



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ผลของการขยายตัวด้วยความเร่งในยุคปัจจุบันของเอกภพต่อ  
โครงสร้างขนาดใหญ่ในเอกภพ

โดย ตัมภีร์ คำแหวน

มิถุนายน 2557

สัญญาเลขที่ RSA5480009

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ผลของการขยายตัวด้วยความเร่งในยุคปัจจุบันของเอกภพต่อ  
โครงสร้างขนาดใหญ่ในเอกภพ

คัมภีร์ คำแหวน

วิทยาลัยเพื่อการค้นคว้าระดับรากฐาน มหาวิทยาลัยนเรศวร

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ อภิสัทธ์ อึ้งกิจจานุกิจ ซึ่งเป็นอาจารย์ในกลุ่มวิจัยทฤษฎีของฟิสิกส์พลังงานสูงและจักรวาลวิทยา ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำหลายอย่างในการทำงานวิจัยนี้ ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณเพื่อนทั้งที่เป็นอาจารย์นักวิจัย และเจ้าหน้าที่ที่วิทยาลัยเพื่อการค้นคว้าระดับรากฐานที่ให้คำแนะนำและให้การสนับสนุนในการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณเพื่อนที่ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยนี้ในช่วงครึ่งปีแรกของโครงการซึ่งเป็นช่วงที่ผู้ทำวิจัยยังทำงานอยู่ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทำยที่สุดผู้ทำวิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อสกว. ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำวิจัยนี้

**Project Code :** RSA5480009  
**Project Title :** Influences of the present accelerated expansion of the universe  
on the large-scale structure  
**Investigator :** Khamphee Karwan,  
The Institute for Fundamental Study, Naresuan University  
**E-mail Address :** khampheed@nu.ac.th  
**Project Period :** 3 years

### **Abstract**

In this project, we investigate behaviors of cosmological perturbations in various models for the accelerating universe. We show that the density perturbations in Ricci dark energy model have an instability problem such that the magnitude of perturbations grows rapidly in time and quickly becomes unphysically large. This problem is not easy to be alleviated, especially when the perturbations in baryons are taken into account. We also study the three-form models for the accelerating universe, and find that three-form field has a quantum instability, called ghost, when matter appears in the universe. However, the three-form field can drive the accelerated expansion of the universe during inflation without a ghost. This means that three-form field can play a role of inflaton. Our further investigation shows that the reheating and preheating processes after inflation can occur properly when the three-form field is an inflaton. Finally, we study how the dynamics of dark energy can influence the non-linear matter power spectrum, and find that the peaks of baryon acoustic oscillation (BAO) in the non-linear matter power spectrum can be significantly shifted when the energy fraction of the dark energy during matter dominated era is larger than one percent.

**Keywords:** cosmology, cosmological perturbation theory, Ricci dark energy, three-form dark energy, three-form inflation, baryon acoustic oscillation

รหัสโครงการ      **RSA5480009**  
ชื่อโครงการ      **ผลของการขยายตัวด้วยความเร่งในยุคปัจจุบันของเอกภพที่  
โครงสร้างขนาดใหญ่ในเอกภพ**  
ชื่อนักวิจัย      **คัมภีร์ คำแหวน**  
   **วิทยาลัยเพื่อการค้นคว้าระดับรากฐาน มหาวิทยาลัยนเรศวร**  
**E-mail Address :      khampheek@nu.ac.th**  
ระยะเวลาโครงการ      **3 ปี**

### **บทคัดย่อ**

ในโครงการนี้ผู้ทำวิจัยตรวจสอบพฤติกรรมของการรบกวนเชิงจักรวาลวิทยาในแบบจำลองของเอกภพที่ขยายตัวด้วยความเร่งแบบต่างๆ ผู้ทำวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าการรบกวนในความหนาแน่นของแบบจำลองพลังงานมืดแบบปริซึ่มมีปัญหาความไม่เสถียร กล่าวคือขนาดของการรบกวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามเวลาและจะมีค่ามากผิดปกติอย่างรวดเร็ว ปัญหาความไม่เสถียรนี้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ง่ายโดยเฉพาะเมื่อมีการเพิ่มการรบกวนในเบริออนเข้าไปในการพิจารณาด้วย ผู้ทำวิจัยศึกษาแบบจำลอง สาม-ฟอร์ม ของการขยายตัวด้วยความเร่งของเอกภพและพบว่าสนาม สาม-ฟอร์ม มีความไม่เสถียรแบบควอนตัมซึ่งเรียกว่า โกสต์ โดยความไม่เสถียรนี้เกิดเมื่อมีสสารในเอกภพนอกเหนือจากสนาม สาม-ฟอร์ม อย่างไรก็ตามสนาม สาม-ฟอร์ม สามารถขับเคลื่อนการขยายตัวด้วยความเร่งของเอกภพในยุคอินเฟลชันได้โดยไม่มีโกสต์ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าสนาม สาม-ฟอร์ม สามารถแสดงบทบาทของอินเฟลตอนได้ การศึกษาเพิ่มเติมของผู้ทำวิจัยแสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำให้ร้อนทั้งสองกระบวนการหลังการเกิดอินเฟลชันสามารถเกิดได้อย่างปกติในกรณีที่สนาม สาม-ฟอร์ม เป็นอินเฟลตอน ท้ายสุดผู้ทำวิจัยศึกษาผลของพลวัตของพลังงานมืดต่อสเปกตรัมกำลังแบบไม่เชิงเส้นของสสารและพบว่ายอดของการแกว่งแบบออสติคของเบริออนในสเปกตรัมของสสารสามารถเลื่อนได้อย่างมีนัยสำคัญถ้าพลังงานมืดมีปริมาณมากกว่าหนึ่งเปอร์เซ็นต์ของพลังงานทั้งหมดของเอกภพในยุคสสารเด่น

**คำหลัก** จักรวาลวิทยา ทฤษฎีการรบกวนในจักรวาลวิทยา พลังงานมืดแบบปริซึ่ม แบบจำลองสาม-ฟอร์ม ของพลังงานมืด แบบจำลอง สาม-ฟอร์ม ของอินเฟลชัน การแกว่งแบบออสติคของเบริออน

# 1 บทนำ

การสังเกตการณ์ทางฟิสิกส์ดาราศาสตร์ที่มีเพิ่มขึ้นทั้งในด้านปริมาณและความแม่นยำล้วนแสดงให้เห็นไปในทิศทางเดียวกันว่าเอกภพกำลังขยายตัวด้วยความเร่งในยุคปัจจุบัน [1, 2, 3] แนวคิดที่ใช้อธิบายการขยายตัวด้วยความเร่งนี้สามารถแบ่งได้เป็นสองแนวคิดใหญ่โดย แนวคิดแรกอธิบายการขยายตัวด้วยความเร่งของเอกภพว่าเป็นเพราะพลังงานที่มีบทบาทเด่นต่อพลวัตของเอกภพในยุคปัจจุบันมีสมบัติพิเศษกล่าวคือ มีความดันเป็นลบอย่างเพียงพอและกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอในเอกภพโดยพลังงานนี้มีชื่อเรียกว่าพลังงานมืด (dark energy) [4] ส่วนอีกแนวคิดหนึ่งอธิบายว่าเอกภพขยายตัวด้วยความเร่งเพราะความโน้มถ่วงที่ระดับสเกลใหญ่มีฟิสิกส์เบี่ยงเบนไปจากทฤษฎีความโน้มถ่วงของ Einstein แบบจำลองที่อธิบายการขยายตัวด้วยความเร่งของเอกภพในลักษณะนี้เรียกว่าทฤษฎีปรับปรุงของความโน้มถ่วง (modified theory of gravity) [5]

ถึงแม้ว่าแนวคิดเกี่ยวกับพลังงานมืดและการปรับปรุงทฤษฎีความโน้มถ่วงจะถูกเสนอขึ้นมาเพื่ออธิบายการขยายตัวด้วยความเร่งของเอกภพ แต่การมีอยู่ของพลังงานมืดและการปรับปรุงทฤษฎีความโน้มถ่วงไม่เพียงทำให้เอกภพขยายตัวด้วยความเร่งเท่านั้น ตัวอย่างเช่น การรบกวน (perturbation) ในความหนาแน่นพลังงานของพลังงานมืดที่ต่างกันสามารถทำให้การกระจายตัวของสสารในเอกภพมีลักษณะต่างกันได้ [4] ซึ่งสิ่งนี้สามารถนำไปใช้ตรวจสอบความสมบูรณ์ของแบบจำลองพลังงานมืดได้ว่า นอกจากจะสามารถทำให้เอกภพขยายตัวด้วยความเร่งแล้ว ยังสามารถทำให้เกิดโครงสร้างต่างๆ เช่น ดาว ดาราจักร ฯลฯ หรือทำให้เกิดการกระจายตัวของสสารในเอกภพในลักษณะที่สอดคล้องกับที่สังเกตวัดได้หรือไม่ ด้วยเหตุนี้ในโครงการนี้ผู้ทำวิทยศึกษาระดับปริญญาโทของการรบกวนในแบบจำลองของพลังงานมืดแบบต่างๆ ทั้งในระดับเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น

โดยอาศัย holographic principle ได้มีผู้เสนอแบบจำลองพลังงานมืดแบบ holographic ขึ้น [6] ถึงแม้ว่าแบบจำลองพลังงานมืดนี้จะถูกสร้างจาก แนวความคิดตั้งต้นที่น่าสนใจ แต่แบบจำลองนี้มีปัญหาที่สำคัญคือ การรบกวนในแบบจำลองนี้มีความไม่เสถียร [7, 8] กล่าวคือขนาดของการรบกวนในความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาและจะมีค่ามากผิดปกติในช่วงเวลาอันสั้น

ในช่วงปีแรกของโครงการผู้ทำวิทยศึกษารบกวนในพลังงานมืดแบบ Ricci [9] ซึ่งเป็นแบบจำลองพลังงานมืดที่มีพื้นฐานมาจาก holographic principle เช่นเดียวกับแบบจำลองพลังงานมืดแบบ holographic แต่ได้มีผู้แสดงให้เห็นว่าในพลังงานมืดแบบ Ricci นี้การรบกวนเกิดความไม่เสถียรในขนาดของเอกภพ [10] นั่นคือในเอกภพที่สังเกตวัดได้ในปัจจุบันไม่มีความไม่เสถียรเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนั้นรูปแบบของการรบกวนถูกจำกัดอยู่ในแบบ adiabatic เท่านั้น ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ผู้ทำวิจัยจึงปรับปรุงการศึกษาให้มีความทั่วไปขึ้นโดยพิจารณาผลของการรบกวนแบบ entropy ด้วย

ก่อนที่จะมีการค้นพบอนุภาค Higgs ในปี 2012 (ดูตัวอย่าง [11]) ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าสนามสเกลาร์มูลฐาน (fundamental scalar field) มีอยู่ในธรรมชาติหรือไม่ ดังนั้นจึงมีผู้เสนอแบบจำลองของพลังงานมืดและแบบจำลองของ inflation ที่อยู่ในรูปของสนามแบบอื่นนอกเหนือจากสนามสเกลาร์ สนามที่ผู้ทำวิทยศึกษาในโครงการคือสนาม three-form [12] โดยในการศึกษาพบว่าสนาม three-form มีความไม่เสถียรแบบควอนตัมถ้ามีสสารอื่นอยู่ในเอกภพด้วย แต่ผู้ทำวิจัยไม่ได้เขียนผลนี้ออกมาเป็นรายงานการวิจัยเพื่อตีพิมพ์เพราะผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า three-form อาจสามารถเป็นสนามที่ขับเคลื่อน inflation ซึ่งเรียกว่า inflaton ได้โดยปลอดจากความไม่เสถียร ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจมากกว่าที่จะตรวจสอบความไม่เสถียรในกรณีนี้และหาเงื่อนไขที่ทำให้สนาม three-form ปลอดจากความไม่เสถียร

จากการตรวจสอบความไม่เสถียรของ three-form ที่เป็น inflaton ผู้ทำวิจัยพบว่า three-form สามารถขับเคลื่อน inflation ได้อย่างดีโดยปลอดจากความไม่เสถียร อย่างไรก็ตามบทบาทสำคัญอีกอย่างของ inflaton นอกเหนือจากการขับเคลื่อน inflation ก็คือการสร้างอนุภาคมูลฐานในเอกภพผ่านกระบวนการ reheating และ preheating [13] เพื่อตรวจสอบว่าสนาม three-form สามารถทำหน้าที่เป็น inflaton ได้อย่างดีหรือไม่ผู้ทำวิจัย

ได้ศึกษากระบวนการ reheating และ preheating สำหรับ three-form inflation ด้วย

ข้อมูลในปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้ของการสำรวจวัดดาราจักรจะให้รายละเอียดที่แม่นยำขึ้นเกี่ยวกับการกระจายตัวของสสารในเอกภพ [14] โดยการกระจายตัวนี้สามารถแสดงในรูปของ matter power spectrum และความแม่นยำของข้อมูลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เราได้ matter power spectrum ที่มีความละเอียดแม่นยำเพียงพอที่จะทำให้เราสามารถศึกษาธรรมชาติของการรบกวนระดับไม่เชิงเส้น เช่น non-linear BAO [15] ได้ ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ผู้ทำวิจัยจะศึกษาผลของพลวัตของพลังงานมืดต่อ non-linear matter power spectrum

เนื่องจากในรายงานนี้ผู้ทำวิจัยได้แนบรายงานการวิจัยที่ได้ตีพิมพ์มาด้วย ดังนั้นในรายงานจะเขียนเฉพาะข้อสรุปที่สำคัญเท่านั้น ส่วนรายละเอียดขอให้ผู้สนใจ อ่านได้จากเอกสารแนบ

## 2 วิธีดำเนินการ

### 2.1 วิธีดำเนินการสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของการรบกวนในพลังงานมืด Ricci

2.1.1. ทาสมการการวิวัฒนาการของการรบกวนในพลังงานมืด Ricci โดยสร้างสมการที่เหมาะสมในการบรรยายการรบกวนแบบ entropy ในพลังงานมืดนี้

2.1.2. ศึกษาการวิวัฒนาการของการรบกวนแบบต่างๆจากสมการที่หาได้ในข้อที่แล้วโดยเน้นศึกษาการรบกวน entropy

2.1.3. ผู้ทำวิจัยได้พบความไม่เสถียรของการรบกวนในพลังงานมืดแบบนี้จึงได้พยายามหากรณีที่ความไม่เสถียรนี้ไม่เกิดขึ้น

2.1.4. สรุปผลเขียนรายงานการวิจัยแล้วส่งไปตีพิมพ์

### 2.2 วิธีดำเนินการสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของการรบกวนในพลังงานมืดแบบ three-form

2.2.1. หา second order perturbed action ของสนาม three-form ในเอกภพที่มีสสารอยู่ด้วยแล้วจัดให้อยู่ในรูปมาตรฐานเพื่อตรวจสอบความไม่เสถียรแบบต่างๆในสนาม three-form

2.2.2. ตรวจสอบความไม่เสถียรของสนาม three-form โดยพิจารณาเครื่องหมายบวกลบหน้าพจน์ที่สำคัญใน action จากข้อที่แล้ว

2.2.3. ผู้ทำวิจัยพบว่าถ้ามีสสารพลังงานรูปแบบอื่นนอกจากสนาม three-form อยู่ในเอกภพสนาม three-form จะมีความไม่เสถียรแบบควอนตัม

2.2.4. เพื่อความน่าสนใจผู้ทำวิจัยจึงศึกษาเฉพาะกรณีที่มีแต่ three-form ในเอกภพแล้วหาเงื่อนไขของศักย์ของสนาม three-form ที่ทำให้สนาม three-form ปลอดภัยจากความไม่เสถียร โดยกรณีนี้ที่ศึกษานี้คือกรณีที่สนาม three-form ทำหน้าที่เป็นอินเฟลตอน

2.2.5. สรุปผลเขียนรายงานการวิจัยแล้วส่งไปตีพิมพ์

### 2.3 วิธีดำเนินการสำหรับการศึกษาการสร้างอนุภาคตั้งต้นใน three-form inflation

2.3.1. พิจารณาหารูปแบบของอันตรกิริยาระหว่าง three-form และสนามสเกลาร์ที่เหมาะสม โดยอันตรกิริยานี้จะเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจาก three-form ไปยังสนามสเกลาร์ และพลังงานที่อยู่ในรูปของสนามสเกลาร์นี้จะเปลี่ยนไปเป็นอนุภาคตั้งต้นต่อไป

- 2.3.2. เขียน action ของ three-form ที่มีอันตรกิริยากับสนามสเกลาร์ ทาสมการการเคลื่อนที่ของ three-form และสนามสเกลาร์ แล้วแก้สมการนี้
- 2.3.3. ใช้สมการการเคลื่อนที่และคำตอบของสมการในหัวข้อที่แล้ว คำนวณหาอุณหภูมิของเอกภพหลังยุค inflation แล้วตรวจสอบว่าค่าของอุณหภูมินี้สอดคล้องกับค่าที่ควรเป็นหรือไม่
- 2.3.4. สรุปผลเขียนรายงานการวิจัยแล้วส่งไปตีพิมพ์
- 2.4. วิธีดำเนินการสำหรับการศึกษาค่าของพลวัตของพลังงานมืดต่อ non-linear matter power spectrum
- 2.4.1. ใส่ผลของการวิวัฒนาการของพลังงานมืดทั้งในระดับพื้นหลังและการรบกวนในสมการการวิวัฒนาการของการรบกวนในสสารโดยการปรับปรุงสมการอย่างเหมาะสม
- 2.4.2. คำนวณ non-linear matter power spectrum โดยการแก้สมการการวิวัฒนาการของการรบกวนในสสารโดยใช้วิธี TRG
- 2.4.3. นำ matter power spectrum ที่ได้จากหัวข้อที่แล้วมาหารด้วย smooth matter power spectrum เพื่อให้เห็น BAO peaks แล้วศึกษาว่าปริมาณและการวิวัฒนาการของพลังงานมืดมีผลต่อ BAO peaks อย่างไร
- 2.4.4. สรุปผลเขียนรายงานการวิจัยแล้วส่งไปตีพิมพ์

### 3 ผลที่ได้

#### 3.1 ผลที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมของการรบกวนในพลังงานมืด Ricci

โดยใช้ holographic principle ความหนาแน่นพลังงานของพลังงานมืด Ricci สามารถเขียนได้ในรูป

$$\rho_d = \frac{\alpha}{2} R, \quad (1)$$

โดย  $\alpha$  คือค่าคงที่และ  $R$  คือ Ricci scalar ผลสำคัญหนึ่งที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ สมการการวิวัฒนาการของการรบกวนในพลังงานมืดและสสารที่เหมาะสมกับการศึกษาการรบกวนแบบ entropy ระหว่าง พลังงานมืดและสสาร ซึ่งในที่นี้ สสารหมายถึงสสารมืดรวมกับ baryon โดยสมการดังกล่าวมีรูปคือ

$$\Delta' = \mathcal{H}r\Delta - kU, \quad (2)$$

$$U' = \mathcal{H}(3w_d - 1)U + \mathcal{H}w_d \left( \frac{2}{\alpha} - 4 \right) v_m - \frac{k}{3} \left( \frac{2}{\alpha} - 1 \right) \Delta + w_d \frac{k}{3} \left( \frac{2}{\alpha} - 4 \right) \delta_m + (1 + w_d) \frac{\rho_b}{\rho_m} T_c, \quad (3)$$

โดย  $w_d$ ,  $\rho_m = \rho_c + \rho_b$  คือ parameter ของสมการสถานะของพลังงานมืด ความหนาแน่นพลังงานของสสาร ความหนาแน่นพลังงานของสสารมืด และ ความหนาแน่นพลังงานของ baryon ตามลำดับ ในที่นี้ตัวห้อย  $d, c$  และ  $b$  หมายถึงพลังงานมืด สสารมืด และ baryon ตามลำดับ  $T_c$  คือพจน์ที่บรรยายอันตรกิริยาระหว่าง baryon และ photon นอกจากนี้  $\Delta$  และ  $U$  มีนิยามคือ

$$\Delta = (1 + w_d)\delta_m - \delta_d, \quad U = (1 + w_d)v_m - u_d. \quad (4)$$

โดย  $\delta \equiv \delta\rho/\rho$  คือความหนาแน่นเปรียบเทียบต่าง (density contrast)  $\delta\rho$  คือการรบกวนในความหนาแน่นพลังงาน และ  $u$  คือความหนาแน่นโมเมนตัม เห็นได้ว่า  $\Delta = U = 0$  ในกรณีของการรบกวนแบบ adiabatic ที่ระดับสเกลเล็ก  $k \ll \mathcal{H}$ , สมการของ  $\Delta'$  และ  $U'$  จะสามารถรวมกันได้เป็น

$$\begin{aligned} \Delta'' + \mathcal{H}(1 - 3w_d - r)\Delta' - \frac{k^2}{3}\left(\frac{2}{\alpha} - 1\right)\Delta \\ \simeq -\mathcal{H}w_d\left(\frac{2}{\alpha} - 4\right)kv_m - w_d\frac{k^2}{3}\left(\frac{2}{\alpha} - 4\right)\delta_m - (1 + w_d)\frac{\rho_b}{\rho_m}kTc. \end{aligned} \quad (5)$$

จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยพบว่า  $\Delta$  จะโตอย่างรวดเร็วและมีค่าเข้าสู่อินฟินิตี้ เนื่องจากพจน์ทางด้านขวามือของสมการข้างบน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพจน์เหล่านี้ทำให้เกิดความไม่เสถียรในการรบกวนแบบ entropy ในพลังงานมืดแบบนี้ ถ้าเราสมมุติว่า baryon ไม่มีผลต่อการรบกวนในพลังงานมืด Ricci เราจะสามารถละพจน์สุดท้ายทางด้านขวามือของสมการข้างบน ซึ่งขึ้นกับ  $\rho_b$  ได้ และ ถ้า  $\alpha = 1/2$  พจน์ทางด้านขวามือทั้งหมดของสมการข้างบนจะเป็นศูนย์ นั่นคือการรบกวนปลอดจากความไม่เสถียรในกรณีนี้ อย่างไรก็ตามในกรณีทั่วไปเราไม่สามารถตัดผลของ baryon ต่อ การรบกวนในแบบจำลองพลังงานมืด Ricci ได้ ทำให้เราไม่สามารถกำจัดความไม่เสถียรของการรบกวนโดยการให้  $\alpha = 1/2$  ในกรณีทั่วไปความไม่เสถียรในพลังงานมืดนี้ไม่สามารถกำจัดได้โดยง่าย

### 3.2 ผลที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมของการรบกวนในพลังงานมืดแบบ three-form

สนาม three-form คือสนามเทนเซอร์ (tensor)  $A_{\mu\nu\sigma}$  ซึ่ง anti-symmetric ภายใต้การสลับทุกคู่ดัชนี  $\mu\nu, \nu\sigma$  และ  $\mu\sigma$  action ของสนาม three-form ในเอกภพสามารถเขียนได้ดังนี้

$$S = \int d^4x\sqrt{-g} \left[ M_{\text{Pl}}^2 R - \frac{1}{48} F_{\alpha\beta\gamma\delta} F^{\alpha\beta\gamma\delta} - V(A_{\alpha\beta\gamma} A^{\alpha\beta\gamma}) \right] + S_m, \quad (6)$$

โดย  $A_{\alpha\beta\gamma}$  คือสนาม three-form  $V(A_{\alpha\beta\gamma} A^{\alpha\beta\gamma})$  คือศักย์ของสนาม three-form  $S_m$  คือ action ของของไหลสมบูรณ์ (perfect fluid) ซึ่งอาจเป็นการแผ่รังสี (radiation) หรือ สสาร (matter) ก็ได้ และ  $F = dA$  คือ Maxwell tensor ซึ่งมี component คือ

$$F_{\mu\nu\rho\sigma} = \nabla_\mu A_{\nu\rho\sigma} - \nabla_\sigma A_{\mu\nu\rho} + \nabla_\rho A_{\sigma\mu\nu} - \nabla_\nu A_{\rho\sigma\mu}. \quad (7)$$

ในที่นี้เราเขียน line element ของกาลอวกาศ (spacetime) ที่มีการรบกวนดังนี้

$$ds^2 = -(1 + 2\alpha)dt^2 + 2\partial_i\psi dt dx^i + a^2(1 + 2\Phi)d\mathbf{x}^2, \quad (8)$$

และเขียน component ต่างๆของสนาม three-form ที่มีการรบกวนดังนี้

$$A_{0ij} = a\epsilon_{ijk}\partial_k\beta(t, \mathbf{x}), \quad A_{ijk} = a^3\epsilon_{ijk}[X(t) + \beta_0(t, \mathbf{x})]. \quad (9)$$

สำหรับของไหลสมบูรณ์เราเขียน action ในรูป

$$S_m = \int d^4x\sqrt{-g}[p_A(X_A) + p_B(X_B)], \quad (10)$$

โดย  $p_A(X_A)$  และ  $p_B(X_B)$  คือ Lagrangians density ของของไหลชนิด  $A$  และ  $B$  ตามลำดับ โดย Lagrangians นี้ก็คือความดันของของไหลนั่นเอง ซึ่งในกรณีนี้เราจะให้ความดันเป็นฟังก์ชันใดๆของพจน์จลน์  $X = -\nabla_\mu\varphi\nabla^\mu\varphi/2$  โดย  $\varphi$  เป็นสนามสเกลาร์ที่ใช้บรรยายของไหลสมบูรณ์ ในกาลอวกาศที่มีการรบกวน

ของไหลสมบูร์นที่อยู่ในการอวกาศก็จะมีการรบกวนด้วย ซึ่งเราบรรยายการรบกวนในของไหล  $A$  และ  $B$  ด้วยการรบกวนในสนาม  $\varphi_A$  และ  $\varphi_B$  ดังนี้  $\varphi_A = \varphi_A(t) + v_A(t, \mathbf{x})$  และ  $\varphi_B = \varphi_B(t) + v_B(t, \mathbf{x})$  โดย  $v_A$  และ  $v_B$  คือการรบกวนในสนาม  $A$  และ  $B$  ตามลำดับ

เมื่อแทนสมการ (8) (9) และ (10) ลงในสมการ (6) แล้วจะพจน์ที่ขึ้นกับการรบกวนที่มี order มากกว่าสอง หลังจากนั้นทำการ integrate by part เราจะได้ second order perturbed action ของการรบกวนที่เขียนได้ดังสมการ

$$\tilde{S}^{(2)} = \int dt d^3k \left[ A_{ij} \dot{Q}_i \dot{Q}_j - B_{ij} \dot{Q}_i Q_j - C_{ij} Q_i Q_j \right], \quad (11)$$

โดยเครื่องหมายจุดบนตัวอักษรแสดงอนุพันธ์เทียบกับเวลา  $Q_i = (\tilde{\phi}, \tilde{v}_A, \tilde{v}_B)$

กล่าวอย่างง่าย ๆ ได้ว่าความไม่เสถียรแบบควอนตัมจะไม่เกิดขึ้นถ้าสัมประสิทธิ์ หน้าพจน์จลน์  $\propto \dot{Q}\dot{Q}$  เป็นบวก ซึ่งในกรณีที่พิจารณา  $Q$  เป็นเวกเตอร์ดังนั้นเงื่อนไขของการไม่มีความไม่เสถียรคือ

$$\det(A) = \frac{3M_{\text{Pl}}^4 a^9 Y^2 W}{2\dot{\varphi}_A^2 \dot{\varphi}_B^2 \Delta} \frac{(1+w_A)\rho_A}{w_A} \frac{(1+w_B)\rho_B}{w_B} > 0, \quad (12)$$

โดยที่  $x^2 = A_{\mu\nu\gamma} A^{\mu\nu\gamma} Y \equiv \dot{X} + 3HX$ ,  $H$  คือ Hubble parameter  $W \equiv (dV(x)/dx)$  และ

$$\Delta = M_{\text{Pl}}^4 H^2 k^2 / a^2 - 3WX^2 [(1+w_A)\rho_A/w_A + (1+w_B)\rho_B/w_B] + 2M_{\text{Pl}}^2 W (2\rho + 2V + \dot{X}^2).$$

โดยสรุป  $\det A > 0$  เมื่อ  $\Delta > 0$  ในกรณีที่  $k$  มีค่ามากเงื่อนไข  $\Delta > 0$  ให้  $W > 0$  แต่ในกรณีที่  $k$  มีค่าเล็ก และ  $\rho_B = 0$   $w_A \simeq 10^{-4} \sim 0$  (พิจารณาในยุคสสารเด่นของเอกภพ) เราได้  $\Delta = -3WX^2 \rho_A/w_A < 0$  นั่นคือในกรณีนี้มีความไม่เสถียรแบบควอนตัมเกิดขึ้น

จากข้อสรุปข้างต้นสนาม three-form จะมีความไม่เสถียรแบบควอนตัมถ้ามีสสารอยู่ในเอกภพ ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงพิจารณากรณีที่ไม่มีแต่สนาม three-form ในเอกภพ ซึ่งกรณีนี้คือกรณีที่สนาม three-form อาจเป็น inflaton ที่ขับเคลื่อน inflation โดยใช้การศึกษาในลักษณะเดียวกันกับการศึกษากรณีที่ไม่มีสสารในเอกภพเราได้ว่า ในกรณีที่สนาม three-form เป็น inflaton ความไม่เสถียรแบบควอนตัมจะไม่เกิดขึ้นถ้าศักย์ของ three-form มีค่าต่ำสุดที่  $x = 0$  โดยไม่มีจุดสูงสุดในช่วง  $x < \pm x_s$  โดย  $x_s$  เป็นจุดเริ่มต้นของ inflation นอกจากนี้ inflation จะเกิดอย่างเพียงพอเมื่อ  $x_s > \sqrt{2/3}$  กล่าวโดยสรุปได้ว่าสนาม three-form สามารถขับเคลื่อนการขยายตัวด้วยความเร่งของเอกภพในยุค inflation ได้โดยปลอดภัยจากความไม่เสถียรถ้าศักย์ของสนาม three-form มีรูปร่างที่เหมาะสม

### 3.3 ผลที่ได้จากการศึกษาการสร้างอนุภาคตั้งต้นใน three-form inflation

ในการศึกษาการเกิด reheating และ preheating ของ inflaton ที่เป็นสนาม three-form ผู้ทำวิจัยเสนอรูปแบบของอันตรกิริยาระหว่างสนาม three-form และสนามสเกลาร์ ซึ่งเป็นสนามตั้งต้นของการสร้างอนุภาคมูลฐานในกระบวนการ reheating และ preheating ดังนี้

$$-\frac{\lambda}{6} E^{\mu\alpha\beta\gamma} A_{\alpha\beta\gamma} \phi \nabla_\mu \phi, \quad (13)$$

โดย  $\lambda$  คือค่าคงที่ของอันตรกิริยา และ  $E_{\alpha\beta\gamma\delta}$  คือ the Levi-Civita antisymmetric tensor บนกาลอวกาศโค้ง เมื่อใส่อันตรกิริยานี้ลงใน action 6 แล้วหาสมการการเคลื่อนที่ของสนาม three-form และสนามสเกลาร์ และใช้การคำนวณตามที่แสดงในบทความวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ที่แนบมากับรายงานนี้เราได้อนุมุมิ reheating คือ

$$T_{\text{rh}} \lesssim \lambda \left( \frac{9g_*}{640\pi^4} \right)^{1/4} M_{\text{Pl}} \left( \frac{m}{M_{\text{Pl}}} \right)^{1/2}, \quad (14)$$

โดย  $m$  คือมวลของสนาม three-form  $g_*$  คือองศาอิสระของอนุภาค relativistic ในช่วงที่เกิด reheating กล่าวโดยสรุปได้ว่าอุณหภูมิ reheating ที่ได้จากการเกิดของ three-form inflation อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

นอกจากการ reheating แล้วในงานวิจัยก็ได้มีการศึกษาการเกิด preheating ด้วย ในการศึกษา preheating ผู้ทำวิจัยได้จัดสมการการเคลื่อนที่ของสนามสเกลาร์ที่เป็นสนามตั้งต้นของการสร้างอนุภาคมูลฐาน ให้อยู่ในรูปของสมการ Mathieu ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการศึกษา parametric resonance หลังจากนั้นก็ได้ใช้วิธี มาตรฐาน ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ต่างๆของสมการ Mathieu ซึ่งได้

$$A_k = \frac{4k^2}{a^2 m^2} + \frac{4m_\phi^2}{m^2}, \quad q = \frac{4\sqrt{8}\lambda M_{\text{Pl}}}{\sqrt{3}m^2(t - t_{\text{os}})}. \quad (15)$$

จากการพิจารณาในรายละเอียดพบว่า three-form inflation สามารถทำให้เกิด preheating ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยรายละเอียด ในส่วนนี้ขอให้ผู้สนใจอ่านเอกสารแนบที่เป็นบทความตีพิมพ์จากโครงการวิจัยในเรื่องนี้

### 3.4 ผลที่ได้จากการศึกษาผลของพลวัตของพลังงานมืดต่อ non-linear matter power spectrum

ในการใส่ผลของการวิวัฒนาการของพลังงานมืดทั้งในระดับพื้นหลังและระดับของการรบกวนลงในสมการการวิวัฒนาการของการรบกวนไม่เชิงเส้นของสสาร ผู้ทำวิจัยใช้การประมาณที่สำคัญคือ ประมาณให้การรบกวนไม่เชิงเส้นของพลังงานมืด มีค่าน้อยมากเทียบกับการรบกวนไม่เชิงเส้นในสสาร นั่นคือสำหรับพลังงานมืดเราพิจารณาการรบกวนแบบเชิงเส้นเท่านั้น โดยสมการการวิวัฒนาการของการรบกวนในสสารที่ใช้คือ

$$\frac{\partial \delta_m}{\partial \tau} + \nabla \cdot [(1 + \delta_m) \mathbf{v}_m] = 0, \quad (16)$$

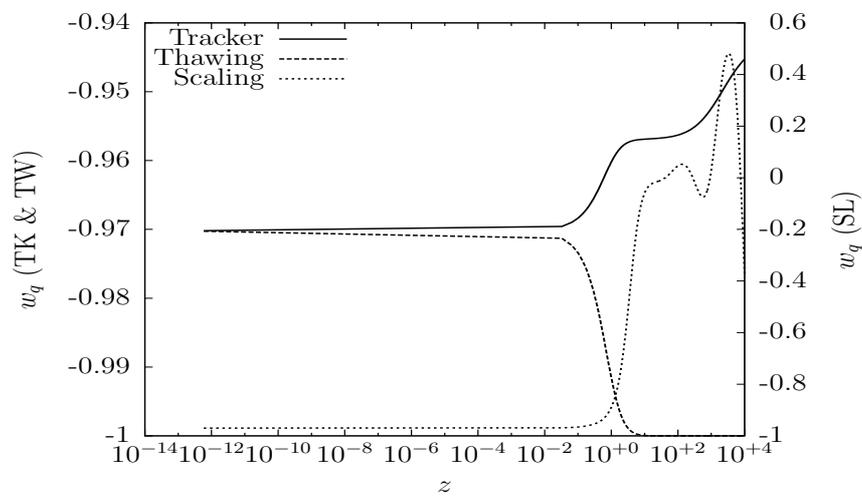
$$\frac{\partial \mathbf{v}_m}{\partial \tau} + \mathcal{H} \mathbf{v}_m + (\mathbf{v}_m \cdot \nabla) \mathbf{v}_m = -\frac{3}{2} \mathcal{H}^2 \Omega_m \left( \delta_m + \frac{\rho_d}{\rho_m} \delta_d \right), \quad (17)$$

โดย  $\tau$  คือ conformal time  $\delta_m$  และ  $\mathbf{v}_m$  คือความหนาแน่นแปรปรวนและการรบกวนในความเร็วของสสารตามลำดับ นอกจากนี้  $\mathcal{H} = a^{-1}(da/d\tau)$  คือ conformal Hubble parameter และ  $\Omega_m = \rho_m a^2 / (3\mathcal{H}^2)$  คือ density parameter ของสสาร ส่วน  $\delta_d$  คือการรบกวนเชิงเส้นของพลังงานมืดและ  $\rho_d$  คือความหนาแน่นพลังงานของพลังงานมืด พลวัตระดับพื้นหลังของพลังงานมืดมีบทบาทต่อสมการข้างบนผ่านทาง  $\mathcal{H}$  และ  $\Omega_m$  ซึ่งขึ้นกับลักษณะของการขยายตัวของเอกภพ

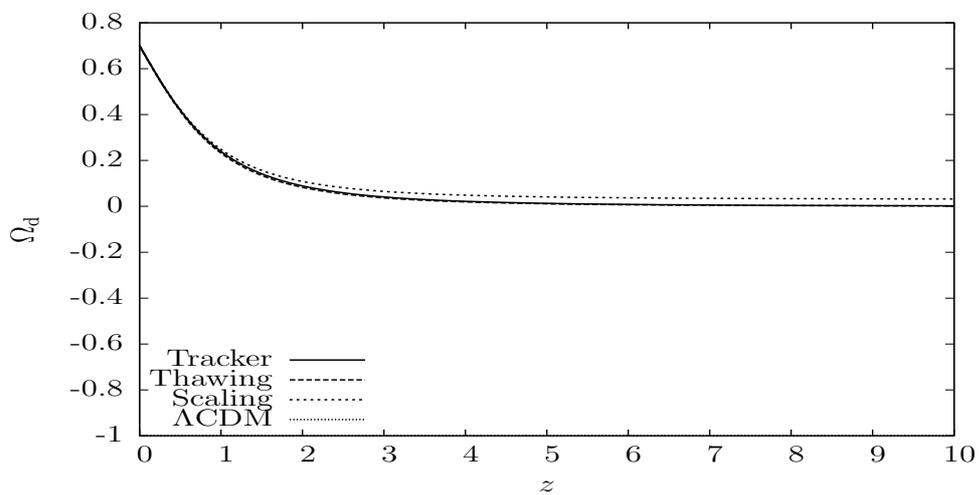
การประมาณที่ให้การรบกวนของพลังงานมืดมีค่าน้อยจนทำให้สามารถละการรบกวนแบบไม่เชิงเส้นในพลังงานมืด จะใช้ได้ดีเมื่ออัตราเร็วเสียงของการรบกวนในพลังงานมืดมีค่าเท่าอัตราเร็วแสง การประมาณแบบนี้จะทำให้การคำนวณ matter power spectrum เชิงตัวเลขทำได้โดยไม่ยุ่งยากนัก

เราใช้วิธี TRG กับสมการการวิวัฒนาการของการรบกวนไม่เชิงเส้นของสสารที่หาได้ คำนวณ non-linear matter power spectrum ในการใช้วิธี TRG จะเน้นหา matter power spectrum เชิงตัวเลขเพราะในการคำนวณหา matter power spectrum เราจะต้องคำนวณหาปริมาณต่างๆของเอกภพที่เกี่ยวข้องกับการวิวัฒนาการของการรบกวนในเอกภพ ซึ่งโดยทั่วไปไม่สามารถคำนวณหาได้โดยวิธีเชิงวิเคราะห์

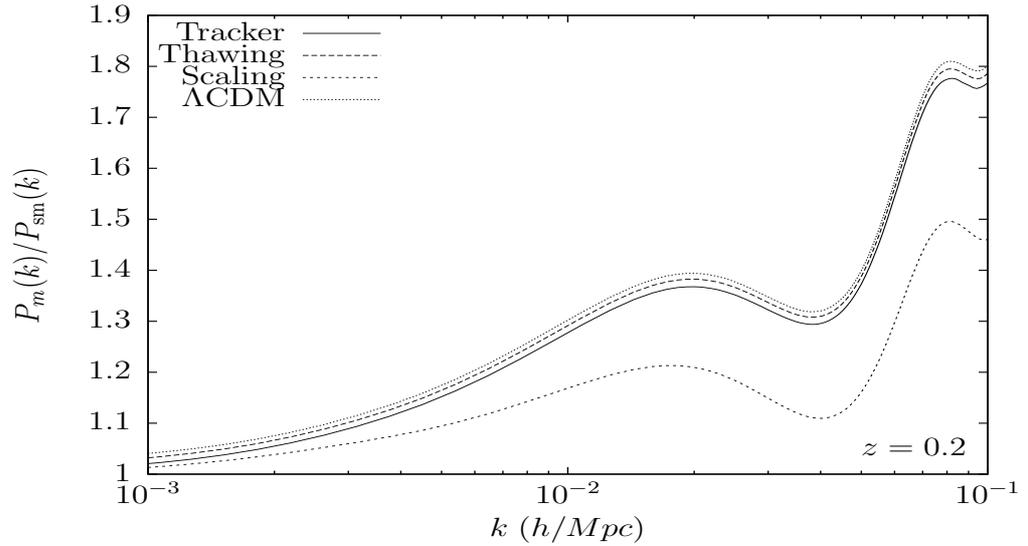
เพื่อให้เห็น BAO peak ชัดเจนเราหาร matter power spectrum ที่คำนวณได้ด้วย smooth matter power spectrum จากเอกสาร ในการศึกษาพลวัตของพลังงานมืดต่อ BAO peak เราใช้แบบจำลองของพลังงานมืดที่มีการวิวัฒนาการสามรูปแบบคือ พลังงานมืดแบบ Thawing (TW), Tracking (TK), และ Scaling (SL) โดยการวิวัฒนาการของ equation of state parameter  $w_q$  ของพลังงานมืดทั้งสามแบบในเอกภพหลังยุคสสารเด่นแสดงในรูป 1 ส่วนการวิวัฒนาการของ density parameter  $\Omega_d$  ของพลังงานมืดซึ่งคืออัตราส่วนของความหนาแน่นพลังงานของพลังงานมืดต่อความหนาแน่นพลังงานรวมแสดงในรูป 1 โดย  $z$  ในรูปคือ redshift



รูปที่ 1:



รูปที่ 2:



รูปที่ 3:

ผลลัพธ์หนึ่งของโครงการวิจัยในส่วนนี้คือ Bao peak สำหรับกรณีที่พลังงานมืดมีการวิวัฒนาการแบบต่างๆ ซึ่งแสดงในรูป 3 จาก BAO peak ที่เราได้เห็นได้ว่ากรณีที่ตำแหน่งของ peak มีการเลื่อนไปมากที่สุดเทียบกับกรณีของแบบจำลอง  $\Lambda$ CDM ซึ่งเป็นแบบจำลองมาตรฐาน คือกรณีที่พลังงานมืดเป็นแบบ scaling ที่เป็นเช่นนี้เพราะ  $\Omega_d$  ของพลังงานมืดนี้มีค่ามากกว่า 0.01 ในยุคสสารเด่นของเอกภพ จากการวิเคราะห์เพิ่มเติมเราพบว่า BAO peak สามารถเลื่อนได้อย่างมีนัยยะสำคัญเทียบกับกรณีของแบบจำลองมาตรฐาน  $\Lambda$ CDM ถ้า  $\Omega_d \gtrsim 0.01$  ในยุคสสารเด่นของเอกภพ

## 4 สรุป

### 4.1 สรุปของการศึกษาพฤติกรรมของการรบกวนในพลังงานมืด Ricci

ในการศึกษาการรบกวนในพลังงานมืดแบบ Ricci พบว่าการรบกวน entropy ในพลังงานมืดนี้ มีความไม่เสถียร ซึ่งความไม่เสถียรนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้ถ้า parameter  $\alpha = 1/2$  และถ้าเราละผลของ baryon ต่อพลังงานมืดนี้ อย่างไรก็ตาม ในแบบจำลองพื้นฐานของพลังงานมืดนี้เราไม่สามารถละผลจาก baryon ได้ ทำให้พลังงานมืดแบบนี้มีปัญหาความไม่เสถียรของการรบกวนซึ่งอาจไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ง่าย ผลจากงานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์แล้วในวารสารวิจัยนานาชาติ

### 4.2 สรุปของการศึกษาพฤติกรรมของการรบกวนในพลังงานมืดแบบ three-form

ในการศึกษาการรบกวนในพลังงานมืดแบบ three-form พบว่าสนาม three-form มีปัญหาของความไม่เสถียรเชิงควอนตัม ซึ่งความไม่เสถียรนี้เกิดขึ้นเมื่อมีสสารอยู่ในเอกภพร่วมกับสนาม three-form นั่นคือเราอาจกล่าวได้ว่าสนาม three-form ไม่เหมาะที่จะเป็นพลังงานมืด อย่างไรก็ตามผู้ทำวิจัยไม่ได้ศึกษาประเด็นนี้ต่อจนได้ผลมากพอที่จะตีพิมพ์ได้ เพราะผู้ทำวิจัยได้มุ่งประเด็นการศึกษาไปหาเงื่อนไขที่ทำให้สนาม three-form ปลอดภัยจากความไม่เสถียรในกรณีที่มีแต่สนาม three-form ในเอกภพ ซึ่งเป็นการศึกษาที่น่าสนใจมากกว่า โดยในกรณีนี้สนาม three-form อาจสามารถแสดงบทบาทเป็น inflaton ที่ขับเคลื่อน inflation ได้ จากการศึกษาในประเด็นนี้พบ

ว่าสนาม three-form จะปลอดภัยจากความไม่เสถียรแบบควอนตัมถ้า ศักย์ของสนาม three-form มีค่าต่ำสุดเมื่อค่าของสนามเป็นศูนย์และระหว่างที่เกิด inflation ศักย์ไม่มีค่าสูงสุดคือ ศักย์ลดลงเรื่อยๆจนมีค่าต่ำสุดเมื่อค่าของสนามเป็นศูนย์ นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าสนาม three-form สามารถขับเคลื่อน inflation ได้อย่างพอเพียงโดยปลอดภัยจากความไม่เสถียร ผลจากการศึกษานี้ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิจัยนานาชาติแล้ว

#### 4.3 สรุปของการศึกษาการสร้างอนุภาคตั้งต้นใน three-form inflation

ในการศึกษาการสร้างอนุภาคตั้งต้นในแบบจำลอง inflation จาก three-form พบว่ากระบวนการ reheating และ preheating ซึ่งเป็นกระบวนการมาตรฐานของการสร้างอนุภาคมูลฐาน สามารถเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพในแบบจำลอง three-form ของ inflation โดยไม่มีปัญหาความไม่เสถียร จากการศึกษาและการศึกษาในประเด็นที่แล้วทำให้กล่าวโดยสรุปได้ว่าสนาม three-form สามารถเป็น inflaton ได้ ผลจากการวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์แล้วในวารสารวิจัยนานาชาติ

#### 4.4 สรุปของการศึกษาผลของพลวัตของพลังงานมืดต่อ non-linear matter power spectrum

ในการศึกษาผลของพลวัตของพลังงานมืดต่อ non-linear BAO พบว่าการวิวัฒนาการของพลังงานมืดที่ต่างกันมีผลน้อยมากต่อตำแหน่งของ BAO peak เว้นแต่ว่าปริมาณของพลังงานมืดมีสัดส่วนมากกว่า 1% ของพลังงานรวมของเอกภพในยุคสสารเด่น การวิจัยนี้ยังอยู่ในขั้นของการสรุปผล จึงขอสรุปไว้เพียงเท่านี้ในรายงานนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. G. Riess et al. [Supernova Search Team Collaboration], *Astrophys. J.* 607, 665 (2004), [arXiv:astro-ph/0402512];  
R. A. Knop et al., [Supernova Cosmology Project Collaboration], *Astrophys. J.* 598, 102 (2004), [arXiv:astro-ph/0309368].
- [2] C. L. Bennett et al., *Astrophys. J. Suppl.* 148, 1(2003), [arXiv:astro-ph/0302207].
- [3] M. Tegmark et al. [SDSS Collaboration], *Phys. Rev. D* 69, 103501 (2004), [arXiv:astro-ph/0310723].
- [4] J. Frieman, M. Turner and D. Huterer, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 46, 385 (2008), [arXiv:0803.0982].
- [5] T. P. Sotiriou and V. Faraoni, *Rev. Mod. Phys.* 82, 451 (2010), [arXiv:0805.1726]
- [6] M. Li, *Phys. Lett. B* 603, 1 (2004), [arXiv:hep-th/0403127].
- [7] Y. S. Myung,
- [8] M. Li, C. Lin, Y. Wang, *JCAP* 0805, 023 (2008), [arXiv:0801.1407].
- [9] C. Gao, X. Chen and Y. G. Shen,
- [10] C. J. Feng and X. Z. Li,

- [11] The ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B716, 1 (2012), [arXiv:1207.7214].
- [12] T. S. Koivisto and N. J. Nunes, Phys. Rev. D80, 103509 (2009), [arXiv:0908.0920].
- [13] L. Kofman, A. Linde and A. Starobinsky, Phys. Rev. D56, 3258 (1997), [arXiv:hep-ph/9704452].
- [14] BOSS project, <http://www.sdss3.org/cosmology.php> .
- [15] D. Schlegel, M. White and D. Eisenstein, (2009), [arXiv:0902.4680].

## 5 Output

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

- Antonio De Felice, Khamphée Karwan, Pitayuth Wongjun, “Reheating in 3-form inflation,” Phys. Rev. D86, 103526 (2012), [arXiv:1209.5156].
- Antonio De Felice, Khamphée Karwan, Pitayuth Wongjun, “ Stability of the 3-form field during inflation,” Phys. Rev. D85, 123545 (2012), [arXiv:1202.0896].
- Khamphée Karwan, Thiti Thitapura, “ Non-adiabatic perturbations in Ricci dark energy model,” JCAP 1201, 017 (2012), [arXiv:1110.2451].
- ผู้ทำวิจัยของปิดโครงการนี้ด้วยผลงานตีพิมพ์ทั้งสามงานที่ได้แสดงข้างบน อย่างไรก็ตามในขณะนี้ยังมีงานวิจัยของโครงการนี้ที่ผู้ทำวิจัยกำลังสรุปผลและเขียนบทความวิจัยอยู่อีกหนึ่งงานวิจัย ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ศึกษาพลวัตของพลังงานมืดต่อ non-linear BAO ตามที่ได้กล่าวไว้ในรายงานเล่มนี้ ผู้ทำวิจัยจะแจ้งให้ สกว. ทราบเมื่อผลงานนี้ได้ตีพิมพ์

## 6 ภาคผนวก

reprint ของงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ทั้งหมด