อภิวิชญ์ กิตติรัตน์พัฒนา : การผลิตอนุภาคนิวเคลียสเบาและไฮเปอร์นิวเคลียสจากการชนกันของไอออนหนักเชิงสัมพันธภาพ (FORMATION OF LIGHT NUCLEI AND HYPERNUCLEI IN RELATIVISTIC HEAVY-ION COLLISIONS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.คริสทอฟ เฮโรล์ด, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ศาสตราจารย์ ดร.มาคุส ไบลเชอร์, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.อายุทธ ลิ้มพิรัตน์, 170 หน้า.

คำสำคัญ: การชนกันของไอออนหนัก/ การไหล/ การผลิตคริสเตอร์/ พลศาสตร์โมเลกุลควอนตัมเชิงสัมพันธภาพ

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นไปที่การทำความเข้าใจพฤติกรรมร่วมกันระหว่างกาลอวกาศของการชนกันของไอออนหนักและ(ไฮเปอร์)นิวเคลียสรวมทั้งปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผมกระทบ ซึ่งมีความสำคัญต่อการศึกษาสมการสถานะ (EoS) ของสสารที่ช่วงพลังงานต่ำของโปรแกรมการสแกนด้วยพลังงาน BES รวมถึงสถาบัน FAIR และ HADES โดยใช้แบบจำลองการขนส่ง UrQMD เวอร์ชั่น 3.5 เราทำการปรับปรุงแบบจำลองการรวมตัวเชิงเรขาคณิตเชิงพื้นที่ของ(แอนติ)ดิวเทอรอนและรัศมีแหล่งกำเนิด(แอนติ)นิวคลีออน ผลการวิจัยที่ได้จากการฟิตติ้งกับค่าพารามิเตอร์ของการรวมตัวจากการทดลอง B_2 และ $\overline{B_2}$ แสดงค่าสูงสุดของรัศมีหรือปริมาตรของไฟร์บอลที่อาจบ่งชี้ว่าเป็นพฤติกรรมวิกฤตได้ ณ พลังงานการชน $\sqrt{s_{NN}} = 27$ GeV ซึ่งรัศมีของไฟร์บอลที่ได้จากการศึกษามีนิยามสมมูลกับปริมาตรของ HBT ดังนั้นผลกระทบของการเปลี่ยนสถานะของสสารต่อรัศมี HBT จากสมการสถานะ (EoS) ต่าง ๆ ได้แก่ การชนแบบอิสระ (cascade) การชนกันภายใต้สมการสถานะแบบแข็ง (hard EoS), สมการสถานะอย่างอ่อน (soft EoS) และสมการสถานะแบบสนามเฉลี่ยไครัล (chiral mean field EoS) จึงถูกศึกษาโดยใช้การแทรกสอด HBT ของสองไพออน สมการสถานะของสนามเฉลี่ยไครัลที่มีการเปลี่ยนวัฏภาคได้ $\left(\text{CMF_PT2}\right)$ แสดงพฤติกรรมวิกฤตทั้งในค่าของ R_O/R_S และ $R_O^2 - R_S^2$ รวมถึงการยืดออกของฟังก์ชันการกระจายตัวของเวลาของไพออน ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลผลทดลองได้ดีกว่าสมการสถานะอื่น ๆ ความหนาแน่นของสสารนิวเคลียร์ (ρ_B) ถูกคาดการณ์ว่าอยู่ในช่วงประมาณ 2-3 เท่าของความหนาแน่นอิ่มตัว (ρ_0) ณ ช่วงพลังงาน $\sqrt{s_{NN}} \approx 4$ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสถานะดังกล่าวและไม่เกินความหนาแน่นของการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของ $\left(\text{CMF_PT3}\right)$ ทำให้ทราบว่าความหนาแน่นที่จะสามารถสร้างได้ ณ ช่วงพลังงานนี้น้อยกว่า 4-5 เท่าของความหนาแน่นอิ่มตัวนิวเคลียร์ นอกจากนี้เราเสนอให้ปรับปรุงการคำนวณและวัดค่าพารามิเตอร์การรวมตัว $\left(B_A\right)$ สำหรับพลังงานต่ำโดยใช้สูตรที่พิจารณาจากกาลอวกาศของการชนและสมดุลของไอโซสปินเพื่อการคำนวณปริมาณนิวคลีออนทั้งหมดนับตั้งแต่ช่วงแรกของการชน ความสัมพันธ์กับพลังงานการชนกันของค่าพารามิเตอร์การรวมตัว $\left(B_A\right)$ ที่ปรับปรุงแล้วที่พลังงานต่ำสอดคล้องกับค่าที่ทำนายจาก HBT ดังที่คาดไว้ เพื่อเป็นการยืนยันว่ากลไกการก่อตัวของคริสเตอร์เป็นกลไกที่เกิดขึ้นจริงมากกว่ากลไกเชิงอุณหพลศาสาตร์ เราทำการวิเคราะห์เชิงกาลอวกาศของกลไกการผลิตคริสเตอร์โดยเสนอให้ใช้พลศาสตร์ของไอโซสปิน $\left(\Delta Y = \left(Y_{\pi^-} - Y_{\pi^+}\right)\right)$ เป็นตัวชี้วัด ค่าจุดสูงสุดที่สังเกตได้จาก d, t และ ^{3}He เมื่อเทียบ

กับ ΔY ของ UrQMD สอดคล้องกับการประมาณจากทฤษฎีตามสมมุติฐาน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สนับสนุนว่ากลไกการรวมตัวเป็นกลไกที่ถูกต้อง สุดท้ายเราแสดงศักยภาพของการใช้ปฏิกิริยาที่เหนี่ยวนำด้วยไพออนในการทดลอง HADES ที่พลังงานต่ำและระบบขนาดเล็กสำหรับการศึกษาการก่อตัวของ(ไฮเปอร์)นิวเคลียส ผลลัพธ์จากแบบจำลองการรวมตัวและแบบจำลองการแตกออกเชิงสถิติ (SMM) ชี้ให้เห็นว่าปริมาณผลผลิตของ(ไฮเปอร์)นิวเคลียสมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งทดลองพลังงานสูง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของขนาดของระบบกับอัตราส่วนของ ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}/\Lambda$ จากปฏิกิริยา $\pi^- + \mathrm{C}$ และ $\pi^- + \mathrm{W}$ แสดงการลดทอนอย่างรุนแรงเมื่อขนาดของระบบเล็กลงซึ่งสอดคล้องและสนับสนุนการทำนายจากแบบจำลองการเชื่อมติดและหักล้างค่าทำนายของแบบจำลองเชิงอุณหพลศาสตร์

สาขาวิชาฟิสิกส์ ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ปีการศึกษา 2567 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

APHIWIT KITTIRATPATTANA : FORMATION OF LIGHT NUCLEI AND HYPERNUCLEI IN RELATIVISTIC HEAVY-ION COLLISIONS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHRISTOPH HEROLD, THESIS CO-ADVISOR : PROF. MARCUS BLEICHER, THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. AYUT LIMPHIRAT, Ph.D. 170 PP.

Keyword: Heavy-ion collision/ Collective flow/ Cluster formation/ Relativistic quantum molecular dynamics

The space-time picture of the fireball geometry and (hyper)nuclei formation in heavy-ion collisions is explored, considering various factors crucial for EoS studies at lower energies, specifically around FAIR and HADES energies, by utilizing the UrQMD v3.5 transport model. The spatial geometric coalescence model to study (anti)deuteron formation is improved and used to extract the (anti)nucleon source radii by fitting the (anti)deuteron formation rate with the available coalescence parameter data $B_2\left(\overline{B_2}\right)$. The findings suggest potential critical behavior on the emission source at $\sqrt{s_{NN}} = 27$ GeV. The antinucleon distributions from UrQMD support the presence of an annihilation region at the core of the emission source for all energies. The effects of a phase transition from cascade, hard, soft and chiral mean field EoS on the emission source are investigated by two-pion HBT interferometry. The chiral mean field with a phase transition (CMF_PT2) EoS exhibits critical behavior in R_O/R_S and $R_O^2 - R_S^2$ as well as a prolongation of the freeze-out time distribution of π^- from UrQMD simulations, showing good agreement with the experimental data. The analyses from both $R_O - R_S$ and the time distribution indicate that only the phase transition from the CMF_PT2 occurs, while the phase transition from the CMF_PT3 is never reached. Thus, according to their density-dependent nature, we conclude that the nuclear density ρ_B is around $2 - 3$ times the saturation density ρ_0 at $\sqrt{s_{NN}} \approx 4$ GeV. We further propose corrections to the measurement of the coalescence parameter B_A for lower energies with the proper formula for estimating primordial protons and neutrons based on the isospin equilibration in the system. As expected, the collision energy dependence of the corrected B_A at low energies aligns well with HBT predictions. Cluster formation mechanisms are analyzed utilizing the different space-time pictures. The isospin triggering is proposed to solve the tension between the thermal emission at the chemical freeze-out and the coalescence at kinetic freeze-out. A dependence on $\Delta Y = Y_{\pi^-} - Y_{\pi^+}$ is expected if the clusters are formed by coalescence. The observed maxima of d, t, and ^{3}He with respect to ΔY from the UrQMD box coalescence model agree with our theoretical assumptions and provide an experimental method to distinguish coalescence

from thermal production. Lastly, The potential usage of pion-induced reactions at the HADES experiment for low energies and smaller system sizes for (hyper)nuclei formation studies is demonstrated. The UrQMD box coalescence model and the Statistical Multifragmentation Model (SMM) results show that (hyper)nuclei abundances are comparable to those at high-energy facilities. Additionally, the system size-dependence of ${}^{3}_{\Lambda}\mathrm{H}/\Lambda$ from $\pi^- + \mathrm{C}$ and $\pi^- + \mathrm{W}$ shows strong suppression at smaller system sizes, thus further supporting the coalescence model for hypernuclei production.

School of Physics
Academic Year 2024

Student's Signature _____
Advisor's Signature _____
Co-Advisor's Signature _____
Co-Advisor's Signature _____