

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกาแลกซีและสสารระหว่างกาแลกซีที่เรดชิฟท์ 3 ใน แบบจำลองคอมพิวเตอร์ GIMIC

The Interaction between Galaxies and the Inter-Galactic Medium at redshift ~ 3 in GIMIC Simulations

พิมปญญวัฒน์ ทุมเมืองปัก*

Pimpunyawat Tummuangpak*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Physics Department, Faculty of Science, KhonKaen University

Received : 6 December 2016

Accepted : 18 July 2017

Published online : 13 September 2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสสารระหว่างกาแลกซีและกาแลกซีที่เรดชิฟท์ 3 ผ่านการจำลองด้วย Galaxies Intergalactic Medium Interaction Calculation (GIMIC) ที่ย่านความหนาแน่น $+1\sigma$ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลจากการสังเกตการณ์ VLT LBG Redshift Survey (VLRS) และข้อมูลจากการจำลองด้วย GIMIC ที่ย่านความหนาแน่น 0σ โดยได้คำนวณค่าความสัมพันธ์ของกาแลกซี-กาแลกซี พบว่าชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการสังเกตการณ์มากกว่าชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ และความสัมพันธ์ที่ได้จากชุดข้อมูล GIMIC $+1\sigma$ มีค่ามากกว่าชุดข้อมูล 0σ อาจเป็นเพราะย่าน $+1\sigma$ มีความหนาแน่นมากกว่าจากนั้นได้คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกาแลกซีและแก๊สพบว่า การส่งผ่านของแก๊สนั้นลดลงแปรผันตามระยะห่างระหว่างกาแลกซีและแก๊สที่เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้โมเดลของ Redshift-space distortion พบว่าความเร็วของกาแลกซีที่ได้จากการจำลองนั้นมีค่าน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับความเร็วที่วัดได้จากการสังเกตการณ์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในการจำลองนั้น มีการจำลองให้แก๊สและกาแลกซีเคลื่อนที่ไปด้วยกันในขณะที่ย้ายจาก real-space ไปเป็น redshift-space

คำสำคัญ : กาแลกซีที่มีค่าเรดชิฟท์มาก สสารระหว่างกาแลกซี

*Corresponding author. E-mail : pimptu@kku.ac.th

Abstract

We use GIMIC (Galaxies Intergalactic Medium Interaction Calculation) simulations to study the relationship between star-forming galaxies and the intergalactic medium at $z \approx 3$. We aim to compare our GIMIC data at $+1\sigma$ region with the observations from the VLT LBG Redshift Survey (VLRS) and the data from GIMIC at region 0σ . Comparing the results with the observations, the high mass (stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$) galaxy correlation function gives a better result than the low mass one (stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$). Our data at $+1\sigma$ region (more dense) show higher clustering than those from 0σ region. The simulated galaxy-gas correlation function shows similar neutral gas densities around galaxies to those seen in the observations. The Ly α transmissivity decrease with increasing separations. We fit the Redshift-space distortion model to the results, the peculiar velocities in the simulation overpredict the difference between the real-space and redshift-space galaxy correlation functions at smaller scales. These small measurements of the galaxy-gas velocity dispersion may be indicative of highly coherent motion when the gas and the galaxies move together from real-space to redshift-space.

Keywords : high-redshift galaxies, intergalactic medium

บทนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างกาแล็กซี่และสสารระหว่างกาแล็กซี่ (Inter-Galactic Medium: IGM) เป็นเรื่องที่น่าสนใจสำหรับนักวิจัยกำลังสนใจไขว่คว้าหาคำตอบว่ากาแล็กซี่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัวอย่างใด หรือความสัมพันธ์ที่แต่ละเรดชิฟท์ (z) มีความแตกต่างกันหรือไม่นอกจากนี้กาแล็กซี่และแก๊สยังมีความเชื่อมโยงที่สลับซับซ้อนโดยสังเกตได้จากพฤติกรรมเคลื่อนที่ของสสารระหว่างกาแล็กซี่ทั้งเคลื่อนที่เข้ามาและเคลื่อนที่ออกจากบริเวณกาแล็กซี่ (gas inflows และ gas outflows) นักวิจัยจึงได้ทุ่มเททำการศึกษเพิ่มเติมในเรื่องนี้อยู่ตลอดเวลาโดยหวังจะได้องค์ความรู้พื้นฐานเพื่อต่อยอดงานวิจัยทางด้านดาราศาสตร์ต่อไป Feedback เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการก่อตัวของกาแล็กซี่ ทั้งนี้ Feedback อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุไม่ว่าจะเป็นซูเปอร์โนวาหรือลมจาก Active Galactic Nuclei (AGN) (เช่น White & Rees 1978; White & Frenk 1991) ในปี 2003, Adelberger *et al.* (2003) ได้ใช้ข้อมูลจากกล้องโทรทรรศน์ KECK (ตั้งอยู่ ณ ฮาวาย สหรัฐอเมริกา) อันประกอบไปด้วยสเปกโตรมิเตอร์ 8 เควซาร์และกาแล็กซี่ (Lyman break galaxy : LBG) จำนวน 431 กาแล็กซี่ รวมกับข้อมูลจาก Steidel *et al.* 2003 ทำการศึกษาผลของ feedback ที่เรดชิฟท์ $z \sim 3$ โดยวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกาแล็กซี่และสสารระหว่างกาแล็กซี่คือคำนวณค่าความสัมพันธ์ ($\xi(r)$) โดยอาจพิจารณาการส่งผ่านหรือการดูดกลืนของแก๊สไฮโดรเจนที่ระยะห่างต่างๆของแก๊สกับกาแล็กซี่ กลุ่มวิจัยของ Steidel พบว่าค่าการดูดกลืนของไฮโดรเจนมีค่าน้อยมากในช่วงระยะห่างสั้นๆระหว่างแก๊สกับกาแล็กซี่ ($\sim 0.5 h^{-1} \text{Mpc}$) จึงวิเคราะห์ว่าน่าจะมี super winds พัดแก๊สไฮโดรเจนออกไปจากกาแล็กซี่เหล่านี้

จากนั้นในปี 2005 กลุ่มนักวิจัยนี้ (Adelberger *et al.* 2005) ได้ทำการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมแต่ที่เรดชิฟท์ $z \sim 2$ กลับพบว่าค่าการดูดกลืนของโลหะที่ระยะห่างระหว่างแก๊สและกาแล็กซี่สั้นๆ นั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามคณะวิจัยยังไม่สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยใดที่ทำให้พฤติกรรมเป็นเช่นนั้น ต่อมาในปี 2011, Crighton *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์นี้และวิเคราะห์ว่าค่าความสัมพันธ์ที่ระยะห่างของกาแล็กซี่และแก๊สที่ระยะสั้นๆ นั้นน่าได้รับผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าเรดชิฟท์ของกาแล็กซี่จึงได้เสนอให้มีการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมนอกจากการสังเกตการณ์แล้วยังมีนักวิจัยจากหลายกลุ่มใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สและกาแล็กซี่ (เช่น Croft *et al.* 2002; Kollmeier *et al.* 2003; Bruscoli *et al.* 2003; Desjacques *et al.* 2004, 2006; Rakic *et al.* 2012 เป็นต้น) โดย Croft *et al.* (2002) พบว่าค่าโพรไฟล์การดูดกลืนรอบๆ กาแล็กซี่เรดชิฟท์สูงๆ นั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างแก๊สและกาแล็กซี่ลดลงเช่นเดียวกับ Kollmeier *et al.* (2003) ที่ได้ยืนยันผลการศึกษาของ Croft *et al.* (2002)

ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสสารระหว่างกาแล็กซี่และกาแล็กซี่ที่เรดชิฟท์ $z \sim 3$ โดยอาศัยหลักการของ Lyman-alpha forest โดยจะทำการวัดค่าการดูดกลืนหรือค่าการส่งผ่านของโลหะผ่านเส้นสเปกตรัมของควอดริเปตและกาแล็กซี่อันจะก่อให้เกิดความเข้าใจในเรื่องของ feedback ที่มีต่อสสารระหว่างกาแล็กซี่มากขึ้น โดยจะเปรียบเทียบผลจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กับผลที่ได้จากการสังเกตการณ์ VLT LBG Redshift Survey (VLRS) (PI: Prof Tom Shanks, Durham University) (Bielby *et al.* 2011, 2013) ร่วมกับข้อมูลจาก Keck LRIS (Low Resolution Imaging Spectrometer) observations (Steidel *et al.* 2003) โดย VLRS นั้นเป็นโครงการสังเกตการณ์กาแล็กซี่ (LBG) ที่เรดชิฟท์ $z \sim 3$ และทำการวัดค่าเรดชิฟท์ของแต่ละกาแล็กซี่ด้วย VLT VIMOS instrument ปัจจุบันได้รวบรวมข้อมูลของกาแล็กซี่จากการสังเกตการณ์นี้ได้ประมาณ 3,000 กาแล็กซี่ในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกาแล็กซี่-กาแล็กซี่และใช้โมเดลของ Redshift-Space Distortion (RSD) เพื่อดูว่าความเร็ว (pairwise-velocity) มีผลต่อความสัมพันธ์ของกาแล็กซี่และกาแล็กซี่มากน้อยเพียงใดโดยปกติแล้วความเร็ว (pairwise-velocity) นี้จะทำให้ผู้สังเกตการณ์เห็นการกระจายตัวของกาแล็กซี่บิดเบือนไป (เรียกว่าการสังเกตใน redshift space) จากการกระจายตัวตามระยะทางที่แท้จริงของกาแล็กซี่ (การสังเกตใน real space) แต่จากการวิเคราะห์เบื้องต้นนั้นยังไม่ปรากฏหลักฐานของ feedback ที่แน่ชัด ทั้งนี้ อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการระบุค่าเรดชิฟท์ของกาแล็กซี่ (Shapley *et al.* 2003, Crighton *et al.* 2011) อันส่งผลต่อการบิดเบี้ยว (smearing) ของความสัมพันธ์ของแก๊สและกาแล็กซี่

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลการจำลองจาก GIMIC (Galaxies Intergalactic Medium Interaction Calculation) (Crain *et al.* 2009) ซึ่งเป็น Hydrodynamical simulation ที่เกิดจากการเลือกบริเวณของกล่องจำลองขนาดใหญ่ ($500 h^{-1} \text{Mpc}$) ที่เรียกว่า Millennium simulation (Springel *et al.* 2001, 2005) โดย GIMIC ได้นำเอาคุณสมบัติของสสารมืดจาก Millennium simulation ในโครงสร้างขนาดใหญ่และคุณสมบัติของแก๊สจาก Hydrodynamic simulation ในโครงสร้างขนาดเล็กมาประกอบการจำลอง ทั้งนี้ GIMIC จะเลือก 5 บริเวณความหนาแน่นของมวลจากกล่องจำลอง Millennium simulation และจำลองซ้ำโดยเพิ่มคุณสมบัติทางฟิสิกส์เช่น star formation, gas cooling, photoionisation, chemical และ winds feedback

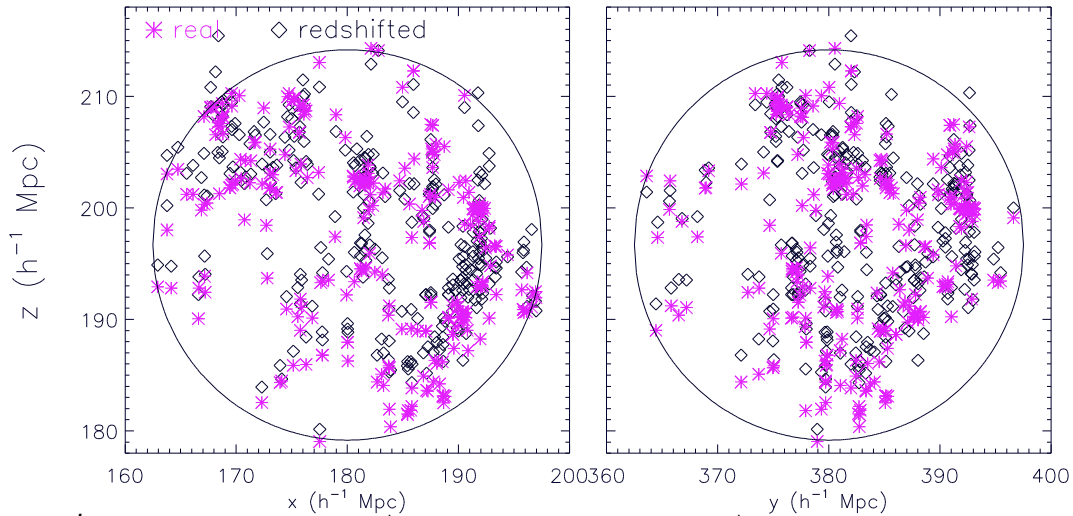
เป็นต้น (Theuns *et al.* 1998,2002, Wiersma *et al.* 2009) โดยกล่องจำลองของ GIMIC มีรัศมี $18 h^{-1} \text{Mpc}$ และมีความหนาแน่นของมวลในปริมาตรที่ศึกษาต่างกัน 5 ขนาดนั้นคือ -2σ , -1σ , 0σ , $+1\sigma$, และ $+2\sigma$ เมื่อ σ คือค่า rms ของมวลที่สเกล $20 h^{-1} \text{Mpc}$ โดย the TreePM SPH code GADGET3 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาจาก GADGET2 code (Springel *et al.* 2005) ได้ถูกนำมาปรับใช้ในการจำลองด้วยพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ต่างๆ ดังนี้ $\Omega_m = 0.25$, $\Omega_\Lambda = 0.75$, $\Omega_b = 0.045$, $h_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $h = 0.73$, $\sigma_8 = 0.9$ และ $n_s = 1$ ผู้วิจัยจึงเลือกจำลองเส้นสเปกตรัมของควซาร์และสร้างแค็ตตาล็อกของกาแล็กซี่ที่เรดชิฟท์ 3 ที่ย่านความหนาแน่น $+1\sigma$ เพื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์และเปรียบเทียบกับผลจากการสังเกตการณ์ และผลการจำลองในย่าน 0σ

วิธีดำเนินการวิจัย

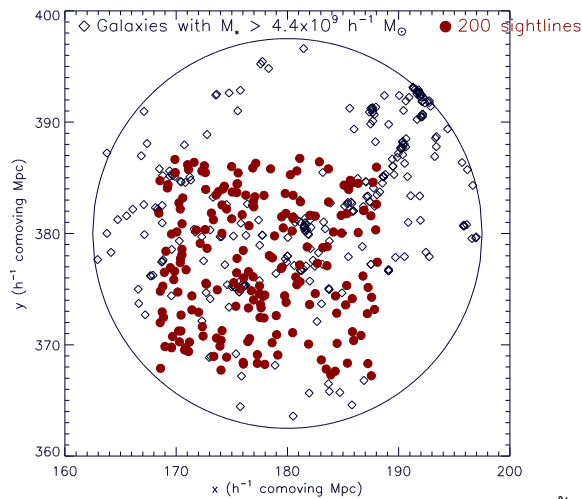
ได้ใช้การจำลองจาก GIMIC ที่ย่านความหนาแน่น $+1\sigma$ เพื่อสร้างแค็ตตาล็อกของกาแล็กซี่และสเปกตรัมจากเส้นสเปกตรัมของควซาร์ที่เรดชิฟท์ $z \sim 3$ ดังนี้

1. กาแล็กซี่

การพิจารณาคุณสมบัติของกาแล็กซี่ที่จะนำมาวิเคราะห์นั้น เริ่มโดยการหาฮาโลของสสารมืด (dark matter haloes) ในกล่องจำลองผ่านวิธีการของ friends-of-friends (FoF: Davis *et al.* 1985) โดยอัลกอริทึมนี้จะพยายามระบุกาแล็กซี่ที่อยู่ใกล้ที่สุดในแต่ละฮาโลจากนั้นอัลกอริทึม SUBFIND (Springel *et al.* 2001; Dolag *et al.* 2009) จะถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาโครงสร้างภายในฮาโลนั้นๆ ทั้งนี้กล่องจำลองมีขนาดรัศมีเพียง $18 h^{-1} \text{Mpc}$ ซึ่งปริมาตรอาจจะมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรจากการสังเกตการณ์แต่ก็เพียงพอที่จะใช้ในการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ของกาแล็กซี่และกาแล็กซี่ในระยะที่สนใจ ($r < 15 h^{-1} \text{Mpc}$) ได้ จากนั้นผู้วิจัยคัดเลือกข้อมูลของกาแล็กซี่ 2 ชุดที่มีค่ามวลของดาว stellar mass (M_*) $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ (M_{sun} คือมวลของดวงอาทิตย์) และ stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ข้อมูลชุดแรก (stellar mass (M_*) $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$) มีจำนวน LBG กาแล็กซี่มากกว่าความเป็นจริง แต่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการคำนวณเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบ ส่วนข้อมูลชุดที่สอง stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ($\rho_g = 5 \times 10^{-3} h^3 \text{Mpc}^{-3}$) จะให้จำนวน LBG กาแล็กซี่ที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการสังเกตการณ์ โดยเปรียบเทียบจากค่าความหนาแน่นของปริภูมิ (space density), ρ_g โดย Adelberger *et al.* 2005b ได้สังเกตการณ์กาแล็กซี่ที่เรดชิฟท์นี้ด้วยกล้องโทรทรรศน์ KECK และคำนวณค่าความหนาแน่นของปริภูมิได้ $\rho_g = (4 \pm 2) \times 10^{-4} h^3 \text{Mpc}^{-3}$ นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างข้อมูลสุ่มของกาแล็กซี่เพื่อจะใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ของกาแล็กซี่และกาแล็กซี่ในหนึ่งมิติภาพที่ 1 แสดงถึงกาแล็กซี่ใน real-space (ดอจันสีชมพู) และ redshift-space (ข้ามหลามตัดสีน้ำเงิน) จะเห็นได้ว่ากาแล็กซี่ใน redshift-space มีการเคลื่อนที่แบบกลุ่ม (bulk motion)



ภาพที่ 1 แสดงตำแหน่งของกาแล็กซี่ที่ระนาบ xz และ yz ตามลำดับ โดยที่ดอกจันสีชมพูแสดงกาแล็กซี่ใน real-space และสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดสีน้ำเงินแสดงกาแล็กซี่ใน redshift-space

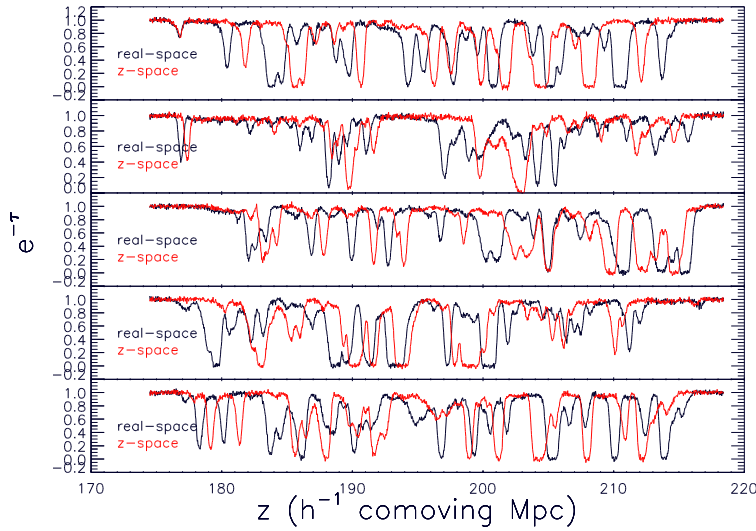


ภาพที่ 2 แสดงตำแหน่งของกาแล็กซี่ใน real-space (ข้าวหลามตัดสีน้ำเงิน) และตำแหน่งเริ่มต้นของเส้นสายตาของควอซาร์ (วงกลมสีแดง) ในระนาบ xy

2. สเปกตรัมจากเส้นสายตาของควอซาร์

ผู้วิจัยได้จำลองสเปกตรัมเส้นสายตาของควอซาร์ในกล่องจำลอง GIMIC โดยพิจารณาจากค่าการส่งผ่าน (transmission), $T = e^{-\tau}$ เมื่อ τ คือ optical depth ตามแนวเส้นสายตาโดยเลือกให้มีค่า full width at half maximum (FWHM) = 7 km s^{-1} และค่า signal-to-noise ที่อัตราส่วน 50 ต่อพิกลเซล โดยแต่ละพิกลเซลต้องมีความกว้าง 2.8 km s^{-1} ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับสเปกตรัมจากการสังเกตการณ์ของสเปคโตรกราฟที่มีกำลังแยกสูงที่ชื่อว่า UVES (Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph) และ HIRES (High Resolution Echelle Spectrometer) โดยเส้นสายตานี้จะมีความยาวขนานกับแกน z และมี การสุ่มตำแหน่งเริ่มต้นในระนาบ xy (ดังแสดงในภาพที่ 2) ในการคำนวณนี้จะใช้เส้นสายตาทั้งหมด 200 เส้นเพื่อไม่ให้เส้น

สายตาค้นพบกันมากเกินไปและแต่ละเส้นจะมีความยาวไม่เกิน $16 h^{-1} \text{Mpc}$ เพื่อป้องกันปัญหาการอิมิตัวของเส้นสเปกตรัมที่ขอบกล่องจำลอง ค่าเฉลี่ยของการส่งผ่านของตัวอย่างข้อมูลของเส้นสายตาใน real-space ($\overline{T_r}$) มีค่าเป็น 0.69 ในขณะที่ redshift-space ($\overline{T_z}$) มีค่าเป็น 0.72 ภาพที่ 3 แสดงการส่งผ่านของตัวอย่างข้อมูลของเส้นสายตาใน redshift-space (เส้นสีแดง) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน z ของกล่องจำลองมากกว่าใน real-space (เส้นสีน้ำเงิน) และที่ปลายเส้นสายตาของ redshift-space นั้นเกิดการอิมิตัวในระยะที่มากกว่า real-space ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของการส่งผ่านของตัวอย่างข้อมูลเส้นสายตาใน redshift-space มีค่ามากกว่าใน real-space



ภาพที่ 3 แสดงค่า การส่งผ่านของตัวอย่างข้อมูลของเส้นสายตา, $T = e^{-\tau}$, ใน real space (เส้นสีน้ำเงิน) และเส้นสายตาใน redshift space (เส้นสีแดง) โดยแกนนอนแสดงระยะทางตามแนวแกน z ของกล่องจำลองขนาด $16 h^{-1} \text{Mpc}$

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผู้วิจัยได้คำนวณหาความสัมพันธ์ใน 1 และ 2 มิติ (1-D, 2-D correlation function) ระหว่างกาแลกซี-กาแลกซี และกาแลกซี-แก๊ส ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ของกาแลกซี-กาแลกซี
 - 1.1 ความสัมพันธ์ 1 มิติของกาแลกซี-กาแลกซี
 - 1.1.1 Estimator

ผู้วิจัยได้ทำการหาความสัมพันธ์ของกาแลกซีที่ได้จากการจำลองด้วย GIMIC ใน real-space ($\xi(r)$) และ redshift-space ($\xi(s)$) โดยใช้ตัวประมาณการจาก Davis & Peebles (1983) ดังนี้

$$\xi(r) = \frac{N_R \langle DD(r) \rangle}{N_G \langle DR(r) \rangle} - 1 \tag{1}$$

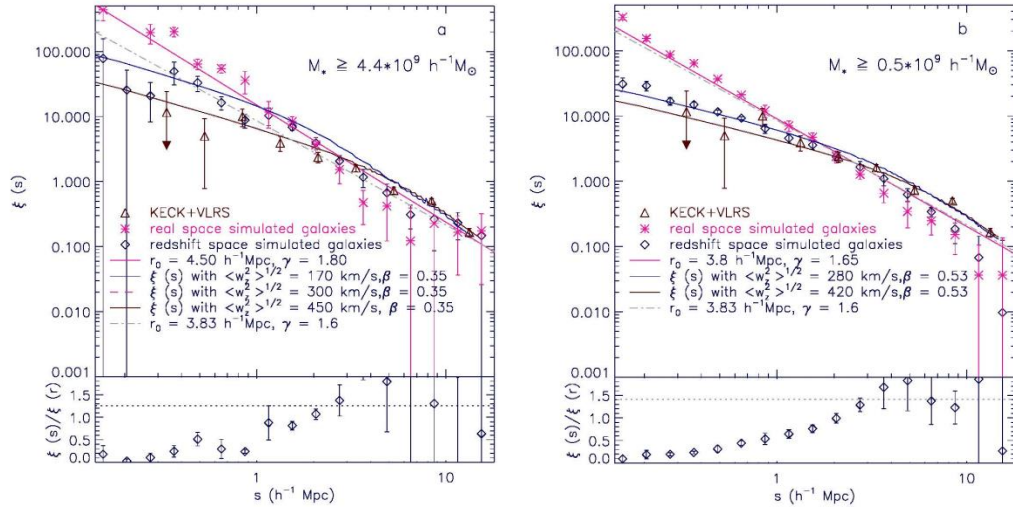
เมื่อ $(DD(r))$ คือจำนวนคู่ของกาแล็กซี-กาแล็กซี และ $(DR(r))$ คือจำนวนคู่ของกาแล็กซี-กาแล็กซีจากข้อมูลสุ่มใน ระยะห่าง r และ $\frac{N_E}{N_C}$ คืออัตราส่วนของจำนวนกาแล็กซีจากการสุ่มต่อจำนวนของกาแล็กซีที่ผ่านการคัดเลือกผู้วิจัยใช้วิธี jack-knife (Efron *et al.* 1981) ในการคำนวณความคลาดเคลื่อนโดยได้ทำการแบ่งปริมาตรของชุดข้อมูลออกเป็น 8 ส่วน และในการ หาค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละครั้งจะหักเอาปริมาตรหนึ่งในแปดของปริมาตรทั้งหมดออกจากการคำนวณ จากนั้นจะทำการ พิสูจน์ผลลัพธ์ที่ได้โดยใช้ power-law ดังสมการ

$$\xi(r) = \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\gamma} \quad (2)$$

เมื่อ γ คือความชันใน logarithmic scale ของความสัมพันธ์ของกาแล็กซีและกาแล็กซี $\xi(r)$ และ r_0 คือ clustering length ซึ่งบอกระยะห่างของความสัมพันธ์ของกาแล็กซีจากจุดศูนย์กลางเป็นสเกลที่ใช้บอกระยะเมื่อค่าความสัมพันธ์ของกาแล็กซีและกาแล็กซี $\xi(r)$ มีค่าเป็นหนึ่ง

1.1.2 ความสัมพันธ์ 1 มิติของกาแล็กซี-กาแล็กซี

ภาพที่ 4 แสดงค่าความสัมพันธ์ 1 มิติของกาแล็กซี-กาแล็กซีใน redshift space $\xi(s)$ และ real space $\xi(r)$ ของ กลุ่มข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ (ภาพที่ 4a) และ stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ (ภาพที่ 4b) ตามลำดับ ดอก จันสีชมพูแสดงถึงผลลัพธ์จากกาแล็กซีใน real-space ขาวหلامตัดสีน้ำเงินแสดงถึงกาแล็กซีใน redshift-space และ สามเหลี่ยมน้ำตาลแสดงถึงข้อมูลที่ได้จากการสังเกตการณ์ VLRS จากนั้นได้ใช้โมเดลของ redshift-space distortion (RSD) เพื่อดูผลของความเร็ว (pairwise-velocity : $\langle w_z^2 \rangle^{1/2}$) ที่มีต่อความสัมพันธ์ของกาแล็กซีและกาแล็กซีซึ่งความเร็ว (pairwise-velocity) นี้จะส่งผลให้ผู้สังเกตการณ์เห็นการกระจายตัวของกาแล็กซีบิดเบือนไป (เรียกว่าการมองเห็นใน redshift space) จากการกระจายตัวตามระยะทางที่แท้จริงของกาแล็กซี (การมองเห็นใน real space) สำหรับชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ได้ใช้ค่าความเร็ว (pairwise-velocity) $\langle w_z^2 \rangle^{1/2} = 170$ km/s (เส้นทึบสีน้ำเงิน), ค่าความเร็ว (pairwise-velocity) $\langle w_z^2 \rangle^{1/2} = 300$ km/s (เส้นประสีชมพู) และความเร็ว (pairwise-velocity) $\langle w_z^2 \rangle^{1/2} = 450$ km/s (เส้นทึบสีน้ำตาล) สำหรับ ชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ได้ใช้ค่าความเร็ว (pairwise-velocity) $\langle w_z^2 \rangle^{1/2} = 280$ km/s (เส้นทึบสีน้ำเงิน) และค่าความเร็ว (pairwise-velocity) $\langle w_z^2 \rangle^{1/2} = 420$ km/s (เส้นทึบสีน้ำตาล) ส่วนเส้นสีชมพูที่บิดได้มาจากการใช้ power law พบว่าชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ มีค่า r_0 มากกว่าและมีความชัน (γ) มากกว่าชุดข้อมูลมี stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับชุดข้อมูลของ GIMIC ในย่าน 0σ โดยตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ จากงานวิจัยนี้กับผลลัพธ์จากการจำลองของ GIMIC ในย่าน 0σ และผลจากการสังเกตการณ์จาก VLRS (Tummuangpak *et al.* 2014)



ภาพที่ 4 แสดงค่าความสัมพันธ์ 1 มิติของกาแล็กซี่-กาแล็กซี่ใน redshift space $\xi(s)$ และ real space $\xi(r)$ ของกลุ่มข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ (ภาพ a) และ stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ (ภาพ b)

1.1.3 อัตราส่วน $\xi(s)/\xi(r)$

อัตราส่วนของ $\frac{\xi(s)}{\xi(r)}$ ของแต่ละระยะห่างระหว่างกาแล็กซี่ (r) สามารถหาได้จาก linear theory (Kaiser

1987; Hamilton, 1992), ผลของอัตราส่วนนี้ควรเป็นไปตามหลักของ “Kaiser boost” ดังสมการ

$$\xi(s) = \left(1 + \frac{2}{3} \beta_{gal} + \frac{1}{5} \beta_{gal}^2\right) \xi(r) \tag{3}$$

เมื่อ β_{gal} คือ dynamical infall parameter จากความสัมพันธ์ของกาแล็กซี่และกาแล็กซี่ $\beta_{gal} \approx \Omega^{0.6}/b$ ในกรณีนี้ b คือ linear galaxy bias ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $b = \sqrt{\xi_{gal}/\xi_{DM}}$ ซึ่ง ξ_{gal} คือค่า galaxy clustering และ ξ_{DM} คือ dark matter clustering

สำหรับชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ เมื่อคำนวณหาค่าแอมพลิจูดของค่าความสัมพันธ์หนึ่งมิติ ที่ระยะ $8 h^{-1} \text{Mpc}$ ($\bar{\xi}(8)$) ซึ่งเป็นระยะเฉลี่ยของสเปคตรัมที่จะยังคงมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นอยู่ (อ้างอิง สมการที่ 17, 18 จาก Bielby *et al.* 2013) ได้ $\bar{\xi}(8) = 0.33 \pm 0.02$ ซึ่งทำให้ได้ค่า bias, $b = 1.85 \pm 0.12$ และ $\beta_{gal} = 0.35 \pm 0.08$ ในขณะที่ชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ พบว่า $\bar{\xi}(8) = 0.75 \pm 0.05$ ซึ่งทำให้ได้ค่า $b = 2.80 \pm 0.18$ และ $\beta_{gal} = 0.53 \pm 0.18$ เส้นประในช่องล่างแสดงค่าคาดหวังของ Kaiser boost $\frac{\xi(s)}{\xi(r)}$ (จากสมการที่ 3) โดย $\beta_{gal} = 0.35$ จะให้ค่า $\frac{\xi(s)}{\xi(r)} = 1.26$ สำหรับชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ และเมื่อ $\beta_{gal} = 0.53$ จะให้ค่า $\frac{\xi(s)}{\xi(r)} = 1.41$ สำหรับชุดข้อมูลที่มี stellar mass

$\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณ พบว่าค่า $\frac{\xi(r)}{\xi(r)}$ มีค่าน้อยกว่าคาดหวัง แต่ก็ยังอยู่ในระดับความคลาดเคลื่อนประมาณ $1-2\sigma$

ตารางที่ 1 ผลการใช้ power-law กับความสัมพันธ์ของกาแล็กซี่ใน 1 มิติ

Sample	$r_0 (h^{-1} \text{ Mpc})$	γ	Bias	β_{gal}
GIMIC, $+1\sigma M_* \geq 0.5 \times 10^9 M_{\odot}$	3.8 ± 0.21	1.65 ± 0.05	1.85 ± 0.12	0.53 ± 0.18
GIMIC, $+1\sigma M_* \geq 4.4 \times 10^9 M_{\odot}$	4.50 ± 0.80	1.80 ± 0.20	2.80 ± 0.18	0.35 ± 0.08
GIMIC, $0\sigma M_* \geq 0.5 \times 10^9 M_{\odot}$	2.41 ± 0.24	1.52 ± 0.10	1.85 ± 0.12	0.35 ± 0.04
GIMIC, $0\sigma M_* \geq 4.4 \times 10^9 M_{\odot}$	4.16 ± 1.16	1.56 ± 0.26	2.80 ± 0.18	0.23 ± 0.08
VLSR (Bielby et al. 2013)	3.83 ± 0.24	1.60 ± 0.09	2.59 ± 0.13	—

1.1.4 Redshift-Space Distortion (RSD) model

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกาแล็กซี่ที่ระยะห่างจากกันน้อย ๆ ($< 1 h^{-1} \text{ Mpc}$) จะพบว่าค่าความสัมพันธ์ของกาแล็กซี่ใน redshift-space มีค่าต่ำกว่าใน real-space ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็ว pairwise-velocity, $\langle w_z^2 \rangle^{1/2}$ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้โมเดลของ Redshift-Space Distortion เพื่อวัดผลของความเร็ว pairwise-velocity นี้ ดังสมการ (da Angela et al. 2005)

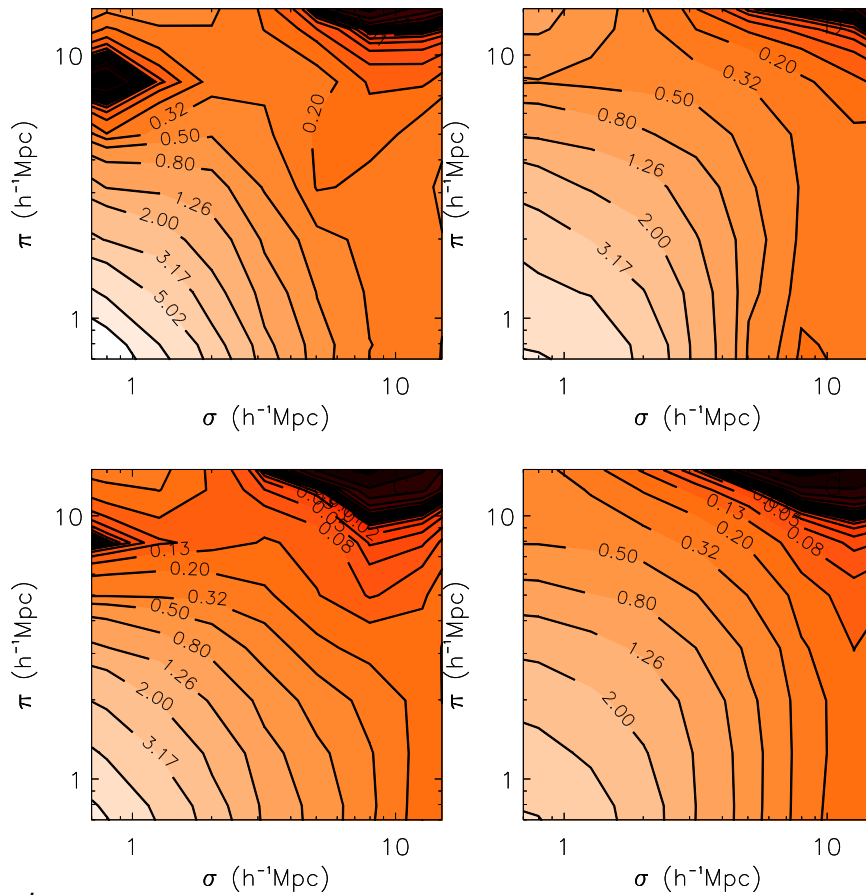
$$f(w_z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \langle w_z^2 \rangle^{1/2}} \exp\left(-0.5 \frac{|w_z|^2}{\langle w_z^2 \rangle^{1/2}}\right) \quad (4)$$

เมื่อใช้ค่า pairwise-velocity ที่แตกต่างกัน $\langle w_z^2 \rangle^{1/2} = 170 \text{ km/s}$, $\langle w_z^2 \rangle^{1/2} = 300 \text{ km/s}$ สำหรับชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ และ $\langle w_z^2 \rangle^{1/2} = 280 \text{ km/s}$, $\langle w_z^2 \rangle^{1/2} = 420 \text{ km/s}$ สำหรับชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ พบว่าสำหรับชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ค่าความเร็ว (pairwise-velocity) $\langle w_z^2 \rangle^{1/2} = 170 \text{ km/s}$ ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าความสัมพันธ์ของกาแล็กซี่และกาแล็กซี่ใน redshift-space มากกว่า ในขณะที่ชุดข้อมูล stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ จะต้องใช้ค่าความเร็ว (pairwise-velocity) $\langle w_z^2 \rangle^{1/2} = 280 \text{ km/s}$ อย่างไรก็ตามค่าความเร็ว (pairwise-velocity) ที่ใช้ในโมเดลนี้มีค่าน้อยกว่าความเร็ว (pairwise-velocity) ที่วัดได้โดยตรงจากข้อมูลจากการสังเกตการณ์ อาจเนื่องมาจากผลของการจำลองที่เปลี่ยนจาก real-space ไปเป็น redshift-space นั้นแก๊สและกาแล็กซี่มีการเคลื่อนที่ไปด้วยกันทั้งระบบและเมื่อคำนวณความเร็ว (pairwise-velocity) จึงทำให้ความเร็วบางส่วนหักล้างกันส่งผลให้ความเร็วรวมที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าค่าจากการสังเกตการณ์

1.2 ความสัมพันธ์ 2 มิติของกาแล็กซี่-กาแล็กซี่

การวัดค่าความสัมพันธ์ 2 มิติของกาแล็กซี่-กาแล็กซี่จะช่วยให้เข้าใจถึงผลของความเร็ว pairwise-velocity ของกาแล็กซี่ต่อความสัมพันธ์ระหว่างกาแล็กซี่ด้วยกันเอง ซึ่ง $\zeta(\sigma, \pi)$ คือนิยามของความสัมพันธ์ของกาแล็กซี่และกาแล็กซี่ใน 2 มิติ

นั่นคือระยะห่างระหว่างกาแลกซีตามแนวเส้นสายตา (π) และระยะห่างตามขวางของเส้นสายตา (σ) จากนั้นใช้ตัวประมาณค่าความสัมพันธ์ของกาแลกซีและกาแลกซีที่ตั้งที่ใช้ในการหาค่าความสัมพันธ์ของกาแลกซีและกาแลกซี 1 มิติ (สมการที่ 1) คำนวณความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ของกาแลกซีและกาแลกซีตามแนวเส้นสายตา (π) และตามแนวขวางของเส้นสายตา (σ) ตามลำดับ ภาพที่ 5 แสดงค่าความสัมพันธ์ 2 มิติของกาแลกซี-กาแลกซีสำหรับชุดข้อมูล stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ใน real space (บนซ้าย) และ redshift space (บนขวา) และสำหรับชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ใน real space (ล่างซ้าย) และ redshift space (ล่างขวา) ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ของกาแลกซีและกาแลกซี 2 มิติ ใน real space และ redshift space พบว่าที่ระยะห่างสั้นๆ ค่าความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ของกาแลกซีและกาแลกซีใน redshift space จะถูกดึงให้บิดเบี้ยวขึ้นในทิศของเส้นสายตา (π) ซึ่งเป็นผลของความเร็ว peculiar velocities และที่ระยะห่างมากๆ ที่ $\pi \sim 10 h^{-1} \text{Mpc}$ จะพบว่าค่าความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ของกาแลกซีและกาแลกซีถูกกดลงซึ่งเป็นผลของ dynamical infall อันเกิดจากความเร็ว (peculiar velocities) ซึ่งเป็นไปตามโมเดลของ Redshift-Space Distortion



ภาพที่ 5 แสดงค่าความสัมพันธ์ 2 มิติของกาแลกซี-กาแลกซีสำหรับชุดข้อมูล stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ใน real space (บนซ้าย) และ redshift space (บนขวา) และสำหรับชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ใน real space (ล่างซ้าย) และ redshift space (ล่างขวา) ตามลำดับ

2. ความสัมพันธ์ของแก๊ส-กาแลกซี

การศึกษาความสัมพันธ์ของสสารระหว่างกาแลกซีและกาแลกซีจะช่วยให้เข้าใจวิวัฒนาการของกาแลกซีได้มากขึ้น ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณหาความสัมพันธ์ของแก๊สและกาแลกซีใน 1 มิติ โดยใช้ค่าฟลักซ์(normalized pixel flux) ตามเส้นสายตา เพื่อหาการส่งผ่านของแก๊ส ($\text{Ly}\alpha$ transmissivity) ตามแนวเส้นสายตาดจากสมการ (Tummuangpak *et al.* 2014)

$$T = \frac{\bar{T}(z=3) f}{\bar{T}(z) f_{con}} \quad (5)$$

เมื่อ $\bar{T}(z)$ คือค่าฟลักซ์ที่ได้จากสเปกตรัมเส้นสายตาดของควอร์ซาร์ที่สนใจ ส่วน f_{con} คือค่า flux continuum ตามแนวเส้นสายตาดโดยต้องหาค่าเฉลี่ยของฟลักซ์ที่ขึ้นกับค่าเรดชิฟท์จาก (McDonald *et al.* 2000)

$$\bar{T}(z) = 0.676 - 0.220(z - 3) \quad (6)$$

เมื่อ z คือค่าเรดชิฟท์ แสงที่เดินทางจากควอร์ซาร์จะถูกดูดกลืนด้วยกลุ่มของแก๊สที่อยู่ระหว่างควอร์ซาร์และโลก ซึ่งการดูดกลืนที่เกิดขึ้นนี้จะปรากฏเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนของไฮโดรเจนเรียกว่า Lyman alpha forest ซึ่งอยู่ระหว่าง $\text{Ly}\beta$ ($\text{Ly}\beta$ มีความยาวคลื่นในกรอบอ้างอิงคือ 1,026 Å) และ $\text{Ly}\alpha$ ($\text{Ly}\alpha$ มีความยาวคลื่นในกรอบอ้างอิงคือ 1,216 Å) ดังนั้นในการคำนวณจะไม่ใช้เส้นสายตาดที่มีค่าความยาวคลื่นต่ำกว่า $\text{Ly}\beta$ และจะใช้สเปกตรัมที่มีค่าความยาวคลื่นต่ำกว่า $\text{Ly}\alpha$ ประมาณ 20 Å เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากฟิสิกการปลดปล่อยในช่วงความยาวคลื่น $\text{Ly}\alpha$ ของควอร์ซาร์

การศึกษาความสัมพันธ์ของแก๊สและกาแลกซีโดยคำนวณค่าการส่งผ่านของแก๊ส ($\text{Ly}\alpha$ transmissivity) ตามแนวเส้นสายตาด ($\langle T(s) \rangle$) นั้นหาได้จาก (Tummuangpak *et al.* 2014)

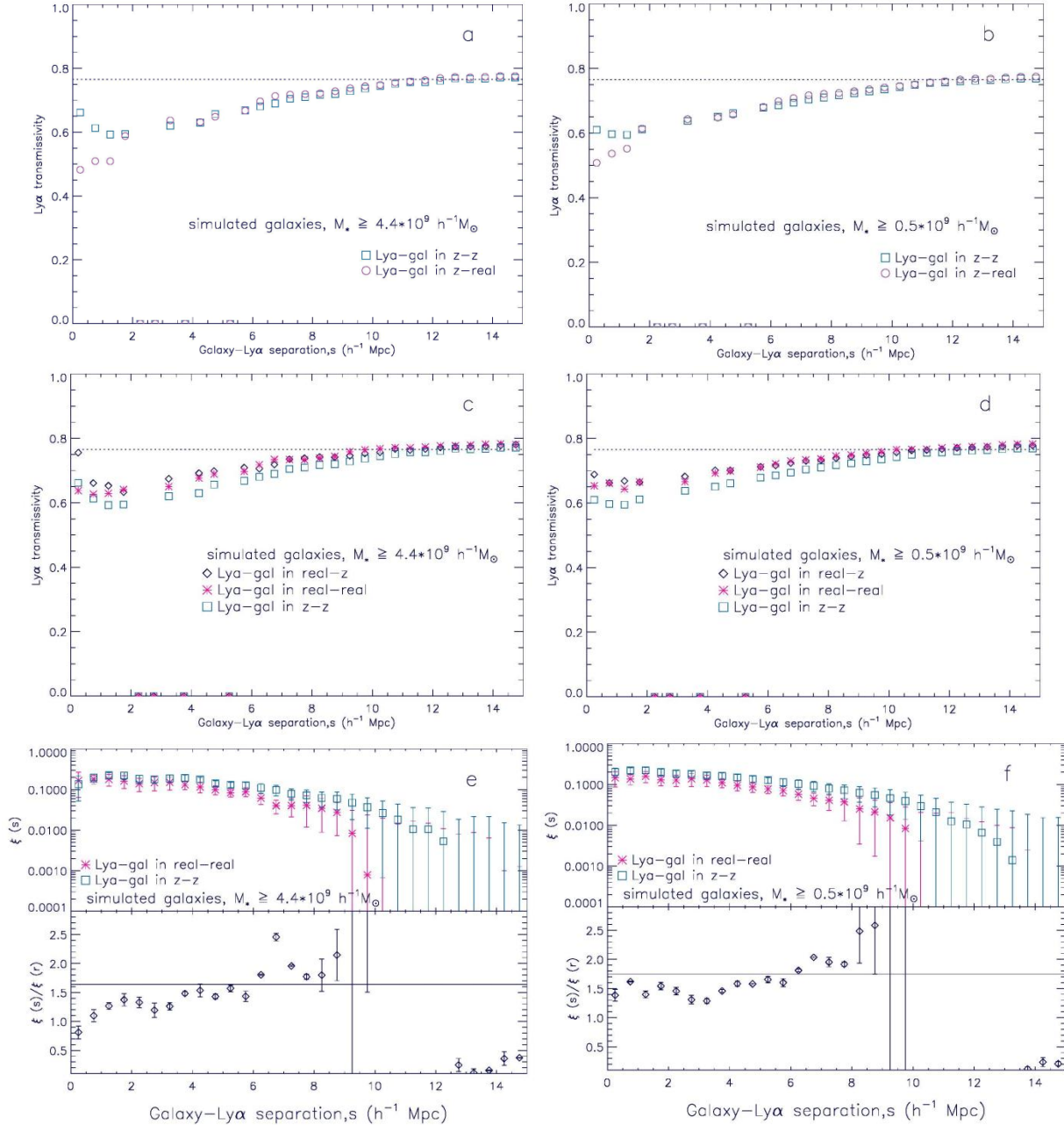
$$\langle T(s) \rangle = \frac{\langle DT(s) \rangle}{N(s)} \quad (7)$$

เมื่อ $\langle DT(s) \rangle$ คือจำนวนคู่ของแก๊สกับกาแลกซีที่ถ่วงน้ำหนักโดยค่าฟลักซ์ (T จากสมการที่ (5)) ในบริเวณพิกเซลนั้นๆ และ $N(s)$ คือจำนวนของกาแลกซีในแต่ละช่วงระยะ s

2.1 ความสัมพันธ์ 1 มิติของแก๊ส-กาแลกซี ($\langle T(s) \rangle$)

ภาพที่ 6 แสดงค่า $\text{Ly}\alpha$ mean transmissivity ($\langle T(s) \rangle$) ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างแก๊สกับกาแลกซีตามเส้นสายตาดซึ่งคำนวณจากสมการ (7) โดยคอลัมน์ซ้ายมือแสดงผลจากชุดข้อมูล stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ และคอลัมน์ทางขวาแสดงผลจากชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ทั้งนี้ได้แบ่งเป็น 3 ชุดการเปรียบเทียบ แกวที่ 1 (ภาพที่ 6(a) และ 6(b)) แสดงค่า $\text{Ly}\alpha$ mean transmissivity ใน redshift space กับกาแลกซีใน redshift-space ($z-z$, แสดงโดยสี่เหลี่ยมสีฟ้า) และ $\text{Ly}\alpha$ mean transmissivity ใน redshift-space กับกาแลกซีใน real-space (z -real, แสดงโดยวงกลมม่วง) แกวที่ 2

(ภาพที่ 6(c) และ 6(d)) แสดงถึงค่า $L\alpha$ mean transmissivity ใน real-space กับกาแล็กซี่ใน redshift-space (real-z, แสดงโดยข้าวหลามตัดสีน้ำเงิน) และค่า $L\alpha$ mean transmissivity ใน real-space กับกาแล็กซี่ใน real-space (real-real, แสดงโดยดอกจันสีชมพู), ค่า $L\alpha$ mean transmissivity ใน redshift-space กับกาแล็กซี่ใน redshift-space (z-z, แสดงโดยสี่เหลี่ยมสีฟ้า) เส้นประในกราฟ (a)-(d) แสดงถึงค่าคาดหวังของ $L\alpha$ mean transmissivity ที่มีค่าประมาณ ≈ 0.765 (McDonald *et al.* 2000) แถวที่ 3 (ภาพที่ 6(e) และ 6(f)) แสดงค่า $\zeta(r)$ สำหรับ real space (real-real, แสดงโดยดอกจันสีชมพู), และ $\zeta(s)$ สำหรับ redshift-space (z-z, แสดงโดยสี่เหลี่ยมสีฟ้า) พร้อมทั้งแสดงค่าอัตราส่วนของ $\frac{\zeta(s)}{\zeta(r)}$ ด้วยจุดตั้งแสดงในช่องว่างและเส้นทึบในช่องว่างของกราฟ (e) – (f) แสดงถึงค่าคาดหวังของค่าอัตราส่วนของ $\frac{\zeta(s)}{\zeta(r)}$ จากสมการ $\frac{\zeta(s)}{\zeta(r)} = \left(1 + \frac{1}{3}(\beta_{gal} + \beta_{Ly\alpha}) + \frac{1}{5}\beta_{gal}\beta_{Ly\alpha}\right)$ (Mountrichas *et al.* 2009) สำหรับ (e) เมื่อ $\beta_{gal} = 0.35$ และ $\beta_{Ly\alpha} = 1.3$ (Tummuangpak *et al.* 2014) จะให้ค่า $\frac{\zeta(s)}{\zeta(r)} = 1.64$ และ (f) ที่มีค่า $\beta_{gal} = 0.53$ และ $\beta_{Ly\alpha} = 1.3$ จะให้ค่า $\frac{\zeta(s)}{\zeta(r)} = 1.75$ และเป็นสิ่งที่สังเกตว่าที่ระยะห่างมากๆ ($s > 9 h^{-1} \text{Mpc}$) ค่า $\zeta(s)$ และ $\zeta(r)$ มีค่าน้อยมากเมื่อนำเสนอใน logarithmic scale ค่าของ error bars จึงดูมีค่ามาก จากผลการคำนวณนี้แสดงให้เห็นถึงการลดลงของค่า $L\alpha$ mean transmissivity ที่ระยะห่างสั้นๆ เมื่อเราเปรียบเทียบ real space – real space, redshift space – redshift space, real space – redshift space ในขณะที่ redshift space – real space นั้นมีการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยๆ เพิ่มขึ้นไปด้วยกัน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากค่าความเร็วของ bulk motion ($\sim 200 \text{ kms}^{-1}$) ที่ทำให้ทั้งแก๊สและกาแล็กซี่เคลื่อนที่ไปด้วยกันเมื่อมีการเปลี่ยนจาก real space เป็น redshift space

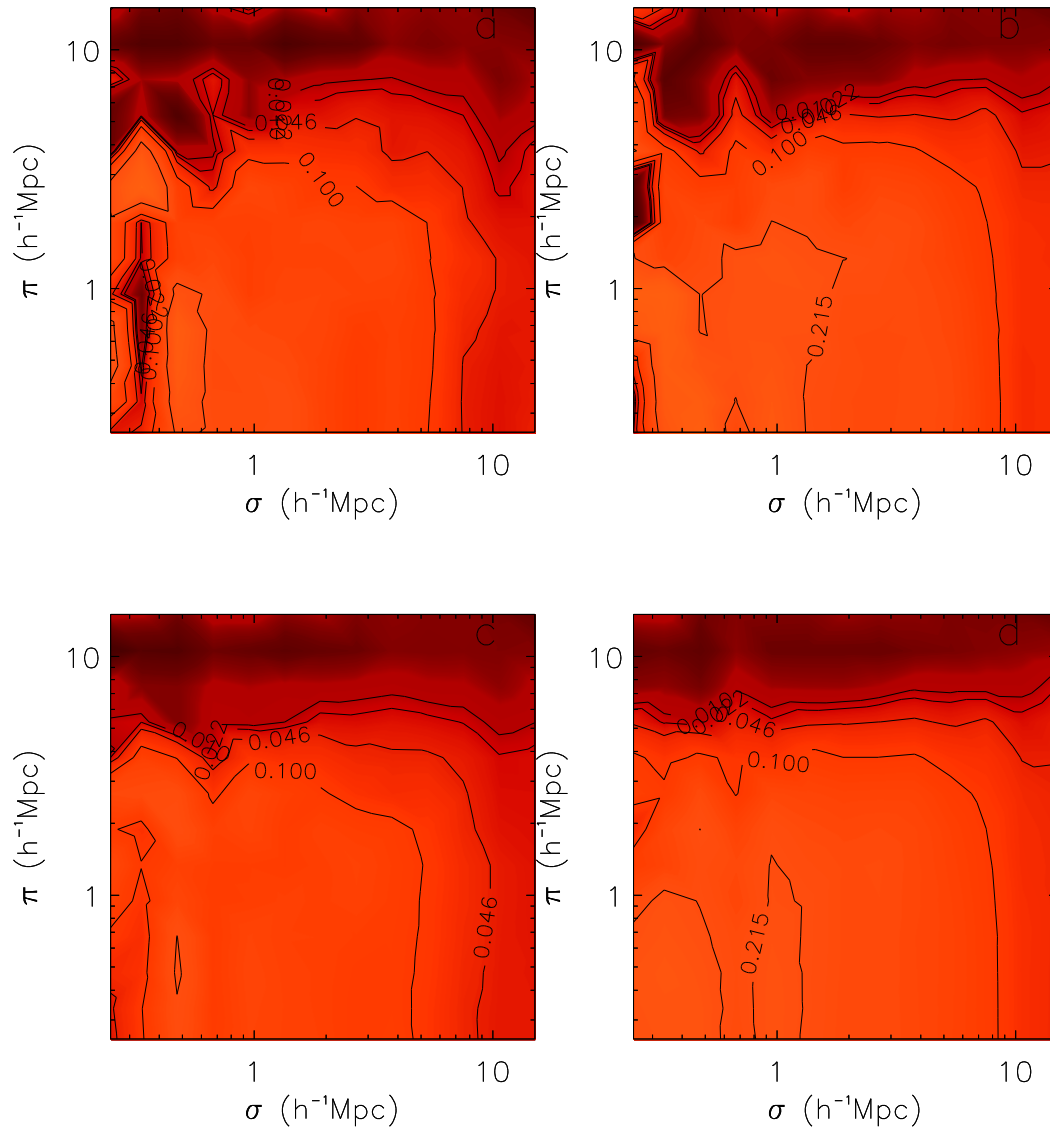


ภาพที่ 6 แสดงค่าความสัมพันธ์ 1 มิติของแก๊ส-กาแล็กซี่โดยคอลัมน์ซ้ายมือแสดงผลจากชุดข้อมูล stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ และคอลัมน์ขวาแสดงผลจากชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$

2.2 ความสัมพันธ์ 2 มิติของแก๊ส-กาแล็กซี่ (σ, π)

ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณค่า $\zeta(\sigma, \pi)$ ด้วยวิธีการเดียวกันกับการหาค่า $\zeta(r)$ ซึ่งผลการคำนวณแสดงในภาพที่ 7 โดยภาพบนซ้ายแสดงผลลัพธ์ของชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ใน real space และภาพบนขวาแสดงผลของข้อมูลใน redshift-space ในแถวล่างของภาพที่ 7 แสดงผลลัพธ์ของชุดข้อมูล stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ใน real-space

(ล่างซ้าย) และ redshift-space (ล่างขวา) ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าที่ระยะห่างสั้นๆ ค่าความสัมพันธ์ของแก๊สและกาแล็กซี่ใน redshift-space จะถูกดึงให้บิดเบี้ยวขึ้นในทิศของเส้นสายตา (π) อันเป็นผลมาจาก peculiar velocities แต่ที่ระยะไกลๆ ($\pi \sim 10 h^{-1} \text{Mpc}$) ความเร็ว (peculiar velocities) จะทำให้ค่าความสัมพันธ์มีค่าลดต่ำลง เป็นไปตามการทำนายของโมเดลของ Redshift Space Distortion ซึ่งจากค่าความสัมพันธ์ของแก๊สและกาแล็กซี่เหล่านี้ สามารถไปคำนวณค่า linear galaxy bias (b) และ dynamical infall parameter (β) ของแก๊สและกาแล็กซี่ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 1



ภาพที่ 7 แสดงค่าความสัมพันธ์ 2 มิติของแก๊ส-กาแล็กซี่ $\xi(\sigma, \pi)$ สำหรับชุดข้อมูล stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ใน real space (บนซ้าย) และ redshift space (บนขวา) และสำหรับชุดข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ใน real space (ล่างซ้าย) และ redshift space (ล่างขวา) ตามลำดับ

สรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สและกาแล็กซี่ที่เรดชิฟท์ 3 โดยใช้ข้อมูลจาก GIMIC ที่ย่านความหนาแน่น $+1\sigma$ เพื่อคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ของแก๊สและกาแล็กซี่ดังนี้

1. ศึกษาความสัมพันธ์ของกาแล็กซี่-กาแล็กซี่ทั้งใน 1 มิติ และ 2 มิติ โดยใช้ข้อมูล 2 ชุด คือ 1. ข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 4.4 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ และ 2. ข้อมูลที่มี stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ จากผลการคำนวณพบว่าชุดข้อมูลของ stellar mass $\geq 0.5 \times 10^9 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการสังเกตการณ์มากกว่า และค่าที่ได้จากชุดข้อมูล GIMIC ที่ย่านความหนาแน่น $+1\sigma$ นั้น มีผลแตกต่างจากย่าน 0σ อาจเป็นผลจากการที่ย่าน $+1\sigma$ มีความหนาแน่นมากกว่า ทำให้ค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลจาก GIMIC $+1\sigma$ มีค่าสูงกว่านอกจากนี้ค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลใน real space และ redshift space มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อใช้โมเดลของ Redshift Space Distortions พบว่าค่าความเร็วของกาแล็กซี่ที่ได้จากการจำลองนั้นมีค่าน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับผลของค่าความเร็วที่วัดได้โดยตรงจากการสังเกตการณ์ทั้งนี้ อาจเป็นผลจากการที่แก๊สและกาแล็กซี่มีการเคลื่อนที่ไปด้วยกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจาก real-space ไปเป็น redshift-space ทำให้ค่าความเร็วบางส่วนมีการหักล้างกัน ส่งผลให้ผลต่างของความเร็วนั้นมีน้อยกว่าค่าจากการสังเกตการณ์

2. ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างกาแล็กซี่และแก๊สจากเส้นสายตาของควอซาร์พบว่าค่าการส่งผ่านของแก๊สนั้นได้ลดลงแปรผันตามระยะห่างระหว่างแก๊สและกาแล็กซี่ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความสัมพันธ์ของแก๊สและกาแล็กซี่ใน redshift space ได้ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จาก real space ซึ่งเป็นไปตามการทำนายของทฤษฎีเชิงเส้นของกาแล็กซี่ประยุกต์กับพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของ Ly-alpha forest ที่บริเวณรอบๆ แก๊สและกาแล็กซี่ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ออกของแก๊ส (gas outflows) บริเวณรอบๆ กาแล็กซี่ไปหักล้างผลที่เกิดจากความเร็ว (peculiar velocities) ที่ส่งผลให้เกิด gravitational infall

ผู้วิจัยได้ใช้โมเดลของ Redshift Space Distortions กับผลของค่าความสัมพันธ์ของแก๊สและกาแล็กซี่ที่ได้และคำนวณหาค่า β_{gal} เปรียบเทียบกับค่าจากการสังเกตการณ์และค่าจาก GIMIC ที่ 0σ เพื่อศึกษาผลของ feedback และ outflows ของแก๊สในการก่อตัวของกาแล็กซี่พบว่าค่า β_{gal} ของชุดข้อมูล GIMIC ที่ $+1\sigma$ มีค่าแตกต่างจาก GIMIC ที่ 0σ เพียงเล็กน้อย

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยใหม่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- Adelberger, K. L., Steidel, C. C., Shapley, A. E., Pettini, M. (2003). Galaxies and Intergalactic Matter at Redshift $z \sim 3$: Overview. *ApJ*, 584, 45.
- Adelberger, K. L., Steidel, C. C., Pettini, M., Shapley, A. E., Reddy, N. A., Erb, D. K. (2005b). The Spatial Clustering of Star-forming Galaxies at Redshifts $1.4 < z < 3.5$. *ApJ*, 619, 697.
- Bielby R. M. , Shanks, T., Weibacher, P.M., Infante, L., Crighton, N.H.M., Bornancini, C., . (2011). The VLT LBG Redshift Survey - I. Clustering and dynamics of ≈ 1000 galaxies at $z \approx 3$. *MNRAS*, 414, 2.
- Bielby, R., Hill, M.D., Shanks, T., Crighton, N.H.M., Infante, L., Bornancini, C. G., . (2013). The VLT LBG Redshift Survey - III. The clustering and dynamics of Lyman-break galaxies at $z \sim 3$. *MNRAS*, 430, 425.
- Bruscoli, M., Ferrara, A., Marri, S., Schneider, R., Maselli, A., Rollinde, E., . (2003). The Ly α forest around high-redshift galaxies. *MNRAS*, 343, L41.
- Crain, R. A., Theuns, T., DallaVecchia, C., Eke, V.R., Frenk, C.S., Jenkins, A., . (2009). Galaxies-intergalactic medium interaction calculation - I. Galaxy formation as a function of large-scale environment. *MNRAS*, 399, 1773.
- Crighton, N. H. M., Bielby, R., Shanks, T., Infante, L., Bornancini, C. G., Bouch, N., . (2011). VLT LBG Redshift Survey II: Interactions between galaxies and the IGM at $z \sim 3$. *MNRAS*, 414, 28.
- Croft, R. A. C., Hernquist, L., Springel, V., Westover, M., White, M. (2002). High-Redshift Galaxies and the Ly α Forest in a Cold Dark Matter Universe. *ApJ*, 580, 634.
- da Angela, J., Shanks, T., Croom, S. M., Weibacher, P., Brunner, R. J., Couch, W. J., . (2008). The 2dF-SDSS LRG and QSO survey: QSO clustering and the L-z degeneracy. *MNRAS*, 383, 565.
- Davis, M., Efstathiou, G., Frenk, C. S., White, S. D. M. (1985). The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter. *ApJ*, 292, 371.
- Davis, M. and Peebles, P. J. E. (1983). A survey of galaxy redshifts. V - The two-point position and velocity correlations. *ApJ*, 267, 465.
- Desjacques, V., Nusser, A., Haehnelt, M. G., Stoehr, F. (2004). Galactic winds and the Ly α forest. *MNRAS*, 350, 879.
- Desjacques, V., Haehnelt, M. G., Nusser, A. (2006). The impact of galactic winds from Lyman-break galaxies on the intergalactic medium. *MNRAS*, 367, L74.

- Dolag, K., Borgani, S., Murante, G., Springel, V. (2009). Substructures in hydrodynamical cluster simulations. *MNRAS*, 497, 514.
- Efron, B. and Stein, C. (1981). The jackknife estimate of variance. *The Annals of Statistics*, 586–596.
- Hamilton, A. J. S.(1992), Measuring omega and the real correlation function from the redshift correlation function. *ApJ*, 385, L5.
- Kaiser, N.(1987). Clustering in real space and in redshift space. *MNRAS*, 227, 1.
- Kollmeier, J. A., Weinberg, D. H., Dav' e, R., Katz, N.(2003). Lyman Break Galaxies and the Ly α Forest. *ApJ*, 594, 75.
- McDonald, P., Miralda-Escud'e, J., Rauch, M., Sargent, W. L. W., Barlow T. A., Cen R., et al.(2000). The Observed Probability Distribution Function, Power Spectrum, and Correlation Function of the Transmitted Flux in the Ly α Forest. *ApJ*, 543, 1.
- Mountrichas, G., Sawangwit, U., Shanks, T.(2009). 2PIGG group masses via 2dF galaxy z-space distortion. *MNRAS*, 398, 971.
- Rakic, O., Schaye, J., Steidel, C. C., Rudie, G. C. (2012). Neutral Hydrogen Optical Depth near Star-forming Galaxies at $z \approx 2.4$ in the Keck Baryonic Structure Survey. *ApJ*, 751, 94.
- Shapley, A. E., Steidel, C. C., Pettini, M., Adelberger K. L.(2003). Rest-Frame Ultraviolet Spectra of $z \approx 3$ Lyman Break Galaxies. *ApJ*, 588, 65.
- Springel, V., White, S. D. M., Tormen, G., Kauffmann, G. (2001). Populating a cluster of galaxies - I. Results at $[formmu^2]z=0$. *MNRAS*, 328, 726.
- Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., Frenk, C. S., Yoshida, N., Gao, L., et al. (2005). Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *Nature*, 435, 629.
- Springel, V. (2005). The cosmological simulation code GADGET-2. *MNRAS*, 364, 1105.
- Steidel, C. C., Adelberger, K. L., Shapley, A. E., Pettini, M., Dickinson, M., Giavalisco, M.(2003). Lyman Break Galaxies at Redshift $z \sim 3$: Survey Description and Full Data Set. *ApJ*, 592, 728.
- Theuns, T., Leonard, A., Efstathiou, G., Pearce, F. R., Thomas, P. A.(1998). P^3 M-SPH simulations of the Ly α forest. *MNRAS*, 301, 478.
- Theuns, T., Viel, M., Kay, S., Schaye, J., Carswell, R. F., Tzanavaris, P.(2002). Galactic Winds in the Intergalactic Medium. *ApJ*, 578, L5.

- Tummuangpak, P. , Shanks, T., Bielby, R. M., Crighton, N. H. M., Francke, H. ,Infante, L.,. (2014). The VLT LBG Redshift Survey - IV. Gas and galaxies at $z \sim 3$ in observations and simulations.*MNRAS*, 442, 2094, 2014.
- Wiersma, R. P. C., Schaye, J., Theuns, T., DallaVecchia, C., Tornatore, L. (2009).Chemical enrichment in cosmological, smoothed particle hydrodynamics simulations.*MNRAS*, 399, 574.
- White, S. D. M. and Rees, M. J. (1978). Core condensation in heavy halos - A two-stage theory for galaxy formation and clustering.*MNRAS*, 183, 341.
- White, S. D. M. and Frenk, C. S. (1991).Galaxy formation through hierarchical clustering.*ApJ*, 379, 52.