التضخم الكوني

محمود الحلّاق

جامعة العين، الإمارات العربيّة المتّحدة

يعرض المقالُ دراسةً على المستويين التقليدي والكمومي لنموذجَ التضخم الكوني. نستعرض بدايةً مشاكل الانفجار العظيم، وكيفيّة حلّها عبر فكرة التضخم، ثم نتحدث عن تقريب التدحرج البطيء، قبل الانتقال لمعالجة النموذج التضخمي كموميًّا بشكلٍ وجيز، من خلال تناول الاضطرابات الكونية الناجمة عن التأرجحات الكمومية لحقل التضخم أثناء مرحلة التدحرج البطيء، والتي ستنعكس كاضطرابات في كلّ من المادة والمتريّة في الكون، تتحوّل بدورها إلى منبع للتجمّعات المادية.

1) المسائل والمشاكل الأساسية في نظرية الانفجار العظيم

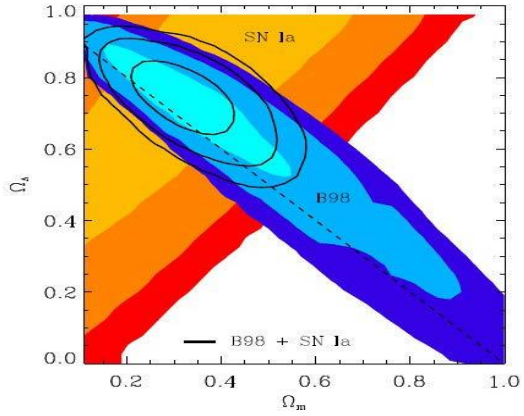
قدّمت نظرية الانفجار العظيم التفسير الصحيح للعديد من المسائل الكونية العالقة، ولعلّ أهمّها إيضاح سبب الوفرة الحالية لعناصر مثل الهيدروجين والهليوم وعناصر أخرى في الكون، كما أنّ اكتشاف بنزياس وويلسون من مختبرات بِل عام 1965 لإشعاعات الخلفية الميكروية "كمُخلّفات بدئية للانفجار العظيم ما زالت تحيط بنا" توافقت وبشكل كبير مع تنبؤات النظرية، التي تفيد بأنّ درجة حرارة الكون تناقصت تدريجياً مع تمدّده، لتصل حالياً إلى **2.7 K**، وهو ما تؤكّده البيانات التجريبية لبعض المهامّ والإرساليّات الرصديّة مثل **COBE** و **Wmap** وغيرها.

على الرّغم من النجاحات التي أبدتها نظرية الانفجار العظيم، إلا أنّها تعاني من مشاكل لم يتمّ التمكّن من حلّها ضمن إطار النظرية ذاتها، نذكر منها:

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

1-1) مسألة الاستواء

تشير الأرصاد الحالية إلى أنّ كونَنا ذو هندسة مستوية لدرجة كبيرة وبكثافة كونية كليّة مساوية تقريباً للكثافة الحرجة للكون. إلا أنّ هذه النتيجة التجريبية بعيدة عمّا تتوقّعه النظرية، التي تتنبأ بحالة من عدم الاستقرار لهذا الكون المستوي، فأيُّ انحراف عن حالة الاستواء سوف يؤدي إمّا إلى كون مغلق، ينهار على نفسه آنياً، و إمّا أن يؤدي إلى كون مفتوح يتبرّد إلى ما دون **3K** خلال الثّانية الأولى من وجوده.



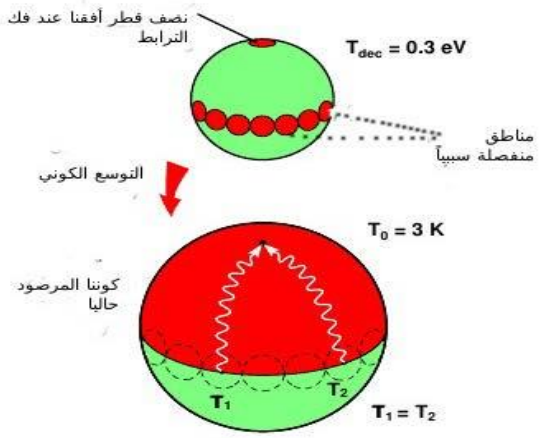
الشكل 1: يمثل المحور الشاقولي قيم وسيط كثافة الثابت الكوني، بينما يمثّل المحور الأفقي قيمَ وسيط كثافة المادة العادية. توافق المنحنيات المغلقة الثلاثة مستوياتِ ثقةٍ **σ-3-2-1**. يوضح المستقيم المتقطع إلى أن مجموع الوسيطين في الوقت الراهِن مساوٍ إلى الواحد تقريبًا، ما يشير إلى كونٍ مستوٍ.

بالنظر للمسألة بشكل معاكس، ينبغي للحصول على القيمة الراهنة للكثافة أن تكون قيمتها عند فترة "إعادة الاتحاد **recombination**" قريبةً من الكثافة الحرجة لدرجة 4 من مائة ألف، بينما يجب عليها أن تكون عند فترة التخليق النووي قريبة من الكثافة الحرجة ولغاية 1 من أصل تريليون!

يطرح هذا الأمر سؤالاً مهماً دون إجابة واضحة: كيف يمكن للكون أن يكون مستوياً لهذه الدرجة العالية في اللحظات الأولى من خلقه؟

2-1) مسألة الأفق

يتناسب الأفقُ الذي يمثّل المسافةَ العظمى التي يمكن للضّوء أن يقطعها منذ تشكّل الكون مع مقلوب ثابت هَبِل، أي طردًا مع الزمن. يبلغ الأفق بضع ثوان ضوئية عند بداية مرحلة التخليق النووي، بينما يبلغ بسبب التناسب الطردي المذكور بضعَ دقائق ضوئية عند نهايتها، وفي الوقت ذاته يتناسب معامل مقاس الكون خلال هذه المرحلة حيث يهيمن الإشعاع على المادّة مع الجذر التربيعي للزمن، فيكون أكبرَ من الأفق، ما يعني أنّ الكون كان يتألف من مناطق لم تتواصل سببيّاً فيما بينها أبداً.



الشكل 2: مسألة الأفق التي تمثّل المشكلة الأكثر إشكاليّة في نموذج الانفجار الكبير، وتتمثل في عدم القدرة على تفسير التجانس المتناحي لأشعة الخلفية الميكروية، فعند زمن انطلاق هذه الأشعة، كان الكونُ الذي تمدّد ليغدو كونَنا المرصودَ حاليًّا مُكوَّنا من عدد كبير من مناطقَ غيرِ مترابطةٍ سببيًّا توافق – عند رصدها اليوم– مسافاتٍ فاصلةً زاويّةً أكبر من 1 درجة، بينما ما نرصده اليوم لفوتونات قادمة من هذه المناطق يوافق طيفَ إشعاعِ جسم أسود متجانس ومتناحٍ.

وبالتالي، تكون أشعة الخلفية الميكروية قد أتت من مناطق منفصلة عن بعضها البعض بما يتجاوز مقدارَ الأفق عند السطح الأخير للتبعثر –الموافق لنطاقٍ زاوي حوالي **1°** في رصدنا الحالي– الأمر الذي يعني عدم تمكّنها من التآثر قبل رصدها حاليًّا، إلّا أن الأرصاد الراهنة لهذه الأشعّة تُظهر تجانساً و تناحيًا كبيرَين للأشعة القادمة

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

من هذه المناطق المنفصلة سببيّاً عند رصد السماء ضمن نطاقات أكبر من 1 درجة، وبالتالي تعجز النظرية عن شرح سبب تساوي درجة الحرارة لأشعة الخلفية الميكروية.

1-3) مسألة التجانس والتناحي

تتوزع المادة في الكون على المقياس الكبير بشكل منتظمٍ لافتٍ للنظر، فعبر أكثر من 10 بلايين سنةٍ ضوئيَّةٍ يحيد توزُّع المادَّة عن التَّجانس التَّام بأقلَّ من جزءٍ من 10000. لوقتٍ طويل، لم يكن لدى أحد فكرة عن سبب هذا التجانس، وعلى الرغم من أن أحد الأركان الاساسية لعلم الكونيّات هو المبدأ الكوني الذي ينص على وجوب تجانس الكون، إلا أن هذه الفرضية لا تساعد كثيراً، إذ يحتوي الكون على انحرافات كبيرة عن مبدأ التجانس بما يحويه من عناقيد مجرية ومجرات وغير ذلك من التجمّعات المادية.

نحن بحاجة إذن إلى نظرية تعمل على إيضاح سبب انتظام الكون على المقياس الكبير من جهة وأن تفسِّر في الوقت ذاته الآليةَ التي تؤدي إلى تشكل المجرات والتجمعات المادية من جهة أخرى، وهذا ما لا توفره نظرية الانفجار الكبير.

1-4) مسألة المُخلَّفات الكونية البدئية الغير منشودة

عند دمج نظرية الانفجار الكبير مع نظريات التوحيد الكبير في فيزياء الجسيمات، تظهر مُخلَّفات كونية غير مرغوب بها عند بداية الكون، من حيث أنها لا بدّ وأن تكون موجودة في وقتنا الحاضر، بما يخالف التجارب، ويتعارض مع الأرصاد الحالية للكون من حولنا، إذ يفترض التسليم بوجودها مثلا كثافةً للكون أكبر من الكثافة الحالية المرصودة.

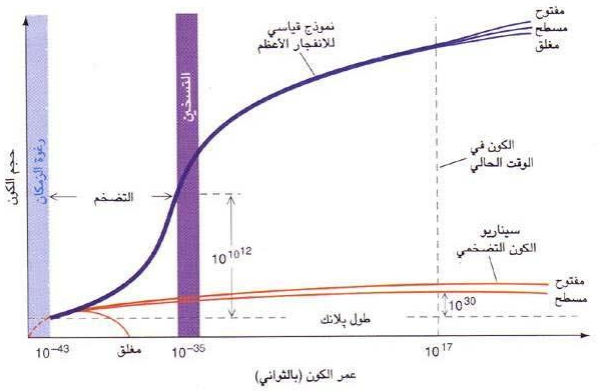
لعلّ أكثر هذه المخلفات إشكاليةً هي جسيمات الغرافيتينو **gravitino** التي تتنبأ بها نظريات الثقالة الكمومية فائقة التناظر، كمرافقاتٍ بسبين **3/2** لجسيمات الغرافيتون حامِل القوى الثقالية. يمتلك الغرافيتينو في معظم نماذج الثقالة الكموميّة كتلةً تصل إلى **100 GeV**، وبوجود مثل هذه الجسيمات تغدو مرحلة تخليق النوى متقلقةً بسبب نواتج تحلّل الغرافيتينو التي يمكن أن تؤثّر على سيناريو التخليق النووي.

علاوةً على ذلك، تتنبّأ نظرياتُ التوحيد الكبير أيضًا بإنتاج أحاديات قطب مغناطيسيّة عند كسر تناظر النظريّة آنيًّا، وبوفرة أكبر بكثير ممّا تسمح به نتائج الرصد، حيث تقارب قيمُها وفقًا لنموذج الانفجار الكبير مقاديرَ البروتونات، ما يعطي كثافةً للكون أكبر بنحو 15 مرّة من قيمتها المرصودة حالياً.

2) التضخم الكوني

اقترح غوث 1981 لحلِّ مشاكل الانفجار العظيم فكرةَ التَّضخم الكوني، كمرحلةٍ حدثت في وقتٍ مبكِّر جداً من عمر الكون، تتمثَّل بتمددٍ متسارعٍ "أسِّيّ" للكون في لحظاته الأولى، وعلى الرَّغم من أن فترة التَّضخم استمرت وفقاً لبعض النَّماذج التَّضخُّميَّة زمنًا لا يتجاوز 10^{-35} **s**، إلّا أن مقاس الكون الذي كان من رتبة طول بلانك (10^{-33} **cm**) عند بدء التضخّم أضحى بعده كبيرًا بمقدارٍ لا يمكن تصديقه، فوفق بعض النَّماذج التَّضخميَّة أمكن له بلوغ $10^{10^{12}}$ cm، وهذا أكبر بكثيرٍ جداً من مقاس الجزء المرصود من الكون والذي يبلغ حوالي 10^{28} **cm**، وهذا هو السَّبب الذي يُبطِل الحاجةَ إلى بدء جميع أجزاء الكون بالتَّمدد في اللحظة نفسها، إذ أن منطقةً واحدةً بأصغر مقاسٍ ممكن (طول بلانك) أكثرُ من كافية لكي تُخرِجَ جميعَ ما نراه الآن.

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء



الشكل 3: يختلف نشوء الكون في سيناريو التضخم عنه في نظرية الانفجار العظيم الدارجة. يتسبّب التضخمُ بزيادة حجم الكون بمقدارٍ كبير لدرجة أن الأجزاء الصغيرة التي لا يتجاوز مقاسُها طولَ بلانك تكبر متجاوزةً نصف قطر الكون المرئي، بخلاف نموذج الانفجار الكبير حيث تبلغ رتبة السنتيمتر فقط. يتنبأ التَّضخم أيضاً بأنَّ الكون يكون غالبًا مُسطَّحًا بحيث تبقى الخطوط المتوازية فيه متوازيةً، بخلاف الكون المغلق (المفتوح) حيث تتقاطع (تتباعد).

2-1) حلّ مسائل الانفجار الكبير

يسمح النُّمو المفاجئ والهائل للكون بحلِّ معظم مشاكل نموذج الانفجار العظيم، إذ يغدو الكونُ الناجمُ عن التضخّم منتظماً، بسبب تمدّدِ جميع ما فيه من أنماطِ عدمِ تّجانسٍ بمقدارٍ كبير، ما يُخفِّض بدرجةٍ هائلة كثافةَ المخلَّفات غير المرغوب بها. كما أن الكون أضحى نتيجة التَّوسُّع التَّضخُّميّ الهائل كبيراً جداً لدرجة أنَّه لا يمكننا معها رؤيةُ إلاّ جُزءٍ ضئيلٍ جداً منه، ولذلك فإنَّ الجزء الذي نعيش فيه يبدو منبسطاً، تماماً كما يبدو السطحُ الصَّغير من الأرض الكروية مستويًا.

2-1-1) حل مسألة الاستواء

يمكن حل مشكلة الاستواء من خلال التضخم الكوني، حيث يؤدي التوسع المتسارع إلى تسطيح الكون بشكل كبير، وذلك من خلال تقليل قيمة مقلوب عامل المقاس المضروب بثابت هبل، ممّا يؤدي إلى اقتراب قيمة وسيط الكثافة من الواحد.

يمكن تبيان ذلك من خلال معادلة تطور وسيط الكثافة مع الزمن، حيث نجد أن قيمة وسيط الكثافة تقترب من الواحد بشكل كبير خلال مرحلة التضخم، وذلك بسبب التوسع المتسارع للكون.

2-1-2) حل مسألة الأفق

يمكن حل مسألة الأفق من خلال التضخم الكوني، حيث يؤدي التوسع المتسارع إلى زيادة المسافة الفيزيائية بين النقاط بشكل كبير، وبالتالي يمكن للمناطق التي كانت متصلة سببياً قبل مرحلة التضخم أن تصبح منفصلة سببيّاً بعد مرحلة التضخم.

يمكن تبيان ذلك من خلال حساب الأفق الجسيمي، حيث نجد أنه يتناقص نسبيًّا خلال مرحلة التضخم، فبالرغم من تناسبه مع سرعة الضوء تعريفًا، ولكن ازديادَه مهملٌ تمامًا أمام اتّساع عامل المقاس بسرعات فوق ضوئيّة، وبالتالي ما يبدو لنا بعيدًا جدًا عن بعضه البعض اليوم كان قريبًا من بعضه قبل التضخّم بحيث أمكنه حينها التآثر وتحقيق التجانس.

2-1-3) حل مسألة التجانس والتناحي

يمكن حل مسألة التجانس والتناحي من خلال التضخم الكوني، حيث يؤدي التوسع المتسارع إلى تجانس الكون بشكل كبير، وذلك من خلال تمديد المناطق المتجانسة بشكل كبير، وبالتالي يمكن للمناطق التي كانت متجانسة قبل مرحلة التضخم أن تصبح متجانسة على مقياس أكبر بعد مرحلة التضخم. يمكن تبيان ذلك من خلال حساب المسافة الفيزيائية بين النقاط، حيث نجد أن هذه المسافات تزداد بشكل كبير خلال التضخم.

2-1-4) حل مسألة المخلفات الكونية البدئية

يمكن حل مسألة المخلّفات الكونية البدئية من خلال التضخم الكوني، حيث يؤدي التوسع المتسارع إلى تخفيف تركيز هذه المخلّفات بشكل كبير، وذلك من خلال الزيادة الهائلة في حجم الكون ما يقتضي تناقصًا كبيرًا في كثافتها.

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

2-1-5) حل مسألة تشكّل المجرّات

لعلَّ السُّؤال الذي يطرح نفسه هنا هو: إذا انبسطت جميع اللاتجانسات بفعل التَّضخم، فكيف تكوّنت المجرَّات والتَّجمعات المادّية التي نرصدها من حولنا؟

تكمن الإجابة في أنه أثناء إزالة اللاتجانسات الموجودة، فإن النموذج التضخمي يولّد في الوقت ذاتِه لاتجانساتٍ جديدةً تنشأ عن التأثيرات الكمومية، فوفقاً للميكانيك الكمومي يكون الفراغ مملوءاً بتموُّجاتٍ كموميَّةٍ صغيرة يمكن اعتبارها تموُّجاتٍ في الحقول الفيزيائيَّة. لهذه التَّموُّجات أطوال موجيَّة متنوّعة، وهي تتحرَّك في جميع الاتجاهات، إلا أنَّه ليس بالإمكان كشفها بسبب طبيعتها المجهريّة وزمن حياتها قصيرة الأمد.

تؤدّي فترة التَّضخُّم إلى مطِّ هذه الموجات بسرعة، وما إن تصبح أطوالها الموجية كافية، حتى تستشعر انحناءَ الكون فتحدث عمليةُ تجميدٍ **freezing** لهذه الأطوال الموجية عندما تزيد أطوالها عن مقاس الأفق. في الواقِع إذا اعتبرنا تراوحًا كموميًّا بطول موجة ابتدائي $\boldsymbol{a\lambda \sim \frac{a}{k}}$ أصغر من الأفق أو نصف قطر هبِل $\boldsymbol{(1/H)}$، فعندها تقارب معادلةُ حركته تلك التي لهزّازٍ توافقي، ما يعني أن التراوح سوف يهتزّ لغاية أن يغدو طول موجته أكبر من الأفق، فينجم حينها عن معادلة حركته ثباتٌ في مقداره، فنقول إنه "تجمّد"، وأضحى تراوحًا كلاسيكيًّا.

يؤدي إذن تجميد الأطوال الموجيَّة إلى ثبات التَّموُّجات المُمثِّلة للّاتجانسات الكونية دون حركةٍ أو تلاشٍ، ما يؤدّي بدوره إلى زيادة قيمة الحقل السلَّمي المسؤول عن التضخّم الذي يملأ الخلاء في بعض المناطق وتخفيضها في مناطق أخرى، وبذلك تُخلَق اضطراباتٌ في كثافة الكون، ما يؤدّي لاحقًا إلى تشكيل المجرَّات.

3) حقل المُضخِّم (الإنفلاتون)

يمكن تحقيق التضخّم من خلال حقلٍ سلمي يدعى الإنفلاتون أو المُضخِّم **inflaton field**، يصف جسيماتٍ بسبين معدوم ذات خواصّ غير اعتياديَّة تتمثَّل بالضَّغط السَّالب. على الرَّغم من عدم وجود رصدٍ مباشر لمثل هذه الجُسيمات إلا أنَّها مُكوِّن أساسيٌّ في نظريات فيزياء الجسيمات الأولية، تمّ اقتراحها قبل أن يلجَ علمُ الكون هذا البابَ بكثير، فهي تلعب دوراً أساسياً في كسر التناظر بين القوى الأساسية في نظريات التوحيد الكبير، من مثل جسيم هيغز الذي تمّ اكتشافُه تجريبيًّا عام 2012. يتميّز الإنفلانتون بكمون **V** ذي قيمة كبيرة وثابتة تقريباً خلال مرحلة التضخم، ممّا يؤدي إلى تحقيق شرط التوسّع المتسارِع.

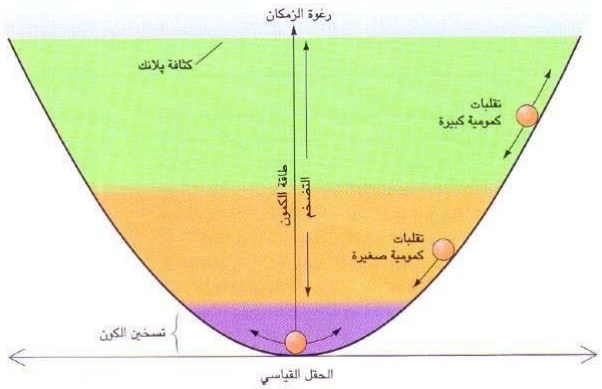
3-1) خصائص الإنفلاتون

تعطى كثافة الطَّاقة لحقلٍ سلَّميٍ $\boldsymbol{\phi}$ متجانسٍ كمجموع حدَّين يعبِّر أولهما (ثانيهما) عن الطاقة الحركية (الكامنة)، بينما يُعطى الضغط كحاصل طرح هذَين الحدَّين، ويمكن الوصول لمعادلة حركة الإنفلاتون بالشكل (**H** هو ثابت هَبِل، وتعني النقطة اشتقاقًا بالنسبة للزمن):

$$\boldsymbol{(1)\ \ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -\frac{dV}{d\phi}}$$

تُظهر المعادلة الأخيرة تشابهاً واضحاً مع معادلة الحركة لكرةٍ تتدحرج على جدار إناءٍ كبيرٍ نحو قاع الإناء الذي يمثِّل القيمة الصُّغرى للطَّاقة، بينما يقابل موضعُ الكرة قيمةَ الحقل السلَّمي. يمثِّل الحدُّ الثَّاني من معادلة الحركة حدَّ احتكاكٍ أو لزوجة، حيث تماثل هذه الحالة وضعَ سائلٍ لزجٍ في الإناء، تقابل لزوجتُه طاقةَ الحقل، إذ كلَّما ازداد ارتفاع الكرة في الإناء غلظ قوام السَّائل، ومن ثمَّ فإذا كان الحقل كبيراً جداً في البداية فإن الطاقة تنخفض ببطء.

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء



الشكل 4: يمكن نمذجة الحقل القياسي في كون تضخمي بكرة تتدحرج على السطح الداخلي لوعاء ، فحافة الوعاء تقابل كثافة بلانك للكون، وتعلوها «رغوة» الزمكان، وهي منطقة تقلبات كمومية قوية، بينما تكون التقلبات في المنطقة أسفل الحافة (الخضراء) أضعف، ولكن يحتمل أنها مازالت تكفُل التجدّد الذاتي للكون، وإذا بقيت الكرة في الوعاء، فإنها تتحرك نحو المنطقة الأقل طاقة (البرتقالية) حيث تنزلق إلى الأسفل ببطء شديد. وينتهي التضخم بمجرد أن تقترب الكرة من القيمة الصغرى للطاقة (اللون الأرجواني) حيث تتذبذب حولها وترفع درجة حرارة الكون.

3-2) تقريب التدحرج البطيء

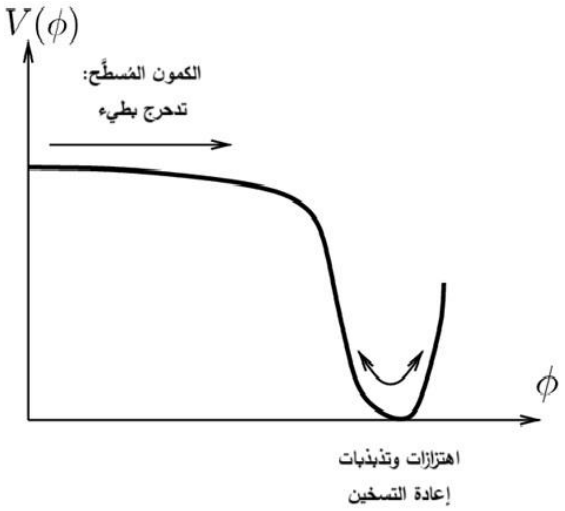
يمثِّل تقريب التَّدحرج البطيء **Slow-roll approximation** التِّقنيَّة الأساسيَّة لدى دراسة التَّضخُّم الكوني، ويتمثَّل بفرض هيمنة الطاقة الكامنة على الطاقة الحركيَّة للحقل السلَّمي، ما يشابه تدحرجاً بطيئاً للكرة ضمن السَّائل في الإناء، فيتدحرج الإنفلاتون ببطء نحو القيمة الصغرى للكمون، وخلال هذه العملية يحدث التضخم الكوني.

3-2-1) شروط التحرج البطيء

هناك شرطان أساسيان لتحقيق تقريب التدحرج البطيء، وهما:

1. يجب أن يكون الكمون مسطحاً بشكل كافٍ، بحيث يكون مشتق الكمون صغيراً بالنسبة للكمون نفسه (معامل التدحرج الأوّل).
2. يجب أن يكون المشتق الثاني للكمون صغيراً بالنسبة للكمون نفسه (معامِل التدحرج الثاني).

إذن، لتحقيق هيمنةِ الطاقة الكامنة يجب أن تكون قيمُ معاملات التدحرج البطيء صغيرة بالنسبة للواحد.



الشكل 5: يتدحرج الإنفلاتون ببطء على الجزء المُسطَّح من الكمون حيث يبقى ثابت هَبِل ثابتًا عندها ويتضخّم الكون أسّيًّا. ينتهي التضخّم عند هبوط الإنفلاتون إلى موضع قاع الكمون واهتزازه حوله مُطلقًا طاقتَه الكامنة على شكل جسيمات وحرارة تُفيد في رفع درجة حرارة الكون (مرحلة إعادة التسخين).

3-2-2) معادلات التدحرج البطيء

يمكن تبسيط معادلة الحركة للحقل السلمي باستخدام تقريب التدحرج البطيء، حيث نهمل الحد الثاني من المعادلة (1) فنحصل على $3H\dot{\phi} \approx -\frac{dV}{d\phi}$ ويكون ثابتُ هَبِل ثابتًا تقريبًا $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2 \approx \frac{V}{3}$، ما يعطي توسّعًا أسيّا لمقاس الكون $a(t) \propto e^{Ht}$.

3-2-3) إعادة التسخين

من خلال حساب معادلات الحركة، نجد أن الإنفلاتون في النهاية سوف يهبط إلى موضع قعر الكمون، حيث يبدأ بالتذبذب حول القيمة الصغرى للكمون، وخلال هذه العملية يتحول جزء من طاقته إلى جسيمات أولية، وحرارة تؤدي إلى تسخين الكون وعودة إلى مرحلة الانفجار العظيم.

4) الاضطرابات الكونيّة: البذور الأولى للبنى الكونيّة

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

تعتبر الاضطرابات الكونية من أهم نتائج نظرية التضخم الكوني، حيث تنشأ هذه الاضطرابات من تأرجحات وتقلّبات كمومية لحقل الإنفلاتون تضخّمت أثناء مرحلة التضخم، ثمّ تحوّلت بعده إلى اضطرابات في كثافة المادة والإشعاع وفي المتريّة، أدّت لاحقًا إلى تشكل المجرات والبنى الكونية الكبيرة.

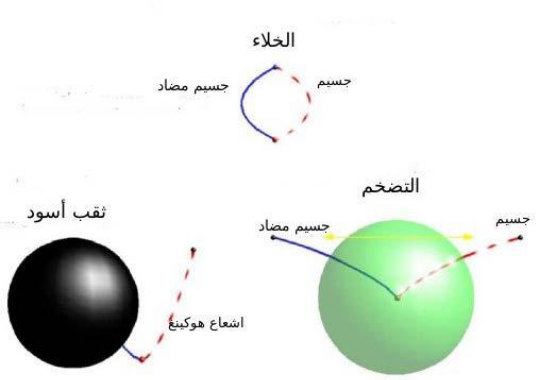
يمكن تبيان ذلك من خلال حساب طيف استطاعة الاضطرابات الكونية، حيث نجده تقريباً ثابتاً على المقاييس الكبيرة، وهذا ما تؤكده الأرصاد الحالية لأشعة الخلفية الميكروية.

4-1) أصل الاضطرابات

خلال التضخم الكوني، أدت التقلبات الكمومية في حقل التضخم (الإنفلاتون) إلى ظهور اضطرابات في كثافة الطاقة. يمكن تشبيه هذه العملية بـ:

- ظهور أزواج من الجسيمات الافتراضية
- انفصال هذه الأزواج بسبب التمدد الكوني السريع
- تجمُّد هذه الاضطرابات عند تجاوز حجم الأفق الكوني (أو مقلوب ثابت هَبِل)

في الواقِع، تمَّ العمل على فكرة التَّأرجحات الكموميَّة و بشكلٍ مستقلٍ وضمن مجالاتٍ مختلفةٍ من قبل كلّ من ستاروبينسكي، وهوكينغ، وغوث. تحدّث ستاروبينسكي عن تأرجحات كموميَّة في فضاء منكوفسكي، تقابل عمليّاتِ خلقٍ وفناءٍ آنيَّين لجسيماتٍ افتراضيَّة في الفضاء، وفق مبدأ الارتياب لهايزنبرغ. أمَّا هوكينغ فقد تحدَّث عن تشكُّل هذه الأزواج قرب أفق الحدث لثقبٍ أسود، حيث يقع أحد عنصرَي الزوج الافتراضي في شرك أفق الثقب تاركاً الجُسيمَ الآخر ليفلت بعيداً في الفضاء كإشعاعٍ حراريٍّ يعرف بإشعاع هوكينغ. بيّن غوث حدوثَ آليَّةٍ مشابهة في حالة التَّضخُّم الكوني حيث يسبّب التَّوسُّع السَّريع جداً للكون ارتدادَ عنصرَي زوج الجُسيمين الافتراضيَّين عن بعضهما البعض بفضل المطِّ الهائل للزَّمكان، لينفصل الجسيمان عن بعضهما ويغدوا واقعَين في مناطق غير متصلة سببيًّا، وبالتالي ليس بالإمكان أن يجدا بعضهما البعض، وبهذا الشكل تصبح التأرجحاتُ الكمومية ذاتَ نمطٍ كلاسيكي للحقل. يوضح الشكل 6 مقارنةً بين الحالات الثلاث آنفة الذكر.



الشكل 6: تشكُّل جسيمات افتراضية في فضاء منكوفسكي (علاقات الارتياب لهايزنبرغ) وبالقرب من أفق الحدث لثقبٍ أسودٍ (إشعاع هوكنغ) وفي فضاءٍ يعاني تضخماً كونياً

4-2) نموذج رياضي بسيط

نقسم حقل الإنفلاتون السُّلمي $\boldsymbol{\phi(x,t)}$ إلى جزأَين: أولهما $\boldsymbol{\phi(t)}$ هو الجزء المتجانس غير المضطرب وثانيهما $\boldsymbol{\delta\phi(x,t)}$ الاضطراب:

$$\boldsymbol{\phi(x,t) = \phi(t) + \delta\phi(x,t)}$$

فيخضع الاضطراب لمعادلة مماثلة للمعادلة (1):

$$\boldsymbol{\delta\ddot{\phi} + 3H\delta\dot{\phi} - \nabla^2\delta\phi = -V''\delta\phi} \quad (2)$$

فإذا حلّلنا الاضطراب $\boldsymbol{\delta\phi}$ إلى مركّبات فوريه $\boldsymbol{\delta\phi_k}$ الموافقة فإننا نجد أثناء التدحرج البطيء مع إهمال المشتق الثاني للكمون أن مركّبة فوريه تخضع للمعادلة:

$$\boldsymbol{\delta\ddot{\phi}_k + 3H\delta\dot{\phi}_k - (\frac{k}{a})^2\delta\phi_k = 0} \quad (3)$$

وبالتالي هناك سيناريوهان ($\boldsymbol{\lambda}$ هو الطول الموجي وفق الإحداثيّات الموافقة للحركة **comoving**، بينما $\boldsymbol{a\lambda}$ هو الطول الموجي الفيزيائي):

4-2-1) دون الأفق: $\boldsymbol{a\lambda = a\frac{2\pi}{k} < \frac{2\pi}{H}}$

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

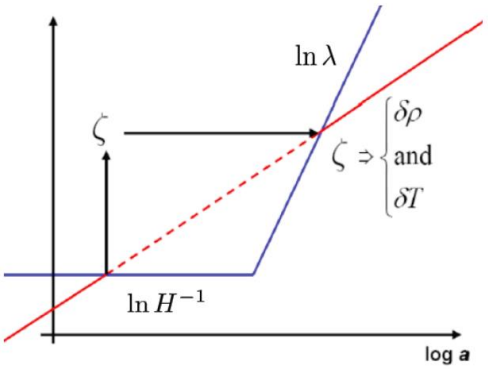
يُهمَل الحد الثاني أمام الحدّ الثالث في الطرف اليسار من المعادلة (3)، فنحصل على معادلةِ هزّاز توافقي، ما يعني أن الأنماط الموافقة تهتزّ داخل الأفق.

4-2-2) فوق الأفق: $a\lambda = a\frac{2\pi}{k} > \frac{2\pi}{H}$

يُهمَل الحد الثالث أمام الحدّ الثاني في الطرف اليسار من المعادلة (3)، فنحصل على معادلة حلّها ثابت، أي أن تأرجحات الإنفلاتون ثابتة على مقاساتٍ أكبر من الأفق، فنقول إنها "تجمّدت".

4-3) مصير الاضطرابات – اضطرابات الانحناء

يضمحلّ حقل الإنفلاتون عند نهاية فترة التَّضخم، وبالتَّالي تفقد تأرجحاته معناها، لذلك لا نستخدم عادةً اضطرابات الإنفلاتون بشكلٍ مباشرٍ، بل ندرس التأرجحات المتحرِّضة في متريّة الزَّمكان، أو بشكلٍ أكثر تحديداً نهتم بدراسة اضطرابات الانحناء الموافقة للحركة **comoving curvature perturbations** التي تتميّز كاضطرابات الإنفلاتون بثباتها عند تقاطعها مع مقاس الأفق، وبقائها معرَّفةً بشكلٍ جيّد بعد زوال الإنفلاتون. تمثِّل اضطرابات الانحناء أداةً فعَّالة للرَّبط ما بين اضطرابات فوق الأفق خلال التَّضخم و الاضطرابات في مرحلة هيمنة الإشعاع المبكِّرة –دون القلق بشأن جهلنا لتفاصيل مرحلة إعادة التسخين– التي ستغدو بذورًا لنمو المجرّات والعناقيد المجريّة. في الواقع، وحيث أن الثقالة الجاذبيّة تتآثر مع مجمل مكوّنات الكون، فإن اضطرابات الإنفلاتون سوف تقتضي اضطراباتٍ في المتريّة يمكن تخيّلها ككمون ثقالي جاذبيّ). أثناء فترة التضخّم سرعان ما "تتقاطع" هذه الاضطرابات مع الأفق فـ "تخرج منه" – أي يتجاوزه طولُها الموجي– وتغدو كلاسيكيّة متجمّدة، ولكنها بعد التضخّم فإنها سوف "تعود وتلج" الأفق –أي يتجاوزها الأفقُ– وعندها تبعًا لمعادلة بواسون فإن هذا الكمون الثقالي الجاذبيّ سوف يولّد كثافةً طاقيّة لمادّة أو إشعاع.



الشكل 7: خروج الأطوال الموجيّة من الأفق أثناء التضخّم، ثم العودة والدخول ضمنه بعد التضخّم [1].

4-3-1) اختيار المعيار Gauge Choice

لعلّ الأمر الأكثر إرباكاً لدى دراسة التّأرجحات الكونية، يكمن في حقيقة أنّ التقسيم إلى جزءٍ متجانس وآخر مضطرب ليس وحيداً، بل يعتمد على اختيار الإحداثيات (المعيار). عند تعريف جملة إحداثياتٍ محدَّدةٍ لدراسة اللاتجانسات الكونيَّة فإنَّه من الممكن أن نُعرِّف ضمنيًّا اضطراباتٍ زائفةً (خيالية) لا تنبع عن تأرجحاتٍ فيزيائيَّة حقيقية، وإنَّما تنبع من تثبيتنا لجملة الإحداثيات. لحلِّ هذا الالتباس بين الاضطِّرابات الحقيقيَّة والاضطرابات التَّخيُّليَّة في النَّظريَّة النّسبيّة العامّة، فإنَّنا بحاجة في معادلات آينشتاين إلى اعتبار جملة الاضطرابات بكلا نوعَيها: الاضطرابات في كثافة المادَّة والاضطرابات في المتريَّة، ومن خلال اختيار معيارٍ مناسبٍ يتوافق و الحالة المدروسة نستطيع أن نساوم **trade** أحدهما مقابل الآخر.

من المفيد أيضاً دراسة تركيبات الاضطراب الخطيّة الصامدة معياريًّا، حيث أن هذه التركيبات لا يمكن إزالتها من خلال التَّحويلات الإحداثية.

4-3-2) الاضطرابات السلّميّة scalar

تنشأ الاضطرابات السلمية من التأرجحات الكمومية للجزء السلّمي من حقل الإنفلاتون، وتتحول إلى

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

اضطرابات في كثافة المادة والإشعاع بعد التضخم، يكون طيفُ استطاعتها ثابتاً على المقاييس الكبيرة، وهذا ما تؤكده الأرصاد الحالية. تؤدّي هذه الاضطرابات إلى نموِّ بعض المناطق لتغدو أكثرَ كثافةً من مناطق أخرى، و بالتَّالي فإنَّها تفسِّر تشكُّل البنى المادِّية في الكون (مجرّات وعناقيد) انطلاقًا من اضطراباتٍ بدئيَّةٍ صغيرةٍ.

4-3-3) الاضطرابات التنسورية (الموتّريّة)

تنشأ الاضطرابات التنسورية من التأرجحات الكمومية للجزء التنسوري من حقل الإنفلاتون، وتتحول إلى موجات ثقاليّة جاذبيّة أوليّة بعد التضخم، ويكون طيفُ استطاعتها ثابتاً على المقاييس الكبيرة، وهذا ما تؤكده الأرصاد الحالية للموجات الثقاليّة البدئيّة. إن كانت هذه الاضطرابات قوية كفاية، فإنَّها ذات أثرٍ يمكن رصده، وذلك من خلال تأثيرها على اللاتناحي في إشعاع الخلفيّة الكونيّة.

4-4) طيف الاستطاعة Power spectrum

إنه بصمة التضخم على الكون، فهو مقدار قابل للقياس يمثل توزيع الاضطرابات حسب تواتراتها، ويعبّر عن تحويل فوريه لدالّة ترابط **correlation function** المقدار قيد الدراسة (أي قيمة توقّع الخلاء لدالّة الترابط الذاتي عند نقطتَين).

4-4-1) طيف الاستطاعة بالنسبة للاضطرابات السلّمية والتنسوريّة

على المقاسات الكبيرة، تتنافس الثقالة الجاذبيّة مع التمدّد الكوني، فتنمو البنى الكونيّة بحيث يكون حقل كثافة الاضطراب غوصيًّا، أي تسلك مكوّناتُه التواتريّة سلوكًا مستقلًّا عن بعضها البعض، وبالتالي يكفي طيفُ الاستطاعة لتوصيف الحقل تمامًا.

بالنسبة للاضطرابات السلّميّة المسؤولة عن تشكيل البنى الكونيّة، فإن طيف الاستطاعة يكون متناسبًا مع العدد الموجي مرفوعًا إلى قوة (n_s-1)، حيث تُعرَف $n_s \approx 1$ باسم القرينة الطيفيّة **spectral index**.

بالنسبة للتأرجحات التنسورية، فإن هناك نوعَين من الاستقطاب لها، النمط الأول تدرّجي طولاني بشكل مشابه لحالة الحقل الكهربائي ويعرف عادة بالنمط **E**، بينما النمط الثاني عرضاني دوّاري بشكل مشابه للحقل المغناطيسي، ويعرف بالنمط **B**، وتتناسب استطاعة الطيف لكلّ منهما مع مربّع ثابت هَبِل عند التقاطع مع الأفق.

4-4-2) نسبة التنسور إلى السلمي

تعتبر نسبة سعة التأرجحات التنسوريّة إلى السلميّة من أهم المؤشرات التي يمكن قياسها لتأكيد نظرية التضخم الكوني. يمكن تبيان ذلك من خلال حساب نسبة طيف الاستطاعة التنسوري إلى السلّمي، حيث نجد أن هذه النسبة ترتبط بشكل مباشر بمعامل التدحرج البطيء الأول، وبالتالي يمكن استخدامها للتمييز بين نماذج التضخم الكوني المختلفة.

تُعَد هذه النسبة **r** مهمّة لأنها تحدد مقياس طاقة التضخم، وتعطينا معلومات عن نوع حقل الإنفلاتون، كما يمكن رصدها من خلال استقطاب إشعاع الخلفية الكونية.

5) الأدلة التجريبية على التضخم الكوني:

في الحقيقة، هناك نتائج رصديّة -يتعلّق أهمّها بالقرينتَين الطيفيّتَين n_s وr- يمكنها اختبار التنبؤات النظريّة للنماذج التضخميّة، التي تتّفق بشكل ممتاز مع توزيع المجرات على النطاق الكبير، ومع نمط اللاتناحيات في إشعاع الخلفية الكونية، ومع قياسات الانزياح الأحمر للمجرات.

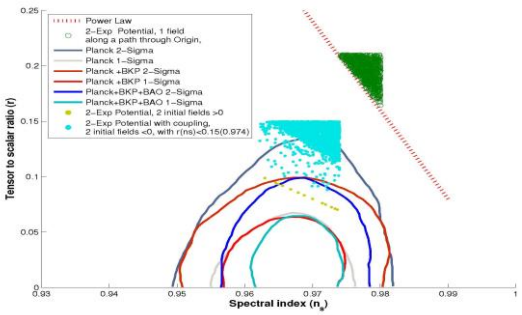
5-1) قياسات طيف الاستطاعة

كما ذكرنا، فإن الأرصاد الحالية لأشعة الخلفية الميكروية تبيّن أن طيف استطاعة الاضطرابات الكونية

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

يكون تقريباً ثابتاً على المقاييس الكبيرة، كما تتنبأ به نظرية التضخم الكوني، فتقيس الانحرافات الصغيرة عن حالة التراوحات الصامدة مقاسيًا **scale−invariant fluctuations** **($n_s \approx 1$)**. تجريبيًا نجد $n_s = 0.968 \pm 0.006$، فيدلّ هذا الانزياح نحو الأحمر **($n_s-1<0$)** أن التراوحات ذات المقاسات الكبيرة عانت تضخّمًا أكبر من قريناتها ذات المقاسات الأصغر.

أمّا بالنسبة لـ **r** فلدينا تجريبيًّا **$r<0.11$**، وهناك تنبؤات دقيقة للعلاقة بين **n_s** و**r** وفقًا للنموذج التضخّمي المُعتمَد يمكن اختبارُها.



الشكل 8: النتائج الرصديّة مع تنبّؤات نموذج تضخّمي يتضمّن كمونه حدَّين أسّيَّين [2].

2-5) قياسات الموجات الثقاليّة الجاذبيّة

تتنبأ نظرية التضخم الكوني بوجود موجات ثقاليّة جاذبية بدئيّة، يمكن رصدها من خلال استقطاب أشعة الخلفية الميكروية. يمكن تبيان ذلك من خلال حساب طيف استطاعة الاضطرابات التنسورية، حيث نجده تقريباً ثابتاً على المقاييس الكبيرة، كما يتنبأ بذلك السيناريو التضخّمي.

6) خاتمة

تظل نظرية التضخم أفضل إطار نظري لفهم الكون المبكر، رغم أن بعض التفاصيل مثل طبيعة حقل التضخم لا تزال موضوع بحث نشط. قد تمنحنا التطوراتُ المستقبلية في رصد الموجات الثقالية البدائية اختباراتٍ حاسمةً لهذه النظرية.

تعتبر نظرية التضخم الكوني من أهم النظريات في علم الكونيات الحديث، حيث تقدم حلولاً للعديد من المشاكل التي تواجه نظرية الانفجار العظيم، وتتنبأ بالعديد من الظواهر التي يمكن رصدها تجريبياً، فعلى سبيل المثال تُفسِّر نظريّةُ الاضطرابات الكونية الناتجة عن التضخم كيف نشأت البنى الكونية من تراوحات كمومية مجهرية، وتقدِّم تعليلًا لسبب كون الكون متجانسًا على النطاق الكبير في حين أنه غير منتظم على النطاق الصغير.

على الرغم من النجاحات الكبيرة لنظرية التضخم الكوني، إلا أنها ما زالت تواجه بعض التحديات، ومن أهمها تحديد طبيعة حقل التضخم وربطه بالفيزياء الأساسية، وكذلك تحديد آلية بدء وانتهاء مرحلة التضخم. تستمر الأبحاث في مجال التضخم الكوني لتحسين فهمنا لهذه النظرية ولتطوير نماذج جديدة يمكن اختبارها تجريبياً، وذلك من خلال الأرصاد الحالية والمستقبلية لأشعة الخلفية الميكروية والموجات الثقاليّة الجاذبية البدئيّة.

يمكن القول إن نظرية التضخم الكوني قد غيرت بشكل جذري فهمنا للكون وأصله وتطوره، وما زالت تقدم إطاراً نظرياً قوياً لفهم الكون في لحظاته الأولى، وربط علم الكونيات بالفيزياء الأساسية.

المراجع:

[1] **A. Riotto, "Inflation and the Theory of Cosmological Perturbations", arXive: hep-ph/0210162** (2017).

[2] **M. AlHallak and N. Chamoun, JCAP 09(2016)006**.

[3] شعبان خليل، "الثقوب السوداء وموجات الجاذبيّة"، مجلّة مسارات في الفيزياء، العدد الأوّل (مارس 2024).

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء