

# فیزیک فراپلانکی و کیهانشناسی تورمی

- تورم، ویژگیها و موفقیتها
- وابستگی مفهوم ذره به ناظر در نظریه میدانهای کوانتومی در فضا زمان خمیده
- کوانتس اف و خیزهای کیهانی
- مساله فراپلانکی
- پاسخها:
- \* روابط پاشندگی تعمیم یافته
- \* خلاء تعمیم یافته
- \* تورم چند میدانی
- \* جفت شدگی غیر کمینه و نظریات تعمیم یافته گرانش

## مدل تورم و پاسخ به مسائل مدل استاندارد کیهانشناسی

- انبساط شتابدار کیهان قادر است سهم چگالی انحنای را در چگالی کل کیهان بسیار ناچیز کند.
- انبساط شتابدار کیهان قادر است افق را در زمان آخرین پراکندگی به اندازه لازم گسترش دهد.
- انبساط شتابدار کیهان قادر است تعداد تک قطبی‌های مغناطیسی را به مقدار واحد در حجم افق امروزی کیهان برساند.
- مدل تورم قادر است مبدا افت و خیزهای چگالی، ناهمسانگردی طیف اشعه زمینه کیهان و ناوردایی مقیاس این طیف را توضیح دهد.

## ویژگیهای مهم تورم

- خروج خوشایند (graceful exit) از دوره تورم رخ می دهد. در مدل‌های دقیق در حد میدان بزرگ یا کوچک و در مدل‌های غلتش کند با رسیدن پارامترهای غلتش کند به مرتبه واحد خروج طبیعی از دوره تورم رخ می دهد و کیهان وارد دوره باز گرمایش می شود.

V. Mukhanov, Physical Foundations of Cosmology, 2005, chapter 5

البته در جزئیات این دوره و خلق ذرات ابهامات بسیاری وجود دارد. اتفاق نظر در این دوره وجود نوسانات میرا برای میدان اینفلاتون است که بدلیل جمله اصطکاک ناشی از انبساط کیهان در معده حرکت این میدان وجود دارد.

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V_{,\phi} = 0$$

- حداقل  $e$ -تایه لازم  $N_0$  برای حل سه مساله مدل استاندارد یکی است. کران بالای این حداقل با دو فرض، صرفنظر کردن از دوره بازگرمایش و هم مرتبه بودن چگالی در ابتدای دوره تابش غالب و چگالی پلانک به مقدار  $65-70$  بدست می آید.

- حداکثر e-تایه  $N_{max} = N_0 + \ln \frac{H(t_{exit})}{H(t_r)}$  است. بدلیل اتلاف انرژی در دوره بازگرمایش پس از تورم،  $N_{max} > N_0$ . البته برای تورم غلتش کند صرفنظر کردن از این اتلاف انرژی تقریب نسبتاً مناسبی است و بنابراین حداکثر تعداد e-تایه همان مقدار ۶۵-۷۰ است.

## وابستگی مفهوم ذره به ناظر در نظریه میدانهای کوانتومی در فضا زمان خمیده

- در ابتدای تورم اختلالات کوانتومی میدان اینفلاتون، بذر اولیه ساختارهای بزرگ مقیاس کیهان را فراهم می کنند و نظریه موجود نظریه میدانهای کوانتومی در فضا زمان خمیده است.
- در فضا زمان تخت بدلیل ناوردایی پوانکاره حالت خلاء خوش تعریف است. بر طبق کوانتش کانونیک

$$\phi(x) = \sum [a_i u_i(x) + a_i^\dagger u_i^*(x)]$$
$$a_i |0\rangle = 0$$

اما در فضا زمان خمیده بدلیل اصل هموردایی عام، با تغییر پایه های بسط (توابع مد)

$$\phi(x) = \sum [\bar{a}_i \bar{u}_i(x) + \bar{a}_i^\dagger \bar{u}_i^*(x)]$$
$$\bar{a}_i |\bar{0}\rangle = 0$$

این دو دسته توابع مد ( و متناظرا دو نوع عملگرهای خلق و فنا) با ضرایب بوگولیوبف (Bogolubov) به یکدیگر مربوطند. مساله اصلی این است که با

تبدیل فوق تعداد ذرات قدیم در خلاء جدید برابر است با

$$\langle \bar{0} | N_i | \bar{0} \rangle = \sum_j |\beta_{ij}|^2$$

پس مفهوم ذره وابسته به ناظر است.

- در زمینه کیهانشناسی انتخاب بسط‌های مختلف نظیر انتخاب زمانهای مختلف است. پس خلاء در یک لحظه، در لحظه دیگر خلاء نیست و تعبیر رایج آن خلق ذره کیهانی است.

## افت و خیزهای کیهانی در تورم

- افت و خیز میدان اینفلاتون
- افت و خیزهای اسکالری متریک: در هر عصر بامحتوای مادی کیهان جفت شده اند و در ساختار بزرگ مقیاس کیهان سهیمند.  
برخی از این اختلالات نظیر باز پارامتریزه کردن متریک کیهان همگن و همسانگرد هستند که به اصل هموردایی عام و آزادی در انتخاب دستکاه مختصات مربوطند و نباید به عنوان اختلالات فیزیکی تعبیر شوند. انتخاب پیمانه و معرفی کمیات پیمانه ناوردا این معضل را برطرف می کنند.
- افت و خیز برداری متریک: با انبساط کیهانی انتقال سرخ می یابند و در تشکیل ساختار سهیم نیستند.
- افت و خیز تانسوری متریک: این افت و خیزها با تانسور انرژی تکانه افت و خیزهای میدان اینفلاتون که به فرم سیال کامل است جفت نمی شوند و امواج گرانشی را تولید می کنند.

معادلات حاکم بر تحول افت و خیزهای متریک و میدان اینفلاتون معادلات تزویج شده‌ای هستند که در دو حد بررسی میشوند:

- در ابتدای تورم طول موج افت و خیزها کوچکتر از افق هابل است. تحول مدهای اختلال نوسانی با زمان است و پاسخها به فرم WKB هستند. با جایگزینی این نوع پاسخها در معادلات می‌بینیم که اندازه افت و خیزهای متریک بسیار کوچکتر از افت و خیزهای میدان اینفلاتون است. برای تعیین ثابت انتگرالگیری دامنه افت و خیزها، باید به دوره بسیار ابتدای تورم برگردیم که در آن افت و خیزهای کوانتومی اینفلاتون را در زمینه مختل نشده کیهان داریم و انتظار داریم ابهام در تعریف خلاء در این دوره نمود داشته باشد.

S. Weinberg, Cosmology, 2008, chapter 10

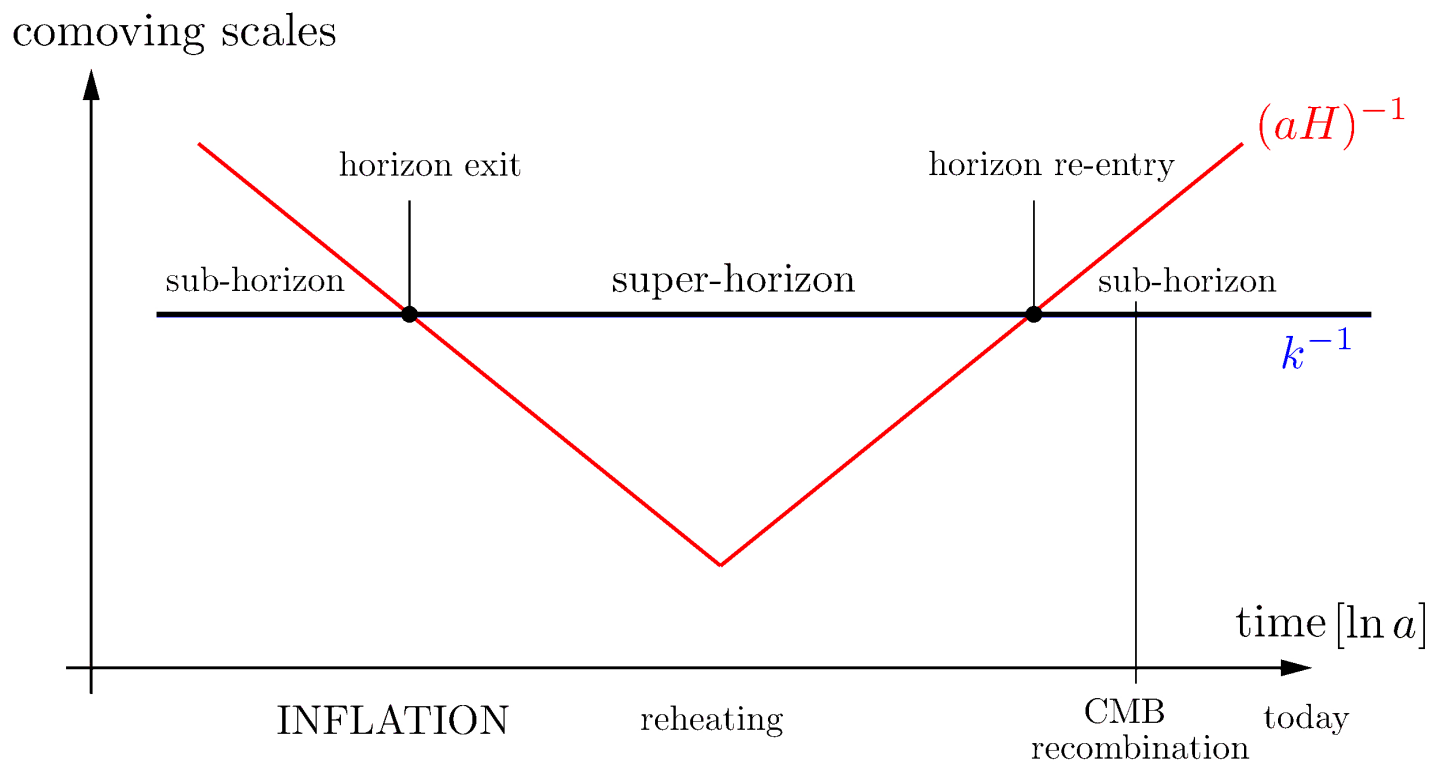
V. Mukhanov, S. Winitzki, Int. to quantum effects in gravity, 2007, chap.6

- با پیش رفتن در دوره تورم طول موج افت و خیزها از افق هابل خارج می‌شود و بر طبق معادلات، اختلالات پیمانه ناوردا یخ می‌زنند تا زمانی که مجدداً در عصر تابش غالب وارد افق شوند و این مقادیر یخ زده به صورت شرط اولیه



در آن دوره ظاهر می‌شود. این ویژگی سبب می‌شود که تحول اختلالات در دوره های تابش و ماده غالب مستقل از جزئیات دوره بازگرمایش شود.

S. Weinberg, Cosmology, 2008, chapter 10



• این دو ویژگی نه تنها در نسبیت عام رخ می‌دهد بلکه در دسته خاصی از نظریات تعمیم یافته

J. Hwang 1996-97

و حتی در عمومی ترین نظریه اسکالر-تانسوری گرانش  $f(R, \phi)$  نیز وجود دارد.

S. Cheraghchi and F. Shojai 2017

## معادله موخائف-ساساکی

- معادله حاکم بر تحول افت و خیزهای اینفلاتون معادله موخائف-ساساکی (Mukanov-Sasaki) است:

$$f_k'' + \left(k^2 - \frac{z''}{z}\right) f_k = 0$$

$$f = zR$$

$$z = \frac{a\phi_0'}{H}$$

$f$  مد فوریه اختلال (متغیر موخائف)،  $R$  متغیر پیمانۀ ناوردانحنای  $z$  تابع کمیات زمینۀ می باشد. در دورۀ بسیار ابتدای تورم، فیزیک کوچک مقیاس از انبساط کیهان تاثیر نمی پذیرد و افت و خیزهای اینفلاتون را در فضا زمان مینکوفسکی داریم و طبیعی ترین انتخاب این است که خلاء را در این دورۀ با خلاء رایج بانچ-دیویس (Bunch-Davies) یکی بگیریم:

$$\lim_{\tau \rightarrow -\infty} f_k(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2k}} e^{-ik\tau}$$

• اطلاعات رصدی اشعه زمینه کیهان الگوی افت وخیزها را در عصر آخرین پراکندگی نشان می دهد که برحسب توابع همبستگی چند نقطه ای در لحظه خروج مد اختلال از افق بدست می آید. تابع همبستگی دو نقطه ای معرف طیف توان افت وخیزها است

$$P_\phi = \frac{k^3}{2\pi^2} \langle 0 | \hat{\phi}_k^\dagger \hat{\phi}_{k'} | 0 \rangle$$

که خلاء در لحظه خروج از افق محاسبه می شود.  
برطبق اطلاعات رصدی طیف توان با دقت خوبی مستقل از مقیاس افت وخیزهاست که با تورم دوسپته و انتخاب خلاء بانچ- دیویس تطبیق دارد.

- در تورم دوسیده ختم دوره تورم را نداریم. (مساله خروج خوشایند)
- بازه تورم متناهی است و اعمال شرط اولیه در گذشته بسیار بسیار دور مبهم است.
- اطلاعات رصدی اشعه زمینه کیهان به انتخاب خلاء اولیه حساس است.
- در مدل رایج تورم که مدل تک میدان اسکالری با جفت شدگی کمینه است اگر بازه تورم کمی بیش از  $e^{-70}$ -تایه شود آنگاه طول موج همراه افت و خیزهای اشعه زمینه کیهان در شروع تورم کوچکتر از طول پلانک می شوند. پس پایبندی به تورم تک میدان اسکالری کمینه جفت شده نیازمند یافتن مدل‌های فیزیک فراپلانکی است.

- روش مقید کردن پتانسیل های تورم با کمک قيود درصدی در صفحه  $(r, n_s)$  است که پارامتر اول نسبت طیف توان اسکالری به تانسوری و پارامتر بعدی اندیس طیف اسکالری است. این دو کمیت تابع پارامترهای غلتش کند هستند که باید تابع  $e$ -تایه در بازه خروج اختلال از افق و انتهای تورم محاسبه گردند.

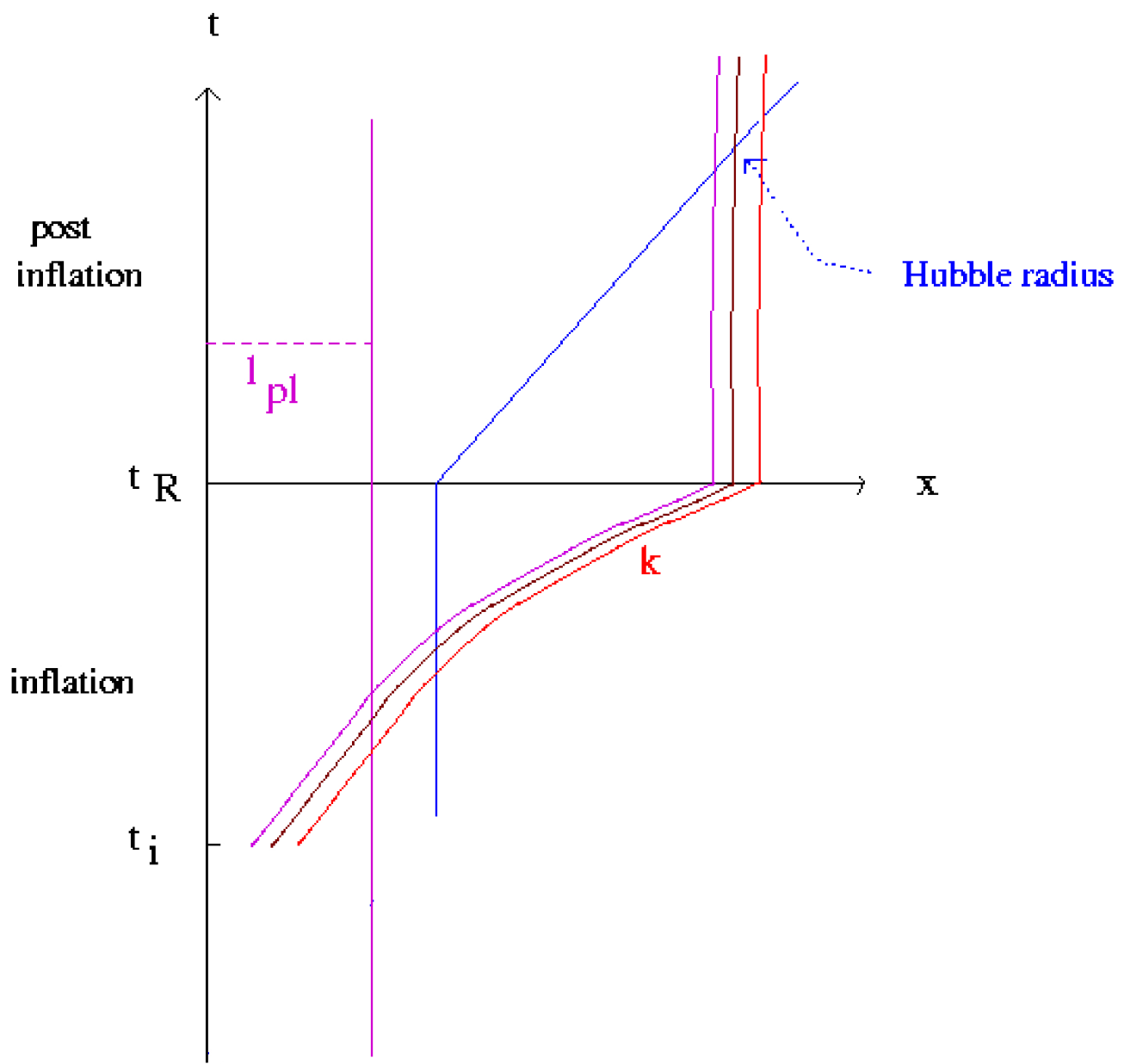
J. Lesgourgues 2006

- برای مثال برای پتانسیل آشوبی که

$$V(\phi) = \lambda\phi^4$$

این محاسبه ما را به ثابت جفت شدگی  $2 \times 10^{-16}$  می‌رساند. با پتانسیل میدان اسکالری از مرتبه جرم پلانک به تعداد  $e$ -تایه  $5 \times 10^8$  می‌رسیم. این بدان معنی است که با مقیاس طول پلانک برای افت و خیزها باید به ساختارهایی از مرتبه  $10^{10^8}$  برابر طول پلانک برسیم که بسیار بزرگتر از ساختارهای فعلیند که در حد چند ده مگاپارسک هستند. اگر با این اندازه به عقب برگردیم به طولی بسیار کوچکتر از پلانک در ابتدای تورم می‌رسیم.

R. Brandenberger 2002



## روابط پاشندگی تعمیم یافته

- فرض بر این است که اثر فیزیک فراپلانکی تصحیح روابط پاشندگی استاندارد است.  $\omega_{eff} = \omega_{eff}(\frac{k}{a(\eta)})$  اگر این تابع کند تغییر باشد و بتوان از تقریب WKB استفاده کرد پس همچنان خلاء بانچ-دیویس را به عنوان شرط اولیه داریم. در این حالت تصحیحات به طیف توان قابل رصد نیست.
- در غیر این صورت است که حالت اولیه خلاء نیست بلکه حالتی تهییج شده است و در طیف توان اثرات قابل رصد به جای می گذارد.

• بدون هیچ فرضی در مورد فیزیک فراپلانکی، خلاء اولیه در زمان محدود  $\tau_i$  که به صورت  $q = a(\tau_i)\Lambda$  تعریف می شود و  $\Lambda$  مقیاس تکانه ای است که در آن مقیاس شرط اولیه مد اختلال اعمال می شود و بدین ترتیب مد اختلال وارد ناحیه فرا پلانکی نمی شود.

• ویژگی بارز این روش آن است که همانطور که مدهای مختلف در زمانهای مختلف که تابع عدد موج آنها است از افق هابل خارج می شوند در زمانهای مختلف وابسته به عدد موجشان شرط اولیه بر آنها اعمال می شود.

• اعمال شرط اولیه در زمان محدود تقارن انتقال در زمان را می شکند پس انتظار بر این است که طیف توان وابستگی به مقیاس داشته باشد.

\* تورم دوسپته: طیف توان با جملات نوسانی که اندازه و فرکانس آنها ثابت است تصحیح می شود.

U. H. Danielsson, 2002, 2006. B. J. Broy 2016.

\* تورم غلتش کند: طیف توان با جملات نوسانی که اندازه و فرکانس آنها تابع عدد موج اختلال است تصحیح می شود.

H. Bouzari Nezhad, F. Shojai 2017.