https://farid.ps/articles/cosmology_radiation_driven_inflation/th.html

โมเดลจักรวาลวิทยาใหม่: การพองตัวที่ขับเคลื่อนด้วยรังสีพร้อมขอบเขตเหตุผลท้องถิ่นและการกระจายพลังงานการเลื่อนสีแดงใหม่

ผมเสนอโมเดลจักรวาลวิทยาที่ยุคการพองตัวถูกขับเคลื่อนด้วยความดันรังสีแทนที่จะเป็นสนามสเกลาร์อินแฟลตอน เริ่มต้นด้วยการขยายตัวแบบเส้นตรงในยุคแพลนก์ จักรวาลจะเปลี่ยนไปสู่การพองตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่ $t \approx 10^{22}\, t_P$ เมื่ออวกาศ-เวลายืดขยายเกินขอบเขตเหตุผล โดยกำหนดความเร็วแสง (c) ใหม่เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงในระดับท้องถิ่น พลังงานที่สูญเสียไปจากการเลื่อนสีแดงของโฟตอนถูกสมมติว่าได้รับการกระจายใหม่เป็นความดันรังสี ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงให้กับการพองตัวและรับประกันการอนุรักษ์พลังงานในจักรวาลที่กำลังขยายตัว แพตช์มินคอฟสกีท้องถิ่นรักษาความไม่เปลี่ยนแปลงของ c ไว้ แก้ไขปัญหาขอบเขตและความแบนราบในขณะที่ประสานทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษกับการถอยห่างแบบเร็วกว่าแสงในระดับจักรวาล การทดสอบเชิงสังเกตแปดครั้งถูกระบุไว้ พร้อมลายเซ็นที่คาดหวังในรังสีไมโครเวฟพื้นหลังของจักรวาล (CMB) คลื่นความโน้มถ่วง และโครงสร้างขนาดใหญ่ ข้อมูลปัจจุบันสอดคล้องกับ ΛCDM แต่ไม่ได้ตัดโมเดลนี้ออก เปิดทางให้มีการตรวจสอบด้วยการทดลองที่มีความแม่นยำสูงในอนาคต

1. บทนำ

จักรวาลวิทยามาตรฐาน ΛCDM อธิบายถึงบิกแบงร้อนที่ $t = 0$ ตามด้วยช่วงการพองตัวสั้นๆ จาก $t \approx 10^{-36}$ วิ นาที ถึง 10^{-34} วิ นาที ยุคนี้ถูกขับเคลื่อนโดยสนามสเกลาร์ “อินแฟลตอน” ซึ่งศักยภาพของมันทำให้เกิดการขยายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล ($a(t) \propto e^{Ht}$) [1, 2] สิ่งนี้แก้ไขปัญหาขอบเขตและความแบนราบ และทิ้งรอยประทับในรังสีไมโครเวฟพื้นหลังของจักรวาล (CMB) แม้จะประสบความสำเร็จ ΛCDM ต้องพึ่งพาส่วนประกอบที่เป็นการคาดเดา: อนุภาคอินแฟลตอนที่ยังไม่ถูกค้นพบ ภูมิทัศน์ศักยภาพที่ปรับแต่งอย่างละเอียด และการยอมรับการสูญเสียพลังงานที่เห็นได้ชัดจากการเลื่อนสีแดงของโฟตอน

ผมนำเสนอทางเลือกที่ขับเคลื่อนด้วยรังสี โมเดลของผมเริ่มต้นด้วยการขยายตัวแบบเส้นตรง เปลี่ยนไปสู่การพองตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลอย่างเป็นธรรมชาติเมื่อโฟตอนครอบงำและขอบเขตแยกจากกัน และดำเนินต่อไปในยุคการเร่งความเร็วสมัยใหม่ หลักการสำคัญสามประการที่ทำให้กรอบนี้แตกต่างคือ:

1. **ไม่ต้องใช้อินแฟลตอน** ความดันรังสีเองที่ได้รับการเสริมด้วยพลังงานการเลื่อนสีแดง ขับเคลื่อนการพองตัว
2. **การอนุรักษ์พลังงานได้รับการฟื้นฟู** พลังงานที่สูญเสียจากการเลื่อนสีแดงถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในเชิงอุณหพลศาสตร์เป็นความดันรังสี ซึ่งทำงานในจักรวาลที่กำลังขยายตัว
3. **ความไม่เปลี่ยนแปลงในระดับท้องถิ่นของ c** ภายในแต่ละแพตช์เหตุผล ผู้สังเกตวัดความเร็วแสงเดียวกัน สอดคล้องกับสมมติฐานของไอน์สไตน์ ในระดับโลก การถอยห่างแบบเร็วกว่าแสงเกิดขึ้นอย่างเป็นธรรมชาติจากการแยกตัวของเหตุผล

2. กรอบทฤษฎี

2.1 การขยายตัวแบบเส้นตรงในช่วงแรก ($t = 0$ ถึง $t = 10^{20}\,t_P$)

ในยุคแพลนก์ ($t = 1\,t_P = 5.39 \times 10^{-44}$ วิ นาที) จักรวาลขยายตัวแบบเส้นตรงด้วยปัจจัยสเกล $a(t) \propto t$ ขนาดที่แท้จริงคือ $R(t) = ct$ และความหนาแน่นของพลังงานอยู่ในระดับสเกลแพลนก์:

$$\rho \approx 5 \times 10^{96}\ \text{กก ม}^{-3}.$$

สมการฟรีดแมนควบคุมการขยายตัว:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2},$$

โดยที่ $H = 1/t$ และความโค้งมีค่าน้อยมาก ในขั้นนี้ โฟตอนยังไม่มี ดังนั้นความดันรังสียังไม่ส่งผล

2.2 การเริ่มต้นของความดันรังสี ($t = 10^{20}\,t_P$)

เมื่อถึง $t \sim 10^{20}\,t_P$ ($\sim 10^{-36}$ วิ นาที) การก่อตัวของอนุภาคสร้างโฟตอนในพลาสมาควาร์ก-กลูออนที่ $T \approx 10^{28}$ เคลวิ น ความดันรังสีปรากฏขึ้น:

$$P = \frac{1}{3}\rho c^2, \qquad \rho = \frac{aT^4}{c^2},$$

โดยที่ $a = 7.566 \times 10^{-16}$ จู ล ม$^{-3}$ เคลวิ น$^{-4}$ ส่งผลให้ $P \sim 10^{92}$ ปาสกาล แม้ว่าจะมหาศาล แรงโน้มถ่วงยังคงครอบงำ และการขยายตัวยังคงชะลอตัว

2.3 การแยกตัวของเหตุผลและความไม่เปลี่ยนแปลงในระดับท้องถิ่นของ c ($t = 10^{22}\,t_P$)

ที่ $t \approx 10^{22}\,t_P$ ($\sim 10^{-34}$ วิ นาที) รัศมีของจักรวาลเกินขอบเขตแบบชวาร์ซชิลด์:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad M = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi R^3, \quad R = ct.$$

เมื่อขอบเขตอนุภาค $d_p \approx ct$ เกิน r_s ภูมิภาคต่างๆ จะแยกตัวออกจากกันในเชิงเหตุผล

ภายในแต่ละแพตช์ขอบเขต ผู้สังเกตวัด $c = 3 \times 10^8$ ม/วิ นาที ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองทางความคิดของไอน์สไตน์เกี่ยวกับรถไฟและจรวด อย่างไรก็ตาม ในระดับโลก ความเร็วการถอยห่างเกิน c เช่นเดียวกับในจักรวาลวิทยามาตรฐาน ผมกำหนดพารามิเตอร์นี้ว่า:

$$c_{\text{eff}} = c_0\left(\frac{a_0}{a}\right)^{\beta}, \qquad \beta > 0,$$

ซึ่งไม่ได้หมายถึงการเปลี่ยนแปลงที่แท้จริงของ c แต่เข้ารหัสความเป็นท้องถิ่นของมัน ดังนั้น c ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงสำหรับผู้สังเกตใดๆ ภายในขอบเขตเหตุผลของตน ในขณะที่การขยายตัวแบบเร็วกว่าแสงในระดับโลกสะท้อนถึงการแยกตัว ไม่ใช่การละเมิดทฤษฎีสัมพัทธภาพ

2.4 การกระจายพลังงานการเลื่อนสีแดงใหม่

ใน ΛCDM พลังงานของโฟตอนลดลงเมื่อความยาวคลื่นยืดออก:

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad \lambda \propto a, \quad E \propto a^{-1}.$$

การสูญเสียพลังงานที่เห็นได้ชัดถูกอธิบายว่าเป็นผลจากการขยายตัว โดยไม่มีกฎการอนุรักษ์ในระดับโลก

โมเดลของผมแก้ไขความขัดแย้งนี้: พลังงานที่สูญเสียจากการเลื่อนสีแดงถูกดูดซับที่ขอบเขตเหตุผลและกระจายใหม่เป็นความดันรังสี ซึ่งทำงานอย่างมีประสิทธิภาพบนเมตริก:

$$\Delta E_{\text{การเลื่อนสีแดง}} \rightarrow \Delta P_{\text{รังสี}} \cdot V.$$

2.4.1 การเลื่อนสีแดงเป็นงานบนเมตริก

หลักการสมมูลของไอน์สไตน์ระบุว่าแรงโน้มถ่วงเทียบเท่ากับการเร่งความเร็ว สิ่งนี้ให้วิธีที่เป็นรูปธรรมในการมองว่าการเลื่อนสีแดงไม่ใช่การทำลายพลังงาน แต่เป็นการแปลงเป็นงานจลน์

การทดลองทางความคิด: ลองจินตนาการถึงเลเซอร์สีน้ำเงินที่ยิงขึ้นจากพื้นผิวดาวเคราะห์ โฟตอนไต่ขึ้นจากศักยภาพโน้มถ่วงและมาถึงผู้สังเกตที่อยู่ห่างไกลด้วยการเลื่อนสีแดง สำหรับผู้สังเกต แต่ละโฟตอนดูเหมือนมีพลังงานน้อยลง อย่างไรก็ตาม เลเซอร์ที่แหล่งกำเนิดได้รับพลังงาน-มวลเต็มของโฟตอนที่ปล่อยออกมา: มันถ่ายโอนโมเมนตัมที่สอดคล้องกับพลังงานที่ไม่มีการเลื่อนสีแดงและความดันรังสี

พลังงานที่ “หายไป” ไปไหน? มันถูกลงทุนในสนามโน้มถ่วง โดยทำงานที่จำเป็นในการยกโฟตอนออกจากหลุมศักยภาพ

โดยเปรียบเทียบ ในจักรวาลวิทยา โฟตอนที่ปล่อยออกมาในช่วงเวลาต้นเสียพลังงานผ่านการเลื่อนสีแดงของจักรวาล ในระดับท้องถิ่น บริเวณที่ปล่อยออกมาได้รับความดันรังสีเต็มของมัน แต่ในระดับโลก การขาดดุลที่เห็นได้ชัดไม่ได้สูญเสียไป มันถูกแปลงเป็น **งานบนเมตริก** - โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นการขยายตัวที่เร่งขึ้น

$$\Delta E_{\text{โฟตอน}} = W_{\text{การขยายตัว}}.$$

2.4.2 อุณหพลศาสตร์ของขอบเขตและกลไกการกระจายใหม่

จากเปรียบเทียบนี้ ผมเสนอว่าขอบเขตเหตุผลทำหน้าที่เป็นตัวกลางของพลังงานการเลื่อนสีแดง:

1. **การถ่ายโอนพลังงาน** พลังงานโฟตอนลดลงตาม $E \propto a^{-1}$ แทนที่จะหายไป พลังงานนี้ถูกดูดซับที่ขอบเขตอนุภาคหรือขอบเขตเหตุผลแบบชวาร์ซชิลด์
2. **การแมปการเลื่อนสีแดงโน้มถ่วง** เช่นเดียวกับที่การเลื่อนสีแดงโน้มถ่วงถ่ายโอนพลังงานไปยังสนาม การเลื่อนสีแดงของจักรวาลถ่ายโอนพลังงานไปสู่การขยายตัวของเมตริก
3. **อุณหพลศาสตร์ของขอบเขต** ขอบเขตมีเอนโทรปี ($S \propto A/4$) และอุณหภูมิ (กิบบอนส์-ฮอว์คิง) พลังงานที่เลื่อนสีแดงมีส่วนช่วยในเอนโทรปีของขอบเขต และผ่านกรอบการโน้มถ่วงอุณหพลศาสตร์ของแพดมานับหัน [3] มันปรากฏใหม่เป็นความดันที่ทำงานบนการขยายตัว
4. **การเพิ่มความดัน**

$$P = \frac{1}{3}\rho c_{\text{eff}}^2 + \Delta P_{\text{การเลื่อนสีแดง}},$$

ซึ่งแก้ไขสมการการเร่งความเร็ว:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right).$$

ด้วย $\Delta P_{\text{การเลื่อนสีแดง}} > 0$ การขยายตัวจะเร่งขึ้นโดยไม่ต้องเรียกใช้ อินแฟลตอน

2.4.3 ข้อพิจารณาอย่างเป็นทางการ

เพื่อทำให้กลไกนี้เป็นทางการ จำเป็นต้อง:

- ทฤษฎีสนามควอนตัมในอวกาศ-เวลาที่โค้งเพื่ออธิบายการโต้ตอบระหว่างโฟตอนและขอบเขต
- อุณหพลศาสตร์ของขอบเขต (การโน้มถ่วงที่เกิดขึ้นของแพดมานับหัน เอนโทรปีของเบเคนสไตน์-ฮอว์คิง) เพื่อจำลองการดูดซับและการปล่อยพลังงานใหม่
- การจำลองเชิงตัวเลขของพลวัตฟรีดแมนที่แก้ไขด้วย $\Delta P_{\text{การเลื่อนสีแดง}}$

2.5 ยุคสมัยใหม่

ที่ $t \approx 2.6 \times 10^{71}\, t_P$ (13.8 พันล้านปี) อุณหภูมิ CMB คือ $T = 2.7$ เคลวิน และความดันรังสีลดลงเหลือ $P \sim 10^{-31}$ ปาสกาล อย่างไรก็ตาม กลไกที่ขอบเขตเป็นตัวกลางยังคงดำเนินต่อไป: พลังงานการเลื่อนสีแดงยังคงเป็นเชื้อเพลิงให้กับการเร่งความเร็วของจักรวาล ซึ่งมีส่วนช่วยในพลวัตช่วงปลายที่มักถูกระบุว่าเป็นพลังงานมืด ($\Omega_\Lambda \approx 0.7$)

3. ความก้าวหน้าทางแนวคิด

1. **ไม่ต้องใช้อินแฟลตอน** การพองตัวเกิดขึ้นอย่างเป็นธรรมชาติจากความดันรังสีที่ได้รับการเสริมด้วยพลังงานการเลื่อนสีแดง ซึ่งขจัดความจำเป็นสำหรับสนามสเกลาร์ที่ยังไม่ถูกค้นพบ
2. **การฟื้นฟูการอนุรักษ์พลังงาน** พลังงานการเลื่อนสีแดงถูกนำกลับมาใช้ใหม่เป็นความดันรังสี ทำให้การขยายตัวสอดคล้องกับหลักการอุณหพลศาสตร์
3. **ความไม่เปลี่ยนแปลงในระดับท้องถิ่นของ c** สมมติฐานของไอน์สไตน์ยังคงใช้ได้ภายในแพตช์เหตุผล ในขณะที่การถอยห่างแบบเร็วกว่าแสงอธิบายได้โดยการแยกตัวของขอบเขต

4. การทดสอบเชิงสังเกตและลายเซ็นที่คาดหวัง

ผมเสนอการทดสอบเชิงสังเกตแปดครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งมีลายเซ็นที่แตกต่างกันซึ่งสามารถแยกโมเดลนี้จาก Λ CDM ได้

4.1 ความไม่สม่ำเสมอของ CMB

- **การทดสอบ:** วัดสเปกตรัมพลังงานของ CMB และโพลาไรเซชันโหมด B ด้วยความแม่นยำสูง
- **ลายเซ็นที่คาดหวัง:** การเพิ่มขึ้นของความผันผวนขนาดเล็กที่มัลติโพล $l > 1000$ พร้อมกับโพลาไรเซชันโหมด B ที่ตรวจพบได้ที่ $l < 100$ ($r \approx 0.05$–0.1)

4.2 ความหนาแน่นของพลังงานรังสีที่ขึ้นกับการเลื่อนสีแดง

- **การทดสอบ:** สังเกตการปรับสเกลของความหนาแน่นของพลังงานรังสี $\rho_{\text{รังสี}}$ กับการเลื่อนสีแดง
- **ลายเซ็นที่คาดหวัง:** ที่ $z > 1100$ $\rho_{\text{รังสี}}$ ควรเบี่ยงเบนจากสเกลมาตรฐาน $\propto a^{-4}$

4.3 พื้นหลังคลื่นความโน้มถ่วง (GWB)

- **การทดสอบ:** ค้นหาพื้นหลังคลื่นความโน้มถ่วงแบบสุ่มจากยุคการพองตัว
- **ลายเซ็นที่คาดหวัง:** จุดสูงสุดที่ $\sim 10^{-9}$ เฮิร์ตซ์ ด้วยความเค้นลักษณะเฉพาะ $h_c \approx 10^{-15}$

4.4 ความตึงเครียดของฮับเบิลและการเร่งความเร็วช่วงปลาย

- **การทดสอบ:** วัดค่าคงที่ของฮับเบิล H_0 และสมการสถานะของพลังงานมืด w
- **ลายเซ็นที่คาดหวัง:** $H_0 \approx 70$ กม/วินาที/เมกะพาร์เซก โดย w อยู่ระหว่าง -0.8 และ 0 ที่ $z < 1$

4.5 โครงสร้างขนาดขอบเขต

- **การทดสอบ:** แมปโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ 10–100 เมกะพาร์เซก
- **ลายเซ็นที่คาดหวัง:** การรวมกลุ่มที่เพิ่มขึ้นและช่องว่างขนาดใหญ่ที่ผิดปกติ

4.6 การเลื่อนของเส้นสเปกตรัม

- **การทดสอบ:** วิเคราะห์สเปกตรัมการเลื่อนสีแดงสูง
- **ลายเซ็นที่คาดหวัง:** การขยายหรือการเลื่อนพลังงาน 0.1–1% ที่ $z > 5$

4.7 ลายเซ็นอุณหพลศาสตร์ของขอบเขต

- **การทดสอบ:** สำรวจเอนโทรปีและการไหลที่ขอบเขตของจักรวาล
- **ลายเซ็นที่คาดหวัง:** การเติบโตของเอนโทรปีของขอบเขต $\Delta S \sim 10^{120} k_B$

4.8 การสังเคราะห์นิวเคลียสเริ่มแรก

- **การทดสอบ:** วัดความอุดมสมบูรณ์ของธาตุเบา
- **ลายเซ็นที่คาดหวัง:** การเพิ่มขึ้น 1–5% ใน ^{4}He และการลดลงในดิวเทอเรียม

5. การเปรียบเทียบกับ ΛCDM

คุณลักษณะ	CDM	โมเดลที่ขับเคลื่อนด้วยรังสี
ตัวขับเคลื่อนการพองตัว	สนามสเกลาร์อินแฟลตอน	ความดันรังสี + พลังงานการเลื่อนสีแดง
การอนุรักษ์พลังงาน	ไม่ได้กำหนดในระดับโลก	ถูกบังคับในเชิงอุณหพลศาสตร์ผ่านขอบเขต
ความเร็วแสง	ไม่เปลี่ยนแปลงในระดับโลก	ไม่เปลี่ยนแปลงในระดับท้องถิ่นภายในขอบเขต
ปัญหาขอบเขต/ความแบนราบ	แก้ไขโดยอินแฟลตอน	แก้ไขโดยรังสี + ขอบเขต
พลังงานมืด	คงที่ของจักรวาล (Λ)	การต่อเนื่องของกลไกการเลื่อนสีแดง-รังสี
การทำนาย CMB	สเปกตรัมมาตรฐาน	การเพิ่มขนาดเล็ก ความแตกต่างที่เป็นไปได้ในโหมด B

คุณลักษณะ	ΛCDM	โมเดลที่ขับเคลื่อนด้วยรังสี
ความตึงเครียดของฮับเบิล	ยังไม่แก้ไข	H_0 ระดับกลางตามธรรมชาติ
สถานะการสังเกต	ได้รับการสนับสนุนแต่ไม่สมบูรณ์	สอดคล้องกับข้อมูล ยังไม่ถูกหักล้าง

6. การอภิปราย

กรอบนี้กำหนดการพองตัวใหม่เป็นกระบวนการอุณหพลศาสตร์ที่อยู่ในรังสี โดยไม่จำเป็นต้องใช้อินแฟลตอนที่เป็นการคาดเดา มันให้กลไกสำหรับการอนุรักษ์พลังงานในอวกาศ-เวลาที่กำลังขยายตัว และประสานสมมติฐานท้องถิ่นของทฤษฎีสัมพัทธภาพกับขอบเขตของจักรวาล

ยังคงมีความท้าทายอยู่ พลวัตที่แน่นอนของการกระจายพลังงานการเลื่อนสีแดงใหม่ต้องการการพัฒนาทางคณิตศาสตร์เพิ่มเติม และการจำลองเชิงตัวเลขของสมการฟรีดแมนที่แก้ไขนั้นจำเป็น การแยกแยะเชิงสังเกตจะขึ้นอยู่กับภารกิจในอนาคต (CMB-S4, Euclid, LISA, SKA)

7. สรุป

ผมนำเสนอจักรวาลวิทยาที่ความดันรังสี ซึ่งถูกปรับโดยขอบเขตเหตุผลและพลังงานการเลื่อนสีแดง ขับเคลื่อนทั้งการพองตัวและการขยายตัวในปัจจุบัน โมเดลนี้ขจัดความจำเป็นสำหรับอินแฟลตอนที่เป็นสมมติฐาน ฟื้นฟูความสอดคล้องทางอุณหพลศาสตร์ และประสานความไม่เปลี่ยนแปลงในระดับท้องถิ่นของ c ของไอน์สไตน์กับความเร็วกว่าแสงในระดับจักรวาล ข้อมูลปัจจุบันสอดคล้องกับ ΛCDM แต่การทดสอบเชิงสังเกตที่เสนอให้ทางสำหรับการตรวจสอบหรือการหักล้าง

อ้างอิง

[1] ความร่วมมือ Planck, **ผลลัพธ์ Planck 2018. VI. พารามิเตอร์จักรวาล,** Astron. Astrophys. 641, A6 (2020). [2] Guth, A. H., **จักรวาลที่พองตัว,** Phys. Rev. D 23, 347 (1981). [3] Padmanabhan, T., **แง่มุมอุณหพลศาสตร์ของแรงโน้มถ่วง: ข้อมูลเชิงลึกใหม่,** Rep. Prog. Phys. 73, 046901 (2010). [4] ความร่วมมือ BICEP2/Keck, **ข้อจำกัดที่ได้รับการปรับปรุงสำหรับคลื่นความโน้มถ่วงดั้งเดิม,** Phys. Rev. Lett. 121, 221301 (2018).