

Teoría de perturbaciones no lineales para el estudio de la formación de estructura cosmológica a grandes escalas

Alejandro Avilés Cervantes, ICF-UNAM

Semestre 2026-II (febrero-junio 2026)

En este curso se enseñarán las técnicas analíticas y numéricas básicas para el estudio de la formación de estructuras a gran escala, utilizando la teoría de perturbaciones no lineales. El objetivo principal es formar recursos humanos que comprendan, desde los principios básicos, cómo se realiza la estimación de parámetros cosmológicos a partir de catálogos de galaxias, empleando los métodos directos de comparación entre datos y teoría, conocidos como análisis de *Full-Shape*.

Al concluir este curso, el estudiante contará con las herramientas necesarias para iniciar investigaciones en estos y otros temas relacionados.

La teoría de perturbaciones es de suma importancia, ya que estudia las estructuras no lineales que se forman a partir del colapso gravitacional después de la época de última dispersión. Son precisamente estas escalas las que se están sondeando hoy en día mediante catálogos de galaxias, como los de los experimentos DESI y LSST, colaboraciones en las que participan varios investigadores y estudiantes tanto de la UNAM como de distintos centros de investigación en México.

Este es un curso de 48 horas, de nivel intermedio, destinado a estudiantes de posgrado con conocimientos previos en cosmología, adquiridos en uno o dos semestres de cursos que cubran los fundamentos básicos de la disciplina. Si bien no es estrictamente necesario haber cursado todos esos temas, el estudiante debe tener claros los conceptos y técnicas necesarias para estudiar la formación de estructuras de materia oscura en el régimen lineal.

PROGRAMA

1. Revisión de cosmología básica (8 hrs)

El propósito de este primer bloque es revisar algunos de los temas que deben ya conocer los estudiantes de un curso introductorio de Cosmología. Se recomienda un texto como Dodelson (2020).

1.1 (2 h) Cosmología de fondo homogénea e isotrópica

1.2 (3 h) Revisión breve de la teoría de perturbaciones lineales en el universo temprano. Códigos Botzmann-Einstein.

1.3 (3 h) Estadísticas en cosmología. Funciones de correlación y espectros de potencias lineales.

2. Teoría estándar de perturbaciones (SPT) (10 hrs)

Se enseñara la teoría estándar de perturbaciones hasta tercer orden perturbativo. Se construirán las primeras correcciones al espectro de potencias de materia (o de 1-lazo) y se mostrará el método de

diagramas para la construcción de ordenes mayores. Se enseñarán métodos numéricos para integrar el espectro de potencias. Texto recomendado: Bernardeau et al (2002).

- 2.1** (1h) Ecuación de Vlasov. Momentos y ecuaciones de hidrodinámica.
- 2.2** (1h) Dinámica euleriana y teoría de perturbaciones lineales.
- 2.3** (1h) Teoría de perturbaciones eulerianas no lineales. Construcción de kernels EdS.
- 2.4** (1h) Distribuciones gaussianas y teorema de Wick. Teorema del límite central.
- 2.4** (2h) Construcción del espectro de potencias a 1-lazo. Integración numérica.
- 2.5** (1h) Separación de escalas. Divergencias infrarrojas y ultravioletas.
- 2.6** (1h) Diagramas de Feynmann y teoría a 2-lazos.
- 2.7** (1h) Kernels exactos en LCDM.
- 2.8** (1h) Teorías efectivas.

3. Teoría de sesgo (4 hrs)

Se enseñara la teoría de sesgo *bias* para trazadores de materia oscura como halos y galaxias. Se mostrarán métodos de renormalización de parámetros de sesgo. Texto recomendado: Desjacques et al (2018). Artículos recomendados: McDonald (2006), McDonald & Roy (2009), Assassi et al (2014)

- 3.1** (1h) Trazadores sesgados, suavizado de sobredensidades y expansión en operadores locales.
- 3.2** (1h) Renormalización de parámetros de sesgo local. Espectro de potencias.
- 3.3** (1h) Expansión completa en operadores. Renormalización.
- 3.4** (1h) Espectro de potencias para trazadores sesgados

4. Redshift-space distortions (RSD) (8 hrs)

Observamos en el cosmos trazadores a una posición aparente en espacio de corrimiento al rojo (redshift), la cual es distorsionada respecto a su posición real debido al efecto Doppler generado por las velocidades peculiares de dichos objetos. En este bloque se mostrará cómo estas distorsiones afectan las mediciones de estadísticas de 2-puntos, en particular el espectro de potencias; la función de correlación se mostrará en el siguiente bloque. Texto recomendado: Bernardeau et al (2002). Artículos recomendados: Kaiser (1984), Scoccimarro (2004), Taruya et al (2012), Vlah & White (2018).

- 4.0** (1h) RSD y efecto Alcock-Paczyński
- 4.1** (1h) Mapeo de coordenadas de espacio de redshift a espacio real. Mapeo de densidades en espacio real a espacio de redshift.
- 4.2** (1h) Efecto Kaiser y *Fingers of God*.
- 4.3** (1h) Espectro de potencias en espacio de redshift I: expresión general.
- 4.4** (2h) Espectro de potencias en espacio de redshift II: expansión en momentos.

4.5 (1h) Modelos Scoccimarro 2004 y TNS.

4.6 (1h) Espectro de potencias en espacio de redshift III: Modelos de Streaming

5. Teoría de perturbaciones lagrangianas (LPT) (5 hrs)

Se enseñará la teoría lagrangiana de perturbaciones hasta tercer orden perturbativo. Se construirán las primeras correcciones a la función de correlación. Se mostrarán el sesgo local y de curvatura lagrangiano renormalizados. Se mapearán tales teorías al espacio de corrimiento al rojo. También se mostrarán métodos numéricos para la integración de la función de correlación a 1-lazo. Se recomiendan las lecturas: Matsubara (2008), Carlson et al (2012), Vlah et al (2016) y Avilés (2018).

5.1 (1h) Desplazamientos lagrangianos y correspondencia con densidades de materia y dinámica lagrangiana.

5.2 (1h) Teoría de perturbaciones lagrangianas.

5.3 (1h) Función de correlación de Zeldovich.

5.4 (1h) Expansión en cumulantes.

5.5 (1h) Resumados al infrarojo

6. Análisis *Full-Shape* (13 hrs)

Se mostrará la implementación numérica moderna para obtener información cosmológica de catálogos galaxias usando el método de *Full-Shape*, que consiste en la comparación directa de datos de catálogos de galaxias y teoría efectiva. Se recomiendan las lecturas: Simonovic (2017), Chudaykin (2020) y Noriega (2020).

6.1 (2h) Espectros de potencia con resumados al infrarojo.

6.2 (1h) Métodos FFTLog

6.3 (2h) Código FOLPS para análisis *Full-Shape*. Código Class-PT

6.4 (3h) Métodos de cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) y código EMCEE

6.5 (1h) Efecto Alcock-Paczyński II

6.6 (1h) Marginalización analítica

6.4 (3h) Comparación con simulaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Assassi V., Baumann D., Green D., Zaldarriaga M. (2014). JCAP 08(2014)056. arXiv:1402.5916
- Bernardeau F., Colombi, S., Gaztañaga E., Scoccimarro R. (2002) *Large-scale structure of the Universe and cosmological perturbation theory*. Physics Reports 367 1-248 arXiv:astro-ph/0112551

- Chudaykin, Ivanov, Philcox, Simonović (2020), *Non-linear perturbation theory extension of the Boltzmann code CLASS*. Phys. Rev. D 102, 063533 (2020). arXiv:2004.10607
- Dodelson S., Schmidt F. (2020). *Modern cosmology*. Academic Press. 2nd Edition
- Desjacques V., Jeong D., Schmidt F. (2018) *Large-scale galaxy bias*. Physics Reports 733 1-193. arXiv:1611.09787
- Taruya A., Nishimichi T., Saito S. (2010) Phys.Rev.D82 063522. arXiv:1006.0699
- Vlah Z, White M. (2019). JCAP 03 007. arXiv:1812.02775
- Scoccimarro R. (2004). Phys.Rev.D70 083007, arXiv:astro-ph/0407214
- Matsubara T. (2008). Phys.Rev.D77 063530, arXiv:0711.2521
- McDonald P. (2006). Phys.Rev.D74 103512. arXiv:astro-ph/0609413.
- McDonald P., Roy A. (2009). JCAP 08(2009)020. arXiv:0902.0991.
- Hernán E. Noriega, Alejandro Aviles, Sébastien Fromenteau, Mariana Vargas-Magaña. *Fast computation of non-linear power spectrum in cosmologies with massive neutrinos*. JCAP 11 (2022) 038. arXiv:2208.02791
- Kaiser N. (1987). MNRAS 227 1–21.
- Carlson J., Reid B., White M. (2012). MNRAS 429 1674–1685. arXiv:1209.0780