

## การศึกษาคุณสมบัติของ LAE ที่เรดชิฟท์ 3

### Lyman Alpha Emitter Properties at $z \sim 3$

พิมปญญวัฒน์ ทุมเมืองปัก\*

Pimpunyawat Tummuangpak\*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Physics Department, Faculty of Science, KhonKaen University

Received : 12 June 2017

Accepted : 1 September 2017

Published online : 13 September 2017

#### บทคัดย่อ

ผู้วิจัยมีโครงการสังเกตการณ์กาแล็กซี่ที่มีค่าเรดชิฟท์มากชื่อว่า The VLT LBG Redshift Survey (VLRs) เก็บข้อมูลของกาแล็กซี่ที่เรดชิฟท์  $z \sim 3$  เพื่อศึกษาคุณสมบัติของกาแล็กซี่และสสารระหว่างกาแล็กซี่ โดยคัดเลือก 9 บริเวณสังเกตการณ์รอบๆ เควซาร์ที่มีความสว่างมากๆ ปัจจุบันฐานข้อมูลที่สมบูรณ์ประกอบไปด้วยไลมานเบรคกาแล็กซี่จำนวนกว่า 3,000 กาแล็กซี่ นอกจากนี้ทางคณะยังได้ใช้กล้องโทรทรรศน์ที่ชื่อว่า Subaru Suprime-Cam ผ่านฟิลเตอร์แบบแคบเพื่อค้นหากาแล็กซี่ที่เรียกว่าไลมานแอลฟาอิมิตเตอร์ที่ค่าเรดชิฟท์นี้ด้วยในงานนี้ใช้ข้อมูลจากบริเวณการสังเกตการณ์ 7 บริเวณเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกาแล็กซี่และกาแล็กซี่ โดยคำนวณฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติของกาแล็กซี่พบว่าค่าความชันของความสัมพันธ์มีค่า  $\gamma = -1.8$  และ clustering length  $r_0 = 1.8 h^{-1} \text{Mpc}$  ซึ่งมีความสอดคล้องกับการสังเกตการณ์อื่นๆ ที่ค่าเรดชิฟท์ใกล้เคียงกัน

**คำสำคัญ:** กาแล็กซี่ วิวัฒนาการ ค่าเรดชิฟท์มาก

#### Abstract

We are undertaking a large galaxy survey centred on distant bright quasars in the form of the VLT LBG Redshift Survey (VLRs) to probe the intergalactic medium (IGM) of  $z \sim 3$  galaxies. At present the VLRs survey consists of 9 fields in total, with spectroscopic observations of  $\sim 3,000$  Lyman break galaxies (LBGs) taken with VLT VIMOS. We have also made the photometric observations of Lyman-alpha emitters (LAEs) in the deep imaging fields of the VLRs, taken by using Subaru Suprime-Cam, and aimed at studying the clustering properties of LAE galaxies. In this research, we use data from 7 fields to conduct the auto-correlation function of LAEs. We find the correlation length of  $r_0 = 1.8 h^{-1} \text{Mpc}$  with a slope of  $\gamma = -1.8$  which are in agreement with those of previous observations.

**Keywords:** galaxies, evolution, high-redshift

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

## บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นักดาราศาสตร์ได้พยายามทำการสำรวจกาแล็กซี่ที่ก่อตัวมานานเพื่อที่จะเข้าใจกระบวนการและวิวัฒนาการของกาแล็กซี่ในยุคต่างๆของเอกภพ ซึ่งการค้นหาการก่อตัวของกาแล็กซี่โดยการเปล่งแสงของอะตอมไฮโดรเจนผ่านย่านความถี่ไลแมน(Lyman Alpha Emission line) นั้นนับเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงและได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลาย เช่น

1. Lyman Break technique วิธีนี้จะสังเกตการณ์โดยใช้ฟิลเตอร์แบบกว้าง (broadband filter, U,G, และ R) ผ่านกล้องโทรทรรศน์ที่ทำงานในย่านความถี่ที่ตามองเห็นและกาแล็กซี่ที่ถูกสำรวจนี้จะปรากฏในฟิลเตอร์แบบG,R แต่ไม่ปรากฏที่ฟิลเตอร์แบบ U ซึ่งเราเรียกกาแล็กซี่ที่ตรวจพบจากวิธีการนี้ว่า Lyman Break Galaxy (LBG) 2. กาแล็กซี่ที่เรียกว่า Lyman Alpha Emitter (LAE) นั้นจะถูกสำรวจและคัดเลือกจากภาพจากกล้องโทรทรรศน์ที่ใช้ฟิลเตอร์แบบแคบ (Narrow-band filter (NB))

กลุ่มวิจัยที่ใช้วิธีการเหล่านี้ ได้แก่ Hu & McMahon (1996); Hu *et al.* (1998); Cowie & Hu (1998); Steidel *et al.* (1996); Ouchi *et al.* (2003); Hayashino *et al.* (2004); Gawiser *et al.* (2007); Gronwall *et al.* (2007); Ouchi *et al.* (2008); Rauch *et al.* (2008); Ouchi *et al.* (2010); Banados *et al.* (2013) แต่กลุ่มวิจัยที่ทำการสำรวจ LAEs ที่เรดชิฟท์ 3 นั้นยังมีจำนวนน้อย (เช่น Steidel *et al.* 2000; Fynbo *et al.* 2003; Hayashino *et al.* 2004; Matsuda *et al.* 2005; Venemans *et al.* 2007; Nilsson *et al.* 2007; Gawiser *et al.* 2007; Gronwall *et al.* 2007; Rauch *et al.* 2008; Ouchi *et al.* 2008; McLinden *et al.* 2014) โดย Gronwall *et al.* (2007) ได้ทำการสังเกตการณ์โดยใช้ the Extended Chandra Deep Field-South (ECDFS) ทำการคัดเลือกและสามารถระบุจำนวน LAEs กาแล็กซี่ได้ถึง 160 กาแล็กซี่ที่เรดชิฟท์ 3.1 ซึ่งการสังเกตการณ์นี้ครอบคลุมพื้นที่ท้องฟ้า  $0.28 \text{ deg}^2$  จากนั้นได้คำนวณหาค่าขอบเขตกำลังส่องสว่างของ (luminosity limit) ข้อมูลพบว่า  $\text{Ly}\alpha \geq 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$  นั้นหมายถึง LAEs ประกอบไปด้วยกลุ่มฝุ่นในปริมาณมาก จากนั้น Ouchi *et al.* (2008) ได้รายงานผลการสังเกตการณ์จากกล้อง Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) บนพื้นที่ท้องฟ้า  $1 \text{ deg}^2$  พบ LAEs จำนวน 350 กาแล็กซี่ผ่านการสังเกตการณ์แบบโฟโตเมทรี ซึ่งในกลุ่มข้อมูลชุดนี้ประกอบไปด้วย LAEs จำนวน 41 กาแล็กซี่ที่มีการยืนยันจากสเปกตรัมซึ่งได้จากสเปกโทรสโคป และพบว่าค่ากำลังส่องสว่างมีค่า  $\text{Ly}\alpha \geq 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$  ซึ่งสรุปได้ว่า LAEs นั้นมีอยู่มากในยุคแรกเริ่มของเอกภพและสามารถใช้เป็นสิ่งชี้วัดกลุ่มประชากรที่มี low-extinction (เมื่อเปรียบเทียบกับ LBGs) แม้จะมีการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของ LAEs อย่างมากแล้วก็ตาม แต่คุณสมบัติของความสัมพันธ์กลุ่มของ LAEs เองนั้นยังไม่ชัดเจน จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ข้อมูลจากการสังเกตการณ์ที่มีบริเวณการสำรวจขนาดใหญ่ กลุ่มวิจัยของ Hayashino *et al.* (2004), Gawiser *et al.* (2007) และ Ouchi *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาคูสมบัตินี้ของ LAEs ที่เรดชิฟท์ 3 นี้ และต่างได้นำเสนอผลการหาฟังก์ชันสหสัมพันธ์ของกาแล็กซี่ (LAE angular correlation function) โดย Gawiser *et al.* (2007) พบค่า  $r_0 = 2.52^{+0.6}_{-0.5} h^{-1} \text{ Mpc}$  และ Ouchi *et al.* (2010) พบ  $r_0 = 1.70^{+0.33}_{-0.26} h^{-1} \text{ Mpc}$  (แต่ Hayashino *et al.* 2004 ไม่ได้นำเสนอปริมาณเชิงตัวเลขไว้) กลุ่มวิจัยของ Gawiser *et al.* (2007) และ Ouchi *et al.* (2010) ได้ใช้ค่า equivalent width (EW) ที่ต่างกัน ( $\text{EW} > 20 \text{ \AA}$  และ  $\text{EW} > 65 \text{ \AA}$  ตามลำดับ) ซึ่งค่า EW ที่น้อยกว่าจะทำให้ได้ค่า clustering length ( $r_0$ ) มากกว่า ในขณะที่กลุ่มวิจัยอื่นก็ได้ทำการศึกษา LAEs ที่เรดชิฟท์สูงๆ เช่น Kovac *et al.* (2007) และ Ouchi *et al.* (2010) ทำการศึกษาที่เรดชิฟท์ 4 และ Ouchi *et al.* (2003); Shimasaku *et al.* (2004); Shioya *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษา LAEs ที่เรดชิฟท์ 5 และ Ouchi *et al.* (2010) ศึกษาที่เรดชิฟท์ 6-7 ในเบื้องต้นได้มีการสรุปว่าค่าความสัมพันธ์ของ LAEs จะมีค่า  $r_0$  เพิ่มขึ้นตามค่าเรดชิฟท์ที่เพิ่มขึ้น และนอกจากนั้น Gawiser *et al.* (2007) ได้ใช้ชุดข้อมูลจาก Gronwall *et al.* (2007) พบว่าค่าเฉลี่ยของ halo mass คือ  $M_h^{\text{med}} \approx 10^{11} M_\odot$  ในขณะที่ Kovac *et al.* (2007) ทำการศึกษา LAE ที่เรดชิฟท์ 4.5 พบค่า

$M_{\text{halo}}^{\text{med}} \approx 1.5 - 3 \times 10^{11} M_{\odot}$  ซึ่ง Ouchi *et al.* (2010) ได้สอดคล้องกับการรายงานผลของ Dark matter halos ของ LAEs ที่เรดชิฟท์ 3-7 ว่าจะมีค่าประมาณ  $10^{11 \pm 1} M_{\odot}$  อย่างไรก็ตามการศึกษาเหล่านี้เกิดขึ้นจากการสังเกตการณ์เดี่ยวเท่านั้น ซึ่งข้อมูลเพียงบางส่วนของพื้นที่ท้องฟ้านี้ ยังไม่เพียงพอต่อการสรุปความสัมพันธ์ของ LAEs ทั้งหมดได้

ผู้วิจัยและคณะ (PI: Tom Shanks, Durham University, UK) (Bielby *et al.* 2011, 2013) มีโครงการสังเกตการณ์ The VLT LBG Redshift Survey (VLRS) เพื่อศึกษาคุณสมบัติของกาแล็กซีและสสารระหว่างกาแล็กซีที่เรดชิฟท์ 3 โดยคัดเลือก 9 บริเวณสังเกตการณ์รอบๆ เควซาร์ที่มีความสว่างมากๆ ปัจจุบันฐานข้อมูลที่สมบูรณ์ประกอบไปด้วย Lyman Break Galaxy (LBG) ประมาณ 3,000 กาแล็กซีซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สและกาแล็กซีที่เรดชิฟท์ 3 (Crighton *et al.* 2011; Tummuangpak *et al.* 2014) นอกจากนี้ทางคณะยังต้องการสำรวจและศึกษาคุณสมบัติของ LAEs ในบริเวณของ VLRS โดยใช้กล้องโทรทรรศน์ Subaru Suprime-Cam ผ่านฟิลเตอร์แบบแคบเพื่อเปรียบเทียบกับผลการสำรวจจากกลุ่มวิจัยต่างๆ โดย Bielby *et al.* 2016 ได้นำเสนอข้อมูล LAEs จากข้อมูลสมบูรณ์ของ 5 บริเวณสำรวจที่เป็นอิสระต่อกันบนพื้นที่การสำรวจ ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลจาก 2 บริเวณการสำรวจใหม่ เพื่อเพิ่มจำนวน LAEs อันจะส่งผลให้ค่าทาง สถิติของการคำนวณหาความสัมพันธ์ของกาแล็กซีมีมากขึ้น

## วิธีดำเนินการวิจัย

### การจัดการข้อมูลที่ได้จากการสังเกตการณ์

ใช้ข้อมูลจากกล้องโทรทรรศน์ Subaru/Suprime-Cam ที่ถ่ายภาพด้วยฟิลเตอร์แบบแคบ (Narrow-band) นั่นคือฟิลเตอร์ NB497 (4977 nm, FWHM 77 Å) เพื่อทำการหาคาแล็กซี LAEs ที่เรดชิฟท์ 3 และข้อมูลจากฟิลเตอร์แบบกว้าง (broadband - B,V,R) จากกล้องโทรทรรศน์ the KPNO MOSAIC หรือจากฐานข้อมูลของ CFHT MegaCAM imaging archives และทำการเตรียมข้อมูลให้พร้อมสำหรับการวิเคราะห์ (Data Reduction) ซึ่งต้องจัดการข้อมูลดิบที่ได้จากการสังเกตการณ์ โดยใช้กระบวนการตามโปรแกรมจาก pipeline ของแต่ละเครื่องมือสังเกตการณ์เพื่อให้ได้ภาพที่ระบุค่าพิกัด (ra, dec) และ ค่าความส่องสว่าง (magnitude) ของวัตถุทั้งหมดในภาพ จากนั้นเมื่อได้ภาพที่สมบูรณ์แล้วจึงทำการสร้างแคตตาล็อกของวัตถุต่างๆ ในแต่ละภาพโดยใช้ซอฟต์แวร์ทางดาราศาสตร์ที่เรียกว่า SEXTRACTOR ระบุพิกัดและค่าความส่องสว่างของแต่ละวัตถุโดยการหาค่าความส่องสว่างของวัตถุในแต่ละภาพนั้นต้องมีการเปรียบเทียบกับดาวพื้นฐาน เมื่อได้ภาพและแคตตาล็อกของวัตถุแล้วก็จะนำข้อมูลที่ได้ออกไปทำแผนภูมิเปรียบเทียบสีของวัตถุที่ปรากฏในฟิลเตอร์แบบต่างๆ (colour diagrams) เพื่อคัดเลือกวัตถุที่มีโอกาสเป็น LAEs (รายละเอียดทั้งหมดได้แสดงไว้ใน Bielby *et al.* 2016)

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของพื้นที่บริเวณสังเกตการณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Central QSO	R.A. (J2000)	Dec. (J2000)	QSO redshift
QSO B2359+068	00:01:40.57	+07:09:54.1	3.234
QSO J0124+0044	01:24:03.78	+00:44:32.7	3.807
LBQS 0301-0035	03:03:41.05	-00:23:21.9	3.175
PKS 2126-158	21:29:12.18	-15:38:41.0	3.268
QSO B2231-0015	22:34:08.99	+00:00:01.7	3.027
HE0940-1050	09:42:53.50	-11:04:25.9	3.060
Q0042-2627	00:44:33.95	-26:11:19.9	3.289

### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผู้วิจัยได้ทำการหาฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติของกาแลกซี (LAE auto-correlation function)  $\omega(\theta)$  โดยใช้ตัวประมาณจากLandy-Szalay (Landy&Szalay, 1993) ดังนี้

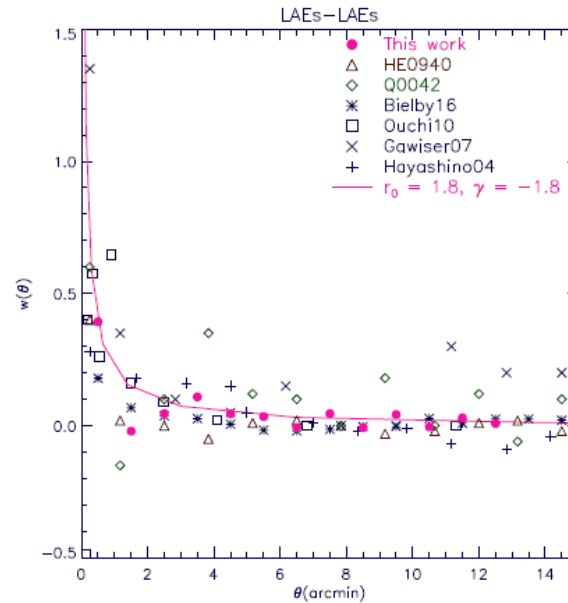
$$\omega(\theta) = \frac{DD(\theta) - 2DR(\theta) + RR(\theta)}{RR(\theta)} \quad (1)$$

เมื่อ  $DD(\theta)$  คือจำนวนคู่ของกาแลกซี  $DR(\theta)$  คือจำนวนคู่ของกาแลกซี-กาแลกซีจากข้อมูลสุ่มในระยะห่าง  $(\theta)$  และ  $RR(\theta)$  คือจำนวนคู่ของกาแลกซีจากข้อมูลสุ่ม โดยได้ทำการจำลองข้อมูลสุ่มให้มีค่าประมาณ 40 เท่าของจำนวนกาแลกซีในแต่ละบริเวณพื้นที่การสำรวจ

จากนั้นได้ใช้Limber's equation (Limber, 1953) อันเป็นการเชื่อมโยงฟังก์ชันสัมพันธ์ระหว่างของกาแลกซี  $\xi(r)$  และฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติของกาแลกซี  $\omega(\theta)$  เราจึงสามารถใช้ power-law เพื่อสร้างเส้นกระชับผลการคำนวณได้ดังความสัมพันธ์

$$\omega(\theta) = \left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)^{1-\gamma} \quad (2)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือความชันของความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ของกาแล็กซี  $\omega(\theta)$  (หรือ  $\xi(r)$ ) และ  $\theta_0$  (หรือ  $r_0$ ) คือ clustering length



ภาพที่ 1 แสดงค่าความสัมพันธ์ของ LAE auto-correlation function  $\omega(\theta)$  กับระยะห่าง  $(\theta)$

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของ LAE ที่เรดชิฟท์ 3 โดยใช้ฐานข้อมูลจากการสำรวจโดยใช้ฟิลเตอร์แบบแคบจาก Bielby *et al.* (2016) โดยในงานนี้ได้มีข้อมูลเพิ่มขึ้นอีก 2 บริเวณการสังเกตการณ์ดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลจากการสังเกตการณ์อื่นๆ เช่น Bielby *et al.* (2016), Ouchi *et al.* (2010), Gawiser *et al.* (2007), Hayashino *et al.* (2004) เป็นต้น อันจะทำให้เกิดความเข้าใจในความสัมพันธ์ของกาแล็กซีที่เรดชิฟท์ 3 มากขึ้น

ภาพที่ 1 แสดงค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติของกาแล็กซี (LAE auto-correlation function) โดยวงกลมที่บดสีชมพูแสดงถึงข้อมูลที่ใช้ในงานนี้ทั้งหมด (7 บริเวณพื้นที่การสังเกตการณ์) สามเหลี่ยมสีน้ำตาลแสดงถึงผลข้อมูลที่คำนวณจากบริเวณสังเกตการณ์ของ HE0940-1050, สี่เหลี่ยมขาวหลามตัดสีเขียวแสดงถึงการคำนวณจากบริเวณสังเกตการณ์ของ Q0042-2627, ดอกจันทน์แสดงถึงข้อมูลจาก Bielby *et al.* (2016), สี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงถึงข้อมูลของ Ouchi *et al.* (2010), เครื่องหมายกากบาทแสดงถึงข้อมูลของ Gawiser *et al.* (2007) และเครื่องหมายบวกแสดงถึงข้อมูลของ Hayashino

*et al.*(2004)และได้ทำการพัฒนาการทดลองโดยใช้ power-law ดังแสดงในสมการที่ (2) นั้น ได้ค่า  $\gamma = -1.8$  และ clustering length  $r_0 = 1.8 h^{-1} Mpc$  ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับ Ouchi *et al.* (2010) และ Bielby *et al.* (2016)

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากการสังเกตการณ์ด้วยฟิลเตอร์แบบแคบซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยระบุหากาแล็กซี่ LAE ที่มีค่าเรดชิฟท์มากๆ โดยงานนี้เป็นกรเพิ่มฐานข้อมูลจาก Bielby *et al.* (2016) ที่ประกอบไปด้วยข้อมูลจากการสังเกตการณ์ 5 บริเวณการสังเกตการณ์จากทั้งหมด 9 บริเวณสังเกตการณ์และนอกจากนี้ยังได้ใช้ข้อมูลจากฟิลเตอร์แบบกว้าง (B, V, และ R) จากฐานข้อมูลอื่นๆ ในบริเวณพื้นที่การสำรวจเดียวกัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของ LAE กาแล็กซี่ที่เรดชิฟท์ 3 โดยได้ทำการคำนวณหาฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติของกาแล็กซี่พบว่า ค่าแอมพลิจูดที่ได้ยังมีค่าไม่สูงนักเมื่อเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่าง LAE-LBG ที่พบใน Bielby *et al.*(2016) ซึ่งอาจเป็นการยืนยันข้อสันนิษฐานที่ว่า LAEs นั้นได้อยู่ในช่วงของฮาโลของสสารมืดที่มีมวลต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม ฐานข้อมูลที่ใช้อยู่นั้นยังมีขนาดไม่เพียงพอ เนื่องจากจำนวนกาแล็กซี่ในช่วงระยะห่างระหว่างกาแล็กซี่น้อยๆ นั้น มีจำนวนกาแล็กซี่อยู่น้อยมาก ผู้วิจัยคาดหวังว่าหากมีการสังเกตการณ์เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการช่วยยืนยันและเพิ่มความเข้าใจในคุณสมบัติต่างๆ ของ LAE ได้มากยิ่งขึ้น

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากโครงการสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ (วท.) ประจำปี 2559 ฝ่ายนักเรียนทุนรัฐบาลกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

### เอกสารอ้างอิง

- Bielby, R. M., Shanks, T., Weillbacher, P.M., Infante, L., Crighton, N.H.M., Bornancini, C., (2011). The VLT LBG Redshift Survey - I. Clustering and dynamics of  $\sim 1000$  galaxies at  $z \sim 3$ . *MNRAS*, 414, 2.
- Bielby, R.M., 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.
- Bañados, E., Venemans, B., Walter, F., Kurk, J., Overzier, R. and Ouchi, M. (2013). The Galaxy Environment of a QSO at  $z \sim 5.7$ . *ApJ*, 773, 178.
- Bielby, R.M., Tummuangpak, P., Shanks, T., Francke, H., Crighton, N.H.M., Bañados, E., et al. (2016). The VLT LBG redshift survey - V. Characterizing the  $z = 3.1$  Lyman alpha emitter population. *MNRAS*, 456, 4061-4080.
- Cowie, L. L. and Hu, E. M. (1998). High- $z$  Ly-alpha Emitters. I. A Blank-Field Search for Objects near Redshift  $Z = 3.4$  in and around the Hubble Deep Field and the Hawaii Deep Field SSA 22. *AJ*, 115, 1319.
- Francke, H. (2009). Clustering of Lyman-Alpha Emitters galaxies. *New Astron. Rev.*, 53, 47.

- Fynbo, J.P.U., Ledoux, C., Moller, P., Thomsen, B. and Burud, I. (2003). The Building the Bridge survey for  $z = 3$  Ly $\alpha$  emitting galaxies . I. Method and first results. *A&A*, 407, 147.
- Gawiser, E., Francke, H., Lai, K., Schawinski, K., Gronwall, C., Ciardullo, R.,etal. (2007).Ly $\alpha$ -Emitting Galaxies at  $z = 3.1$ : L\* Progenitors Experiencing Rapid Star Formation. *ApJ*, 671, 278.
- Gronwall, C., Ciardullo, R., Hickey, T., Gawiser, E., Feldmeier, J. J., van Dokkum, P. G., et al.(2007). Ly $\alpha$  Emission-Line Galaxies at  $z = 3.1$  in the Extended Chandra Deep Field-South. *ApJ*, 667, 79.
- Hayashino, T., Matsuda, Y., Tamura, H., Yamauchi, R., Yamada, T., Ajiki, M.,etal.(2004).Large-Scale Structure of Emission-Line Galaxies at  $z=3.1$ . *AJ*, 128, 2073.
- Hildebrandt ,H., Pielorz, J., Erben, T., van Waerbeke, L., Simon, P. and Capak , P. (2009). CARS: the CFHTLS-Archive-Research Survey. II. Weighing dark matter halos of Lyman-break galaxies at  $z = 3-5$ .*A&A*, 498, 725.
- Hu, E. M. and McMahon, R. G. (1996). Detection of Lyman- $\alpha$  emitting galaxies at redshift  $z = 4.55$ .*Nature*, 382, 231.
- Hu, E. M., Cowie, L. L. and McMahon, R. G. (1998). The Density of Ly $\alpha$  Emitters at Very High Redshift. *ApJ*, 502, L99.
- Kovač, K., Somerville, R. S., Rhoads, J. E., Malhotra, S. and Wang, J. (2007).Clustering of Ly $\alpha$  Emitters at  $z \sim 4.5$ .*ApJ*, 668, 15.
- Landy, S. D. andSzalay, A. S. (1993). Bias and variance of angular correlation functions. *ApJ*, 412, 64-71.
- Limber, D. N. (1953). The Analysis of Counts of the Extragalactic Nebulae in Terms of a Fluctuating Density Field.*ApJ*, 117, 134.
- Matsuda, Y., Yamada, T., Hayashino, T., Tamura, H., Yamauchi, R., Murayama, Ta., (2005). Large-Scale Filamentary Structure around the Protocluster at Redshift  $z = 3.1$ . *ApJ*, 634, L125 - L128.
- McLinden, E. M., Rhoads, J. E., Malhotra, S., Finkelstein, S. L., Richardson, M. L. A., Smith, B.,(2014). Galactic winds and stellar populations in Lyman  $\alpha$  emitting galaxies at  $z - 3.1$ .*MNRAS*, 439, 446.
- Nilsson, K. K., Møller, P., Möller, O., Fynbo, J. P. U., Michalowski, M. J., Watson, D., (2007). A multi-wavelength study of  $z = 3.15$  Lyman- $\alpha$  emitters in the GOODS South Field. *A&A*, 471, 71.
- Ouchi, M., Shimasaku, K., Furusawa, H., Miyazaki, M., Doi, M., Hamabe, M., (2003).Subaru Deep Survey. II. Luminosity Functions and Clustering Properties of Ly $\alpha$  Emitters at  $z=4.86$  in the Subaru Deep Field. *ApJ*, 582, 60.
- Ouchi, M., Shimasaku, K., Okamura, S., Furusawa, H., Kashikawa, N., Ota, K., (2004a). Subaru Deep Survey. V. A Census of Lyman Break Galaxies at  $z=4$  and 5 in the Subaru Deep Fields: Photometric Properties. *ApJ*, 611, 660.

- Ouchi, M., Shimasaku, K., Okamura, S., Furusawa, H., Kashikawa, N., Ota, K., (2004b). Subaru Deep Survey VI. A Census of Lyman Break Galaxies at  $z=4$  and 5 in the Subaru Deep Fields: Clustering Properties. *ApJ*, 661, 685.
- Ouchi, M., Shimasaku, K., Akiyama, M., Simpson, C., Saito, T., Ueda, Y., (2008). The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). IV. Evolution of Ly $\alpha$  Emitters from  $z = 3.1$  to 5.7 in the 1 deg<sup>2</sup> Field: Luminosity Functions and AGN. *ApJS*, 176, 301.
- Ouchi, M., Shimasaku, K., Furusawa, H., Saito, T., Yoshida, M., Akiyama, M., (2010). Statistics of 207 Ly $\alpha$  Emitters at a Redshift Near 7: Constraints on Reionization and Galaxy Formation Model. *ApJ*, 723, 869.
- Rauch, M., Haehnelt, M., Bunker, A., Becker, G., Marleau, F., Graham, J., (2008). A Population of Faint Extended Line Emitters and the Host Galaxies of Optically Thick QSO Absorption Systems. *ApJ*, 681, 856.
- Shimasaku, K., Hayashino, T., Matsuda, Y., Ouchi, M., Ohta, K., Okamura, S., (2004). Large Cosmic Variance in the Clustering Properties of Ly $\alpha$  Emitters at  $z = 5$ . *ApJ*, 605, L93.
- Shioya, Y., Taniguchi, Y., Sasaki, S. S., Nagao, T., Murayama, T., Takahashi, M. I., et al. (2009). Photometric Properties of Ly $\alpha$  Emitters at  $z \sim 4.86$  in the COSMOS 2 Square Degree Field. *ApJ*, 696, 546.
- Steidel, C. C., Giavalisco, M., Pettini, M., Dickinson, M. and Adelberger, K. L. (1996). Spectroscopic Confirmation of a Population of Normal Star-forming Galaxies at Redshifts  $Z > 3$ . *ApJ*, 462, L17+.
- Steidel, C. C., Adelberger, K. L., Shapley, A. E., Pettini, M., Dickinson, M. and Giavalisco, M. (2000). Ly $\alpha$  Imaging of a Proto-Cluster Region at  $z \sim 3.09$ . *ApJ*, 532, 170.
- 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.
- Venemans, B. P., Röttgering, H. J. A., Miley, G. K., van Breugel, W. J. M., de Breuck, C., Kurk, J. D., (2007). Protoclusters associated with  $z > 2$  radio galaxies. I. Characteristics of high redshift protoclusters. *A&A*, 461, 823.
- Yoshida, M., Shimasaku, K., Ouchi, M., Sekiguchi, K., Furusawa, H. and Okamura, S. (2008). The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). VII. Clustering Segregation with Ultraviolet and Optical Luminosities of Lyman Break Galaxies at  $z \sim 3$ . *ApJ*, 679, 269.
- van der Burg, R. F. J., Hildebrandt, H. and Erben, T. (2010). The UV galaxy luminosity function at  $z = 3-5$  from the CFHT Legacy Survey Deep fields. *A&A*, 523, A74.