

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<sup>1\*</sup>, สุกัญญา สมบุญ<sup>1</sup>, ธงชัย เกตุคำ<sup>1</sup>, พรรัตน์ ศรีสวัสดิ<sup>2</sup>, ยูหมิง เจิง<sup>3</sup>, อายุต ลิ้มพิรัตน์<sup>4</sup> และ ยูเป็ง แยน<sup>4</sup>  
Oranuch Ketsungnoen<sup>1</sup>, Sukanya Sombun<sup>1</sup>, Thongchai Katukum<sup>1</sup>, Pornrad Srisawad<sup>2</sup>, Yu-Ming Zheng<sup>3</sup>, Ayut

Limphirat<sup>4</sup> and Yupeng Yan<sup>4</sup>

<sup>1</sup> คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ วิทยาลัยนครราชสีมา

<sup>2</sup> ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

<sup>3</sup> สถาบันพลังงานปรมาณูแห่งชาติจีน กรุงปักกิ่ง ประเทศจีน

<sup>4</sup> สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### บทคัดย่อ

การชนของไอออนหนักที่มีพลังงานปานกลางและพลังงานสูงซึ่งมีความสำคัญต่อการตรวจสอบคุณสมบัติของฮาดรอนในตัวกลางที่มีความหนาแน่น โดยเฉพาะอนุภาคมีซอนแปลกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงในตัวกลาง การคำนวณทางทฤษฎีพบว่าศักย์ของ  $K^+N$  เป็นแรงหลักในสสารที่มีความหนาแน่น ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค  $K^+$  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) ซึ่งในผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการคำนวณภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค  $K^+$  มีซอน จากการชนของ นิวเคลียส - นิวเคลียส โดยการรวมศักย์เคออนในตัวกลางของสมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็งมีผลสอดคล้องกับการทดลองของ 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

การศึกษาพฤติกรรมของสสารนิวเคลียร์ที่ความหนาแน่นสูงและคุณสมบัติของฮาดรอนที่อยู่ในตัวกลางที่มีความหนาแน่นจากการชนของนิวเคลียส-นิวเคลียสของไอออนหนักตามหลักสัมพัทธภาพ การเกิดและการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีซอนแปลก (Strange mesons) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับตัวกลาง (in-medium) ในสสารนิวเคลียร์ได้มีการคำนวณทางทฤษฎีทำนายผลศักย์อันตรกิริยา  $K^+N$  ในสสารนิวเคลียร์ว่าเป็นแรงผลักและศักย์  $K^-N$  ในสสารนิวเคลียร์ว่าเป็นแรงดูด ดังนั้นอนุภาคเคออนและโพออนจึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาคุณสมบัติของฮาดรอนในสสารนิวเคลียร์ ซึ่งการทดลองของอนุภาคเคออนในนิวเคลียสจะให้ข้อมูลแบบศักย์เคออน (Kaon optical potential) และรวมถึงคุณสมบัติไฮเปอร์นิวคลีไอ คุณสมบัติในตัวกลางของฮาดรอนได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปฏิริยาการชนไอออนหนักตามหลักสัมพัทธภาพ (Uhlig 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 หรืออนุภาคที่เกิดขึ้นที่ต่ำกว่าพลังงานขีดเริ่ม ด้วยการชนแบบอิสระแบบนิวเคลียส-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  $\Delta N \rightarrow K^+ YN$  ในแกนเนลที่สองด้วยค่าโมเมนตัมที่เหมาะสม จะให้เกิดอนุภาค  $K^+$  มากที่สุด นอกจากนี้ค่าความหนาแน่นในบริเวณการเกิดปฏิริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มของสสารนิวเคลียร์ เนื่องจากค่าทางเดินอิสระเฉลี่ยค่อนข้างยาว (Long mean free path  $\approx 5$  fm ณ สภาวะความหนาแน่นปกติ) ที่มีเป็นลักษณะเฉพาะ จึงทำให้อนุภาค  $K^+$  เป็นตัวตรวจวัดที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในช่วงความหนาแน่นสูงของปฏิริยาไอออนหนักและสำหรับการศึกษาสมการสถานะนิวเคลียร์ (EOS) (Ko, 1984) (Aichelin and Ko, 1984) (Sturm et al., 2001) (Fuchs et al., 2001) (Hartnack et al., 2006)

## 2. วิธีการ

ศึกษาพลศาสตร์ของอนุภาค  $K^+$  ภายใต้พลศาสตร์โคเวเรียนซ์เคออนโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ควอนตัมเชิงโมเลกุล (Quantum Molecular Dynamic, QMD) บนระบบปฏิบัติการลีนุกซ์ ซึ่งในแบบจำลอง QMD จะเป็นแบบจำลองสำหรับศึกษาการชนของไอออนหนักที่พัฒนามาจากแบบจำลองพลศาสตร์เชิงโมเลกุลแบบฉบับ (Classical molecular dynamics) ซึ่งแบบจำลองนี้จะเป็นทฤษฎีของระบบหลายวัตถุ (N-body theory) โดยข้อมูลทั้งหมดของระบบสามารถคำนวณได้จากการหาผลเฉลยของสมการลูยิวิลแบบหลายวัตถุ (N-body Liouville equation) ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาพลศาสตร์ของอนุภาค  $K^+$  ภายใต้พลศาสตร์โคเวเรียนซ์เคออนโดยใช้แบบจำลอง QMD ดังนี้

2.1 คำนวณค่าพารามิเตอร์ตกกระทบ (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)

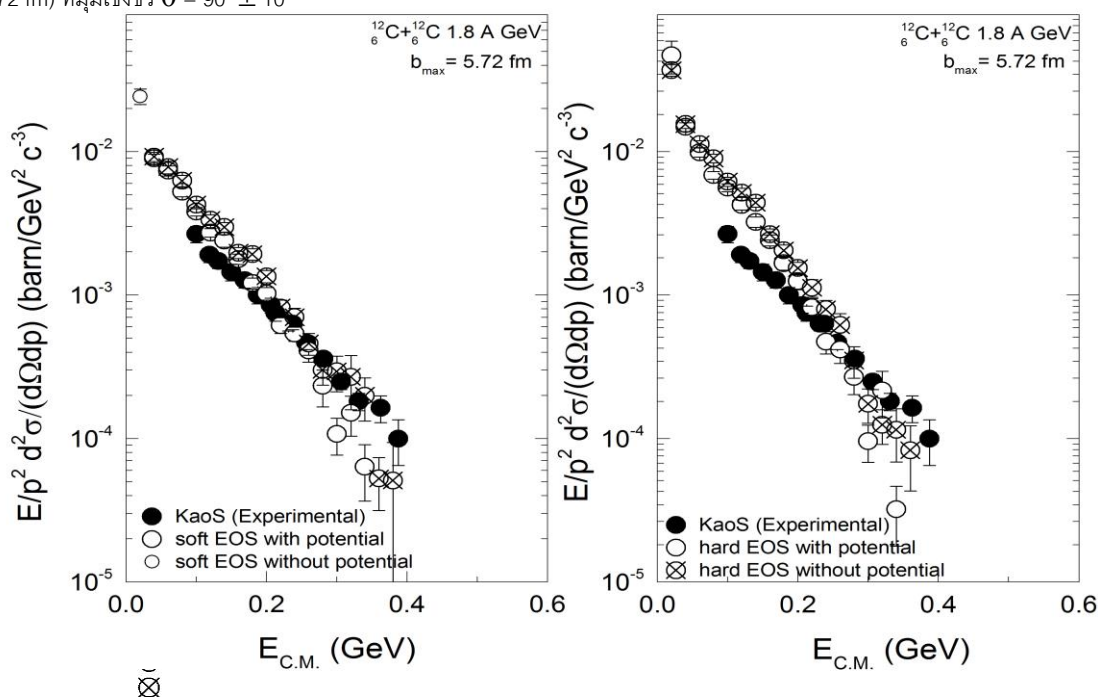
2.2.2 การชนของ  $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$  ที่ระดับพลังงาน 1.50 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ( $b_{\min} = 9.35$  fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ( $b_{\max} = 13.29$  fm)

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

### 3. ผลและอภิปราย

#### ภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค $K^+$

ผลการวิเคราะห์ภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค  $K^+$  เทียบกับพลังงานจลน์  $E_{C.M.}$  (GeV) ของปฏิกิริยาการชนระหว่าง  $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$  ที่ระดับพลังงานในการเข้าชน 1.8 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ( $b_{\min} = 3.70$  fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ( $b_{\max} = 5.72$  fm) ที่มุมเชิงซ้าย  $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$

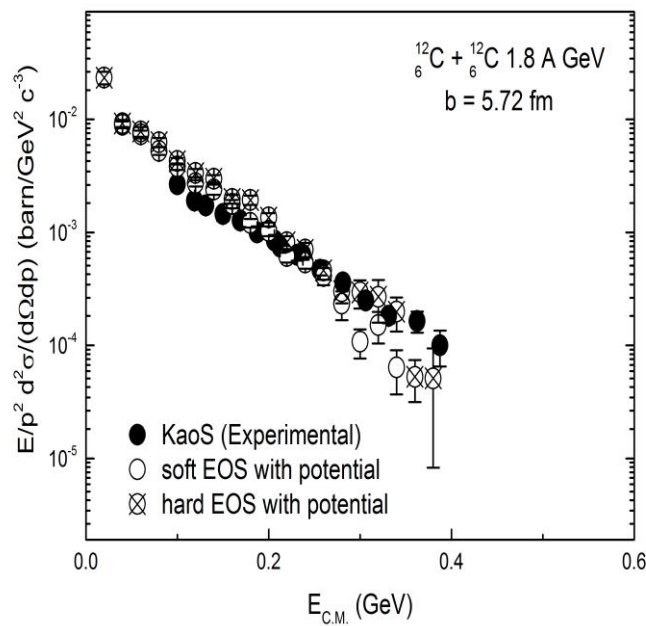


ภาพ 1 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด  $K^+$  เทียบกับพลังงานจลน์ ( $E_{C.M.}$ ) จาก ปฏิกิริยาการชนของ  $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$  ที่พลังงาน 1.8 A GeV ที่มุมเชิงซ้าย  $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$  โดยสมการสถานะแบบอ่อน (ซ้าย) และสมการสถานะแบบแข็ง (ขวา)

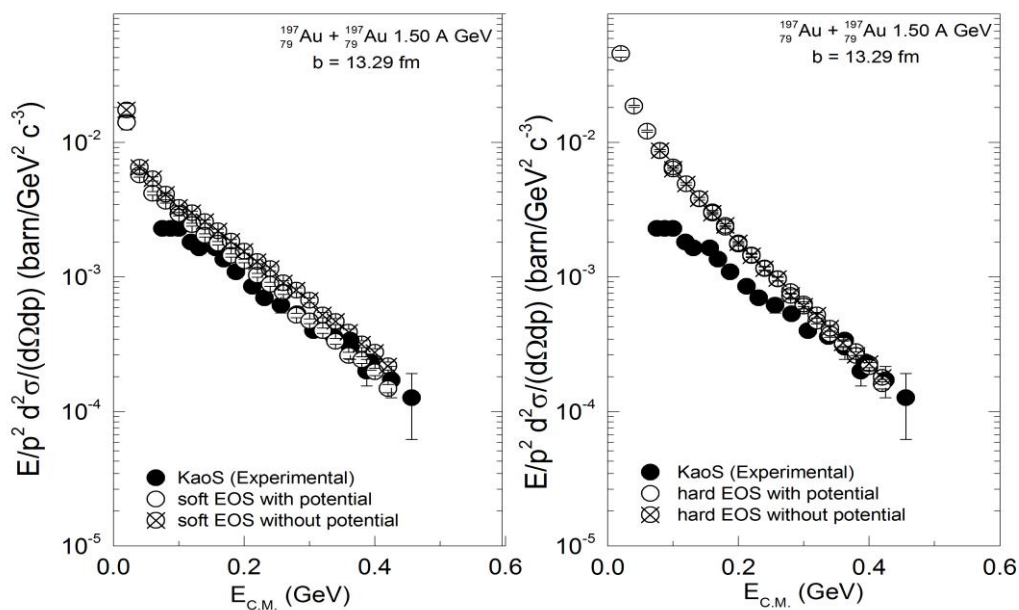
จากภาพ 1 เป็นการคำนวณภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค  $K^+$  เทียบกับพลังงานจลน์  $E_{C.M.}$  (GeV) จากปฏิกิริยาการชนของ  $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$  ที่พลังงาน 1.8 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ( $b_{\min} = 3.70$  fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ( $b_{\max} = 5.72$  fm) ที่มุมเชิงซ้าย  $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$  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 ของเคออนที่เกิดขึ้นทำให้โมเมนต์ส่วนของสเปกตัมมีค่าลดลง และจากการคำนวณโดยแบบจำลอง QMD ซึ่งได้ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ของสมการสถานะแบบอ่อนที่รวมตัว, สมการสถานะแบบอ่อนที่ไม่รวมตัว, สมการสถานะแบบแข็งที่รวมตัวและสมการสถานะแบบแข็งที่ไม่รวมตัว เท่ากับ  $5 \times 10^{-4}$ ,  $2.6 \times 10^{-3}$ ,  $8 \times 10^{-4}$  และ  $2.3 \times 10^{-1}$  barn  $\text{GeV}^2 \text{c}^{-3}$  ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง QMD ของสมการสถานะแบบอ่อนที่รวมตัวและสมการสถานะแบบแข็งที่รวมตัวมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าสมการสถานะที่ไม่รวมตัว ด้วยเหตุนี้

จึงทำให้ผลการคำนวณโดยรวมของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+$ N) มีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกับผลการทดลองของ KaoS (Hartnack et al., 2012)

จากภาพ 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) เทียบกับสัญลักษณ์วงกลมโปร่งแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนโดยรวมของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+$ N) และสัญลักษณ์วงกลมกากบาทแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบแข็งโดยรวมของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+$ N) ผลจากการคำนวณทางทฤษฎีด้วยสมการสถานะแบบอ่อน จะมีค่าใกล้เคียงกับสมการสถานะแบบแข็ง เมื่อเพิ่มการคำนวณศักยภาพของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+$ N) และผลการคำนวณทางทฤษฎีมีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกับผลการทดลองของ KaoS (Hartnack et al., 2012)

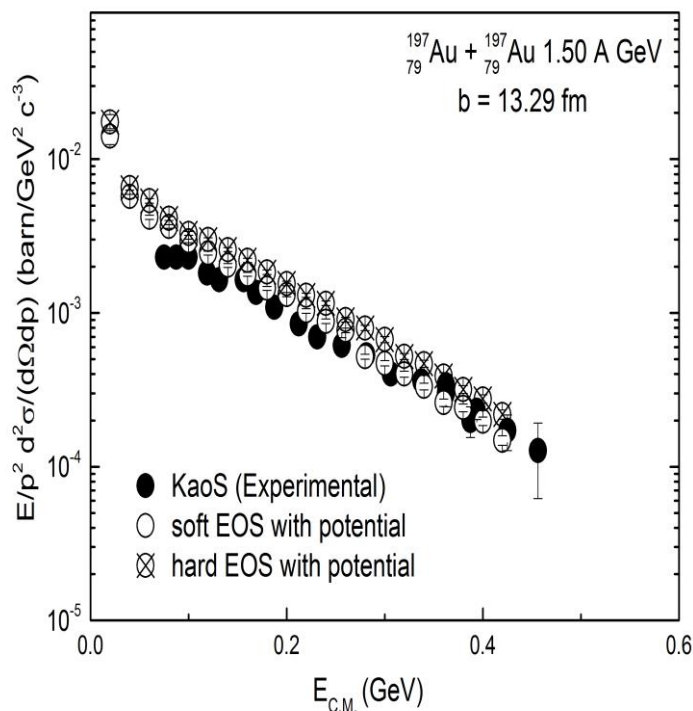


ภาพ 2 การคำนวณภาคตัดขวางของการเกิด  $K^+$  เทียบกับพลังงานจลน์ ( $E_{C.M.}$ ) จาก ปฏิกิริยาการชนของ  $^{12}_6\text{C} + ^{12}_6\text{C}$  ที่พลังงาน 1.8 A GeV ที่มุมเชิงขั้ว  $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$  โดยสมการสถานะแบบอ่อนและสมการสถานะแบบแข็งของการรวมศักยภาพเคออน-นิวคลีออน



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

จากภาพ 3 เป็นการคำนวณภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค  $K^+$  เทียบกับพลังงานจลน์  $E_{C.M.}$  (GeV) จากปฏิกริยาการชนของ  $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$  ที่พลังงาน 1.50 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ( $b_{\min} = 9.40$  fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ( $b_{\max} = 13.29$  fm) ที่มุมเชิงขั้ว  $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$  โดยสัญลักษณ์วงกลมทึบแสดงผลการทดลองของ KaoS (Hartnack et al., 2012) เทียบกับสัญลักษณ์วงกลมโปร่งแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็งของการรวมคักย์ของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+N$ ) และสัญลักษณ์วงกลมกากบาทแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็งของการไม่รวมคักย์ของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+N$ ) พบว่าผลการคำนวณโดยไม่รวมคักย์ของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+N$ ) จะทำให้เกิดอนุภาค  $K^+$  เกิดขึ้นมากและเห็นได้ชัดว่าผลการคำนวณมีค่าสูงกว่าการคำนวณโดยรวมคักย์ของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+N$ ) และการคำนวณโดยการรวมคักย์ของเคออน-นิวคลีออนของ Brown กับ Rho ของเคออนที่เกิดขึ้นทำให้โมเมนต์ส่วนของสเปกตรัมมีค่าลดลง และพบว่าในช่วงพลังงานจลน์ 0.1-0.3 GeV จากการคำนวณโดยแบบจำลอง QMD ซึ่งได้ค่า RMSE ของสมการสถานะแบบอ่อนที่รวมคักย์, สมการสถานะแบบอ่อนที่ไม่รวมคักย์, สมการสถานะแบบแข็งที่รวมคักย์และสมการสถานะแบบแข็งที่ไม่รวมคักย์ เท่ากับ  $3.8 \times 10^{-4}$ ,  $7.7 \times 10^{-4}$ ,  $5.7 \times 10^{-4}$  และ  $6.5 \times 10^{-4}$  barn  $\text{GeV}^2 \text{ c}^{-3}$  ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง QMD ของสมการสถานะแบบอ่อนที่รวมคักย์และสมการสถานะแบบแข็งที่ไม่รวมคักย์มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าสมการสถานะแบบอ่อนที่รวมคักย์ และสมการสถานะแบบแข็งที่รวมคักย์



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

จากภาพ 4 เป็นการคำนวณภาคตัดขวางของการเกิดอนุภาค  $K^+$  เทียบกับพลังงานจลน์  $E_{C.M.}$  (GeV) จากปฏิกริยาการชนของ  $^{197}_{79}\text{Au} + ^{197}_{79}\text{Au}$  ที่พลังงาน 1.50 A GeV โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตกกระทบต่ำสุด ( $b_{\min} = 9.40$  fm) และค่าพารามิเตอร์ตกกระทบสูงสุด ( $b_{\max} = 13.29$  fm) ที่มุมเชิงขั้ว  $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$  โดยสัญลักษณ์วงกลมทึบแสดงผลการทดลองของ KaoS (Hartnack et al., 2012) เทียบกับสัญลักษณ์วงกลมโปร่งแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนโดยรวมคักย์ของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+N$ ) และสัญลักษณ์วงกลมกากบาทแสดงผลการคำนวณโดยใช้สมการสถานะแบบแข็งโดยรวมคักย์ของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+N$ ) ผลจากการคำนวณทางทฤษฎี

ด้วยสมการสถานะแบบอ่อน จะมีค่าใกล้เคียงกับสมการสถานะแบบแข็ง เมื่อเพิ่มการคำนวณศักย์ของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+N$ ) และพบว่าผลการคำนวณทางทฤษฎีมีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกับผลการทดลองของ KaoS

#### 4. บทสรุป

การคำนวณของภาคตัดขวางของอนุภาค  $K^+$  เทียบกับพลังงานจลน์  $E_{C.M.}$  (GeV) จากการชนของ  $^{12}_6C + ^{12}_6C$  ที่พลังงาน 1.8 A GeV และจากการชนของ  $^{197}_{79}Au + ^{197}_{79}Au$  ที่พลังงาน 1.50 A GeV ที่มุมเชิงซ้าย  $\theta = 90^\circ \pm 10^\circ$  โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ควอนตัมเชิงโมเลกุล เมื่อทดสอบการรวมศักย์ของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+N$ ) ในสมการสถานะแบบอ่อนและสมการสถานะแบบแข็ง พบว่าผลการคำนวณโดยรวมศักย์ของเคออน-นิวคลีออน ( $K^+N$ ) ในสมการสถานะแบบอ่อนและแข็ง มีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกับผลการทดลองของ KaoS

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (Thailand Center of Excellence in Physics (ThEP)) ที่สนับสนุนทุนการวิจัย และขอขอบคุณโครงการพัฒนาระบบกลุ่มคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงเพื่อการประมวลผลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (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., Bottcher, 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., Bottcher, 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.