

การเกิดเคออนในการชนของ $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ และ $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$
Kaon production in Au-197 and C-12 collisions

อรนุช เขตสูงเนิน^{1*}, สุกัญญา สมบุญ¹, ธงชัย เกตุคำ¹, พรรรัตน์ ศรีสวัสดิ์², ยูหมิง เจิง³, आयुท ลิมพิรัตน์⁴
และ ยูเปิง แยน⁴

Oranuch Ketsungnoen¹, Sukanya Sombun¹, Thongchai Katukum¹, Pornrad Srisawad²,
Yu-Ming Zheng³, Ayut Limphirat⁴ and Yupeng Yan⁴

¹ คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ วิทยาลัยนครราชสีมา

² ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

³ สถาบันพลังงานปรมาณูแห่งชาติจีน กรุงปักกิ่ง ประเทศจีน

⁴ สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

การชนของไอออนหนักที่มีพลังงานปานกลางและพลังงานสูง ซึ่งมีความสำคัญต่อการตรวจสอบคุณสมบัติของฮาดรอนใน
ตัวกลางที่มีความหนาแน่น โดยเฉพาะอนุภาคมีซอนแปลกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงในตัวกลาง การคำนวณทางทฤษฎีพบว่า
ศักย์ของ K^+N เป็นแรงผลักในสสารที่มีความหนาแน่น ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาคัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ มีซอน
จากการชนที่ระดับพลังงาน 1- 2 A GeV จากระบบการชนของ $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ ที่พลังงาน 1.50 A GeV และการชนของ
 $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$ ที่พลังงาน 1.8 A GeV ตามลำดับ โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ควอนตัมเชิงโมเลกุล (QMD) ซึ่งในผลการวิจัยแสดง
ให้เห็นว่าการคำนวณภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ มีซอน จากการชนของ นิวเคลียส - นิวเคลียส โดยการรวมศักย์
เคออนในตัวกลางของสมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็งมีผลสอดคล้องกับการทดลองของ KaoS

คำสำคัญ : ภาคตัดขวาง / การชนไอออนหนัก / เคออน / พลศาสตร์ควอนตัมเชิงโมเลกุล

Abstract

Intermediate and high energy heavy ion collisions provide a unique opportunity to investigate the properties of
hadrons in dense nuclear matter. In particular, strange mesons are considered to be sensitive to in-medium
modifications. Theory predicts a repulsive K^+N potential in dense matter. We study the calculation production cross
sections of K^+ mesons in heavy ion collisions at incident energy 1-2 A GeV for $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ collision and
 $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$ collisions within the quantum molecular dynamics (QMD) model. We also find that our calculated
production cross sections of K^+ mesons in nucleus-nucleus collisions by using the in-medium kaon potential and
with soft EOS and hard EOS are in good agreement with KaoS data.

Keywords : azimuthal / cross section / heavy-ion collisions / kaons / Quantum molecular

*Corresponding author. E-mail: nattanicha9@gmail.com

1. บทนำ

การชนของไอออนหนักแบบสัมพัทธภาพที่ระดับพลังงานในการเข้าชน 0.6 – 2.0 A GeV เป็นรูปแบบเฉพาะของการศึกษาพฤติกรรมของสสารนิวเคลียร์ที่สภาวะความหนาแน่นสูง ซึ่งการศึกษาเหล่านี้เป็นสิ่งท้าทายที่จะทดสอบความเข้าใจของสสารนิวเคลียร์ และสามารถนำความรู้ที่ได้ไปอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทางฟิสิกส์ เช่นปรากฏการณ์การเกิดดาวนิวตรอน (neutron stars) หรือ การเกิดซูเปอร์โนวา (Bethe, 1990) ดังนั้นตัวตรวจวัดที่สำคัญในการทดสอบเหล่านี้คือการเกิดของอนุภาคมีซอนแปลกในการชนกันแบบอิสระของนิวคลีออน-นิวคลีออน

การศึกษาพฤติกรรมของสสารนิวเคลียร์ที่ความหนาแน่นสูง และคุณสมบัติของฮาดรอนที่อยู่ในตัวกลางที่มีความหนาแน่นจากการชนของนิวเคลียส-นิวเคลียสของไอออนหนักตามหลักสัมพัทธภาพการเกิด และการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีซอนแปลก (Strange mesons) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับตัวกลาง (in-medium) ในสสารนิวเคลียร์ได้มีการคำนวณทางทฤษฎีทำนายผลศักยภาพอันตรกิริยา K^+N ในสสารนิวเคลียร์ว่าเป็นแรงผลักและศักย์ KN ในสสารนิวเคลียร์ว่าเป็นแรงดูด ดังนั้นอนุภาคเคออนและไพออนจึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาคุณสมบัติของฮาดรอนในสสารนิวเคลียร์ ซึ่งการทดลองของอนุภาคเคออนในนิวเคลียสเป้าจะให้ข้อมูลแบบศักย์เคออน (Kaon optical potential) และรวมถึงคุณสมบัติไฮเปอร์นิวคลีไอ คุณสมบัติในตัวกลางของฮาดรอนได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปฏิริยาการชนไอออนหนักตามหลักสัมพัทธภาพ (Uhlir *et al.*, 2005) ในศูนย์กลางการชนของระบบศูนย์กลางมวลระหว่าง $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ ภายใต้ระดับพลังงานในการชนที่ความหนาแน่นมีค่ามากกว่า 2-3 เท่า ความหนาแน่นปกติ จะพบได้จากงานวิจัย (Hartnack *et al.*, 1994) (Fuchs, 2006) (Hartnack, 2004) โดยพบว่าเครื่องมือที่มีสภาพไวต่อการตรวจสอบเงื่อนไขดังกล่าวคือมีซอนสเตรนจ์ที่เกิดขึ้น หรืออนุภาคที่เกิดขึ้นที่ต่ำกว่าพลังงานขีดเริ่มด้วยการชนแบบอิสระแบบนิวเคลียส-นิวเคลียส โดยที่ค่าของพลังงานขีดเริ่มของการเกิดอนุภาค K^+ ของปฏิริยา $NN \rightarrow K^+ \Lambda N$ เท่ากับ 1.58 A GeV (ในกรอบปฏิบัติการ) สำหรับปฏิริยา $NN \rightarrow NNK^+ K^+$ ของอนุภาค K^- เท่ากับ 2.5 A GeV กลไกที่สำคัญสำหรับการเกิด K^+ ในปฏิริยาการชนระหว่างไอออนหนัก ได้แก่พลังงานสะสมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการชนแบบต่อเนื่องในบริเวณของการเกิดปฏิริยาซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นบริเวณนั้นเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะปฏิริยาของ $\Delta N \rightarrow K^+ YN$ ในแกนแนลที่สองด้วยค่าโมเมนตัมที่เหมาะสม จะให้เกิดอนุภาค K^+ มากที่สุด นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นในบริเวณการเกิดปฏิริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มของสสารนิวเคลียร์ เนื่องจากค่าทางเดินอิสระเฉลี่ยค่อนข้างยาว (Long mean free path ≈ 5 fm ณ สภาวะความหนาแน่นปกติ) ที่มีเป็นลักษณะเฉพาะ จึงทำให้อนุภาค K^+ เป็นตัวตรวจวัดที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในช่วงความหนาแน่นสูงของปฏิริยาไอออนหนักและสำหรับการศึกษาสถานะนิวเคลียร์ (EOS) (Ko, 1984) (Aichelin and Ko, 1984) (Sturm *et al.*, 2001) (Fuchs *et al.*, 2001) (Hartnack *et al.*, 2006)

2. วิธีการ

ศึกษาพลศาสตร์ของอนุภาค K^+ ภายใต้พลศาสตร์ควาเรียนซ์เคออนโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ควอนตัมเชิงโมเลกุล (Quantum Molecular Dynamic, QMD) บนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ ซึ่งในแบบจำลอง QMD จะเป็นแบบจำลองสำหรับศึกษาการชนของไอออนหนักที่พัฒนามาจากแบบจำลองพลศาสตร์เชิงโมเลกุลแบบฉบับ (Classical molecular dynamics) ซึ่งแบบจำลองนี้จะเป็นทฤษฎีของระบบหลายวัตถุ (N-body theory) โดยข้อมูลทั้งหมดของระบบสามารถคำนวณได้จากการหาผลเฉลยของสมการลูอิววิลล์แบบหลายวัตถุ (N-body Liouville equation) ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาพลศาสตร์ของอนุภาค K^+ ภายใต้พลศาสตร์ควาเรียนซ์เคออนโดยใช้แบบจำลอง QMD ดังนี้

2.1 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ตกกระทบ (impact parameter) จากการชนของ $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ และ $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$

2.2 คำนวณภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ เทียบกับฟังก์ชันพลังงาน $E_{C.M.}$ (GeV) ณ มุมเชิงขั้วที่ $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$ โดยที่เปรียบเทียบการรวมศักย์และไม่รวมศักย์ (K^+N) และทดสอบสมการสถานะแบบแข็งและสมการสถานะแบบอ่อน จากการชนของ $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ และ $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$ ตามลำดับ

2.2.1 การชนของ $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$ ที่ระดับพลังงาน 1.80 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ($b_{\min} = 3.70$ fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ($b_{\max} = 5.23$ fm)

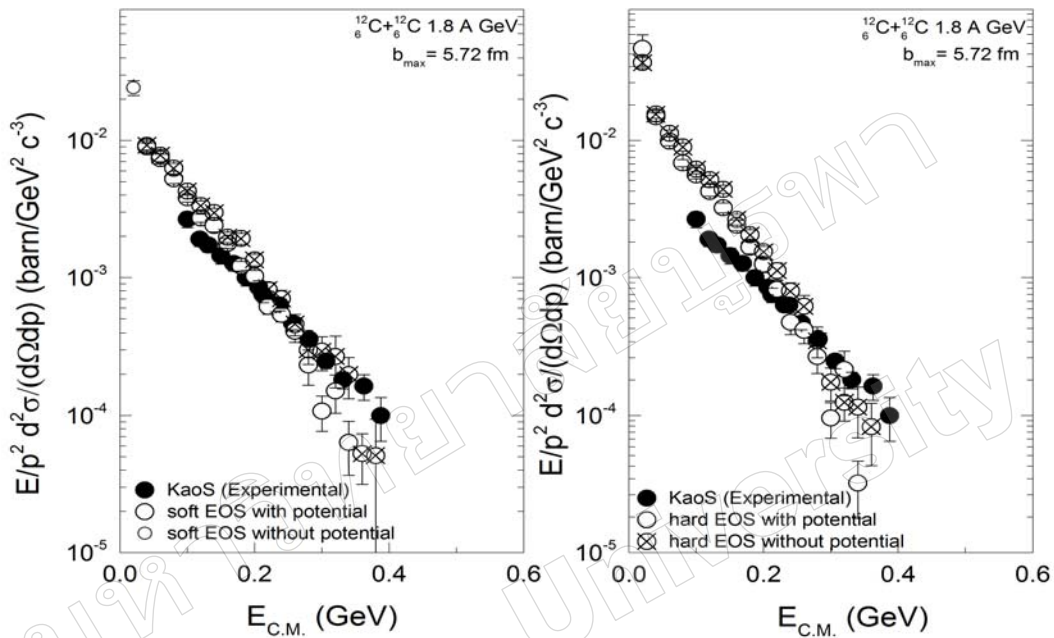
2.2.2 การชนของ $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ ที่ระดับพลังงาน 1.50 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ($b_{\min} = 9.35$ fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ($b_{\max} = 13.29$ fm)

2.3 เปรียบเทียบค่าภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ ที่คำนวณได้จากแบบจำลองพลศาสตร์ควอนตัมเชิงโมเลกุลกับค่าจากการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ KaoS (Hartnack *et al.*, 2012)

3. ผลและอภิปราย

ภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+

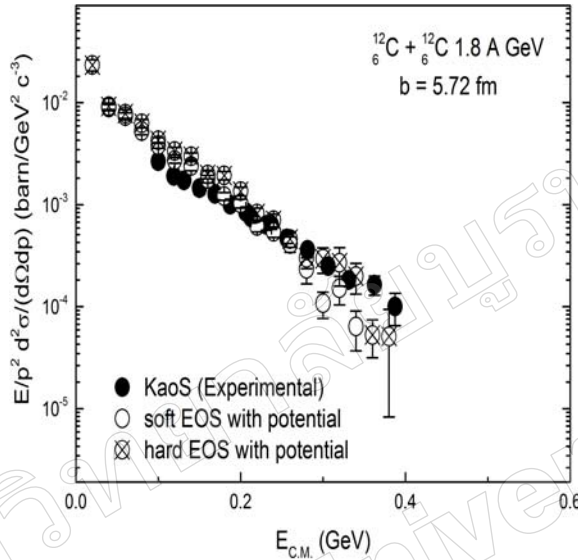
ผลการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ $E_{C.M.}$ (GeV) ของปฏิกิริยาการชนระหว่าง $^{12}_6C + ^{12}_6C$ ที่ระดับพลังงานในการเข้าชน 1.8 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ($b_{min} = 3.70$ fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ($b_{max} = 5.72$ fm) ที่มุมเชิงซ้าย $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$



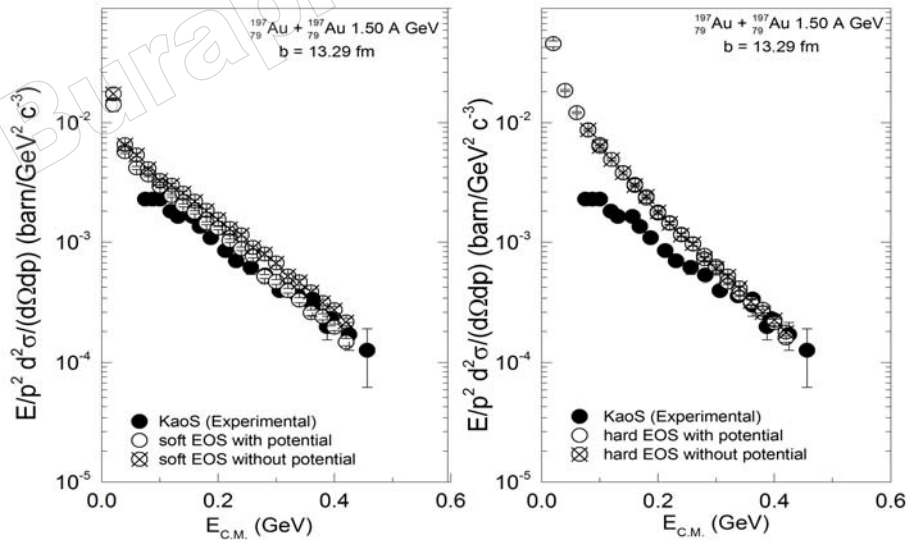
ภาพที่ 1 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ ($E_{C.M.}$) จาก ปฏิกิริยาการชนของ $^{12}_6C + ^{12}_6C$ ที่พลังงาน 1.8 A GeV ที่มุมเชิงซ้าย $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$ โดยสมการสถานะแบบอ่อน (ซ้าย) และสมการสถานะแบบแข็ง (ขวา) \otimes

จากภาพที่ 1 เป็นการคำนวณภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ $E_{C.M.}$ (GeV) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{12}_6C + ^{12}_6C$ ที่พลังงาน 1.8 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ($b_{min} = 3.70$ fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ($b_{max} = 5.72$ fm) ที่มุมเชิงซ้าย $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$ โดยสัญลักษณ์วงกลมทึบแสดงผลการทดลองของ KaoS (Hartnack *et al.*, 2012) เทียบกับสัญลักษณ์วงกลมโปร่งแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็งของการรวมตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) และสัญลักษณ์วงกลมกากบาทแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็งของการไม่รวมตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) พบว่าผลการคำนวณโดยไม่รวมตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) จะทำให้เกิดอนุภาค K^+ เกิดขึ้นมากและเห็นได้ชัดว่าผลการคำนวณมีค่าสูงกว่าการคำนวณโดยรวมตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) และการคำนวณโดยการรวมตัวของเคออน-นิวคลีออนของ Brown กับ Rho ของเคออนที่เกิดขึ้นทำให้โมเมนต์ส่วนของสเปกตรัมมีค่าลดลงและจากการคำนวณโดยแบบจำลอง QMD ซึ่งได้ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ของสมการสถานะแบบอ่อนที่รวมตัวกัน, สมการสถานะแบบอ่อนที่ไม่รวมตัวกัน, สมการสถานะแบบแข็งที่รวมตัวกันและสมการสถานะแบบแข็งที่ไม่รวมตัวกันเท่ากับ 5×10^{-4} , 2.6×10^{-3} , 8×10^{-4} และ 2.3×10^{-1} barn $GeV^2 c^{-3}$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง QMD ของสมการสถานะแบบอ่อนที่รวมตัวกันและสมการสถานะแบบแข็งที่รวมตัวกันมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าสมการสถานะที่ไม่รวมตัวกันด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผลการคำนวณโดยรวมตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) มีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกับผลการทดลองของ KaoS (Hartnack *et al.*, 2012)

จากภาพที่ 2 เป็นการคำนวณภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ $E_{C.M.}$ (GeV) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$ ที่พลังงาน 1.8 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ($b_{\min} = 3.70$ fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ($b_{\max} = 5.72$ fm) ที่มุมเชิงขั้ว $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$ โดยสัญลักษณ์วงกลมทึบแสดงผลการทดลองของ KaoS (Hartnack *et al.*, 2012) เทียบกับสัญลักษณ์วงกลมโปร่งแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนโดยรวมศักย์ของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) และสัญลักษณ์วงกลมทึบแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบแข็งโดยรวมศักย์ของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) ผลจากการคำนวณทางทฤษฎีด้วยสมการสถานะแบบอ่อน จะมีค่าใกล้เคียงกับสมการสถานะแบบแข็งเมื่อเพิ่มการคำนวณศักย์ของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) และผลการคำนวณทางทฤษฎีมีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกับผลการทดลองของ KaoS (Hartnack *et al.*, 2012)

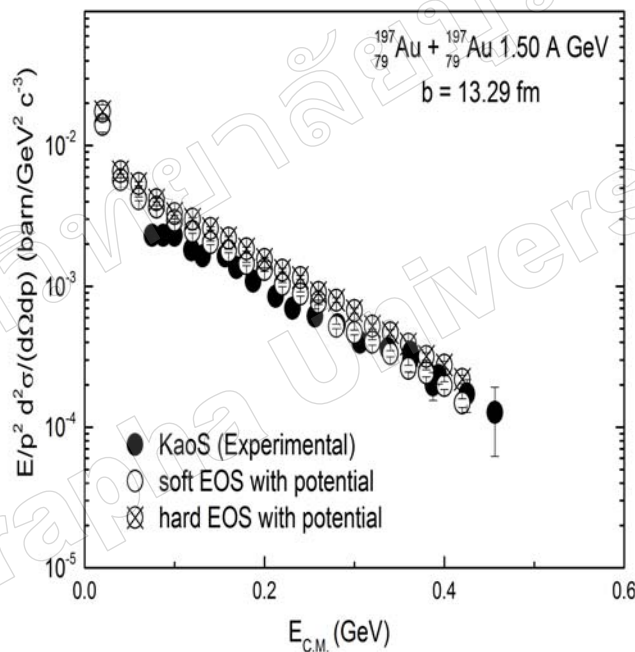


ภาพที่ 2 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ ($E_{C.M.}$) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$ ที่พลังงาน 1.8 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$ โดยสมการสถานะแบบอ่อนและสมการสถานะแบบแข็งของการรวมศักย์เคออน-นิวคลีออน



ภาพที่ 3 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ ($E_{C.M.}$) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ ที่พลังงาน 1.50 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$ โดยสมการสถานะแบบอ่อน (ซ้าย) และสมการสถานะแบบแข็ง (ขวา)

จากภาพที่ 3 เป็นการคำนวณภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ $E_{C.M.}$ (GeV) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ ที่พลังงาน 1.50 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ($b_{\min} = 9.40$ fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ($b_{\max} = 13.29$ fm) ที่มุมเชิงหัว $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$ โดยสัญลักษณ์วงกลมทึบแสดงผลการทดลองของ KaoS (Hartnack *et al.*, 2012) เทียบกับสัญลักษณ์วงกลมโปร่งแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็งของการรวมตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) และสัญลักษณ์วงกลมกากบาทแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็งของการไม่รวมตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) พบว่าผลการคำนวณโดยไม่รวมตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) จะทำให้เกิดอนุภาค K^+ เกิดขึ้นมาก และเห็นได้ชัดว่าผลการคำนวณมีค่าสูงกว่าการคำนวณโดยรวมตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) และการคำนวณโดยการรวมตัวของเคออน-นิวคลีออนของ Brown กับ Rho ของเคออนที่เกิดขึ้นทำให้โมเมนต์มีส่วนของสเปกตรัมมีค่าลดลง และพบว่าในช่วงพลังงานจลน์ 0.1-0.3 GeV จากการคำนวณโดยแบบจำลอง QMD ซึ่งได้ค่า RMSE ของสมการสถานะแบบอ่อนที่รวมตัว, สมการสถานะแบบอ่อนที่ไม่รวมตัว, สมการสถานะแบบแข็งที่รวมตัวและสมการสถานะแบบแข็งที่ไม่รวมตัว เท่ากับ 3.8×10^{-4} , 7.7×10^{-4} , 5.7×10^{-4} และ 6.5×10^{-4} barn $\text{GeV}^2 \text{c}^{-3}$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง QMD ของสมการสถานะแบบอ่อนที่ไม่รวมตัวและสมการสถานะแบบแข็งที่ไม่รวมตัวมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าสมการสถานะแบบอ่อนที่รวมตัว และสมการสถานะแบบแข็งที่รวมตัว



ภาพที่ 4 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ ($E_{C.M.}$) จาก ปฏิกิริยาการชนของ $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ ที่พลังงาน 1.50 A GeV ที่มุมเชิงหัว $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$ โดยสมการสถานะแบบอ่อนและสมการสถานะแบบแข็งของการรวมตัวของเคออน-นิวคลีออน

จากภาพที่ 4 เป็นการคำนวณภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ $E_{C.M.}$ (GeV) จากปฏิกิริยาการชนของ $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ ที่พลังงาน 1.50 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ($b_{\min} = 9.40$ fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ($b_{\max} = 13.29$ fm) ที่มุมเชิงหัว $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$ โดยสัญลักษณ์วงกลมทึบแสดงผลการทดลองของ KaoS (Hartnack *et al.*, 2012) เทียบกับสัญลักษณ์วงกลมโปร่ง แสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนโดยรวมตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) และสัญลักษณ์วงกลมกากบาท แสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบแข็งโดยรวมตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) ผลจากการคำนวณทางทฤษฎีด้วยสมการสถานะแบบอ่อน จะมีค่าใกล้เคียงกับสมการสถานะแบบแข็ง เมื่อเพิ่มการคำนวณตัวของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) และพบว่าผลการคำนวณทางทฤษฎีมีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกับผลการทดลองของ KaoS

4. บทสรุป

การคำนวณของภาคตัดขวางของอนุภาค K^+ เทียบกับพลังงานจลน์ $E_{C.M.}$ (GeV) จากการชนของ $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$ ที่พลังงาน 1.8 A GeV และจากการชนของ $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$ ที่พลังงาน 1.50 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$ โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ควอนตัมเชิงโมเลกุล เมื่อทดสอบการรวมศักย์ของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) ในสมการสถานะแบบอ่อนและสมการสถานะแบบแข็ง พบว่าผลการคำนวณโดยรวมศักย์ของเคออน-นิวคลีออน (K^+N) ในสมการสถานะแบบอ่อนและแข็ง มีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกับผลการทดลองของ KaoS

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (Thailand Center of Excellence in Physics (ThEP)) ที่สนับสนุนทุนการวิจัย และขอขอบคุณโครงการพัฒนาระบบกลุ่มคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง เพื่อการประมวลผลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (Suranaree University of Technology – High Performance Computing Cluster: SUT-HPCC) ที่เอื้อเฟื้อระบบคอมพิวเตอร์ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Aichelin, J. and Ko, C. M. (1985). Subthreshold kaon production as probe of the nuclear equation of state. *Physics Review Letters*, 55, 2661-2663.
- Bethe, H. A. (1990). Supernova mechanisms. *Reviews Of Modern Physics*, 62, 801-866.
- Fuchs, C. (2006). Kaon production in heavy ion reactions at intermediate energies. *Progress Particle and Nuclear Physics*, 56, 1-103.
- Fuchs, C., Faessler, A., Zabrodin, E. and Zheng, Y.M. (2001). Probing the nuclear equation of state by K^+ production in heavy-ion collisions. *Physics Review Letters*, 86(10), 1974-1977.
- Hartnack, C., Jaenicke, J., Sehn, L., Stocker, H. and Aichelin, J. (1994). Kaon production at subthreshold energies. *Nuclear Physics A*, 580, 643-667.
- Hartnack, J. (2004). Dynamics of K^+ production in heavy ion collisions close to threshold. habilitation thesis, Ph.D., Nantes University, Nantes.
- Hartnack, C., Oeschler, H. and Aichelin, J. (2006). Hadronic matter is soft. *Physics Review Letters*, 96(1), 012302-012305.
- Hartnack, C., Oeschler, H., Leifels, Y., et al. (2012). Strangeness production close to the threshold in proton-nucleus and heavy-ion collisions. *Physics Reports*, 510, 119-200.
- Ko, C. M. (1984). Effect of final state interactions on subthreshold K^- production in heavy ion collisions. *Physics Letters B*, 138(5), 361-384.
- Sturm, C., Böttcher, I., Debowski, M., Forster, A., Grosse, E., Koczon, P., et al. (2001). Evidence for a soft nuclear equation-of-state from kaon production in heavy-ion collisions. *Physics Review Letters*, 86(1), 38-42.
- Uhlig, F., Forster, A., Böttcher, I., Debowski, M., Dohrmann, F., Grosse, E., et al. (2005). Observation of different azimuthal emission patterns of K^+ and K^- Mesons in heavy-ion collisions at 1-2 A GeV. *Physics Review Letters*, 95(1), 012301.