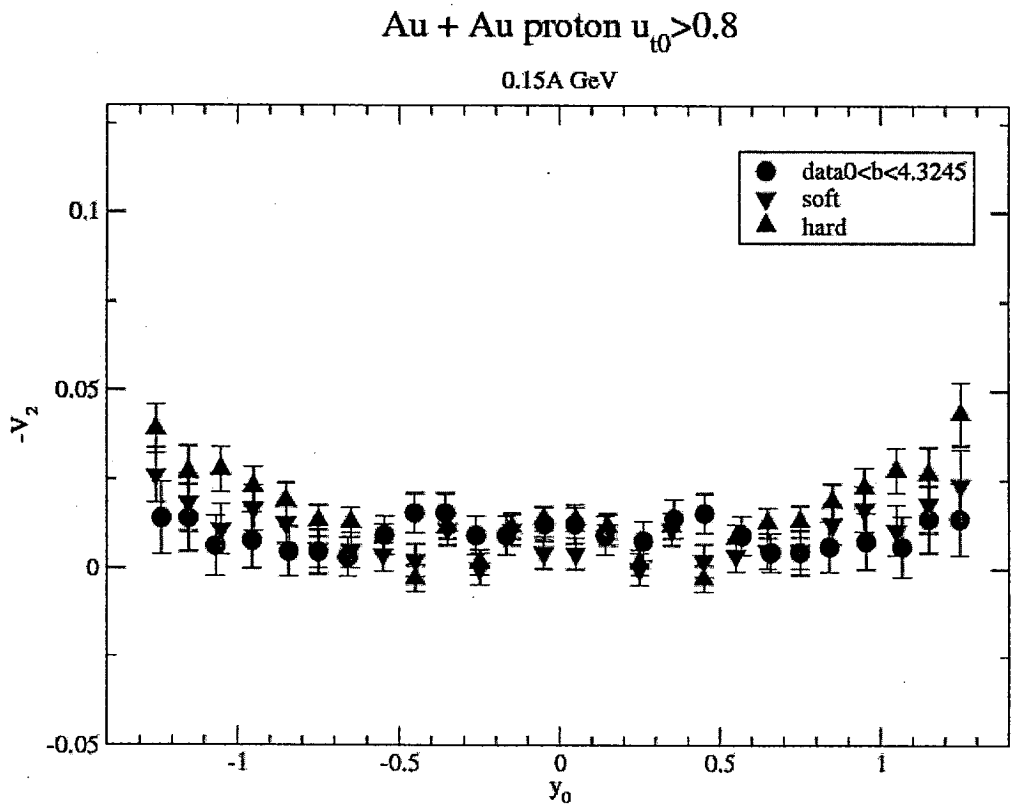
บทที่ 4

ผลการวิจัย

การศึกษาการไหลเชิงตรงและการไหลเชิงวงรีของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 0 ถึง 4.3245 fm ($0 < b < 4.3245$), 4.3245 ถึง 5.9804 fm ($4.3245 < b < 5.9804$) และ 5.9804 ถึง 7.3089 fm ($5.9804 < b < 7.3089$) โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ควอนตัมเชิงโมเลกุล (QMD) ซึ่งเป็นทฤษฎี N-body ใช้จำลองปฏิกิริยาการชนของไอออนหนัก และเปรียบเทียบผลการทดลองกับห้องปฏิบัติการ FOPI

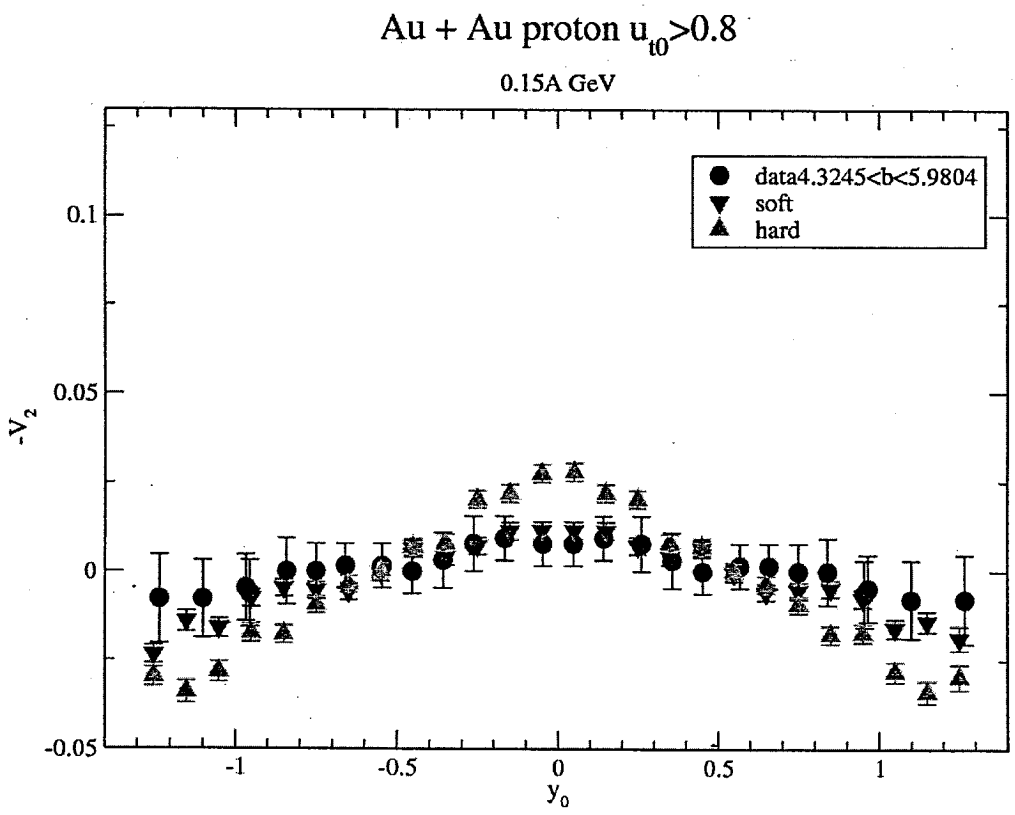
ภาพ 6 แสดงผลการคำนวณการไหลเชิงวงรีของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 0 ถึง 4.3245 fm โดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมการสถานะนั้นมีผลต่อการรูปแบบการไหลเชิงวงรีของโปรตอน และผลการทดลองนั้นแสดงคุณสมบัติของสมการสถานะแบบอ่อนซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองของ FOPI และค่าการไหลเชิงวงรีมีค่าเป็นศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์เนื่องจากค่าโมเมนตัมในแนวแกน x และ แกน y มีค่าเท่ากัน หรือที่มุม ϕ มีค่าเท่ากับ $-45^{\circ}, -135^{\circ}, +45^{\circ}, +135^{\circ}$ จึงทำให้การไหลเชิงวงรีของโปรตอนมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งพฤติกรรมการไหลจะเป็นแบบในระนาบปฏิกิริยาซึ่งค่าการไหลเชิงวงรีมีค่ามากกว่าศูนย์ และที่แรพิดิตี้เป็นศูนย์ เนื่องจากค่าโมเมนตัมในแนวแกน z เป็นศูนย์



ภาพ 6 การไหลเชิงวงรีของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้แรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 0 ถึง 4.3245 วงกลมทึบสีดำแสดงผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ FOPI สำหรับสามเหลี่ยมหัวตั้ง และ สามเหลี่ยมหัวกลับแสดงผลการทดลองจากแบบจำลอง QMD โดยการใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง ตามลำดับ

ภาพ 7 แสดงผลการคำนวณการไหลเชิงวงรีของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้แรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 4.3245 ถึง 5.9804 fm โดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมการสถานะนั้นมีผลต่อการรูปแบบการไหลเชิงวงรีของโปรตอน และผลการทดลองนั้นแสดงคุณสมบัติของสมการสถานะแบบอ่อนซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองของ FOPI และค่าการไหลเชิงวงรีมีค่าเป็นศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์เนื่องจากค่าโมเมนตัมในแนวแกน x และ แกน y มีค่าเท่ากัน หรือที่มุม ϕ มีค่าเท่า $-45^{\circ},-135^{\circ},+45^{\circ},+135^{\circ}$ จึงทำให้การไหลเชิงวงรีของโปรตอนมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งพฤติกรรมการไหลจะมีทั้งในและนอกระนาบปฏิกิริยาโดยที่ค่าการไหลเชิงวงรีมีค่ามากกว่าศูนย์จะเป็นแบบในระนาบปฏิกิริยา และที่ค่าการไหลเชิงวงรีมีค่าน้อยกว่าศูนย์จะเป็นแบบนอกระนาบ

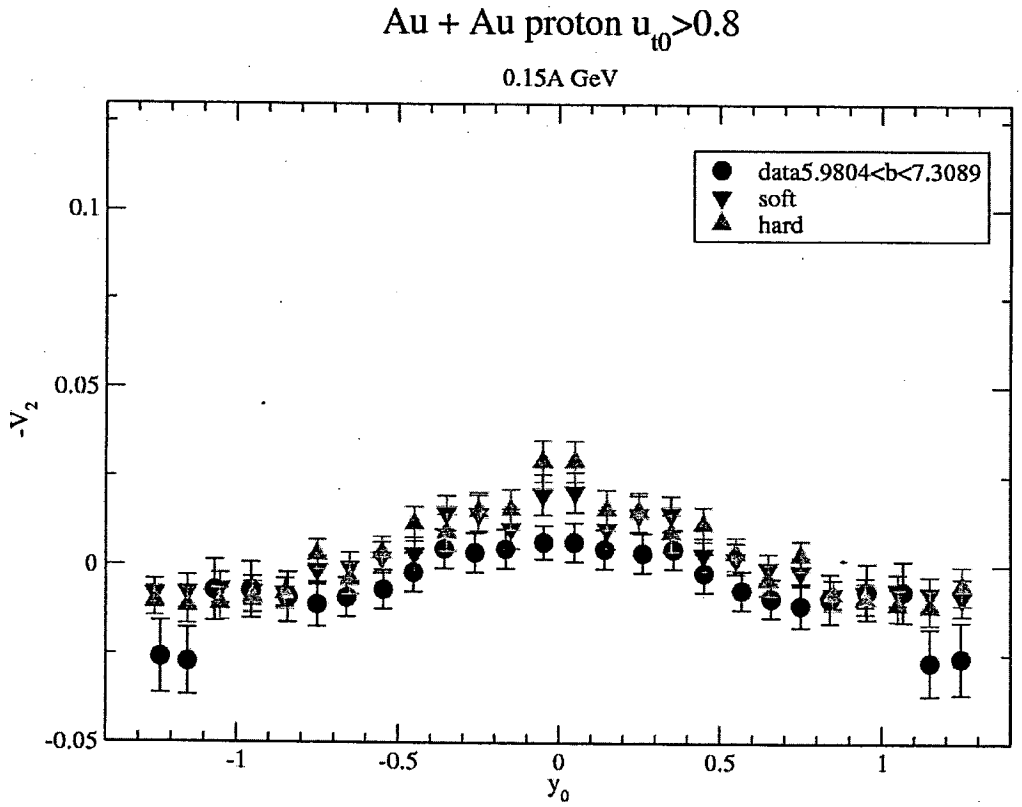
ปฏิกิริยา และมีค่าการไหลมากที่สุดช่วงกลางแรพิดิตี้หรือที่แรพิดิตี้เป็นศูนย์ เนื่องจากค่าโมเมนตัมในแนวแกน z เป็นศูนย์



ภาพ 7 การไหลเชิงวงรีของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 4.3245 ถึง 5.9804 fm วงกลมทึบสีดำแสดงผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ FOPI สำหรับสามเหลี่ยมหัวตั้ง และ สามเหลี่ยมหัวกลับแสดงผลการทดลองจากแบบจำลอง QMD โดยการใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง ตามลำดับ

ภาพ 8 แสดงผลการคำนวณการไหลเชิงวงรีของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 5.9804 ถึง 7.3089 fm โดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมการสถานะนั้นมีผลต่อการรูปแบบการไหลเชิงวงรีของโปรตอน และผลการทดลองนั้นแสดงคุณสมบัติของสมการสถานะแบบอ่อนซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดลองของ FOPI และค่าการไหลเชิงวงรีมีค่าเป็นศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์เนื่องจากค่าโมเมนตัมในแนวแกน x และ แกน y มีค่าเท่ากัน หรือที่มุม ϕ

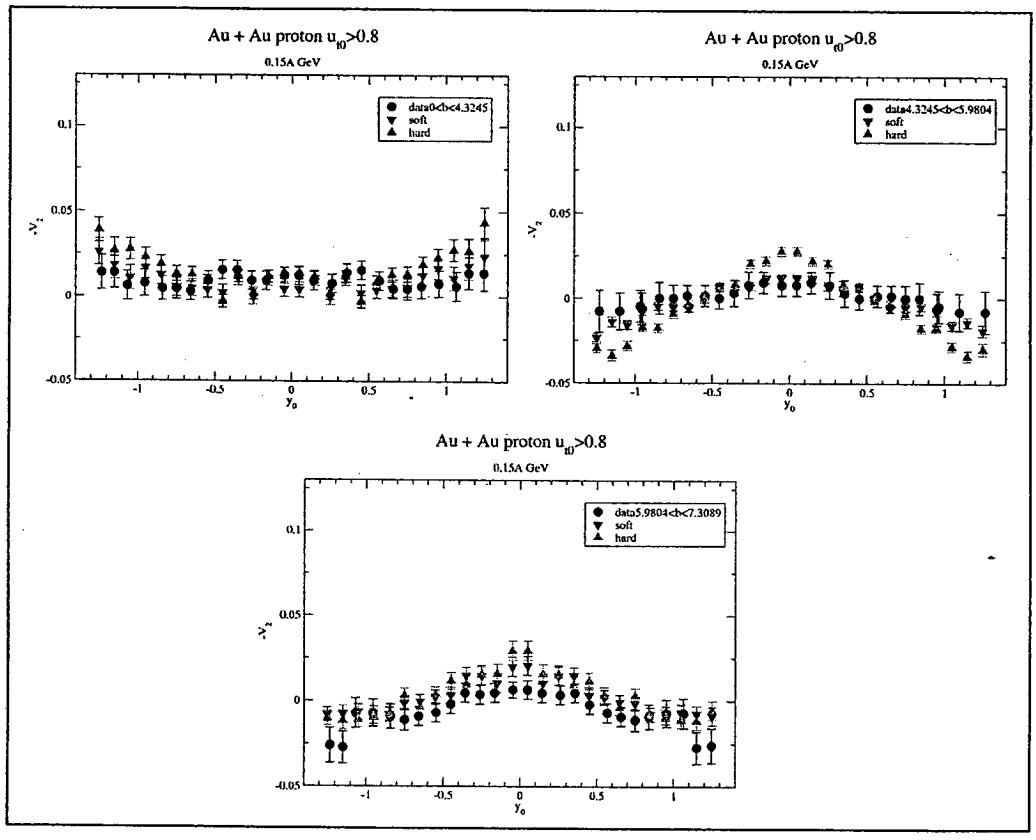
มีค่าเท่ากับ $-45^{\circ},-135^{\circ},+45^{\circ},+135^{\circ}$ จึงทำให้การไหลเชิงวงรีของโปรตอนมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งพฤติกรรมการไหลจะมีทั้งในและนอกระนาบปฏิกิริยาโดยที่ค่าการไหลเชิงวงรีมีค่ามากกว่าศูนย์จะเป็นแบบในระนาบปฏิกิริยา และที่ค่าการไหลเชิงวงรีมีค่าน้อยกว่าศูนย์จะเป็นแบบนอกระนาบปฏิกิริยา และมีค่าการไหลมากที่สุดช่วงกลางแรพิดิตี้หรือที่แรพิดิตี้เป็นศูนย์ เนื่องจากค่าโมเมนตัมในแนวแกน z เป็นศูนย์



ภาพ 8 การไหลเชิงตรงของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}$Au+$^{197}_{79}$Au ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 5.9804 ถึง 7.3089 fm วงกลมทึบสีดำแสดงผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ FOPI สำหรับสามเหลี่ยมหัวตั้ง และ สามเหลี่ยมหัวกลับ แสดงผลการทดลองจากแบบจำลอง QMD โดยการใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง ตามลำดับ

ภาพ 9 แสดงผลการคำนวณการไหลเชิงวงรีของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}$Au+$^{197}_{79}$Au ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับเท่ากับ 0 ถึง 4.3245 fm, 4.3245 ถึง 5.9804 fm และ 5.9804 ถึง 7.3089 fm โดยใช้สมการสถานะ

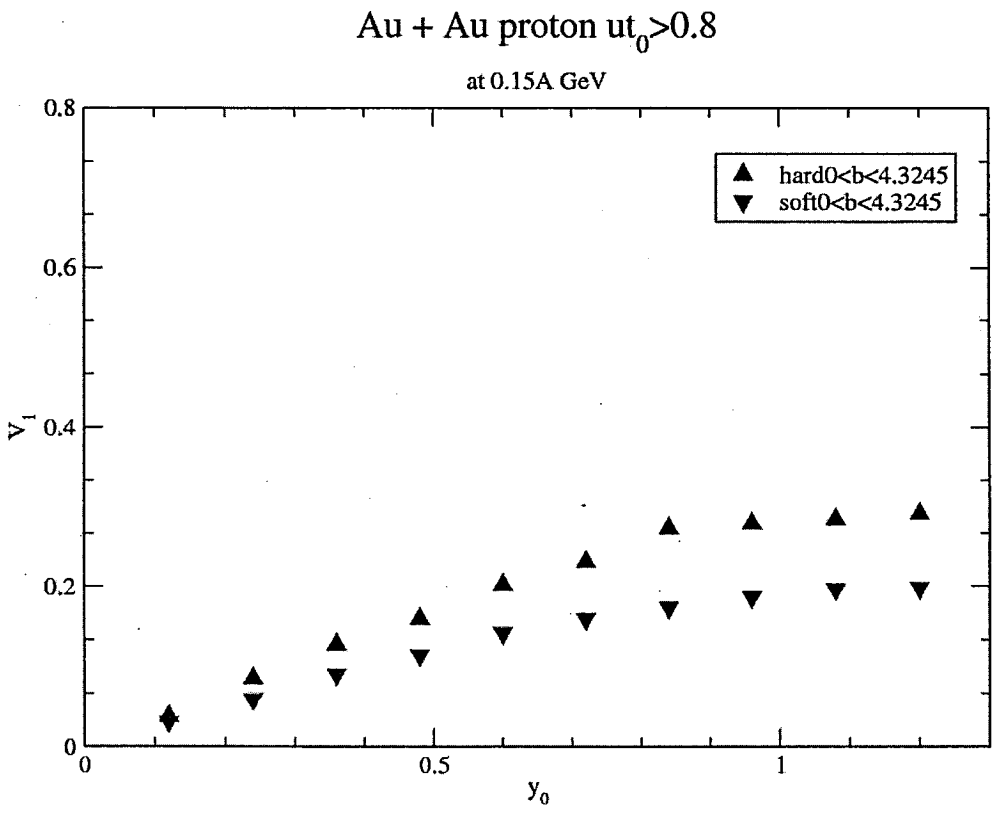
แบบอ่อนและแบบแข็ง ในแต่ละช่วงของค่าพารามิเตอร์ตกกระทบที่เราทำการจำลองนั้นจะเห็นได้ว่าค่าของการไหลจะน้อยลงเมื่อค่าพารามิเตอร์ตกกระทบมีค่ามากขึ้นเนื่องจากเมื่อค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเป็นระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของนิวเคลียสทั้งสองที่ชนกันและเมื่อมีค่ามากขึ้นจะทำให้บริเวณการชนกันของอนุภาคมีค่าน้อยหรือมีพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาในการชนกันน้อยนั่นเอง ทำให้บริเวณนั้นเกิดอนุภาคน้อยจึงมีค่าการไหลน้อยลงตามระยะของพารามิเตอร์ตกกระทบ



ภาพ 9 แสดงผลการคำนวณการไหลเชิงวงรีของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ เท่ากับ 0 ถึง 4.3245 fm, 4.3245 ถึง 5.9804 fm และ 5.9804 ถึง 7.3089 fm โดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง

ภาพ 10 แสดงผลการคำนวณการไหลเชิงตรงของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 0 ถึง 4.3245 fm โดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง ซึ่งในการไหลเชิงตรงก็เช่นเดียวกัน จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสมการสถานะนั้นมีผลต่อการรูปแบบการไหลเชิงตรงของโปรตอน

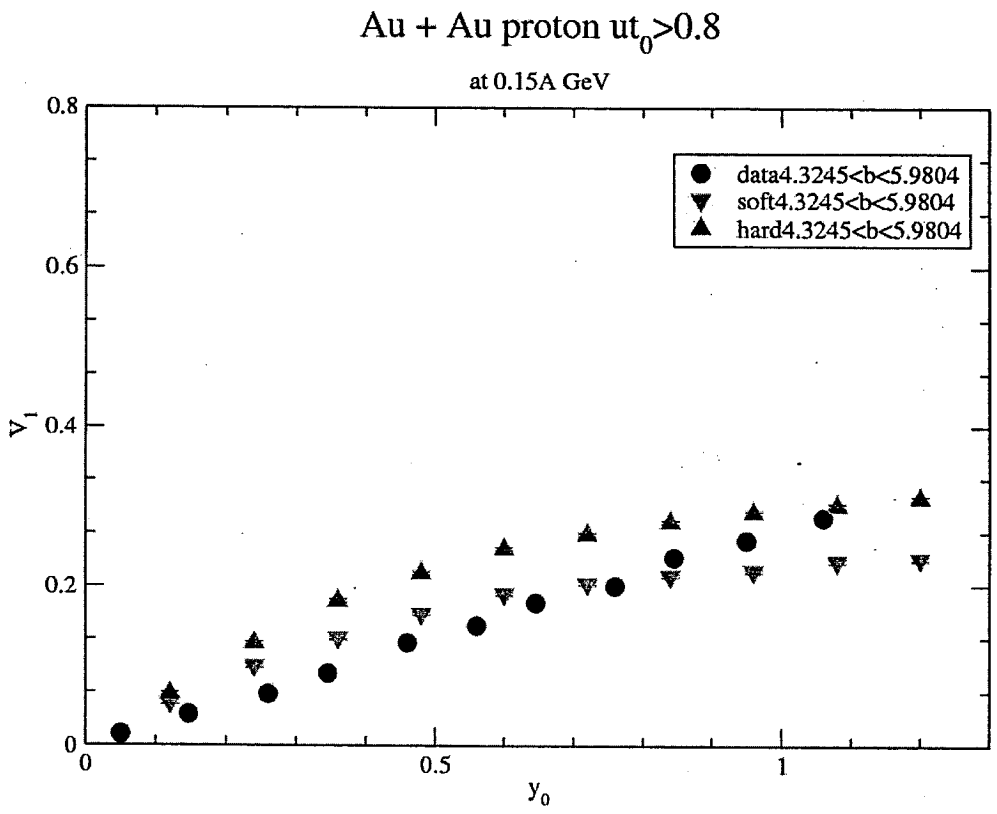
ซึ่งค่าการไหลเชิงตรงของทั้งสมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็งมีค่าต่างกัน ซึ่งมีค่าการไหลเพิ่มมากขึ้นที่แรพิดิตี้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่ค่าการไหลมีค่าเท่ากับศูนย์หรือใกล้ศูนย์ในช่วงที่แรพิดิตี้เป็นศูนย์นั้น คือค่าโมเมนตัมในแนวแกน x และ z มีค่าศูนย์เป็นศูนย์ หรือที่มุม ϕ มีค่าเท่ากับ $-90^{\circ}, +90^{\circ}$



ภาพ 10 การไหลเชิงตรงของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับเท่ากับ 0 ถึง 4.3245 fm สำหรับสามเหลี่ยมทึบหัวตั้ง และสามเหลี่ยมทึบหัวกลับ แสดงผลการทดลองจากแบบจำลอง QMD โดยการใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง ตามลำดับ

ภาพ 11 แสดงผลการคำนวณการไหลเชิงตรงของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 4.3245 ถึง 5.9804 fm โดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง ซึ่งในการไหลเชิงตรงก็เช่นเดียวกันจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสมการสถานะนั้นมีผลต่อการรูปแบบการไหลเชิงตรงของโปรตอน ซึ่งผลการทดลองนั้นแสดงคุณสมบัติของสมการสถานะแบบอ่อน และให้ผลสอดคล้อง

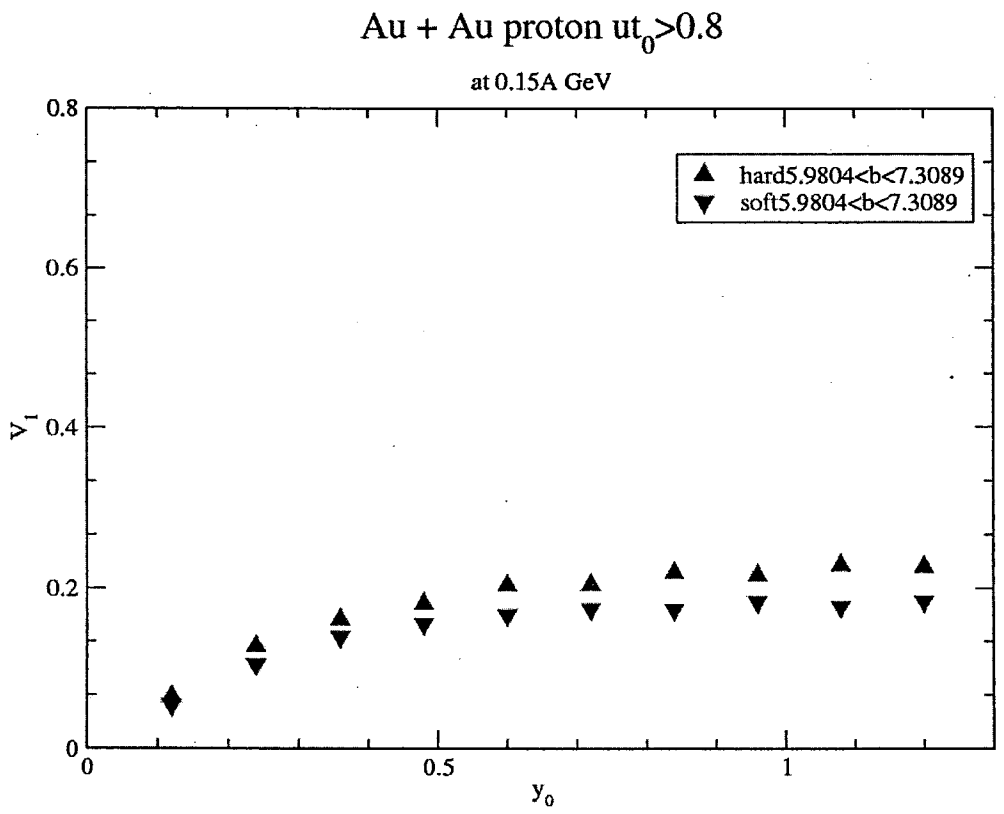
ของโปรตอน ซึ่งผลการทดลองนั้นแสดงคุณสมบัติของสมการสถานะแบบอ่อน และให้ผลสอดคล้องกับการทดลองของ FOPI ซึ่งมีค่าการไหลเพิ่มมากขึ้นที่แรพิดิตี้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่ค่าการไหลมีค่าเท่ากับศูนย์หรือใกล้ศูนย์ในช่วงที่แรพิดิตี้เป็นศูนย์นั้น คือค่าโมเมนตัมในแนวแกน x และ z มีค่าศูนย์เป็นศูนย์ หรือที่มุม ϕ มีค่าเท่ากับ $-90^{\circ}, +90^{\circ}$



ภาพ 11 การไหลเชิงตรงของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 4.3245 ถึง 5.9804 fm วงกลมทึบสีดำแสดงผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการ FOPI สำหรับสามเหลี่ยมทึบสีเหลือง และ สามเหลี่ยมทึบสีชมพู แสดงผลการทดลองจากแบบจำลอง QMD โดยการใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็งตามลำดับ

ภาพ 12 แสดงผลการคำนวณการไหลเชิงตรงของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 5.9804 ถึง 7.3089 fm โดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง ซึ่งในการไหลเชิงตรงก็

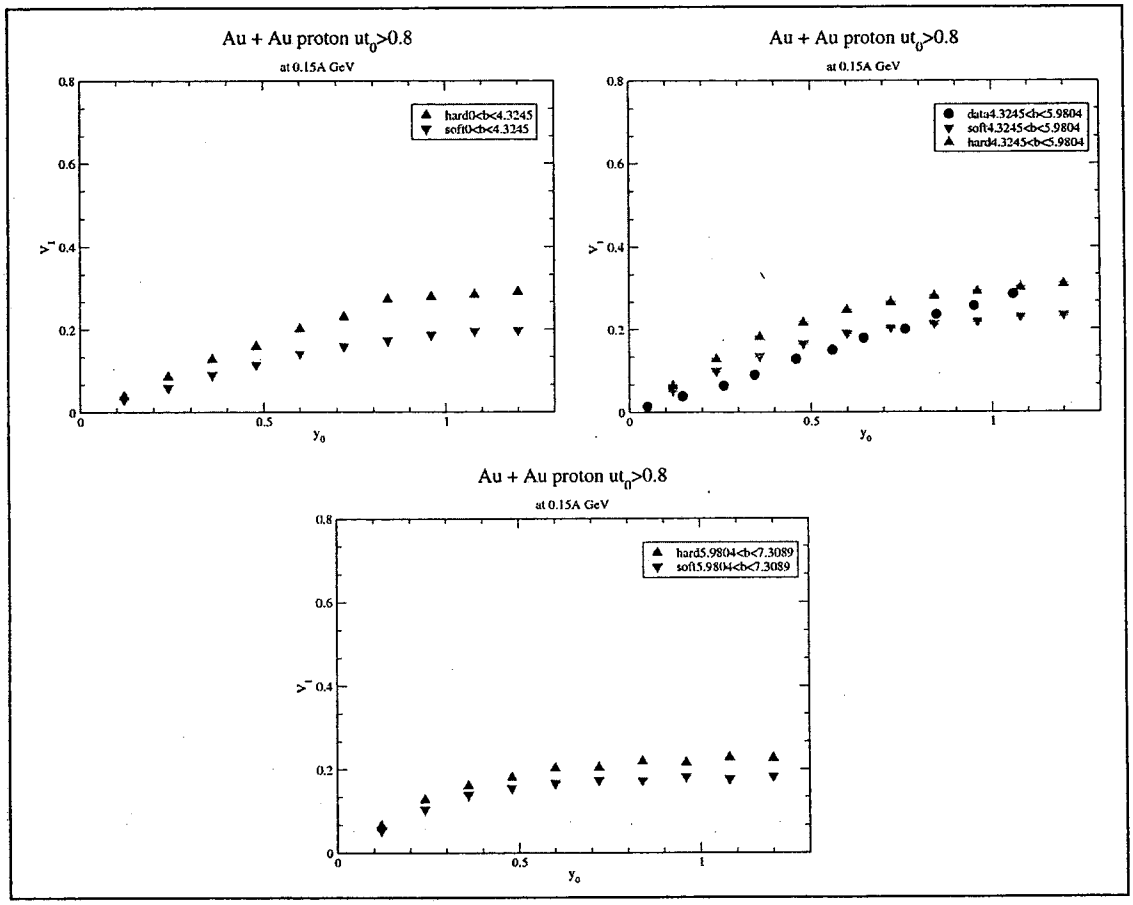
เช่นเดียวกันจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสมการสถานะนั้นมีผลต่อการรูปแบบการไหลเชิงตรงของโปรตอน ซึ่งค่าการไหลเชิงตรงของทั้งสมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็งมีค่าต่างกัน ซึ่งมีค่าการไหลเพิ่มมากขึ้นที่แรพิดิตี้มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่ค่าการไหลมีค่าเท่ากับศูนย์หรือใกล้ศูนย์ในช่วงที่แรพิดิตี้เป็นศูนย์นั้น คือค่าโมเมนตัมในแนวแกน x และ z มีค่าศูนย์เป็นศูนย์ หรือที่มุม ϕ มีค่าเท่ากับ $-90^{\circ}, +90^{\circ}$



ภาพ 12 การไหลเชิงตรงของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ $^{197}_{79}Au+^{197}_{79}Au$ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ 5.9804 ถึง 7.3089 fm สำหรับสามเหลี่ยมทึบหัวตั้ง และ สามเหลี่ยมทึบหัวกลับ แสดงผลการทดลองจากแบบจำลอง QMD โดยการใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง ตามลำดับ

ภาพ 13 แสดงผลการคำนวณการไหลเชิงตรงของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ ในการชนกันของ ที่พลังงาน 0.15 A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับ เท่ากับ 0 ถึง 4.3245 fm, 4.3245 ถึง 5.9804 fm และ 5.9804 ถึง 7.3089 fm โดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและ

แบบแข็ง ในแต่ละช่วงของค่าพารามิเตอร์ตกกระทบที่เราทำการจำลองนั้นจะเห็นได้ว่าค่าของการไหลจะน้อยลงเมื่อค่าพารามิเตอร์ตกกระทบมีค่ามากขึ้นเนื่องจากเมื่อค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเป็นระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของนิวเคลียสทั้งสองที่ชนกันและเมื่อมีค่ามากขึ้นจะทำให้บริเวณการชนกันของอนุภาคมีค่าน้อยหรือมีพื้นที่ของการเกิดปฏิกิริยาในการชนกันน้อยนั่นเองทำให้บริเวณนั้นเกิดอนุภาคน้อยจึงมีค่าการไหลน้อยลงตามระยะของพารามิเตอร์ตกกระทบ



ภาพ 13 แสดงผลการคำนวณการไหลเชิงตรงของโปรตอนซึ่งเป็นฟังชันก์ของแรพิดิตี้ในการชนกันของ ที่พลังงาน 0.15A GeV และใช้ค่าพารามิเตอร์ตกกระทบเท่ากับเท่ากับ 0 ถึง 4.3245 fm, 4.3245 ถึง 5.9804 fm และ 5.9804 ถึง 7.3089 fm โดยใช้สมการสถานะแบบอ่อนและแบบแข็ง