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

# نموذج كوني جديد: التضخم المدفوع بالإشعاع مع أفق سببي محلي وإعادة توزيع طاقة الانزياح الأحمر

أقترح نموذجًا كونيًا يتم فيه دفع فترة التضخم بضغط الإشعاع بدلاً من حقل إنفلاتون سكالاري. بدءًا من التوسع الخطي في عصر بلانك، ينتقل الكون إلى تضخم أسي عند $t \approx 10^{22}\, t_P$ مع تمدد الفضاء-الزمان خارج الأفق السببي، مما يعيد تعريف سرعة الضوء ($c$) كمعامل ثابت محليًا. يُفترض أن الطاقة المفقودة بسبب الانزياح الأحمر للفوتونات تُعاد توزيعها إلى ضغط الإشعاع، مما يغذي التضخم ويضمن حفظ الطاقة في كون متوسع. تحافظ الأجزاء المحلية من مينكوفسكي على ثبات $c$، مما يعالج مشكلتي الأفق والتسطح مع التوفيق بين النسبية الخاصة وانحسار الكون الفائق السرعة. يتم تحديد ثمانية اختبارات رصدية، مع توقعات بتوقيعات في الخلفية الكونية الميكروية، الأمواج الثقالية، والهيكلية واسعة النطاق. تتماشى البيانات الحالية مع $\Lambda$CDM لكنها لا تستبعد هذا النموذج، مما يترك مجالًا للتحقق منه بتجارب عالية الدقة في المستقبل.

## 1. المقدمة

تصف الكوسمولوجيا القياسية $\Lambda$CDM انفجارًا كبيرًا ساخنًا عند $t = 0$، يتبعه فترة تضخم قصيرة من $t \approx 10^{-36}$ ثانية إلى $10^{-34}$ ثانية. يتم دفع هذه الفترة بحقل "إنفلاتون" سكالاري، ينتج عنه توسع أسي ($a(t) \propto e^{Ht}$) [1, 2]. يحل هذا مشكلتي الأفق والتسطح ويترك بصمات في الخلفية الكونية الميكروية (CMB). وعلى الرغم من نجاحها، تعتمد $\Lambda$CDM على مكونات تخمينية: جسيم إنفلاتون غير مكتشف، مناظر طبيعية للإمكانات مضبوطة بدقة، وتسامح مع عدم حفظ الطاقة الظاهري بسبب انزياح الفوتونات الأحمر.

أقدم بديلاً مدفوعًا بالإشعاع. يبدأ نموذجي بالتوسع الخطي، ينتقل بشكل طبيعي إلى التضخم الأسي بمجرد أن تهيمن الفوتونات وتنفصل الأفق، ويستمر في العصر المتسارع الحديث. تتميز هذه الإطار بثلاث مبادئ رئيسية:

1. **لا حاجة للإنفلاتون.** ضغط الإشعاع نفسه، مدعومًا بطاقة الانزياح الأحمر، يدفع التضخم.
2. **استعادة حفظ الطاقة.** تُعاد تدوير الطاقة المفقودة من الانزياح الأحمر إلى ضغط الإشعاع، مما يقوم بعمل على الكون المتوسع.
3. **ثبات محلي لـ $c$.** ضمن كل رقعة سببية، يقيس المراقبون نفس سرعة الضوء، بما يتماشى مع افتراضات أينشتاين. على المستوى العالمي، ينشأ الانحسار الفائق السرعة بشكل طبيعي من الانفصال السببي.

## 2. الإطار النظري

### 2.1 التوسع الخطي المبكر ($t = 0$ إلى $t = 10^{20}\, t_P$)

في عصر بلانك (ثانية $t = 1\, t_P = 5.39 \times 10^{-44}$)، يتوسع الكون خطيًا مع معامل المقياس $a(t) \propto t$. حجمه الفعلي هو $R(t) = ct$، وكثافة الطاقة هي بمقياس بلانك:

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

تتحكم معادلة فريدمان في التوسع:

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

مع $H = 1/t$ وانحناء لا يكاد يُذكر. في هذه المرحلة، لا توجد فوتونات، لذا لا يسهم ضغط الإشعاع بعد.

## 2.2 بداية ضغط الإشعاع ($t = 10^{20}\,t_P$)

بحلول $t \sim 10^{20}\,t_P$ (ثانية $\sim 10^{-36}$)، ينتج تكوين الجسيمات فوتونات في بلازما الكوارك-غلوون عند $T$ \$ . يظهر ضغط الإشعاع:

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

مع $a = 7.566 \times 10^{-16}\ \text{كجم}^{-3}\,\text{ك}^{-4}$. ينتج عن هذا لاكس اب $P \sim 10^{92}$. وعلى الرغم من ضخامته، لا تزال الجاذبية تهيمن، ويظل التوسع متباطئًا.

## 2.3 الانفصال السببي وثبات $c$ محليًا ($t = 10^{22}\,t_P$)

عند $t \approx 10^{22}\,t_P$ (ثانية $\sim 10^{-34}$)، يتجاوز نصف قطر الكون أفقه الشبيه بشوارزشيلد:

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

عندما يتجاوز أفق الجسيمات $d_p \approx ct$ نصف القطر $r_s$، تنفصل المناطق سببيًا.

داخل كل رقعة أفق، يقيس المراقبون $c = 3 \times 10^8$ م/ث، بما يتماشى مع تجارب أينشتاين الفكرية للقطار والصاروخ. على المستوى العالمي، تتجاوز سرعات الانحسار $c$، كما في الكوسمولوجيا القياسية. أعبر عن هذا بمعامل:

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

لا يعني ذلك تغيرًا حرفيًا في $c$، بل يشفر محليته. وبالتالي، يظل $c$ ثابتًا لأي مراقب ضمن أفقه السببي، بينما يعكس التوسع الفائق السرعة عالميًا الانفصال، وليس انتهاكًا للنسبية.

## 2.4 إعادة توزيع طاقة الانزياح الأحمر

في $\Lambda$CDM، تتناقص طاقة الفوتونات مع تمدد الأطوال الموجية:

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

يُعزى فقدان الطاقة الظاهري إلى التوسع، دون قانون حفظ عام.

يحل نموذجي هذا التناقض: تُمتص الطاقة المفقودة من الانزياح الأحمر عند الأفق السببي وتُعاد توزيعها إلى ضغط الإشعاع، مما يؤدي فعليًا إلى عمل على المتري:

$$\Delta E_{\text{redshift}} \;\rightarrow\; \Delta P_{\text{radiation}} \cdot V.$$

### 2.4.1 الانزياح الأحمر كعمل على المتري

يحدد مبدأ التكافؤ لأينشتاين الجاذبية مع التسارع. يوفر هذا طريقة ملموسة لرؤية الانزياح الأحمر ليس كتدمير للطاقة، بل كتحويلها إلى عمل حركي.

**تجربة فكرية:** تخيل ليزر أزرق يُطلق للأعلى من سطح كوكب. تتسلق الفوتونات خارج إمكانية الجاذبية وتصل إلى مراقب بعيد بانزياح أحمر. بالنسبة للمراقب، يبدو أن كل فوتون يحمل طاقة أقل. ومع ذلك، عند المصدر، اختبر الليزر كامل طاقة الكتلة للفوتونات المُنبعثة: نقل زخمًا يتماشى مع طاقتها وضغط الإشعاع غير المنزاح.

أين ذهبت الطاقة "المفقودة"؟ لقد استُثمرت في الحقل الثقالي، لأداء العمل اللازم لرفع الفوتونات من البئر الإمكاني.

بالمثل، في الكوسمولوجيا، تفقد الفوتونات المُنبعثة في الأوقات المبكرة طاقتها من خلال الانزياح الأحمر الكوني. محليًا، تعاني المنطقة المُنبعثة من كامل ضغط الإشعاع. لكن عالميًا، لا يُفقد العجز الظاهري؛ بل يتحول إلى **عمل على المتري** - تحديدًا، إلى توسع متسارع.

$$\Delta E_{\text{photon}} \;=\; W_{\text{expansion}}.$$

### 2.4.2 ديناميكا حرارية الأفق وآلية إعادة التوزيع

بناءً على هذا التشبيه، أقترح أن تعمل الأفق السببية كوسيط لطاقة الانزياح الأحمر:

1. **نقل الطاقة.** تتناقص طاقة الفوتونات كـ $E \propto a^{-1}$. بدلاً من التلاشي، تُمتص هذه الطاقة عند أفق الجسيمات أو الحدود السببية الشبيهة بشوارزشيلد.
2. **تخطيط الانزياح الأحمر الثقالي.** مثلما ينقل الانزياح الأحمر الثقالي الطاقة إلى الحقل، ينقل الانزياح الأحمر الكوني الطاقة إلى توسع المتري.
3. **ديناميكا حرارية الأفق.** تمتلك الأفق إنتروبيا ($S \propto A/4$) ودرجة حرارة (جيبونز-هوكينج). تساهم الطاقة المنزاحة إلى إنتروبيا الأفق، ومن خلال إطار جاذبية بادمانابهان الحراري الديناميكي [3]، تظهر مجددًا كضغط يقوم بعمل على التوسع.
4. **تعزيز الضغط.**

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

تعديل معادلة التسارع:

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

مع $\Delta P_{\text{redshift}} > 0$، يتسارع التوسع دون استدعاء إنفلاتون.

#### 2.4.3 الاعتبارات الرسمية

لتأصيل هذه الآلية يتطلب:

- نظرية الحقل الكمومي في الفضاء-الزمان المنحني لوصف تفاعلات الفوتون-الأفق.
- ديناميكا حرارية الأفق (الجاذبية الناشئة لبادمانابهان، إنتروبيا بيكنشتاين-هوكينج) لنمذجة امتصاص الطاقة وإعادة الانبعاث.
- محاكاة عددية لديناميكيات فريدمان المعدلة مع $\Delta P_{\text{redshift}}$.

### 2.5 العصر الحديث

عند $t \approx 2.6 \times 10^{71}\, t_P$ (13.8 مليار سنة)، تكون درجة حرارة الخلفية الكونية الميكروية ك $T = 2.7$، وقد تناقص ضغط الإشعاع إلى لاكس‌اب $P \sim 10^{-31}$. ومع ذلك، تستمر نفس الآلية المتوسطة بالأفق: تستمر طاقة الانزياح الأحمر في تغذية التسارع الكوني، مساهمة في ديناميكيات الوقت المتأخر التي تُعزى عادةً إلى الطاقة المظلمة ($\Omega_\Lambda \approx 0.7$).

## 3. التقدمات المفاهيمية

1. **لا حاجة للإنفلاتون.** ينشأ التضخم بشكل طبيعي من ضغط الإشعاع المعزز بطاقة الانزياح الأحمر، مما يلغي الحاجة إلى حقل سكالاري غير مكتشف.
2. **استعادة حفظ الطاقة.** تُعاد تدوير طاقة الانزياح الأحمر إلى ضغط الإشعاع، مواءمة التوسع مع المبادئ الحرارية الديناميكية.
3. **ثبات محلي لـ $c$.** يظل افتراض أينشتاين صالحًا ضمن الأجزاء السببية، بينما يُفسر الانحسار الفائق السرعة بانفصال الأفق.

## 4. الاختبارات الرصدية والتوقيعات المتوقعة

أقترح ثمانية اختبارات رصدية، كل منها بتوقيعات مميزة يمكن أن تميز هذا النموذج عن $\Lambda$CDM.

### 4.1 التباينات في الخلفية الكونية الميكروية

- **الاختبار:** قياس طيف القدرة للخلفية الكونية الميكروية واستقطاب النمط B بدقة عالية.
- **التوقيع المتوقع:** تعزيز التذبذبات صغيرة النطاق عند المتعددات $l > 1000$، مع استقطاب النمط B القابل للكشف عند $l < 100$ ($r \approx 0.05$–0.1).

### 4.2 كثافة طاقة الإشعاع المتعلقة بالانزياح الأحمر

- **الاختبار:** مراقبة تطور كثافة طاقة الإشعاع $\rho_{\text{radiation}}$ مع الانزياح الأحمر.
- **التوقيع المتوقع:** عند $z > 1100$، يجب أن تنحرف $\rho_{\text{radiation}}$ عن التطور القياسي $\propto a^{-4}$.

### 4.3 خلفية الموجات الثقالية

- **الاختبار:** البحث عن خلفية موجات ثقالية عشوائية من فترة التضخم.
- **التوقيع المتوقع:** ذروة عند زتـره $\sim 10^{-9}$، مع إجهاد مميز $h_c \approx 10^{-15}$.

### 4.4 توتر هابل والتسارع في الوقت المتأخر

- **الاختبار:** قياس ثابت هابل $H_0$ ومعادلة حالة الطاقة المظلمة $w$.
- **التوقيع المتوقع:** سبم/ث/مك $H_0 \approx 70$، مع $w$ بين $-0.8$ و $0$ عند $z < 1$.

### 4.5 الهيكلية على نطاق الأفق

- **الاختبار:** رسم خريطة للهيكلية واسعة النطاق عند 10–100 ميغابارسيك.
- **التوقيع المتوقع:** تعزيز التجمعات وفراغات كبيرة بشكل غير طبيعي.

### 4.6 تغيرات الخطوط الطيفية

- **الاختبار:** تحليل أطياف الانزياح الأحمر العالي.
- **التوقيع المتوقع:** اتساع أو تغيرات طاقة بنسبة 0.1–1% عند $z > 5$.

### 4.7 توقيعات ديناميكا حرارية الأفق

- **الاختبار:** استكشاف الإنتروبيا والتدفق عند الأفق الكونية.
- **التوقيع المتوقع:** نمو إنتروبيا الأفق $\Delta S \sim 10^{120} k_B$.

### 4.8 التخليق النووي البدائي

- **الاختبار:** قياس وفرة العناصر الخفيفة.
- **التوقيع المتوقع:** زيادة بنسبة 1–5% في $^4\text{He}$ ونقصان في الديوتيريوم.

## 5. مقارنة مع $\Lambda$CDM

| الميزة | CDM | النموذج المدفوع بالإشعاع |
|---|---|---|
| محرك التضخم | حقل إنفلاتون سكالاري | ضغط الإشعاع + طاقة الانزياح الأحمر |
| حفظ الطاقة | غير محدد عالميًا | يتم فرضه حراريًا ديناميكيًا عبر الأفق |
| سرعة الضوء | ثابت عالميًا | ثابت محليًا ضمن الأفق |
| مشكلتا الأفق/التسطح | يحلهما الإنفلاتون | يحلهما الإشعاع + الأفق |

| الميزة | $\Lambda$CDM | النموذج المدفوع بالإشعاع |
|---|---|---|
| الطاقة المظلمة | ثابت كوني ($\Lambda$) | استمرار آلية الإشعاع-الانزياح الأحمر |
| تنبؤات الخلفية الكونية | طيف قياسي | تعزيزات صغيرة النطاق، اختلافات محتملة في النمط B |
| توتر هابل | غير محلول | متوسط طبيعي $H_0$ |
| الحالة الرصدية | مدعوم لكنه غير مكتمل | متسق مع البيانات، لم يُفنَد بعد |

## 6. النقاش

يعيد هذا الإطار صياغة التضخم كعملية حرارية ديناميكية متأصلة في الإشعاع، دون الحاجة إلى إنفلاتون تخميني. يوفر آلية لحفظ الطاقة في الفضاء-الزمان المتوسع ويوفق بين افتراضات النسبية المحلية وأفق الكون.

تظل التحديات قائمة. تتطلب ديناميكيات إعادة توزيع طاقة الانزياح الأحمر تطويرًا رياضيًا إضافيًا، وتعد المحاكاة العددية لمعادلات فريدمان المعدلة ضرورية. سيعتمد التمييز الرصدي على المهام المستقبلية (CMB-S4، Euclid، LISA، SKA).

## 7. الخاتمة

أقدم كوسمولوجيا يدفع فيها ضغط الإشعاع، المنظم بالأفق السببية وطاقة الانزياح الأحمر، كلاً من التضخم والتوسع الحالي. يلغي هذا النموذج الحاجة إلى إنفلاتون افتراضي، ويعيد الاتساق الحراري الديناميكي، ويوفق بين ثبات أينشتاين المحلي لـ $c$ والتوسع الفائق السرعة الكوني. تتوافق البيانات الحالية مع $\Lambda$CDM، لكن الاختبارات الرصدية المقترحة توفر مسارًا للتحقق أو التفنيد.

## المراجع


[1] تعاون بلانك، **نتائج بلانك 2018. VI. المعلمات الكونية،** Astron. Astrophys. 641, A6 (2020). [2] جوث، أ. هـ.، **الكون التضخمي،** Phys. Rev. D 23, 347 (1981). [3] بادمانابهان، ت.، **الجوانب الحرارية الديناميكية للجاذبية: رؤى جديدة،** Rep. Prog. Phys. 73, 046901 (2010). [4] تعاون BICEP2/Keck، **تحسين القيود على الأمواج الثقالية البدائية،** Phys. Rev. Lett. 121, 221301 (2018).