

מודל קוסמולוגי חדש: אינפלציה מונעת על ידי קרינה עם אופקים סיבתיים מקומיים וחלוקה מחדש של אנרגיית הסטה לאדום

אני מציע מודל קוסמולוגי שבו תקופת האינפלציה מונעת על ידי לחץ קרינה במקום שדה אינפלטון סקלרי. החל מהתפשטות ליניארית בתקופת פלנק, היקום עובר לאינפלציה אקספוננציאלית בזמן $t \approx 10^{22} t_P$ כאשר המרחב-זמן מתמתח מעבר לאופקים סיבתיים, ומגדיר מחדש את מהירות האור (c) כפרמטר מקומי בלתי משתנה. ההשערה היא כי האנרגיה שאבדה עקב הסטה לאדום של פוטונים מחולקת מחדש ללחץ קרינה, ובכך מזינה את האינפלציה ומבטיחה שימור אנרגיה ביקום מתפשט. תיקונים מקומיים של מינקובסקי שומרים על הבלתי משתנה של c, תוך התייחסות לבעיות האופק והשטיחות, ומיישבים את תורת היחסות המיוחדת עם נסיגה על-אורית קוסמולוגית. שמונה מבחנים תצפיתיים מוצגים, עם סימנים צפויים בקרינת הרקע הקוסמית (CMB), גלי כבידה ומבנים בקנה מידה גדול. הנתונים הנוכחיים תואמים את Λ CDM אך אינם שוללים מודל זה, ומשאירים פתח לאימות עם ניסויים עתידיים בעלי דיוק גבוה.

1. מבוא

הקוסמולוגיה הסטנדרטית Λ CDM מתארת מפץ גדול חם בזמן $t = 0$, ואחריו תקופת אינפלציה קצרה מ- $t \approx 10^{-36} s$ עד $t \approx 10^{-34} s$. תקופה זו מונעת על ידי שדה סקלרי "אינפלטון", שפוטנציאל שלו מייצר התפשטות אקספוננציאלית ($a(t) \propto e^{Ht}$) [1, 2]. זה פותר את בעיות האופק והשטיחות ומשאיר חותמות בקרינת הרקע הקוסמית (CMB). למרות הצלחתו, Λ CDM תלוי במרכיבים ספקולטיביים: חלקיק אינפלטון שלא זוהה, נופי פוטנציאל מכווננים עדינות וסובלנות לאי-שימור אנרגיה לכאורה עקב הסטה לאדום של פוטונים.

אני מציע חלופה מונעת על ידי קרינה. המודל שלי מתחיל בהתפשטות ליניארית, עובר באופן טבעי לאינפלציה אקספוננציאלית כאשר הפוטונים שולטים והאופקים מתנתקים, וממשיך לעידן המואץ הנוכחי. שלושה עקרונות מרכזיים מבדילים מסגרת זו:

1. **אין צורך באינפלטון.** לחץ הקרינה עצמו, מוגבר על ידי אנרגיית הסטה לאדום, מניע את האינפלציה.
2. **שימור אנרגיה משוחזר.** האנרגיה שאבדה עקב הסטה לאדום ממוחזרת תרמודינמית ללחץ קרינה, שמבצע עבודה על היקום המתפשט.
3. **בלתי משתנה מקומי של c.** בתוך כל תיקון סיבתי, צופים מודדים את אותה מהירות אור, בהתאם לפוסטולטים של איינשטיין. באופן גלובלי, נסיגה על-אורית מתעוררת באופן טבעי מניתוק סיבתי.

2. מסגרת תיאורטית

2.1 התפשטות ליניארית מוקדמת ($t = 0$ עד $t = 10^{20} t_P$)

בתקופת פלנק ($t = 1 t_P = 5.39 \times 10^{-44} s$), היקום מתפשט באופן ליניארי עם גורם סקלה $a(t) \propto t$. גודלו הראוי הוא $R(t) = ct$, וצפיפות האנרגיה היא בסקלת פלנק:

$$\rho \approx 5 \times 10^{96} \text{ kg m}^{-3}.$$

משוואת פרידמן שולטת בהתפשטות:

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

עם $H = 1/t$ ועקמומיות זניחה. בשלב זה, אין פוטונים, ולכן לחץ הקרינה עדיין לא תורם.

2.2 תחילת לחץ הקרינה ($t = 10^{20} t_P$)

בזמן $t \sim 10^{20} t_P$ ($\sim 10^{-36} \text{ s}$), יצירת חלקיקים מייצרת פוטונים בפלזמת קווארק-גלואון בטמפרטורה $T \approx 10^{28} \text{ K}$. לחץ הקרינה מתעורר:

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

עם $a = 7.566 \times 10^{-16} \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-4}$. זה מניב $P \sim 10^{92} \text{ Pa}$. למרות שהוא עצום, הכבידה עדיין שולטת, וההתפשטות נותרת מאטה.

2.3 ניתוק סיבתי ובלתי משתנה מקומי של c ($t = 10^{22} t_P$)

בזמן $t \approx 10^{22} t_P$ ($\sim 10^{-34} \text{ s}$), רדיוס היקום עולה על האופק דמוי שוורצשילד שלו:

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

כאשר אופק החלקיקים $d_p \approx ct$ עולה על r_s , האזורים מתנתקים באופן סיבתי.

בתוך כל תיקון אופק, צופים מודדים $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, בהתאם לניסויים מחשבתיים של איינשטיין עם רכבת ורקטה. עם זאת, באופן גלובלי, מהירויות הנסיגה עולות על c , כפי שקורה בקוסמולוגיה סטנדרטית. אני מפרמטר זאת כך:

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

לא משתמע מכך שינוי מילולי של c , אלא קידוד של מקומיותו. לפיכך, c נשאר בלתי משתנה עבור כל צופה בתוך האופק הסיבתי שלו, בעוד שהתפשטות על-אורית גלובלית משקפת ניתוק, לא הפרה של היחסות.

2.4 חלוקה מחדש של אנרגיית הסטה לאדום

ב-CDM, אנרגיית הפוטונים פוחתת ככל שהאורכי גל מתמתחים:

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

האובדן הנראה של אנרגיה מיוחס להתפשטות, ללא חוק שימור גלובלי.

המודל שלי פותר פרדוקס זה: האנרגיה שאבדה עקב הסטה לאדום נספגת באופקים סיבתיים ומחולקת מחדש ללחץ קרינה, שמבצע עבודה על המטריקה באופן יעיל:

$$\Delta E_{\text{מודל הסטה}} \rightarrow \Delta P_{\text{הניר}} \cdot V.$$

2.4.1 הסטה לאדום כעבודה על המטריקה

עקרון השקילות של איינשטיין מזהה כבידה עם תאוצה. זה מספק דרך קונקרטית לראות את ההסטה לאדום לא כהרס של אנרגיה, אלא כהמרתה לעבודה קינטית.

ניסוי מחשבתי: שקול לייזר כחול שנורה כלפי מעלה מפני השטח של כוכב לכת. הפוטונים מטפסים מתוך הפוטנציאל הכבידתי ומגיעים לצופה רחוק כשהם מוסטים לאדום. עבור הצופה, כל פוטון נראה כנושא פחות אנרגיה. עם זאת, הלייזר במקור חווה את מלוא מסת-האנרגיה של הפוטונים שנפלטו: הוא העביר תנע התואם לאנרגיה הבלתי מוסטת שלהם ולחץ הקרינה.

לאן נעלמה האנרגיה "החסרה"? היא הושקעה בשדה הכבידה, תוך ביצוע העבודה הדרושה להרמת הפוטונים מתוך הבאר הפוטנציאלית.

באנלוגיה, בקוסמולוגיה, פוטונים שנפלטו בזמנים מוקדמים מאבדים אנרגיה דרך הסטה לאדום קוסמולוגית. באופן מקומי, האזור הפולט חווה את מלוא לחץ הקרינה שלהם. אך באופן גלובלי, הגירעון הנראה אינו אבוד; הוא הומר **לעבודה על המטריקה** - במיוחד, להתפשטות מואצת.

$$\Delta E_{\text{פוטון}} = W_{\text{תושפתה}}.$$

2.4.2 תרמודינמיקה של האופק ומנגנון החלוקה מחדש

בהסתמך על אנלוגיה זו, אני מציע כי אופקים סיבתיים פועלים כמתווכים של אנרגיית ההסטה לאדום:

1. **העברת אנרגיה.** אנרגיית הפוטונים פוחתת כ- $E \propto a^{-1}$. במקום להיעלם, אנרגיה זו נספגת באופקי חלקיקים או בגבולות סיבתיים דמויי שוורצשילד.
2. **מיפוי הסטה לאדום כבידתית.** בדומה להסטה לאדום כבידתית שמעבירה אנרגיה לשדה, הסטה לאדום קוסמולוגית מעבירה אנרגיה להתפשטות המטריקה.
3. **תרמודינמיקה של האופק.** לאופקים יש אנטרופיה ($S \propto A/4$) וטמפרטורה (גיבונס-הוקינג). אנרגיה מוסטת לאדום תורמת לאנטרופיה של האופק, ובאמצעות מסגרת הכבידה התרמודינמית של פדמנבהאן [3], היא מופיעה מחדש כלחץ שמבצע עבודה על ההתפשטות.
4. **שיפור הלחץ.**

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

תוך שינוי משוואת התאוצה:

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

עם $\Delta P_{\text{מודל הסטה}} > 0$, ההתפשטות מואצת מבלי להזדקק לאינפלטון.

2.4.3 שיקולים פורמליים

פורמליזציה של מנגנון זה דורשת:

- תורת שדות קוונטית במרחב-זמן מעוקם לתיאור אינטראקציות פוטון-אופק.
- תרמודינמיקה של האופק (כבידה מתהווה של פדמנבהאן, אנטרופיה של בקנשטיין-הוקינג) למידול ספיגה ופליטה מחדש של אנרגיה.
- סימולציות מספריות של דינמיקת פרידמן משתנה עם ΔP מודאל הטסה.

2.5 העידן המודרני

בזמן $t_P \approx 2.6 \times 10^{71} t$ (13.8 מיליארד שנים), טמפרטורת ה-CMB היא $T = 2.7 \text{ K}$, ולחץ הקרינה ירד ל- $P \sim 10^{-31} \text{ Pa}$. עם זאת, אותו מנגנון מתווך על ידי האופק נמשך: אנרגיית ההסטה לאדום ממשיכה להזין את ההאצה הקוסמית, תורמת לדינמיקה של זמן מאוחר המיוחס בדרך כלל לאנרגיה אפלה ($\Omega_\Lambda \approx 0.7$).

3. התקדמות קונספטואלית

1. **אין צורך באינפלטון.** האינפלציה מתעוררת באופן טבעי מלחץ הקרינה המוגבר על ידי אנרגיית ההסטה לאדום, ומבטלת את הצורך בשדה סקלרי שלא זוהה.
2. **שימור אנרגיה משוחזר.** אנרגיית ההסטה לאדום ממוחזרת ללחץ קרינה, מיישרת את ההתפשטות עם עקרונות תרמודינמיים.
3. **בלתי משתנה מקומי של c.** הפוסטולט של איינשטיין מתקיים בתוך תיקונים סיבתיים, בעוד נסיגה על-אורית מוסברת על ידי הפרדת אופקים.

4. מבחנים תצפיתיים וסימנים צפויים

אני מציע שמונה מבחנים תצפיתיים, כל אחד עם סימנים מובחנים שיכולים להבדיל מודל זה מ-CDMΛ.

4.1 אניזוטרופיות של CMB

- **מבחן:** מדידת ספקטרום הכוח של CMB ופולריזציה של מצב B בדיוק גבוה.
- **סימן צפוי:** תנודות מוגברות בקנה מידה קטן במולטיפולים $l > 1000$, יחד עם פולריזציה של מצב B ניתנת לזיהוי ב- $l < 100$ ($r \approx 0.05$).

4.2 צפיפות אנרגיית קרינה תלוית הסטה לאדום

- **מבחן:** תצפית על קנה המידה של צפיפות אנרגיית הקרינה הנירק ρ עם הסטה לאדום.
- **סימן צפוי:** ב- $z > 1100$, צריכה לסטות מקנה המידה הסטנדרטי $\propto a^{-4}$.

4.3 רקע גלי כבידה (GWB)

- **מבחן:** חיפוש אחר GWB סטוכסטי מתקופת האינפלציה.
- **סימן צפוי:** שיא ב- $\sim 10^{-9} \text{ Hz}$, עם מתח אופייני $h_c \approx 10^{-15}$.

4.4 מתח האבל והאצה בזמן מאוחר

- **מבחן:** מדידת קבוע האבל H_0 ומשוואת המצב של האנרגיה האפלה w .
- **סימן צפוי:** $H_0 \approx 70 \text{ km/s/Mpc}$, עם w בין -0.8 ל-0 ב- $z < 1$.

4.5 מבנה בקנה מידה של האופק

- **מבחן:** מיפוי מבנה בקנה מידה גדול ב-10-100 Mpc.
- **סימן צפוי:** התקבצות מוגברת וחללים גדולים באופן חריג.

4.6 הסטות בקווי ספקטרום

- **מבחן:** ניתוח ספקטרים בהסטה לאדום גבוהה.
- **סימן צפוי:** הרחבה או הסטות אנרגיה של 0.1%-1% ב- $z > 5$.

4.7 סימנים תרמודינמיים של האופק

- **מבחן:** חקירת אנטרופיה וזרימה באופקים קוסמיים.
- **סימן צפוי:** גידול באנטרופיית האופק $\Delta S \sim 10^{120} k_B$.

4.8 נוקליאוסינתזה ראשונית

- **מבחן:** מדידת שפע של יסודות קלים.
- **סימן צפוי:** עלייה של 1%-5% ב- He^4 וירידה בדאטריום.

5. השוואה עם Λ CDM

תכונה	Λ CDM	מודל מונע קרינה
מניע האינפלציה	שדה אינפלטון סקלרי	לחץ קרינה + אנרגיית הסטה לאדום
שימור אנרגיה	לא מוגדר גלובלית	נאכף תרמודינמית דרך אופקים
מהירות האור	בלתי משתנה גלובלית	בלתי משתנה מקומית בתוך אופקים
בעיות האופק/שטיחות	נפתרות על ידי אינפלטון	נפתרות על ידי קרינה + אופקים
אנרגיה אפלה	קבוע קוסמולוגי (Λ)	המשך של מנגנון הסטה לאדום-קרינה
תחזיות CMB	ספקטרום סטנדרטי	שיפורים בקנה מידה קטן, הבדלים אפשריים במצב B
מתח האבל	לא פתור	H_0 בינוני טבעי
סטטוס תצפיתי	נתמך אך לא שלם	תואם לנתונים, עדיין לא הופרך

6. דיון

מסגרת זו ממסגרת מחדש את האינפלציה כתהליך תרמודינמי טבוע בקרינה, ללא צורך באינפלטון ספקולטיבי. היא מספקת מנגנון לשימור אנרגיה במרחב-זמן מתפשט ומיישבת את הפוסטולטים המקומיים של היחסות עם אופקים קוסמולוגיים.

אתגרים נותרים. הדינמיקה המדויקת של חלוקה מחדש של אנרגיית הסטה לאדום דורשת פיתוח מתמטי נוסף, וסימולציות מספריות של משוואות פרידמן משתנות חיוניות. ההבחנה התצפיתית תסתמך על משימות עתידיות (CMB-S4, Euclid, LISA, SKA).

7. מסקנה

אני מציג קוסמולוגיה שבה לחץ הקרינה, מווסת על ידי אופקים סיבתיים ואנרגיית הסטה לאדום, מניע גם את האינפלציה וגם את ההתפשטות הנוכחית. מודל זה מבטל את הצורך באינפלטון היפותטי, משחזר עקביות תרמודינמית ומיישב את הבלתי משתנה המקומי של c של איינשטיין עם על-אוריות קוסמולוגיות.

הנתונים הנוכחיים תואמים את Λ CDM, אך המבחנים התצפיתיים המוצעים מספקים דרך לאימות או הפרכה.

מקורות

Planck Collaboration, **Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters**, Astron. [1] Astrophys. 641, A6 (2020). [2] Guth, A. H., **Inflationary Universe**, Phys. Rev. D 23, 347 (1981). [3] Padmanabhan, T., **Thermodynamical Aspects of Gravity: New Insights**, Rep. Prog. Phys. 73, 046901 (2010). [4] BICEP2/Keck Collaboration, **Improved Constraints on Primordial Gravitational Waves**, Phys. Rev. Lett. 121, 221301 (2018)