทธ์  $0.00 \leq \Delta p \leq 4.00$  GeV/c ของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+\bar{p}$  และเปรียบเทียบกับอัตราการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+\bar{p}$  ที่มีโมเมนตัมสัมพัทธ์และเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+\bar{p}$  ที่ไม่มีโมเมนตัมสัมพัทธ์

4. จำลองการชนกันของทองคำทองคำที่ระดับพลังงาน 130 GeV ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบ 0 ถึง 3 fm ( $0 < b < 3.0$ ) ค่าแรพิดิตี  $|y| < 1.0$  โมเมนตัมตามขวางที่  $0.2 < p_T < 1.0$  GeV/c และ

พารามิเตอร์  $\text{parj}(1) = 0.180$ ,  $\text{parj}(2) = 0.390$  และ  $\text{parj}(3) = 0.650$  ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกใส่ในไฟล์ข้อมูลสำหรับใช้ในการทดลองการชนในแบบจำลอง PACIAE จากนั้นนำผลผลิตจากการจำลองการชน อนุภาค  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  และ  $\bar{p}$  เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงจากห้องปฏิบัติการ STAR ดังตาราง 8

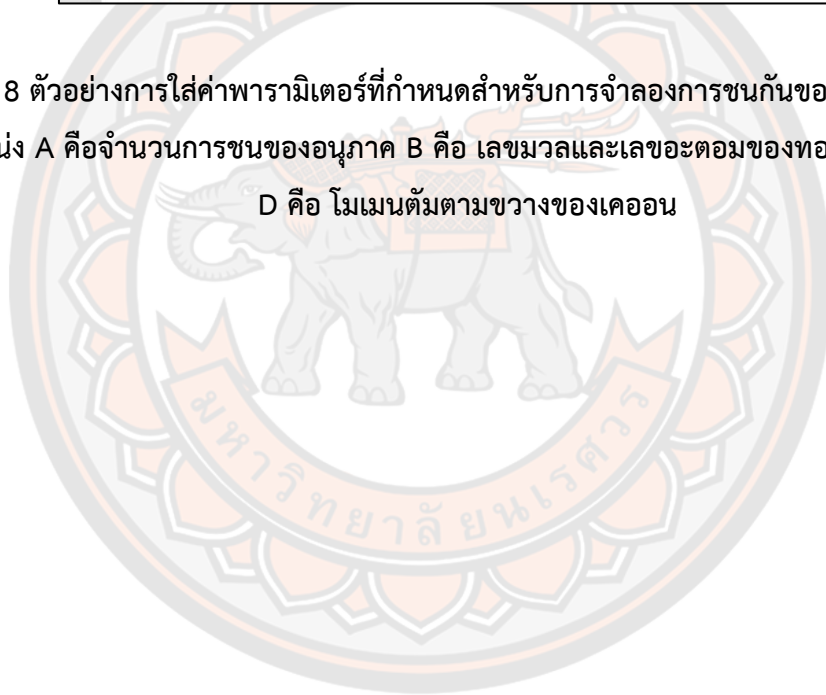
5. นำอนุภาค  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  และ  $\bar{p}$  จากการชนกันของทอว์กับทอว์ทำนายอัตราการเกิดของเคออนนิกนิกวโคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}\bar{p}$  ที่ระดับพลังงาน 130 GeV โดยใช้แบบจำลอง PACIAE+DCPC เป็นเครื่องมือในการทำนายเคออนนิกนิกวโคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}\bar{p}$  ที่มวลของแต่ละเคออนนิกนิกวโคลด์ = 2.352 GeV มวลที่เปลี่ยนแปลงของเคออนนิกนิกวโคลด์  $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$  GeV รัศมีของเคออนนิกนิกวโคลด์ = 1.90 fm ระยะทางนับจากศูนย์กลางของเคออนนิกนิกวโคลด์ (Centrality) = 0 - 6 % และจำนวนการชนกันของอนุภาคตั้งแต่ 5,000 - 30,000 ครั้ง

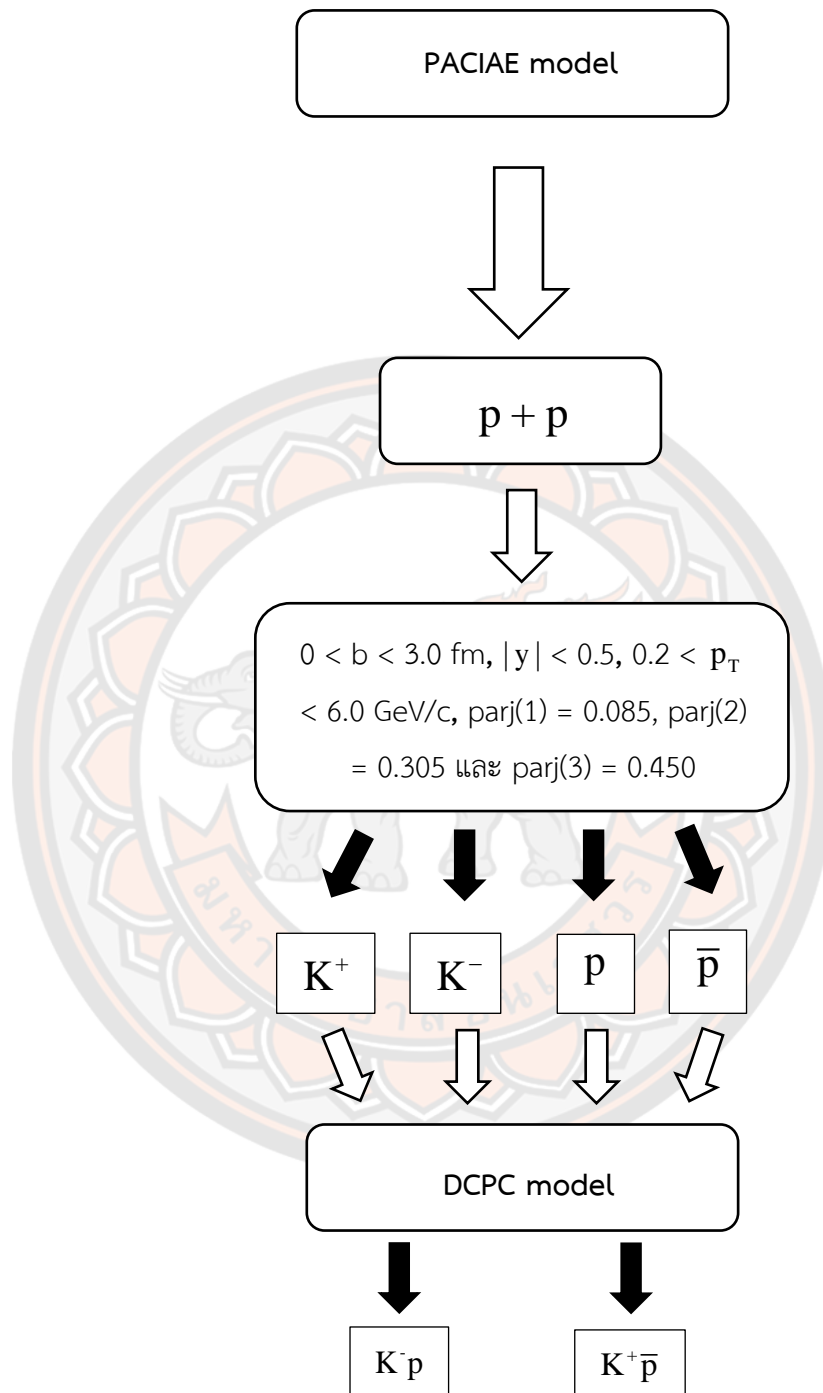
A	1000000, 100, 7000
B	1, 1, 1, 1
3	1, 0, 1, 2, 3, 1
4	1, 20, 5, 2, 1, 0
5	211, 321, 333, 3122, -3122, 3312, -3312, 3334, -3334, -211
6	-321, 310, 2212, -2212, 2112, -2112, 3212, -3212, 3112, 3222
7	0.2, 0.5, 0.2, 1., 3
8	-0.5, 0.5
9	0.1, 3.0
10	-0.5, 0.5 C
11	0.2, 6.0 D
12	-0.5, 0.5
13	0., 20.
14	-0.5, 0.5
15	0., 20.
16	-0.5, 0.5

ภาพ 7 ตัวอย่างการใส่ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดสำหรับการจำลองการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนที่ ตำแหน่ง A คือจำนวนการชนของอนุภาค B คือ เลขมวลและเลขอะตอมของโปรตอน C คือ แรพิดิตี D คือ โมเมนตัมตามขวางของเคออน

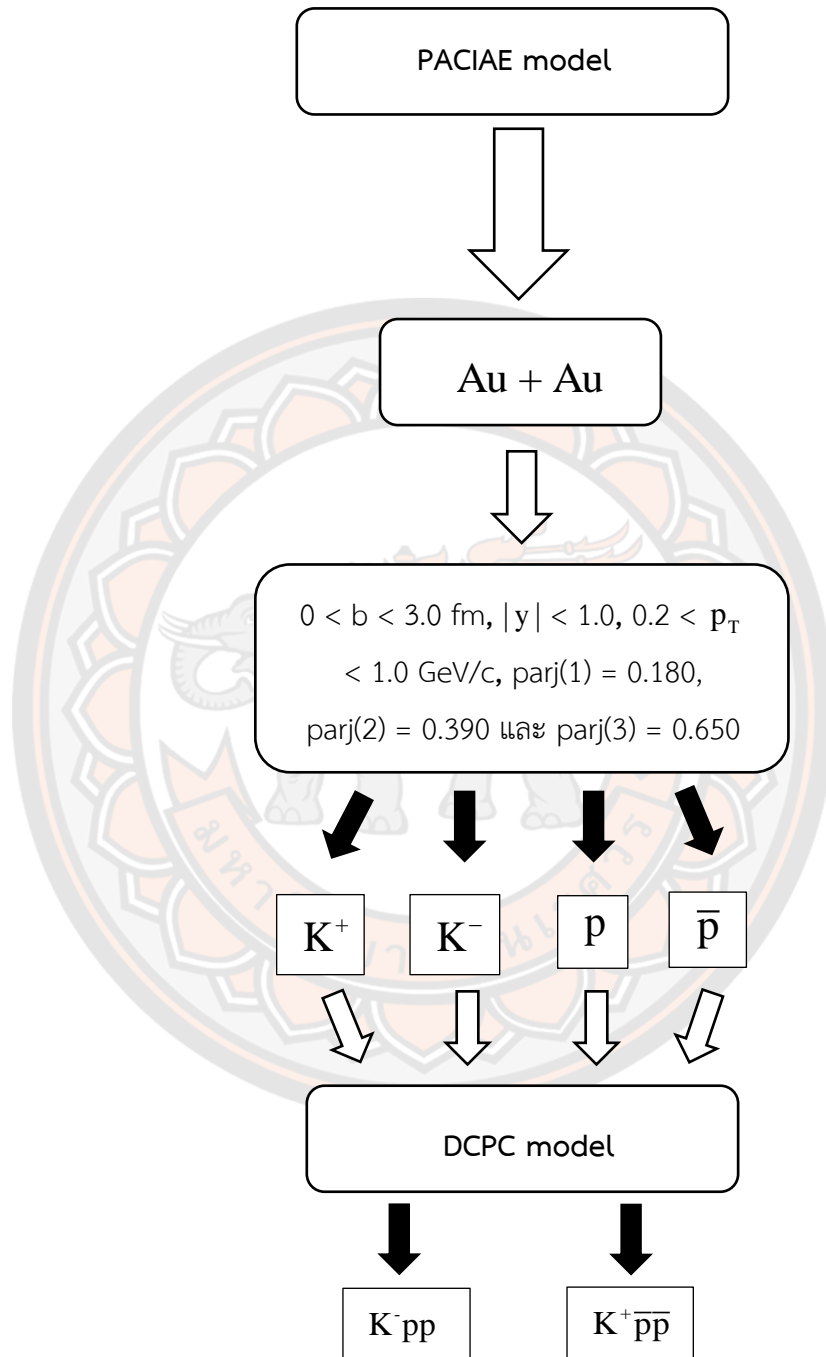
A	30000, 100, 1	
B	197, 79, 197, 79	
3	0.0001, 0.01, 0., 3.56, 10	
4	1, 1, 1.2, 20000., 1	
5	3.1416, 1, 1	
6	20, 5, 2	
7	211, 321, 333, 3122, -3122, 3312, -3312, 3334, -3334, -211	
8	-321, 310, 2212, -2212, 2112, -2112, 3112, 3222, 111, 221	
9	0.5, 0.5, 0.5, .4, 50	
10	-1.0, 1.0	
11	0.3, 1.3	
12	-1.0, 1.0	C
13	0.2, 1.0	D
14	-0.1, 0.1	
15	0.4, 1.9	
16	-0.1, 0.1	

ภาพ 8 ตัวอย่างการใส่ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดสำหรับการจำลองการชนกันของทอว์กับทอว์ที่ตำแหน่ง A คือจำนวนการชนของอนุภาค B คือ เลขมวลและเลขอะตอมของทอว์ C คือ แรพิดิตี้ D คือ โมเมนตัมตามขวางของเคออน





ภาพ 9 แผนผังการจำลองการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนโดยใช้แบบจำลอง PACIAE+DCPC



ภาพ 10 แผนผังการจำลองการชนกันของทอว์กับทอว์โดยใช้แบบจำลอง PACIAE+DCPC

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดของอนุภาค  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  และ  $\bar{p}$  ในแบบจำลอง PACIAE โดยการจำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงานในการชนกันที่ 7 TeV โดยมีพารามิเตอร์ได้แก่แรพิดิตี  $|y| < 0.5$ , โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคเคออน  $0.2 < p_T < 6.0$  GeV/c และโมเมนตัมตามขวางของอนุภาคโปรตอน  $0.3 < p_T < 6.0$  GeV/c การจำลองการชนกันของทองกับทองที่ระดับพลังงานในการชนกันที่ 130 GeV โดยมีพารามิเตอร์ได้แก่  $|y| < 0.1$ , Centrality ที่ 0-6 %, โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคเคออน  $0.2 < p_T < 1.0$  GeV/c และโมเมนตัมตามขวางของอนุภาคโปรตอน  $0.3 < p_T < 1.3$  GeV/c ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 แสดงพารามิเตอร์ในการจำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนและการชนกันของทองกับทอง

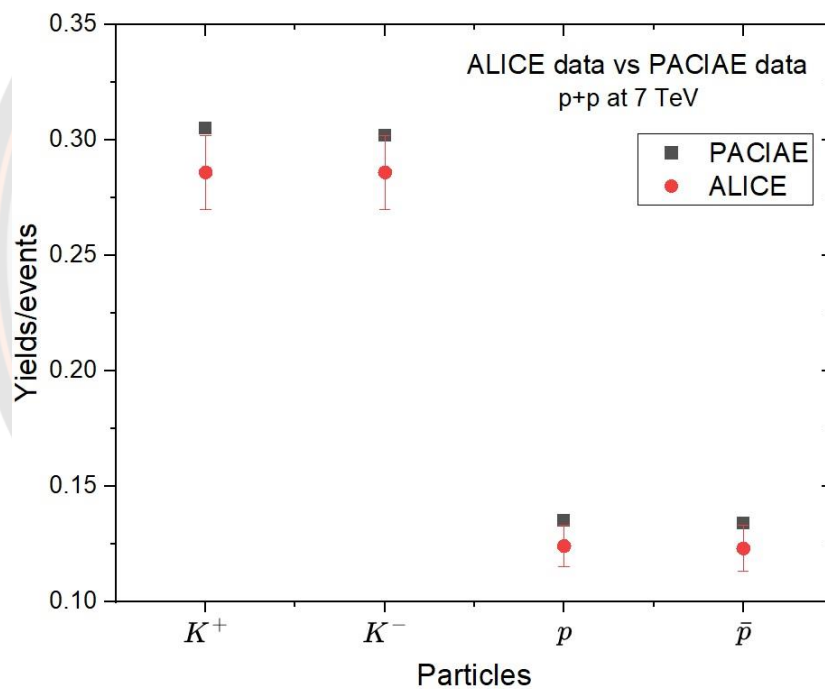
ชนิดของการชน	พลังงาน (GeV)	แรพิดิตี ( $y$ )	โมเมนตัมตามขวาง ( $p_T$ )(GeV/c)	
			เคออน	โปรตอน
p + p	7000	$< 0.5$	0.2-6.0	0.3-6.0
Au + Au	130	$< 0.1$	0.2-1.0	0.3-1.3

#### 4.1 ผลการจำลองการเกิดอนุภาคเดี่ยว $K^+$ , $K^-$ , $p$ และ $\bar{p}$ จากการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนที่พลังงาน 7 TeV

จากการจำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV มีพารามิเตอร์สำหรับการจำลองการชนได้แก่ แรพิดิตี  $|y| < 0.5$ , โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคเคออน  $0.2 < p_T < 6.0$  GeV/c และโมเมนตัมตามขวางของอนุภาคโปรตอน  $0.3 < p_T < 6.0$  GeV/c ในแบบจำลอง PACIAE เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ ALICE [50]

ตาราง 5 แสดงอัตราการเกิดของ  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  และ  $\bar{p}$  ที่เป็นผลผลิตจากการจำลองการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV เปรียบเทียบกับข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ ALICE

อนุภาค	ALICE data (yields/events)	PACIAE2.0 (yields/events)
$K^+$	$0.286 \pm 0.016$	0.305
$K^-$	$0.286 \pm 0.016$	0.302
$p$	$0.124 \pm 0.009$	0.135
$\bar{p}$	$0.123 \pm 0.010$	0.134



ภาพ 11 เปรียบเทียบอัตราการเกิดของอนุภาค  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  และ  $\bar{p}$  ระหว่างข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ ALICE กับแบบจำลอง PACIAE

จากตาราง 5 อัตราการเกิดของอนุภาค  $K^+$  = 0.305 ตัวซึ่งมีอัตราการเกิดใกล้เคียงกับอนุภาค  $K^-$  ที่  $K^-$  = 0.302 ตัวและอัตราการเกิดของอนุภาค  $p$  = 0.135 ตัวซึ่งมีอัตราการเกิดใกล้เคียงกับอนุภาค  $\bar{p}$  ที่  $\bar{p}$  = 0.134 ตัวโดยเมื่อนำอัตราการเกิดของอนุภาคทั้ง 4 เปรียบเทียบกับข้อมูลจาก



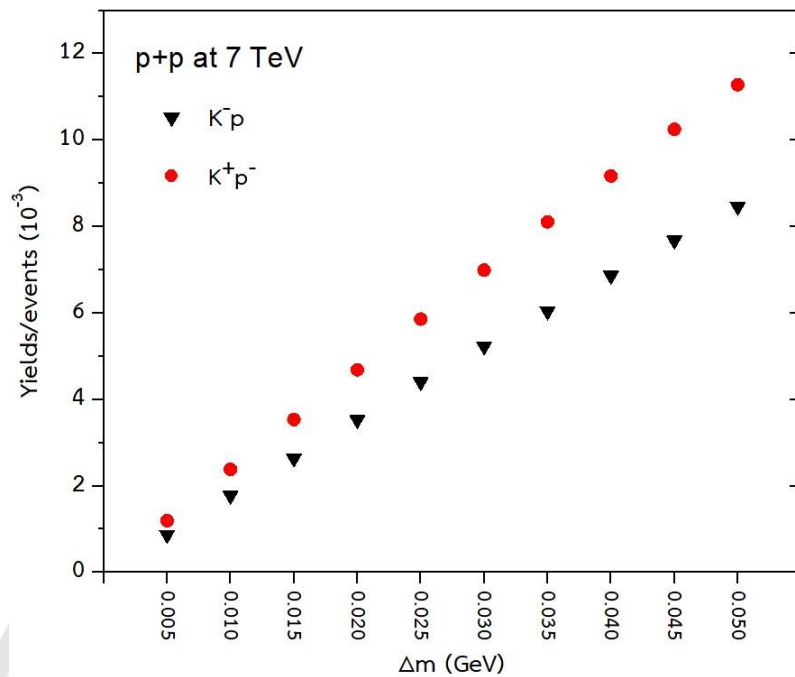
ห้องปฏิบัติการ ALICE พบว่า อัตราการเกิดของอนุภาคทั้ง 4 มีความสอดคล้องกับข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ ALICE

#### 4.2 ผลการจำลองการเกิดเคออนชนิดนิวไคลด์ $K^-p$ และ $K^+p$ จากการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนที่พลังงาน 7 TeV

จากการจำลองการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอน 1,000,000 ครั้ง ที่พลังงาน 7 TeV โดยมีพารามิเตอร์  $|y| < 0.5$ , โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคเคออน  $0.2 < p_T < 6.0$  GeV/c, โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคโปรตอน  $0.3 < p_T < 6.0$  GeV/c และ  $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$  GeV ในแบบจำลอง PACIAE+DCPC ดังแสดงในตาราง 6

ตาราง 6 แสดงอัตราการเกิดเคออนชนิดนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  จากการชนกันของโปรตอนกับโปรตอน 7 TeV จำนวน 1,000,000 ครั้ง จากแบบจำลอง PACIAE+DCPC ที่  $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$  GeV

$\Delta m$ (GeV)	$K^-p$ ( $10^{-3}$ )	$K^+p$ ( $10^{-3}$ )
0.005	0.871	1.199
0.010	1.776	2.383
0.015	2.639	3.536
0.020	3.527	4.688
0.025	4.406	5.861
0.030	5.234	6.996
0.035	6.043	8.109
0.040	6.865	9.174
0.045	7.680	10.250
0.050	8.464	11.280



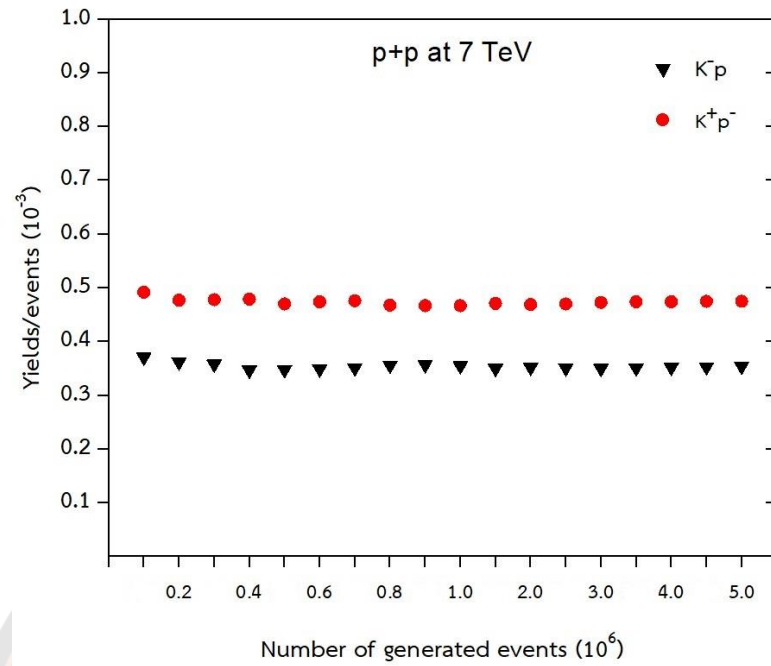
ภาพ 12 เปรียบเทียบอัตราการเกิดของคอนนิกนัวโคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p^-$  ที่  $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$  GeV

จากภาพ 12 พบว่าอัตราการเกิดของคอนนิกนัวโคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p^-$  ที่การชนกันของโปรตอนกับโปรตอนที่มีพลังงาน 7 TeV ในแบบจำลอง PACIAE + DCPC มีการแปรผันตาม  $\Delta m$  โดยเมื่อ  $\Delta m$  มีค่ามากขึ้นอัตราการเกิดของคอนนิกนัวโคลด์ทั้ง 2 ชนิดจะมีค่ามากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ความต่างของการเกิด  $K^-p$  กับ  $K^+p^-$  มีค่ามากขึ้นตาม  $\Delta m$  ที่เพิ่มขึ้นโดย  $K^+p^-$  มีอัตราการเกิดมากกว่า  $K^-p$

เมื่อพิจารณาการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่มีจำนวนการชน 100,000 – 5,000,000 ครั้งที่มีพลังงาน 7 TeV โดยมีพารามิเตอร์  $|y| < 0.5$  โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคคอนนิกนัวโคลด์  $0.2 < p_T < 6.0$  GeV/c โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคโปรตอน  $0.3 < p_T < 6.0$  GeV/c และ  $\Delta m = 0.020$  GeV ในแบบจำลอง PACIAE + DCPC พบว่าอัตราการเกิดของคอนนิกนัวโคลด์  $K^-p$  กับ  $K^+p^-$  มีอัตราการเกิดเฉลี่ยที่  $3.54 \times 10^{-3}$  และ  $4.74 \times 10^{-3}$  ตามลำดับดังตาราง 7

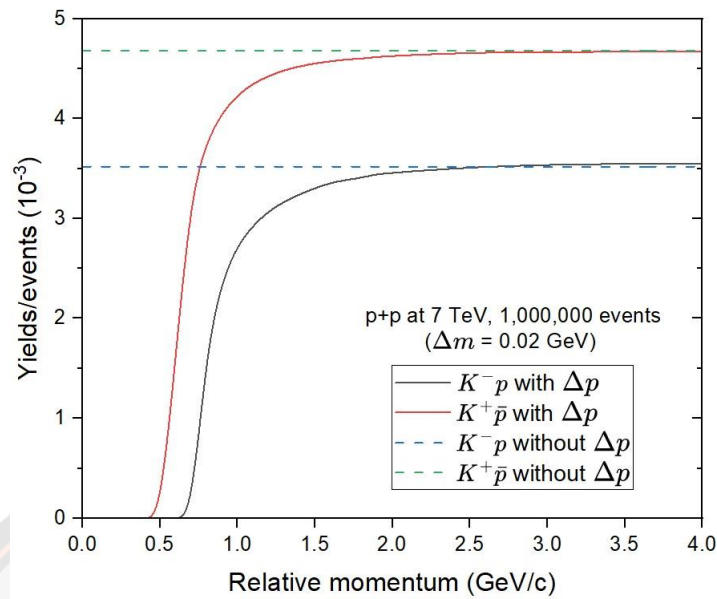
ตาราง 7 แสดงอัตราการเกิดเคออนนิกนัวโคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  จากการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนที่  $\Delta m = 0.020$  GeV และจำนวน 100,000 – 5,000,000 ครั้งที่พลังงาน 7 TeV จากแบบจำลอง PACIAE + DCPC

จำนวนการชน	$K^-p$ ( $10^{-3}$ )	$K^+p$ ( $10^{-3}$ )
100,000	3.71	4.92
200,000	3.62	4.77
300,000	3.58	4.78
400,000	3.47	4.79
500,000	3.48	4.70
600,000	3.49	4.74
700,000	3.51	4.76
800,000	3.56	4.68
900,000	3.57	4.67
1,000,000	3.55	4.67
1,500,000	3.50	4.71
2,000,000	3.52	4.69
2,500,000	3.51	4.70
3,000,000	3.50	4.73
3,500,000	3.51	4.74
4,000,000	3.52	4.74
4,500,000	3.53	4.75
5,000,000	3.54	4.75



ภาพ 13 อัตราการเกิดของคอนนิควินิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p^-$  จากการชนของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนจำนวน 100,000 – 5,000,000 ครั้ง

จากภาพ 13 พบว่าเมื่อจำนวนการชนของโปรตอนกับโปรตอนมีค่ามากขึ้น  $K^-p$  และ  $K^+p^-$  จะมีอัตราการเกิดเฉลี่ยคงที่โดยมุ่งเข้าสู่  $3.54 \times 10^{-3}$  ตัว และ  $4.74 \times 10^{-3}$  ตัว ตามลำดับ



ภาพ 14 การเปรียบเทียบอัตราการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  ที่พลังงาน 7 TeV ระหว่างโมเมนตัมสัมพัทธ์ที่ 0.00 – 4.00 GeV/c และการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  โดยไม่มีโมเมนตัมสัมพัทธ์

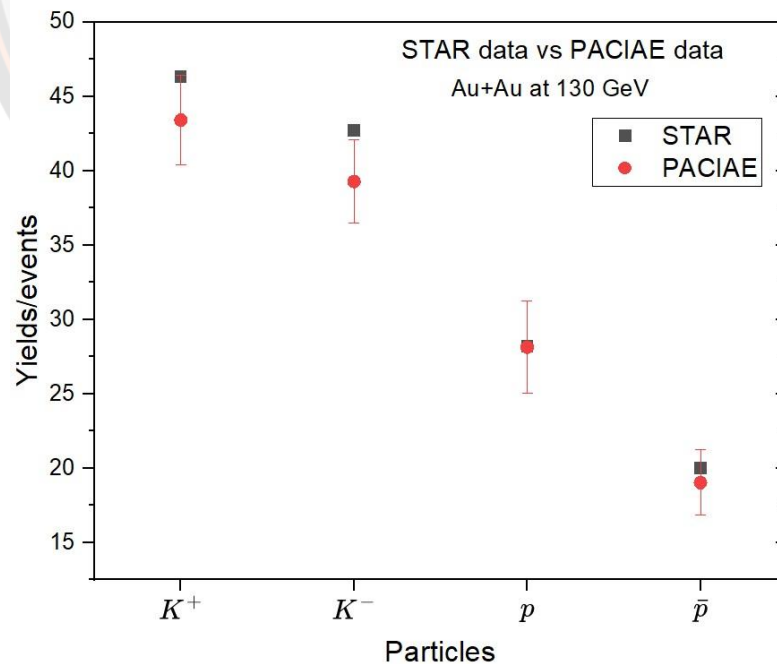
จากภาพ 14 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  จากการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่พลังงาน 7 TeV ในแบบจำลอง PACIAE + DCPC ในแบบที่มีโมเมนตัมสัมพัทธ์  $0.00 \leq \Delta p \leq 4.00$  GeV/c และ แบบไม่มีโมเมนตัมสัมพัทธ์เป็นปัจจัยในการเกิดเคออนนิกนิวไคลด์ ที่จำนวนการชนกันของอนุภาคโปรตอนกับโปรตอนที่ 1,000,000 ครั้ง พบว่าอัตราการเกิดของ  $K^-p$  ที่โมเมนตัมสัมพัทธ์  $0.00 \leq \Delta p \leq 0.70$  GeV/c มีค่าเท่ากับ 0.00 ตัว แต่อัตราการเกิดของ  $K^-p$  ที่โมเมนตัมสัมพัทธ์  $0.80 \leq \Delta p \leq 4.00$  GeV/c มีค่าเท่ากับอัตราการเกิดของ  $K^-p$  แบบไม่มีโมเมนตัมสัมพัทธ์ที่  $\approx 3.55 \times 10^{-3}$  ตัว อัตราการเกิดของ  $K^+p$  ที่โมเมนตัมสัมพัทธ์  $0.00 \leq \Delta p \leq 0.50$  GeV/c มีค่าเท่ากับ 0.00 ตัว แต่อัตราการเกิดของ  $K^+p$  ที่โมเมนตัมสัมพัทธ์  $0.60 \leq \Delta p \leq 4.00$  GeV/c มีค่าเท่ากับอัตราการเกิดของ  $K^+p$  แบบไม่มีโมเมนตัมสัมพัทธ์ที่  $\approx 4.68 \times 10^{-3}$  ตัว

#### 4.3 ผลการจำลองการเกิดอนุภาคเดี่ยว $K^+$ , $K^-$ , $p$ และ $\bar{p}$ จากการชนกันของทองคำกับทองคำที่พลังงาน 130 GeV

จากการจำลองการชนกันของทองคำกับทองคำที่ระดับพลังงาน 130 GeV โดยมีพารามิเตอร์ได้แก่  $|y| < 0.1$ , Centrality = 0 - 6 % โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคเคออน  $0.2 < p_T < 1.0$  GeV/c และโมเมนตัมตามขวางของอนุภาคโปรตอน  $0.3 < p_T < 1.3$  GeV/c ในแบบจำลอง PACIAE เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ STAR ดังแสดงในตาราง 8

ตาราง 8 แสดงอัตราการเกิดของ  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  และ  $\bar{p}$  ที่เป็นผลผลิตจากการจำลองการชนกันของทองคำกับทองคำที่ระดับพลังงาน 130 GeV เปรียบเทียบกับข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ STAR [51]

อนุภาค	STAR data (yields/events)	PACIAE2.0 (yields/events)
$K^+$	$46.3 \pm 3.0$	43.40
$K^-$	$42.7 \pm 2.8$	39.27
$p$	$28.2 \pm 3.1$	28.13
$\bar{p}$	$20.0 \pm 2.2$	19.03



ภาพ 15 เปรียบเทียบอัตราการเกิดของอนุภาค  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  และ  $\bar{p}$  ระหว่างข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ STAR กับแบบจำลอง PACIAE

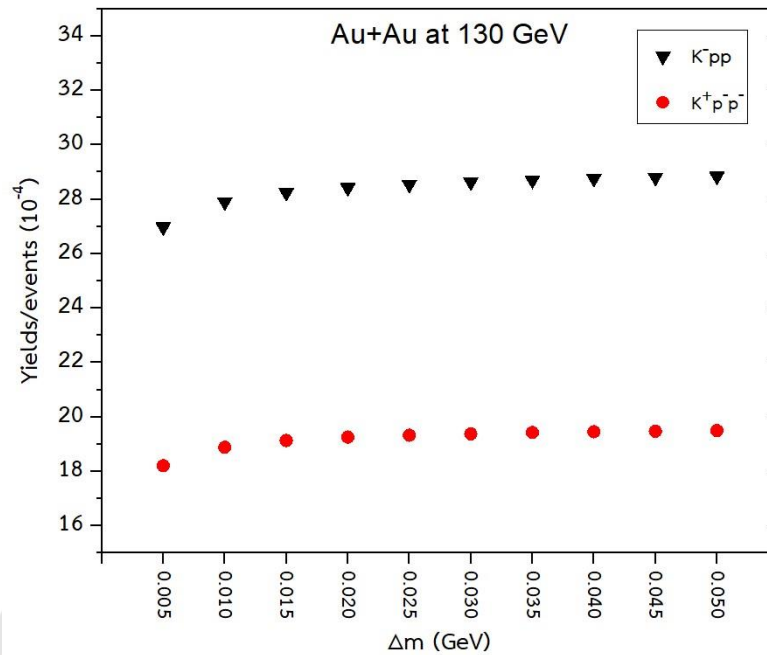
ภาพ 15 แสดงการจำลองการชนกันของทอว์กับทอว์ที่พลังงาน 130 GeV พบว่าอัตราการเกิดของอนุภาค  $K^+ = 43.40$  ตัวซึ่งมีอัตราการเกิดมากกว่าอนุภาค  $K^-$  ที่  $K^- = 39.27$  ตัวและอัตราการเกิดของอนุภาค  $p = 28.13$  ตัวมีอัตราการเกิดมากกว่าอนุภาค  $\bar{p}$  ที่  $\bar{p} = 19.03$  ตัวโดยเมื่อนำอัตราการเกิดของอนุภาคทั้ง 4 เปรียบเทียบกับข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ STAR พบว่า อัตราการเกิดของอนุภาคทั้ง 4 มีความสอดคล้องกับข้อมูลจากห้องปฏิบัติการ STAR

#### 4.4 ผลการจำลองการเกิดเคออนชนิดนิวไคลด์ $K^-pp$ และ $K^+\bar{p}\bar{p}$ จากการชนกันของทอว์กับทอว์ที่พลังงาน 130 GeV

จากการจำลองการชนกันของนิวเคลียสของทอว์กับทอว์ 30,000 ครั้ง ที่พลังงาน 130 GeV โดยมีพารามิเตอร์  $|y| < 0.1$ , Centrality = 0-6 % โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคเคออน  $0.2 < p_T < 1.0$  GeV/c โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคโปรตอน  $0.3 < p_T < 1.3$  GeV/c และ  $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$  GeV ในแบบจำลอง PACIAE + DCPC

ตาราง 9 แสดงอัตราการเกิดเคออนชนิดนิวไคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}\bar{p}$  จากการชนกันของทอว์กับทอว์ที่พลังงาน 130 GeV จำนวน 10,000 ครั้ง จากแบบจำลอง PACIAE + DCPC ที่  $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$  GeV

$\Delta m$ (GeV)	$K^-pp$ ( $10^{-4}$ )	$K^+\bar{p}\bar{p}$ ( $10^{-4}$ )
0.005	26.98	18.21
0.010	27.90	18.89
0.015	28.24	19.14
0.020	28.42	19.26
0.025	28.54	19.33
0.030	28.63	19.38
0.035	28.70	19.43
0.040	28.76	19.46
0.045	28.80	19.48
0.050	28.84	19.50



ภาพ 16 เปรียบเทียบอัตราการเกิดของคอนนิกนินวโคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  ที่  $0.005 \leq \Delta m \leq 0.05$  GeV

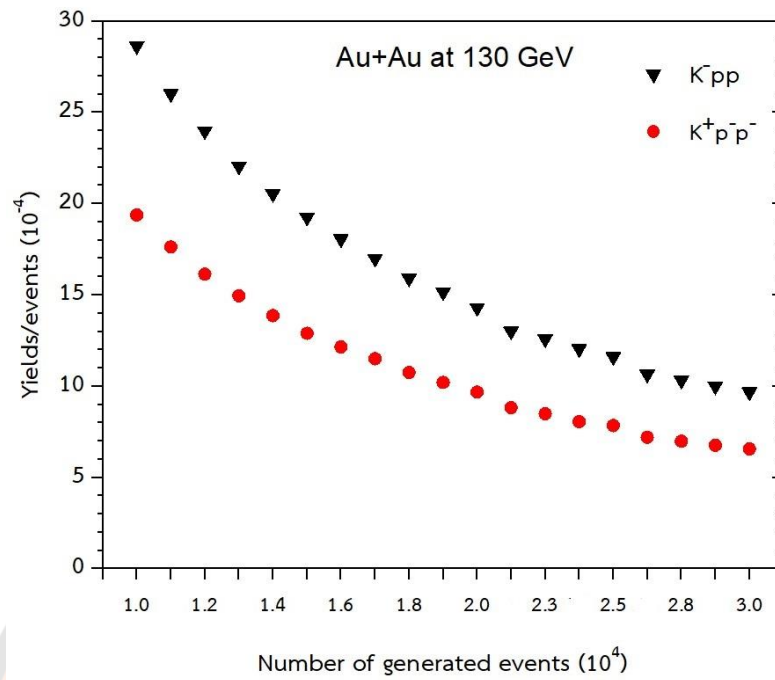
ภาพ 16 แสดงการจำลองการเกิดของคอนนิกนินวโคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  ที่การชนกันของของทองกับทองที่พลังงาน 130 GeV ในแบบจำลอง PACIAE + DCPC พบว่าเมื่อ  $\Delta m$  มีค่ามากขึ้น อัตราการเกิดคอนนิกนินวโคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  มีอัตราการเกิดเฉลี่ยคงที่โดยมุ่งสู่  $28.84 \times 10^{-4}$  ตัว และ  $19.50 \times 10^{-4}$  ตัว ตามลำดับ

จากการจำลองการชนกันของทองกับทองที่พลังงาน 130 GeV โดยมีพารามิเตอร์  $|y| < 0.1$ , Centrality = 0-6 % โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคเคออน  $0.2 < p_T < 1.0$  GeV/c โมเมนตัมตามขวางของอนุภาคโปรตอน  $0.3 < p_T < 1.3$  GeV/c และ  $\Delta m = 0.03$  GeV ในแบบจำลอง PACIAE และโปรแกรม DCPC ดังแสดงในตาราง 10



ตาราง 10 อัตราการเกิดเคออนนิควิลด์  $K^-pp$  และ  $K^+p\bar{p}$  จากการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนจำนวน 10,000 – 30,000 ครั้งที่พลังงาน 130 GeV จากแบบจำลอง PACIAE + DCPC

จำนวนการชน	$K^-pp$ ( $10^{-4}$ )	$K^+p\bar{p}$ ( $10^{-4}$ )
10,000	28.63	19.38
11,000	26.02	17.63
12,000	23.98	16.13
13,000	22.04	14.95
14,000	20.54	13.87
15,000	19.25	12.90
16,000	18.06	12.15
17,000	16.99	11.51
18,000	15.91	10.75
19,000	15.16	10.21
20,000	14.30	9.68
22,000	13.01	8.82
23,000	12.58	8.49
24,000	12.04	8.06
25,000	11.61	7.85
27,000	10.65	7.20
28,000	10.32	6.99
29,000	10.00	6.77
30,000	9.68	6.56



ภาพ 17 แสดงอัตราการเกิดเคออนนิกนินวโคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+p^-p^-$  จากการชนกันของทองกับทองจำนวน 10,000 – 30,000 ครั้งทีพลังงาน 130 GeV จากแบบจำลอง DCPC  
 $\Delta m = 0.030$  GeV

ภาพ 17 แสดงจำนวนการชนกันของทองกับทองที่ 10,000 – 30,000 ครั้งในแบบจำลอง PACIAE + DCPC ที่  $\Delta m = 0.03$  GeV พบว่าอัตราการเกิดของ  $K^-pp$  มีค่ามุ่งเข้าสู่  $9.68 \times 10^{-4}$  ตัวในขณะที่อัตราการเกิดเฉลี่ยของ  $K^+p^-p^-$  มีค่ามุ่งเข้าสู่  $6.56 \times 10^{-4}$  ตัว

## บทที่ 5

### บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้แสดงอัตราการเกิดของอนุภาคเคออน ( $K^+$ ,  $K^-$ ) และโปรตอน ( $p$ ,  $\bar{p}$ ) จากการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนที่พลังงาน 7 TeV ค่าแรพิดิตี  $|y| < 0.5$  และการชนกันของทองกับทองที่พลังงาน 130 GeV ค่าแรพิดิตี  $|y| < 0.1$  และ Centrality = 0 - 6 % โดยเปรียบเทียบผลการจำลองจากแบบจำลอง PACIAE กับผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ ALICE สำหรับการชนกันของโปรตอนกับโปรตอน และผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ STAR สำหรับการชนกันของทองกับทอง พบว่าผลการจำลองจากแบบจำลอง PACIAE มีค่าสอดคล้องกับผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการทั้ง 2 นอกจากนี้งานวิจัยยังใช้อัตราการเกิดของอนุภาคเคออนและโปรตอนจากแบบจำลอง PACIAE เป็นส่วนประกอบในการทำนายและจำลองการเกิดเคออนนิคนิวไคลด์  $K^-p$ ,  $K^+p$ ,  $K^-pp$  และ  $K^+pp$  ในแบบจำลอง DCPC

### สรุปผลการวิจัย

การทำนายการเกิดเคออนนิคนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  จากการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนโดยใช้มวลของ  $K^-p$  และ  $K^+p$  ที่ 1.425 GeV กับ  $\Delta m$  ระหว่าง 0.005 - 0.050 GeV และจำนวนการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนที่ 100,000 - 5,000,000 ครั้ง พบว่าอัตราการเกิดของอนุภาคเคออน ( $K^+$ ) และปฏิอนุภาคของเคออน ( $K^-$ ) มีอัตราการเกิดที่ใกล้เคียงกันรวมถึงอัตราการเกิดของอนุภาคโปรตอน ( $p$ ) และแอนติโปรตอน ( $\bar{p}$ ) ที่มีค่าใกล้เคียงกับปฏิอนุภาคของตัวเองเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเกิดเฉลี่ยของเคออนนิคนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+p$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม  $\Delta m$  แต่กลับมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มจำนวนการชนกันของโปรตอนกับโปรตอน ผลรวมของการเกิด  $K^-p$  และ  $K^+p$  ที่  $\Delta m = 0.020$  GeV มีค่าประมาณ  $8.29 \times 10^{-3}$  ตัว โดยจำแนกออกเป็น  $K^-p \approx 3.54 \times 10^{-3}$  ตัว และ  $K^+p \approx 4.75 \times 10^{-3}$  ตัว จากข้อมูลข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าอัตราการเกิดของ  $K^-p$  และ  $K^+p$  มีอัตราการเกิดที่ใกล้เคียงกันซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า  $K^-p$  และ  $K^+p$  เกิดมาจากการสลายตัวของอนุภาคบางชนิดที่เหมือนกันนั่นคือ  $\Lambda(1405)$  ตามที่นักวิทยาศาสตร์ได้มีการตีความไว้ว่า  $\Lambda(1405)$  คือ bound state ของ  $\bar{K}N$  interaction

ในส่วนของการเกิดเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}p$  จากการชนกันของทอว์กับทอว์โดยใช้มวลของ  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}p$  ที่ 2.352 GeV กับ  $\Delta m$  ระหว่าง 0.005 - 0.050 GeV และจำนวนการชนกันของทอว์กับทอว์ที่ 10,000 – 30,000 ครั้ง พบว่าอัตราการเกิดเฉลี่ยของอนุภาคเคออน ( $K^+$ ) และปฏิอนุภาคของเคออน ( $K^-$ ) มีจำนวน 43.40 ตัว และ 39.27 ตัว ตามลำดับซึ่งมีอัตราการเกิดที่ใกล้เคียงกัน แต่อัตราการเกิดเฉลี่ยของอนุภาคโปรตอน ( $p$ ) และแอนติโปรตอน ( $\bar{p}$ ) มีการเกิดที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดคือ  $p = 28.13$  ตัว และ  $\bar{p} = 19.03$  ตัว นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเกิดเฉลี่ยของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}p$  มีค่าคงที่เมื่อเพิ่ม  $\Delta m$  แต่กลับมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนการชนกันของทอว์กับทอว์ ผลรวมของการเกิด  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}p$  ที่  $\Delta m = 0.030$  GeV มีค่าประมาณ  $16.24 \times 10^{-4}$  ตัว โดยจำแนกออกเป็น  $K^-pp \approx 9.68 \times 10^{-4}$  ตัว และ  $K^+\bar{p}p \approx 6.56 \times 10^{-4}$  ตัว จากข้อมูลข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าอัตราการเกิดของ  $K^-pp$  มีอัตราการเกิดที่มากกว่าอัตราการเกิดของ  $K^+\bar{p}p$  เนื่องจากอัตราการเกิดของ  $p$  มีค่ามากกว่าอัตราการเกิดของ  $\bar{p}$  ทำให้สามารถสรุปได้ว่า  $K^-pp$  และ  $K^+\bar{p}p$  เกิดมาจาก  $K^-$  จับคู่โดยตรงกับ  $p$  อีสระ 2 ตัว และ  $K^+$  จับคู่โดยตรงกับ  $\bar{p}$  อีสระ 2 ตัว โดยไม่ได้มีที่มาจาก  $\Lambda^*p$  เนื่องจากอันตรกิริยาแบบแรงระหว่าง  $K^-$  กับ  $p$  คือกฏูญแจสำคัญในการรวมตัวเป็น  $K^-pp$  จากหัวข้อที่ 2.6

นอกจากนี้ในการคำนวณโมเมนตัมสัมพัทธ์ในการชนกันของโปรตอนกับโปรตอนจากแบบจำลอง PACIAE + DCPC ที่ระดับพลังงาน 7 TeV จำนวนการชน 1,000,000 ครั้ง  $\Delta m = 0.020$  GeV และ  $0.00 \leq \Delta p \leq 4.00$  GeV/c เพื่อเป็นเงื่อนไขที่ 3 ในการทำนายการเกิดเคออนนิกนิวไคลด์ นอกเหนือจากระยะห่างระหว่างแต่ละอนุภาคและมวลรวมของอนุภาคเคออนและโปรตอนในเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  และ  $K^+\bar{p}$  ซึ่งมีอยู่แล้วในแบบจำลอง PACIAE + DCPC พบว่าที่โมเมนตัมสัมพัทธ์  $0.80 \leq \Delta p \leq 2.50$  GeV/c อัตราการเกิดของ  $K^-p$  มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.00 ตัวไปจนถึง  $\approx 3.52 \times 10^{-3}$  ตัวและที่  $\Delta p > 2.50$  GeV/c อัตราการเกิดของ  $K^-p$  มีค่าคงที่อยู่ที่  $\approx 3.52 \times 10^{-3}$  ตัว ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดของ  $K^-p$  แบบไม่มีโมเมนตัมสัมพัทธ์ จึงทำให้เราทราบว่า การเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^-p$  มีการเกิดขึ้นอยู่ในช่วงของโมเมนตัมสัมพัทธ์ ที่  $\Delta p \geq 0.80$  GeV/c และโมเมนตัมสัมพัทธ์ที่มีค่ามากที่สุดในการส่งผลต่ออัตราการเกิดของ  $K^-p$  มีค่าเท่ากับ 2.50 GeV/c ส่วนอัตราการเกิดของ  $K^+\bar{p}$  ที่โมเมนตัมสัมพัทธ์  $0.60 \leq \Delta p \leq 3.00$  GeV/c มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.00 ตัวไปจนถึง  $\approx 4.68 \times 10^{-3}$  ตัวและที่  $\Delta p > 3.00$  GeV/c อัตราการเกิดของ  $K^+\bar{p}$  มีค่าคงที่อยู่ที่  $\approx 4.68 \times 10^{-3}$  ตัว ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดของ  $K^+\bar{p}$  แบบไม่มีโมเมนตัมสัมพัทธ์ จึงทำให้เราทราบว่า การเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์  $K^+\bar{p}$  มีการเกิดขึ้นอยู่ในช่วงของโมเมนตัมสัมพัทธ์ ที่  $\Delta p \geq 0.60$  GeV/c และโมเมนตัมสัมพัทธ์ที่มีค่ามากที่สุดในการส่งผลต่ออัตราการเกิดของ  $K^+\bar{p}$  มีค่าเท่ากับ

3.00 GeV/c โดยข้อมูลชุดนี้สามารถนำไปใช้ในการเป็นพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงการจำลองการเกิดของเคออนนิกนิวไคลด์ในแบบจำลอง PACIAE + DCPC ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นในอนาคต



# บรรณานุกรม



## บรรณานุกรม

- [1] สมศักดิ์ เสนาใหญ่, (2017). กำเนิดเอกภพ, สืบค้น 10 สิงหาคม 2023 จาก, <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7310-cosmology>
- [2] CERN, (1984). The Large Hadron Collider, สืบค้น 10 สิงหาคม 2023 จาก, <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>
- [3] R.L. Workman et al. (Particle Data Group), (2022). Prog.Theor.Exp.Phys. สืบค้น 10 สิงหาคม 2023 จาก, <https://pdg.lbl.gov/2023/web/viewer.html?file=../listings/rpp2023-list-K-plus-minus.pdf>
- [4] R.L. Workman et al. (Particle Data Group), (2022). Prog.Theor.Exp.Phys. สืบค้น 10 สิงหาคม 2023 จาก, <https://pdg.lbl.gov/2023/web/viewer.html?file=../listings/rpp2023-list-K-zero.pdf>
- [5] A. Ramos, J. Schaffner-Bielich, and J. Wambach, (2001). Lect. Notes Phys. 578, 175.
- [6] G. E. Brown, V. Thorsson, K. Kubodera, and M. Rho, (1992). Phys. Lett. B 291, 355.
- [7] B. H. Sa, D. M. Zhou, Y. L. Yan, X. M. Li, S. Q. Feng, B. G. Dong and X. Cai, (2012). PACIAE 2.0: An Updated parton and hadron cascade model (program) for the relativistic nuclear collisions Comput. Phys. Commun., 183, 333.
- [8] Y. L. Yan, G. Chen, X. M. Li, D. M. Zhou, M. J. Wang, S. Y. Hu, L. Ye and B. H. Sa, (2012). Predictions for the production of light nuclei in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 14 TeV. Phys. Rev. C., 85,024907.
- [9] Riga Technical University, (2023). The elementary particles forming the Standard Model, สืบค้น 10 สิงหาคม 2023 จาก, <https://www.rtu.lv/en/hep/particle-physics/standard-model>.
- [10] FIZZICS, (2023). STRANGE PARTICLES, WHAT ARE THEY AND WHY ARE THEY STRANGE, สืบค้น 10 สิงหาคม 2023 จาก, <https://www.fizzics.org/strange-particles-what-are-they-and-why-they-are-strange/>
- [11] J. Beringer et al.[Particle Data Group], (2012). Review of Particle Physics (RPP) pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 14 TeV. Phys. Rev. D., 86,010001.

- [12] D. J. Griffiths, (2012). Introduction To Elementary Particles NEW YORK, USA: WILEY (1987) 392p.
- [13] C. Fuchs, (2006). Kaon production in heavy ion reactions at intermediate energies. Prog. Part. Nucl. Phys.,56, 1.
- [14] F. Buccella, G. Miele, L. Rosa, P. Santorelli and T. Tuzi, (1989). An Upper Limit for the Proton Lifetime in SO(10).Phys. Lett. B.,233,178.
- [15] D. G. Lee, R. N. Mohapatra, M. K. Parida and M. Rani, (1995). Predictions for proton lifetime in minimal nonsupersymmetric SO(10) models: An update.Phys. Rev. D., 51,229.
- [16] S. N. Ahmed et al., (2004). Constraints on nucleon decay via 'invisible' modes from the Sudbury Neutrino Observatory Phys. Rev. Lett.,92,102004.
- [17] T. Gaitanos and M. Kaskulov, (2015). Toward relativistic mean-field description of N-nucleus reactions. Nucl. Phys. A., 940, 181.
- [18] N. Kaiser, P. B. Siegel and W. Weise, (1995). Nucl. Phys. A 594 325 [arXiv:nuclth/9505043].
- [19] R. H. Dalitz and S. F. Tuan, (1959). Phys. Rev. Lett. 2, 425.
- [20] T. Yamazaki and Y. Akaishi, (2007). The Basic anti-K nuclear cluster  $K^-pp$  and its enhanced formation in the  $p + p \rightarrow K^+ + X$  reaction. Phys. Rev. C.,76, 045201.
- [21] T. Yamazaki, A. Dote and Y. Akaishi, (2004). Invariant-Mass Spectroscopy for Condensed Single- and Double- $\bar{k}$  Nuclear Clusters to be Formed as Residues in Relativistic Heavy-Ion Collisions. Phys. Lett. B 587 167
- [22] Y. Akaishi and T. Yamazaki, (2002). Nuclear  $K^-$  bound states in light nuclei. Phys. Rev. C 65 044005.
- [23] T. Yamazaki and Y. Akaishi, (2002). ( $K^-, \pi^-$ ) production of nuclear  $K^-$  bound states in proton-rich systems via doorways Phys. Lett. B 535 70.
- [24] A. Mueller- Groeling, K. Holinde and J. Speth, (1990).  $K^-N$  interaction in the meson exchange framework. Nucl. Phys. A 513 557.
- [25] T. Waas, N. Kaiser and W. Weise, (1996). Low energy  $KN$  interaction in nuclear matter Phys. Lett. B 365 12.



- [26] J. Esmaili, Y. Akaishi and T. Yamazaki, (2010). Phys. Lett. B 686 23  
doi:10.1016/j.physletb.2010.01.075 [arXiv:0906.0505 [nucl-th]].
- [27] M. Bazzi et al., (2016). K-series X-rays yield measurement of kaonic hydrogen atoms in gaseous target. Nucl. Phys. A 954 7.
- [28] M. Tanabashi et al. (2018), (2019). (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001
- [29] N. Kaiser, P. B. Siegel and W. Weise, (1995). Chiral Dynamics and the Low Energy Kaon-Nucleon Interaction. Nucl. Phys. A 594 325.
- [30] N. Kaiser, T. Waas and W. Weise, (1997). SU(3) Chiral Dynamics with Coupled Channels: Eta and Kaon Photoproduction. Nucl. Phys. A 612, 297.
- [31] E. Oset and A. Ramos, (1998). Non perturbative chiral approach to s-wave  $\bar{K}N$  interactions. Nucl. Phys. A 635, 99.
- [32] E. Oset, A. Ramos and C. Bennhold, (2002). Low lying  $S=-1$  excited baryons and chiral symmetry. Phys. Lett. B 527, 99.
- [33] J. A. Oller and U. G. Meissner, (2001). Chiral dynamics in the presence of bound states: kaon–nucleon interactions revisited. Phys. Lett. B 500, 263.
- [34] C. Garcia-Recio, J. Nieves, E. Ruiz Arriola and M. J. Vicente Vacas, (2003).  $S=-1$  meson-baryon unitarized coupled channel chiral perturbation theory and the  $S_{01}$  resonances  $\Lambda(1405)$  and  $-\Lambda(1670)$  Phys. Rev. D 67, 076009.
- [35] C. Garcia-Recio, M. F. M. Lutz and J. Nieves, (2004). Quark mass dependence of s-wave baryon resonances. Phys. Lett. B 582, 49.
- [36] T. Hyodo, S. I. Nam, D. Jido and A. Hosaka, (2003). Flavor SU(3) breaking effects in the chiral unitary model for meson-baryon scatterings. Phys. Rev. C 68, 018201.
- [37] C. Garcia-Recio, J. Nieves and L. L. Salcedo, (2006). Phys. Rev. D 74 034025 [arXiv:hep-ph/0505233].
- [38] D. Jido, J. A. Oller, E. Oset, A. Ramos and U. G. Meissner, (2003). Chiral Dynamics of the Two  $\Lambda(1405)$  States. Nucl. Phys. A 725, 181.
- [39] J. C. Nacher, A. Parreno, E. Oset, A. Ramos, A. Hosaka and M. Oka, (2000). Chiral Unitary Approach To The  $N^*N^*\pi$ ,  $N^*N^*\eta$  Couplings For The  $N^*(1535)$  Resonance. Nucl. Phys. A 678, 187.

- [40] S. Pakvasa, S.F. Tuan, (1999).  $\Lambda_s(1405)$  and negative parity baryon states. Physics Letters B 459 301.
- [41] D.E. Groom et al., (2000). Eur. Phys. J. C15, 1.
- [42] C. Amsler, et al. (2008). (Particle Data Group), Phys. Lett. B667, 1.
- [43] M. Arima, S. Matsui, K. Shimizu, (1994).  $\Lambda(1405)$  and meson-baryon interactions in a quark model. Phys. Rev. C 49, 2831.
- [44] S. Takeuchi, K. Shimizu, (2007). Phys. Rev. C 76, 035204 [arXiv:hep-ph/0705.0565].
- [45] S. Takeuchi, K. Shimizu, (2009).  $\Lambda(1405)$  in a baryon-meson scattering with a bound state embedded in the continuum. Phys. Rev. C 79, 045204.
- [46] T. Sjostrand, S. Mrenna and P. Z. Skands, (2006). PYTHIA 6.4 Physics and Manual. Nonlinear Anal., 32, 447–454.
- [47] B. H. Sa, A. Bonasera, A. Tai and D. M. Zhou, (2002). Energy and centrality dependences of charged multiplicity density in relativistic nuclear collisions. Phys. Lett. B., 537, 268.
- [48] B. Alver et al. [PHOBOS Collaboration], (2011). Phobos results on charged particle multiplicity and pseudorapidity distributions in Au+Au, Cu+Cu, d+Au, and p+p collisions at ultra-relativistic energies. Phys. Rev. C., 83, 024913.
- [49] B. I. Abelev et al. [STAR Collaboration], (2009). on Systematic Measurements of Identified Particle Spectra in pp; d+ Au and Au+Au Collisions from STAR. Phys. Rev. C., 79, 034909.
- [50] J. Adam et al. [ALICE Collaboration], (2015). Eur. Phys. J. C 75 no.5, 226 doi:10.1140/epjc/s10052-015-3422-9 [arXiv:1504.00024 [nucl-ex]].
- [51] B. I. Abelev et al. [STAR Collaboration], (2009) Phys. Rev. C 79, 034909.



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยนครพนม

ภาคผนวก ก ตัวอย่างการใส่พารามิเตอร์ในแบบจำลอง PACIAE+DCPC ของการชนกันของ  
โปรตอนกับโปรตอนที่ระดับพลังงาน 7 TeV

5000000,100,7000

1,1,1,1

1,0,1,2,3,1

1,20,5,2,1,0

211,321,333,3122,-3122,3312,-3312,3334,-3334,-211

-321,310,2212,-2212,2112,-2112,3212,-3212,3112,3222

0.2,0.5,0.2,1.,3

-0.5,0.5

0.1,3.0

-0.5,0.5

0.2,6.0

-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5

0.,20.

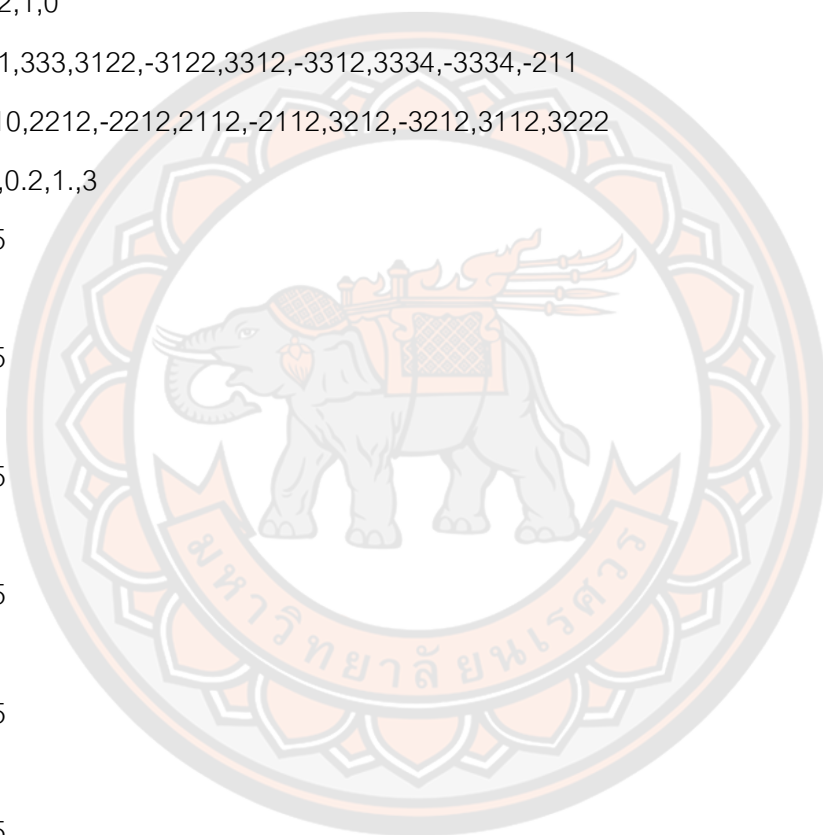
-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5



0.1,3.0

-0.5,0.5

0.2,6.0

-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5

0.3,6.0

-0.5,0.5

0.3,6.0

-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5

0.,20.

-0.5,0.5

0.,20.

3, 0.47, 0.40,1000, 1, 0.30, 0.58, 1.0, 1.4, 3

0.10, 0, 26, 18,1.00, 50, 2.00, 0, 0.03, 1

1, 2.5, 0,0.15, 0.4, 1000,800000., 1.0, 0.26, 2.0

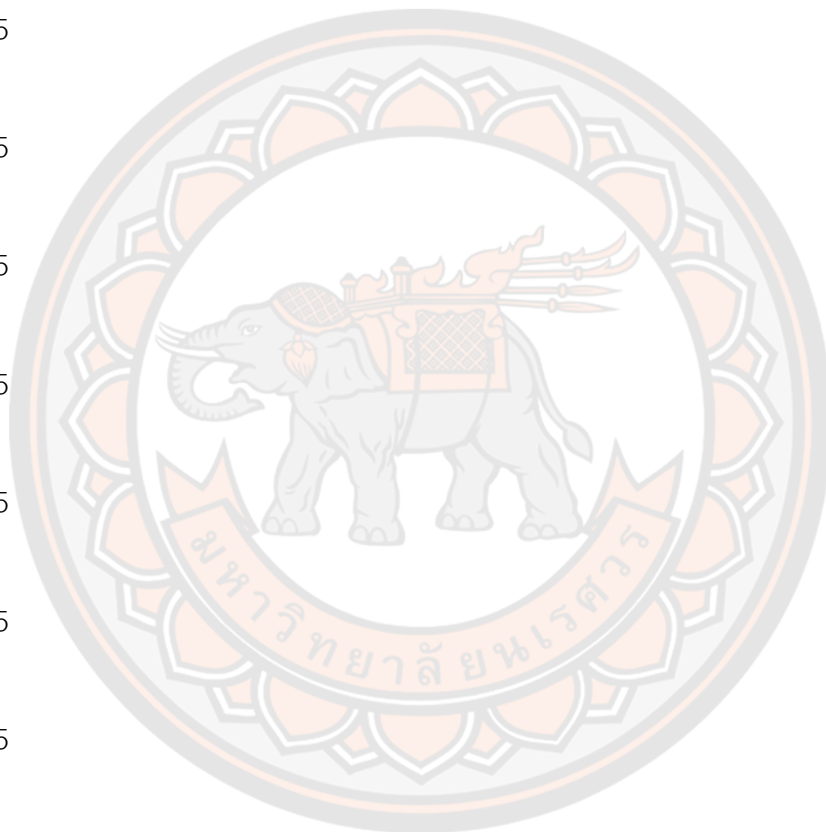
0.085, 0.305, 0.45,0.36, 1.0, 0.0,100.0, 3.0, 0.44, 5.0

1.442,0,0,1,1

0.,.5,1,1

2,0,0.001,10

0.005,0.01,0.015,0.02,0.025,0.03,0.035,0.04,0.045,0.05



0,1.0,0.5,0.1,0.05,0.02,0.01,0.005,0.002,0.001

0,1.0001,1.001,1.002,1.003,1.004,1.005,1.01,1.05,1.1

**ภาคผนวก ข ตัวอย่างการใส่พารามิเตอร์ในแบบจำลอง PACIAE+DCPC ของการชนกันของทอ  
งกับทอที่ระดับพลังงาน 130 GeV**

30000,100,1

197,79,197,79,

0.0001,0.01,0.,3.56,10

1,1,1.2,20000.,1

3.1416,1,1

20,5,2

211,321,333,3122,-3122,3312,-3312,3334,-3334,-211

-321,310,2212,-2212,2112,-2112,3112,3222,111,221

0.5,0.5,0.5,4,50

-1.0,1.0

0.3,1.3

-1.0,1.0

0.2,1.0

-0.1,0.1

0.4,1.9

-0.1,0.1

0.4,1.9

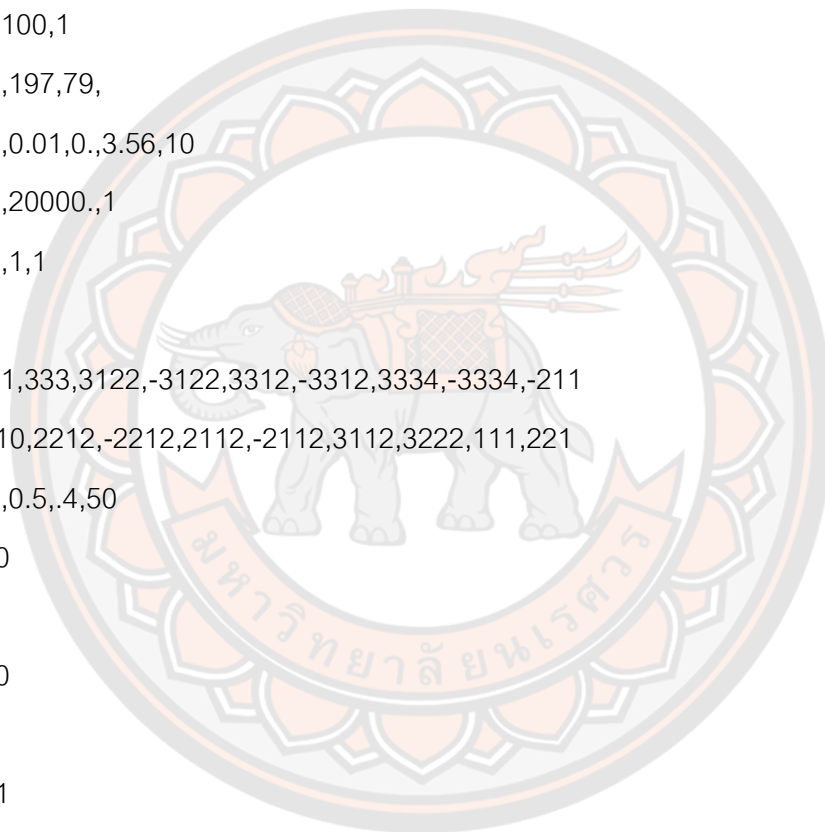
-0.1,0.1

0.4,1.9

-0.1,0.1

0.4,1.9

-0.1,0.1



0.4,1.9

-0.1,0.1

0.4,1.9

-0.1,0.1

0.4,1.9

-1.0,1.0

0.3,1.3

-1.0,1.0

0.2,1.0

-1.0,1.0

0.4,1.9

-1.0,1.0

0.3,1.3

-1.0,1.0

0.3,1.3

-0.1,0.1

0.4,1.9

-0.1,0.1

0.4,1.9

-0.1,0.1

0.4,1.9

-0.1,0.1

0.4,1.9

-0.1,0.1

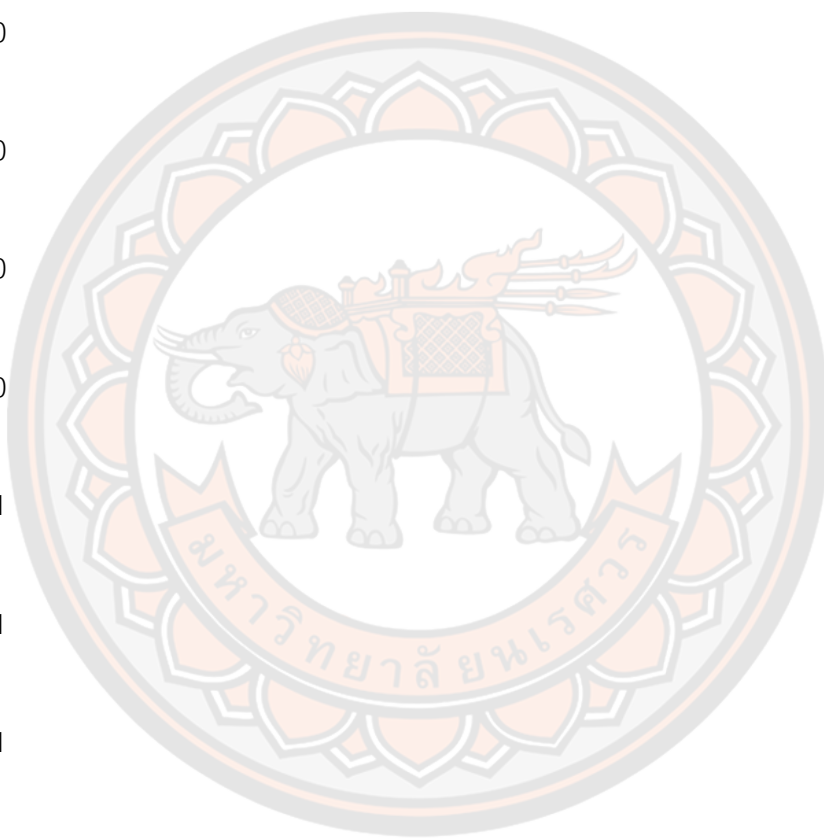
0.4,1.9

-0.1,0.1

0.4,1.9

4.5,10.,130.

0.,5,1,1,7



7.2,4.,1,40.,20.,.00000,.1 ! 7.2,4.,10.,40.,20.,.00000,.1

39.,39.,25,10.

0.5.,6,2.,.05.,.35,20

1,0,1,2,3 ! LUND 1,0,2,2,3 ! IF 2,0,1,3,0 LUND

3.,0.47,0.4000,1000,1,0.3,1.5,1.0,1.4,1.7

0.10,0,26,18,1.000,0,2.00,0,0.03,1

0,4,0,0,0.15,0.4, 0.0 , 800000.,1.0,0.26,2.0 !radm(6)

0.18,0.39,0.65,0.36,1.0,0.0,100.0,3.0,0.44,4.0

2,1,2

2,0,0.001,10

0.005,0.01,0.015,0.02,0.025,0.03,0.035,0.04,0.045,0.05

