

Campos Magnéticos Astrofísicos y Cosmológicos

Alejandra Kandus

- **Caracterización del curso:** El curso es de naturaleza teórico-práctica y está destinado a alumnos de doctorado en Ciencias Físicas y en Astronomía.
- **Carga Horaria Total:** El curso será dictado durante 12 semanas, con 2 clases por semana: una de 2 horas y otra de 3 horas, contabilizando un total de 60 horas.
- **Fecha de inicio:** la semana del 18 de agosto de 2014. En la semana del 11 de agosto habrá una reunión con los alumnos para fijar los días y horarios del curso.
- **Régimen de Aprobación de Trabajos Prácticos:** Habrá dos evaluaciones parciales con sus respectivos recuperatorios.
- **Examen Final:** Al final del curso será tomado un examen final.

Introducción

Todas las observaciones astronómicas hechas hasta el presente, han confirmado la presencia generalizada de campos magnéticos en el Universo. Tanto los objetos compactos, como planetas y estrellas, hasta las estructuras extensas como galaxias y aglomerados de galaxias presentan campos magnéticos de variada intensidad y estructura. La Vía Láctea, por ejemplo, posee un campo magnético coherente entre sus brazos, de intensidad del orden de los micro-Gauss, mientras que en los brazos domina una componente estocástica de intensidad varios ordenes de magnitud superior. Ese campo es una componente muy importante del medio interestelar, ya que gobierna la dinámica de las nubes de gas, determina la energía de los rayos cósmicos e influye sobre el proceso de formación estelar.

Campos magnéticos de características e intensidades similares han sido detectados en otras galaxias espirales y también en barradas e irregulares. Sin embargo el magnetismo cósmico no está confinado a las galaxias: Ha sido verificado repetidamente a través de observaciones la existencia de campos magnéticos de decenas de micro-Gauss en cúmulos de galaxias y también en estructuras protogalácticas de alto corrimiento al rojo. También fueron detectados campos magnéticos coherentes, de intensidades del orden de centenas de micro-Gauss en galaxias situadas en $z \sim 0,7$, hecho que sugiere que campos magnéticos semejantes al existente en la Vía Láctea son comunes en galaxias remotas.

La consecuencia inmediata de estas observaciones tiene que ver con el modelo de generación: un campo “semilla” amplificado por el mecanismo de “dínamo turbulento”. Por un lado el tiempo requerido por ese dínamo para construir un campo coherente sería considerablemente menor que el aceptado hasta ahora, y por otro lado la presencia generalizada de campos magnéticos relativamente intensos en objetos de alto corrimiento al rojo puede significar que esos campos son de origen cosmológico y no necesitaron de amplificación posterior.

Si bien todavía es muy temprano para llegar a una conclusión, la idea de magnetismo primordial gana terreno a medida que mas y mas campos de intensidad de los micro-Gauss son detectados en protogalaxias remotas. Mas soporte para esta hipótesis viene de observaciones recientes de campos

magnéticos en el espacio intergaláctico, de baja densidad, donde debido a la ausencia de plasma, no pueden operar dínamos. Sin embargo, es casi seguro que la respuesta al problema de origen del magnetismo cosmológico será encontrada en las huellas que esos campos pudieron haber dejado en la radiación de fondo de microondas. Sobre este último asunto hay simulaciones numéricas que proveen cotas al grado de polarización de esta radiación debido a estos campos. Por otro lado, los datos de la misión Planck no mostraron efectos debidos a ellos.

La idea de magnetogénesis primordial es atractiva porque, en principio, podría explicar todos los campos observados hoy en el universo. Sin embargo, para que un tal mecanismo sea operativo debe satisfacer necesariamente dos condiciones relacionadas con la escala de coherencia y con la intensidad: la escala de coherencia (extrapolada a valores de hoy) no debe ser menor que 10 Kpc, ya que si no, el dínamo galáctico (caso sea necesario) no podría operar. Respecto de la intensidad, ella tiene que estar en un intervalo 10^{-22} Gauss $\lesssim B \lesssim 10^{-9}$ Gauss. Hasta ahora no se ha encontrado un mecanismo de magnetogénesis primordial satisfactorio que cumpla con esos dos requerimientos.

Se considera que un mecanismo de magnetogénesis es primordial si tuvo lugar antes del desacople entre radiación y materia, es decir para un corrimiento al rojo $z > 1000$. Este criterio deja como candidatos a las transiciones de fase electrodébil y quark-hadrón y a todos los procesos que pudieran haber ocurrido durante Inflación y Recalentamiento. La diferencia principal entre los campos inducidos durante las transiciones de fase y durante Inflación está en la escala de coherencia: para los primeros esa escala es del orden del horizonte de partícula al momento de la generación, mientras que para los segundos es varios ordenes de magnitud mayor. La razón para esto es los procesos de inducción magnética en las transiciones de fase son causales, lo que confina la escala de coherencia de los campos producidos al tamaño del horizonte de partículas al momento de la generación. Traduciendo esto a algunos números, si el campo fue generado durante la transición de fase electrodébil, el tamaño del horizonte hoy es del orden del Sistema Solar. Si se asume que el plasma primordial posee algún grado de turbulencia, y que el campo “semilla” posee *helicidad magnética*, se podría aumentar la escala de coherencia del campo magnético mediante el proceso conocido en magnetohidrodinámica como “cascada inversa de helicidad magnética”. Inflación puede resolver el problema de la escala, ya que durante esa etapa se crean en forma natural correlaciones mayores que el horizonte de partícula. Sin embargo las intensidades producidas son muchos ordenes de magnitud menores que las necesarias para explicar las observaciones o alimentar un proceso posterior de amplificación. Debido a estos problemas se comenzó a buscar la solución al problema de las intensidad fuera de la teoría electromagnética clásica o de la cosmología convencional de Friedmann-Robertson-Walker. Ejemplos de esta búsqueda son correcciones cuántica en electrodinámica cuántica en espacio-tiempos curvos, anomalía de traza, teoría de cuerdas, dimensiones extras, etc.

Objetivos

El objetivo del curso es estudiar los distintos modelos de generación de los campos magnéticos detectados en galaxias y cúmulos de galaxias. Este estudio consistirá en dos grandes líneas: 1) mecanismos de generación primordiales y 2) “dínamo de campo medio” como paradigma de mecanismo de amplificación de campos primordiales. Los mecanismos serán analizados críticamente, enfatizando sus ventajas relativas, aspectos innovadores y limitaciones.

Programa

1. Introducción: Campos Magnéticos en el Universo.

(a) Observaciones de campos magnéticos de grande escala en el universo:

- Métodos de observación: Efecto Zeeman de la línea de 21 cm - Radiación de sincrotrón - Rotación de Faraday.
- Intensidades detectadas y geometría del campo asociado: Vía Láctea - Galaxias próximas - Aglomerados de Galaxias - Espacio intergaláctico - Objetos de alto corrimiento al rojo.

(b) Límites sobre los campos magnéticos primordiales:

- Cotas impuestas por nucleosíntesis primordial.
- Cotas a partir de las anisotropías de radiación cósmica de fondo.
- Cotas debidas a ondas gravitatorias.

2. Campos magnéticos en cosmología.

(a) Modelos cosmológicos relativistas magnetizados: El campo gravitatorio - Cinemática - Campos de materia - Campos electromagnéticos - Leyes de conservación.

(b) Evolución del campo electromagnético: Ecuaciones de Maxwell en espacio-tiempo curvo - Ecuación de ondas del campo electromagnético.

(c) Magnetohidrodinámica cosmológica: La ley de Ohm - El límite de la magnetohidrodinámica ideal.

(d) Formación de estructuras y magnetismo: El régimen lineal del proceso de formación de estructuras en cosmologías magnetizadas - Aspectos del régimen no lineal en cosmologías magnetizadas.

3. Magnetogénesis en universos de Friedmann-Robertson-Walker (FRW).

(a) Los modelos cosmológicos de Friedmann: Dinámica del universo de FRW - Evolución del factor de escala en los modelos de FRW.

(b) Magnetogénesis temprana versus magnetogénesis tardía: El paradigma del dínamo galáctico - Introducción a la magnetogénesis posterior a recombinación (batería de Biermann, supernovas) - Introducción a la magnetogénesis anterior a recombinación (baterías tipo Biermann primordiales, helicidad magnética).

(c) Campos magnéticos producidos en inflación: Generación de escalas grandes - Distintos acoplamientos del campo electromagnético con la curvatura durante Inflación - Decaimiento adiabático - Campo magnético residual.

(d) Amplificación de campos magnéticos en universos de FRW: Amplificación super-adiabática.

4. Magnetogénesis en el Modelo Estándar de Partículas.

(a) Magnetogénesis durante la etapa de recalentamiento del Universo: Resonancia paramétrica - Corrientes eléctricas estocásticas - Perturbaciones métricas.

- (b) Magnetogénesis en las transiciones de fase electrodébil (EW) y quark-hadrón (QCD): transición de fase electrodébil - Cuerdas cósmicas - Transición de fase quark-hadrón.

5. Magnetogénesis mas allá del Modelo Estándar.

- (a) Acoplamiento gravitacional del potencial de gauge.
- (b) Correcciones cuánticas a la electrodinámica en un espacio-tiempo curvo.
- (c) Anomalía de traza.
- (d) Acoplamiento del campo electromagnético con otros campos. Acoplamientos no constantes.
- (e) Magnetogénesis en teoria de cuerdas.
- (f) Magnetogénesis a partir de dimensiones extras.
- (g) Magnetogénesis en teorías con simetría de Lorentz rota.
- (h) Magnetogénesis y electrodinámica no lineal.

6. Amplificación de Campos Primordiales: Dínamo Turbulento de Campo Medio.

- Breve introducción a la magnetohidrodinámica clásica.
- Helicidades cinética y magnética.
- Ecuación de evolución del campo magnético en un medio turbulento: fuerza electromotriz turbulenta.
- Amplificación de campos magnéticos con y sin helicidad magnética.

Bibliografía

A continuación se indica la bibliografía básica del curso, la que será complementada con artículos ya publicados en revistas de primer nivel, y con aquellos que aparezcan en el correr del año.

- A. Kandus, K. Kunze and C. G. Tsagas, *Primordial Magnetogenesis*, Phys. Repts. **505**, 1 (2011).
- R. Durrer and A. Neronov, *Cosmological Magnetic Fields: Their Generation, Evolution and Observations*, The Astron. & Astrophys. Rev. **21**, art. 62 (2013).
- D. Ryu, D. R. G. Schleicher, R. A. Treumann, C. G. Tsagas and L. M. Widrow, *Magnetic Fields in the Large-Scale Structure of the Universe*, Sp. Sci. Rev., **166**, 1 (2012).
- L. M. Widrow, D. Ryu, D. R. G. Schleicher, K. Subramanian, C. G. Tsagas, and R. A. Treumann, *The First Magnetic Fields*, Sp. Sci. Rev., **166**, 37 (2012).
- D. Grasso and H. R. Rubinstein, Phys. Rep. **348**, 163 (2001).
- L. M. Widrow, Rev. Modern Phys. **74**, 775 (2002).
- A. Brandenburg and K. Subramanian, Phys. Rep. **417**, 1 (2005).
- J. D. Barrow, R. Maartens and C. G. Tsagas Phys. Rep. **449**, 131 (2007).
- D. Biskamp, *Magnetohydrodynamic Turbulence*, Camb. Univ. Press, Cambridge (2003).