

**RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI PER I DIVERSI ARGOMENTI
TRATTATI DURANTE IL CORSO:
“COSMOLOGIA DELL’UNIVERSO PRIMORDIALE”
ANNO ACCADEMICO 2018-2019**

NICOLA BARTOLO

Di seguito indico dove trovare le parti rilevanti del corso nei testi di riferimento (ed eventualmente in altri testi che ritengo sia utile consultare). Per alcune parti del corso metto anche a disposizione degli appunti specifici (la dove indico “vedere appunti”). I riferimenti e gli appunti messi a disposizione sono da intendersi come materiale che accompagna quanto spiegato a lezione. Ovviamente in alcune parti indicate nei testi si possono trovare dei dettagli in più rispetto a quanto spiegato a lezione.

- Brevi richiami al modello cosmologico standard.

Mettrica di Robertson-Walker; equazioni di Friedmann. Orizzonti cosmologici.

- Vedere appunti

Ottimi riferimenti per queste parti sono:

- Capitolo 2.2 del Kolb and Turner (KT).
- Capitolo 2 del Liddle and Lyth (Cosmological Inflation and Large-Scale Structure, da qui in poi indicato come LL): uno può vedere fino a 2.2 escluso e poi 2.2.2 e il capitolo 2.3.
- inizio Capitolo 2 e 6.3.1 del Dodelson (D).
- Capitolo 2.7 del Coles and Lucchin (CL).

- Problemi del modello cosmologico standard dell’ Hot Big-Bang.

Il problema dell’ orrizzonte (e sue diverse formulazioni). Soluzione inflazionaria (e universi di de-Sitter). Calcolo del numero minimo di e-folds per avere un periodo inflazionario che risolve il problema dell’orizzonte. Problema della piatezza (e sue diverse formulazioni). Calcolo esplicito del parametro di densità a tempi primordiali. Soluzione inflazionaria. Calcolo del numero di e-folds necessario per risolvere il problema della piatezza. Predizione dell’ inflazione per il parametro di densità all’ epoca presente.

- Vedere appunti (negli appunti relativi al problema della piatezza si trovano anche delle stime per il valore del parametro di densità a tempi primordiali più “veloci” , ma meno precise, rispetto a quanto fatto a lezione, dove invece ho seguito da vicino quanto contenuto nel CL)

Date: 24/1/2017.

Riferimenti nei testi:

- Un ottimo riferimento sono i capitoli 7.8 e 7.9 del CL, dove si trovano dei calcoli espliciti sul problema della piattezza e dell'orizzonte difficili ormai da trovare in altri testi.
- Una bella discussione del problema dell'orizzonte (in particolare con riferimento alle anisotropie del fondo Cosmico di microonde) si trova ai capitoli 6.2 e 6.3 del D.
- Capitolo 3 (fino a 3.3 escluso) del LL.

- Accenno al problema dei “relitti cosmici” (difetti topologici, particelle massive, esempi). Difetti topologici: esempio di domain wall. Soluzione inflazionaria.

- Per la parte delle transizioni di fase (poi riprese anche in relazione ai modelli inflazionari) vale la pena di vedere il capitolo 7.1 e 7.1.1 del KT. Per l'esempio del domain wall ho seguito da vicino il capitolo 7.2 del KT (la parte iniziale, vale comunque la pena di leggersi il resto del capitolo). Si veda anche capitolo 7.5 del KT. È scritta molto bene la parte sulle transizioni di fase capitoli 7.3 e 7.4 del CL.
- Per altri esempi di “relitti cosmici” si veda 3.1.3 del LL.

- Dinamica dell' inflazione.

Interpretazione della costante cosmologica come energia del vuoto. Esempio legato all' effetto Casimir. Energia del vuoto in termini di un campo scalare.

Dinamica dell'inflazione. Azione e tensore energia momento di un campo scalare (con dettagli su come calcolarlo). Divisione della dinamica in background e perturbazioni. Quadro generale della dinamica di background: moto di lento rotolamento. Discussione sul cosmic no-hair principle e teorema di Wald.

Dettagli sulla dinamica del campo scalare: la equazione di Klein-Gordon per un campo scalare in una metrica di RW. Evoluzione di background del campo: parametri di slow-roll. Esempio di modello di inflazione “a campo grande”. Esempio di inflazione a “campo piccolo”.

- vedere appunti.
- Ottimo capitolo 8.2 e 8.3 del KT. Per i cenni al cosmic no-hair principle e al teorema di Wald si legga capitolo 8.6 del KT.
- Per la dinamica di background dell'inflatone e parametri di slow-roll capitoli 3.3, 3.4, 3.4.1, 3.4.2 del LL.

- Fluttuazioni quantistiche dell' inflatone.

Equazione perturbata di Klein-Gordon in una metrica di RW. Argomento molto generale (metodo alla Guth and Pi) per dare una spiegazione sul perchè ci aspettiamo fluttuazioni quantistiche dell'inflatone in un universo di de Sitter. Fluttuazioni quantistiche di un campo

scalare: seconda quantizzazione in uno spazio-tempo curvo. Caso di un campo scalare senza massa e in de-Sitter. Metodo del matching tra regime sub-horizon e regime super-horizon. Significato fisico dei risultati trovati.

- vedere appunti
- Per un eventuale ripasso sulle proprietà dei campi scalari (in universo piatto) si veda da 7.1 a 7.3.3 del LL.
- Paragrafi 7.4.1; 7.4.4; 7.4.5 del LL.

- Fluttuazioni quantistiche dell'inflatone.

Soluzione esatta nel caso di campo scalare senza massa e espansione di quasi-de Sitter (calcolo completo con le funzioni di Hankel).

- vedere appunti

- Fluttuazioni quantistiche dell'inflatone.

Estensione dei risultati precedenti al caso di fluttuazioni di un campo scalare con massa e in quasi de-Sitter (+ perturbazioni della metrica). Accenno alla variabile gauge-invariante di Sasaki-Mukhanov. Estensione dei risultati precedenti al caso della generazione di onde gravitazionali dall'inflazione.

- vedere appunti
- paragrafo 7.4.2 del LL
- Per la parte sulle onde gravitazionali (modi di perturbazione tensoriali) prodotte durante l'inflazione: vedere appunti; paragrafo 6.5 e 7.7.1 del LL; capitolo 8.4 del KT (saltare pure da Eq.(8.57) in poi).
- Per la parte sulle onde gravitazionali uno può anche guardare ai paragrafi 5.3 e 6.4.2 del D.

- Spettro di potenza delle perturbazioni cosmologiche.

Spettro di potenza per le fluttuazioni dell'inflatone (e delle onde gravitazionali). Dalle perturbazioni quantistiche in un universo in espansione alle prime perturbazioni di densità primordiali: metodo del formalismo δN (accenno alla gauge-invarianza della variabile ζ). Calcolo dello spettro di potenza per le perturbazioni di densità primordiali. Calcolo dello spettro di potenza delle onde gravitazionali dall'inflazione. Scala di energia dell'inflazione e accenno all'imprint delle onde gravitazionali sulle anisotropie in temperatura e polarizzazione del CMB. Predizioni osservabili dell'inflazione in termini degli spettri di potenza: ampiezze e indici spettrali. Calcolo esplicito dell'indice spettrale per le perturbazioni scalari e tensoriali.

- vedere appunti.

- Capitolo 7.5 del LL (escluso 7.5.3)
N.B.: la quantità che viene qui indicata come $\mathcal{R}$ corrisponde (su scale più grandi dell'orizzonte) alla quantità che io ho indicato con ζ a lezione.
- Capitolo 8.4 del KT.

- Contatto con le osservazioni.

piano (r, n_s) e classificazione dei modelli inflazionari sul piano (r, n_s) : modelli a campo “piccolo”, modelli a campo “grande” e modelli ibridi (e loro contestualizzazione all'interno dei modelli di fisica delle particelle). Relazione tra field-excursion durante l'inflazione e ampiezza onde gravitazionali. Espressione per il valore dell'ampiezza delle onde gravitazionali.

- vedere appunti
- Nello specifico per modelli inflazionari a campo “piccolo” si veda 8.3.3 e 8.3.4 del LL; per i modelli a campo “grande” paragrafi 8.3.1 e 8.3.2 del LL.
- per i modelli ibridi si veda 8.4.1 del LL.
- A parte i paragrafi indicati sopra, potete anche fare (semplicemente) una lettura di tutto il capitolo 8.3 e 8.4 e 8.6 del LL.

- Inflazione nel contesto di modelli di fisica delle particelle

Excursus sui primi modelli “storici” di inflazione (per meglio comprendere alcune caratteristiche dei modelli più recenti e la visuale attuale dell'inflazione): Modelli di “vecchia” inflazione di Guth. Modelli di “nuova” inflazione e inflazione caotica (da qui i cosiddetti modelli a campo “piccolo” e “grande”). Modelli ibridi. Esempio concreto del modello di nuova inflazione: potenziale di Coleman-Weinberg, problemi del modello.

- vedere appunti
- Un bel riassunto si trova nel capitolo 7.10 e 7.11 del CL; si veda anche come introduzione generale 8.2 del KT.
- Per l'esempio del modello con potenziale di Coleman-Weinberg ho seguito da vicino quanto contenuto a proposito di questo modello nel capitolo 8.5 del KT.

- Inflazione nel contesto di modelli di fisica delle particelle.

Alcune considerazioni generali: contributo al potenziale dalle correzioni ad una loop; importanza delle simmetrie: esempio di natural inflation; accenno al cosiddetto “ η problem”; accenno a modelli di inflazione nel contesto di gravità modificata.

- Capitolo 8 fino a 8.3 escluso del LL.
- si veda anche paragrafo 8.4.5 del LL.

- Fase di reheating.

semplice modello per la transizione dall'universo primordiale inflazionario all'universo standard di Friedmann-Robertson-Walker.

- Ho seguito da vicino la parte sul reheating del capitolo 8.3 del KT .

- Formalismo in-in

Concetti di base del calcolo delle funzioni di correlazione ad ordini superiori nel formalismo in-in

- vedere appunti

- Richiami su condizioni di equilibrio termico e condizioni fuori dall'equilibrio per una specie di particella in un universo in espansione.

- Ottimo 3.5 del KT fino a paragrafo "neutrino decoupling".

- Equazione di Boltzmann in un universo in espansione.

Equazione di Boltzmann per l'abbondanza di una certa specie.

- Capitolo 5.1 del KT.
- Quanto fatto a lezione segue anche il capitolo 3.1 del D.

- Bariogenesi.

Numero barionico attuale; condizioni per la bariogenesi. Semplice modello per chiarire le condizioni per avere bariogenesi. Dettagli su uscita dall'equilibrio termico per avere bariogenesi. Modello del decadimento fuori dall'equilibrio.

- 6.2 del KT; viene molto utile riguardarsi l'espressione sulla densità di entropia nel capitolo 3.4 del KT (per esempio da Eq.(3.72) per capire poi come n_B/n_γ è legato al numero barionico per volume comovente n_B/s , si veda intorno ad Eq.(3.76)).
- Ho seguito poi da vicino il capitolo 6.3 del KT.

- Bariogenesi.

Altro possibile scenario per bariogenesi, legato al decadimento dell'inflatone durante la fase di reheating.

- 6.7 del KT (a lezione ho a un certo punto seguito una strada leggermente diversa da quella di questo paragrafo del KT, si vedano gli appunti presi a lezione). Quanto spiegato nel 6.7 del KT rimanda al capitolo 5.3 del KT.

- Bariogenesi.

Toy model per meccanismo di bariogenesi (con decadimento fuori dall'equilibrio) con uso equazioni di Boltzmann per il numero barionico: scrittura equazioni di Boltzmann, soluzioni formali; soluzioni approssimate.

- Ho seguito da vicino 6.4 del KT (a lezione ho esplicitato in dettaglio alcuni passaggi).

- Bariogenesi.

Accenni a possibilità di violazione di numero barionico e C e CP in modelli di fisica delle particelle.

- Potete scaricare dalla rete questo ottimo articolo di review, al sito <http://www.slac.stanford.edu/econf/C040802/papers/L018.PDF>. Per quanto parecchio avanzato alcune parti relative alle possibilità di violazione di numero barionico e C e CP in modelli di fisica delle particelle ed eventuale legame con l' inflazione sono comunque accessibili e ve ne consiglio la lettura.

- Materia oscura.

Produzione di particelle di materia oscura attraverso il meccanismo di freeze-out: equazioni di Boltzmann. Applicazione del meccanismo di freeze-out al caso di materia oscura "fredda". Applicazione del meccanismo di freeze-out alla materia oscura calda.

- Ho seguito da vicino 5.2 del KT (a parte l' ultimo esempio che parte dopo la Eq.(5.51)); per le equazioni di Boltzmann si guardi anche a 3.2 del D.
- Potete anche guardare 3.4 del D.

Quest' anno ho menzionato brevissimamente anche a particelle di materia oscura non termica (un esempio sono axion-like particles) e al meccanismo di produzione di particelle di materia oscura chiamato "freeze-in". Per chi volesse *approfondire* si veda, per esempio:

- il KT, capitolo 10.3, fino a 10.3.3 escluso (10.3.1 presenta un altro esempio di applicazione delle Eq. di Boltzmann, mentre 10.3.2 presenta un esempio di meccanismo per la produzione non-termica di candidati di materia oscura).
- <https://arxiv.org/pdf/0911.1120.pdf>

Per chi fosse curioso, un altro esempio concreto di quello visto per particelle che si disaccoppiano quando sono non-relativistiche è l' applicazione alla cosiddetta "catastrofe dell' annichilazione barioni-antibarioni" di cui vi ho detto per la parte di bariogenesi. Si veda:

- il KT, capitolo 5.2, pag.127.

- Perturbazioni cosmologiche in Relatività Generale (anche in connessione a quanto detto sulle perturbazioni inflazionarie).

Trasformazioni di gauge; problema della gauge-invarianza; tensore energia momento; perturbazione di curvatura ζ e sua conservazione. Equazione di Einstein perturbate.

- Gli appunti delle lezioni sono scaricabili dal sito, sono nel file dal nome GRperturbationsnew.pdf

Per chi volesse approfondire l'argomento consiglio il seguente articolo

<https://arxiv.org/abs/astro-ph/9707278>

Inoltre alcune reviews sulla teoria delle perturbazioni cosmologiche sono:

"Gauge Invariant Cosmological Perturbations", James M. Bardeen (Princeton, Inst. Advanced Study). 1980. 24 pp., Published in Phys.Rev. D22 (1980) 1882-1905

"Cosmological Perturbation Theory", Hideo Kodama (Tokyo U.), Misao Sasaki (Kyoto U.). 1985, Published in Prog.Theor.Phys.Suppl. 78 (1984) 1-166

Si tratta di due review "storiche", fondamentali sulla teoria delle perturbazioni cosmologiche in Relatività Generale. Una più recente è

<https://arxiv.org/abs/0809.4944>

- Test osservativi dell'universo primordiale

A parte gli argomenti trattati a lezione, per i quali ho via via fatto presente quali sono i principali constraints cosmologici, quest'anno a fine lezione ho dedicato due ore di lezione di approfondimento per capire i principali effetti delle perturbazioni scalari e tensoriali da inflazione sullo spettro angolare del CMB (si vedano gli appunti a lezione). Ho anche accennato ad alcuni papers della collaborazione del satellite *Planck* che, sfruttando i dati della CMB, pongono vari limiti sui modelli inflazionari (oltre che su una serie di altri parametri cosmologici). Ve ne segnalo 3 per chi fosse interessato a leggerli ed approfondire:

- <https://arxiv.org/pdf/1502.02114.pdf>

- <https://arxiv.org/pdf/1502.01592.pdf>

- <https://arxiv.org/pdf/1502.01589.pdf>

TESTI DI RIFERIMENTO:

- Andrew Liddle and David Lyth, *Cosmological Inflation and Large-Scale-Structure*, Cambridge University Press, 2000 (LL)

(o in alternativa degli stessi autori: *The primordial density Perturbation*, Cambridge University Press 2009).

- E.W. Kolb and M.S. Turner, *The Early Universe*, Addison-Wesely, 1990 (KT).

Altri testi utili da consultare per alcune parti specifiche:

- Scott Dodelson, *Modern Cosmology*, Academic Press 2003 (D).
- P. Coles and F. Lucchin, *Cosmolgy: The origin and Evolution of Cosmic Structure*, Wiley and Sons, 2001 (CL)