Por qué así

TEMARIO DESARROLLADO

Bloque B · Radioastronomía

Los temas 35 a 88 en formato de examen: cada resultado, deducido

Muestra gratuita · primeras 19 de 423 páginas

Juan Carlos del Río

Temario de la oposición al Cuerpo de Astrónomos (subgrupo A1), programa de la convocatoria BOE-A-2025-24750

porqueasi.com · noviembre de 2026

Material de estudio elaborado de forma independiente a partir del temario. No es material oficial del organismo convocante ni de ninguna Administración, ni está avalado por ellos. Elaborado por el autor con ayuda de herramientas de inteligencia artificial; si encuentras un error, escribe a hola@porqueasi.com.

Índice

I Bloque B) Radioastronomia (temas 35 a 88) 11

35 Radioastronomía general, ventana atmosférica y radiotelescopios 12
1 Radioastronomía general . . . 13
2 Su importancia en astrofísica . . . 15
3 Transmisión atmosférica en el espectro de radiofrecuencias . . . 15
4 Generalidades sobre radiotelescopios y tipología . . . 16
5 Cierre y valoración . . . 18

36 Ondas electromagnéticas, Stokes y rotación de Faraday 20
1 Ondas electromagnéticas. Ecuaciones de Maxwell . . . 21
2 Solución general de las ecuaciones de Maxwell . . . 22
3 Velocidad de grupo . . . 23
4 Polarización de ondas electromagnéticas . . . 24
5 Parámetros de Stokes . . . 24
6 Rotación de Faraday: aplicaciones en radioastronomía . . . 25
7 Polarización de radiofuentes . . . 26
8 Cierre y valoración . . . 27

37 Interaccion materia-radiacion: mapa de los mecanismos de emision y absorcion 29
1 Interaccion materia-radiacion: los procesos elementales . . . 30
2 La division maestra: emision termica frente a no termica . . . 32
3 Inventario de los mecanismos de continuo . . . 32
4 Inventario de los mecanismos de linea. La emision estimulada como puente . . . 33
5 El criterio operativo de clasificacion y la relevancia en radioastronomia . . . 34
6 Cierre y valoracion . . . 35

38 Radiación del cuerpo negro: Planck, Wien y Rayleigh-Jeans 37
1 Radiación térmica del cuerpo negro . . . 38
2 Ley de Planck . . . 39
3 Ley del desplazamiento de Wien y ley de Stefan-Boltzmann . . . 40
4 Ley de Rayleigh-Jeans y su límite de validez . . . 40
5 Temperatura de brillo y dilución de haz . . . 41
6 Aplicación y ejemplos en radioastronomía . . . 42
7 Cierre y valoración . . . 43

39 Mecanismos de radiación en el continuo 45
1 Mecanismos de radiación en el continuo: marco común . . . 46

2 Emisión del polvo . . . 47
3 Radiación del gas ionizado . . . 48
4 Radiación sincrotrón . . . 50
5 Separación práctica de los tres mecanismos . . . 51
6 Cierre y valoración . . . 52

40 Radiación en líneas y coeficientes de Einstein **54**
1 Fundamentos de la radiación en líneas . . . 55
2 Coeficientes de Einstein . . . 56
3 Transferencia radiativa con los coeficientes de Einstein . . . 58
4 Cierre y valoración . . . 59

41 Transferencia radiativa **61**
1 Transferencia radiativa: la intensidad específica . . . 62
2 Absorción de energía electromagnética. Espesor óptico . . . 62
3 Emisión de energía electromagnética . . . 64
4 Emisión interna y absorción: la función fuente . . . 64
5 Irradiancia externa con emisión y absorción interna . . . 65
6 Ecuación de transferencia: los dos límites y su uso . . . 66
7 Cierre y valoración . . . 66

42 La atmósfera terrestre en ondas milimétricas y submilimétricas **69**
1 La estructura físico-química de la atmósfera terrestre . . . 70
2 Transferencia radiativa en el rango milimétrico y submilimétrico . . . 71
3 Medida de la absorción atmosférica . . . 72
4 Efectos refractivos de la atmósfera . . . 73
5 Cierre y valoración . . . 73

43 Atmósfera neutra y cargada en VLBI. Retraso dispersivo **76**
1 El observable es una fase, luego el error atmosférico es un retraso . . . 77
2 La atmósfera neutra: hidrostático, húmedo y proyección . . . 78
3 Turbulencia, estructura de fase y tiempo de coherencia . . . 79
4 La atmósfera cargada: el retraso dispersivo . . . 80
5 Técnicas de corrección y su compromiso . . . 81
6 Cierre y valoración . . . 82

44 Emisión en la línea de 21 cm del hidrógeno neutro **84**
1 Emisión en la línea de los 21 centímetros del hidrógeno neutro . . . 85
2 Líneas de emisión y absorción . . . 87
3 Aplicaciones . . . 88
4 Cierre y valoración . . . 89

45 Líneas del monóxido de carbono **91**
1 Por qué el H_2 no se observa y por qué el sustituto es el CO . . . 92
2 La escalera rotacional del CO: qué selecciona cada transición . . . 92
3 Opacidad de la línea de ^{12}CO e isotopólogos . . . 94
4 De la línea a la masa: columna en ETL y el factor X_{CO} . . . 94
5 Relevancia en el medio interestelar y en las galaxias . . . 95
6 Cierre y valoración . . . 96

46 Líneas de recombinación a frecuencias radio **98**
1 Líneas de recombinación a frecuencias radio . . . 99
2 Parámetros físicos de las líneas . . . 99
3 Intensidades de las líneas en condiciones de equilibrio térmico . . . 100
4 Intensidades de las líneas en condiciones de no equilibrio térmico . . . 101
5 Observaciones de líneas de recombinación . . . 102
6 Cierre y valoración . . . 103

47 Líneas moleculares rotacionales **105**
1 Líneas moleculares rotacionales . . . 106
2 Moléculas diatómicas . . . 108
3 Moléculas poliatómicas lineales . . . 108
4 Moléculas poliatómicas no lineales . . . 109
5 Cierre y valoración . . . 110

48 Astroquímica: formación y destrucción de moléculas **112**
1 Astroquímica: la paradoja del gas frío y el criterio que selecciona las rutas . 113
2 Principales procesos de formación . . . 114
3 Principales procesos de destrucción . . . 115
4 Lugares de formación de las moléculas y del polvo . . . 116
5 Cierre y valoración . . . 117

49 Abundancias de las moléculas interestelares. Densidad proyectada **119**
1 Abundancias de las moléculas interestelares . . . 120
2 Densidad proyectada . . . 121
3 Métodos de análisis . . . 122
4 Observaciones multi-línea . . . 123
5 Diagnósticos de densidad y temperatura . . . 123
6 Cierre y valoración . . . 124

50 Máseres astronómicos y megamáseres **126**
1 Máseres astronómicos . . . 127
2 Principales moléculas con efecto máser en el medio interestelar y circunestelar 129
3 Megamáseres . . . 130
4 Cierre y valoración . . . 131

51 Radiofuentes galácticas: naturaleza y tipos de emisión **133**
1 Radiofuentes galácticas: qué se mide y qué se concluye . . . 134
2 Naturaleza y tipo de emisión: estrellas, regiones HII, medio interestelar y circunestelar . . . 135
3 Pulsares y restos de supernova . . . 136
4 Fondo galáctico, confusión y procedimiento ante una fuente sin identificar . 138
5 Cierre y valoración . . . 138

52 Radiofuentes extragalácticas: radiogalaxias y cuásares **140**
1 Radiofuentes extragalácticas: delimitación, escalas y observables . . . 141
2 Naturaleza de la emisión: sincrotrón, autoabsorción y espectro compuesto . 142
3 Tipo de emisión y morfología: radiogalaxias y clasificación de Fanaroff y Riley 143
4 Cuásares y blazares: orientación, movimiento superluminal y realce Doppler 144
5 Cierre y valoración . . . 145

53 Radioestrellas, Sol y vientos estelares **147**
1 Radioestrellas . . . 148
2 La emisión del Sol en radiofrecuencias . . . 149
3 Estrellas eruptivas y binarias activas . . . 150
4 Vientos estelares . . . 151
5 Estrellas simbióticas y cataclísmicas . . . 152
6 Cierre y valoración . . . 152

54 Evolución post-secuencia principal: gigantes rojas, AGB y envolturas circunestelares **154**
1 Evolución post-secuencia principal de las estrellas . . . 156
2 Estrellas gigantes rojas . . . 156
3 Estrellas AGB . . . 157
4 Envolturas circunestelares . . . 158
5 Utilidad de la radioastronomía para su estudio . . . 158
6 Máseres circunestelares . . . 159
7 Cierre y valoración . . . 160

55 Evolución tardía de estrellas masivas, supernovas y rayos cósmicos **162**
1 Evolución tardía de estrellas masivas . . . 163
2 Utilidad de la radioastronomía para su estudio . . . 164
3 Nebulosas planetarias . . . 165
4 Supernovas: origen y clasificación . . . 165
5 Erupciones de rayos gamma . . . 166
6 Rayos cósmicos . . . 167
7 Cierre y valoración . . . 168

56 Remanentes estelares: enanas blancas, estrellas de neutrones y magnetares **170**
1 Remanentes estelares: enanas blancas, física de la materia degenerada, límite de Chandrasekhar . . . 171
2 Estrellas de neutrones y púlsares . . . 173
3 Magnetares . . . 174
4 Utilidad de la radioastronomía para su estudio . . . 175
5 Cierre y valoración . . . 175

57 La Vía Láctea: morfología y cinemática con HI y CO **177**
1 La Vía Láctea . . . 178
2 Observaciones radioastronómicas . . . 179
3 Morfología y cinemática determinadas a partir de observaciones de HI y CO 180
4 Rotación diferencial y constantes de Oort . . . 181
5 Cierre y valoración . . . 183

58 Condiciones fisicas de las regiones HII **185**
1 Condiciones fisicas de las regiones HII . . . 186
2 Equilibrio ionizacion recombinacion . . . 187
3 Equilibrio termico . . . 189
4 Lo que se mide en radio: continuo libre-libre y lineas de recombinacion . . . 190
5 Cierre y valoracion . . . 191

59 El medio interestelar difuso **193**
1 El medio interestelar difuso . . . 194
2 Observaciones . . . 196
3 Excitación de las líneas de estructura fina más importantes . . . 196
4 Procesos de calentamiento y enfriamiento . . . 198
5 Cierre y valoración . . . 199

60 Nubes moleculares: gas, polvo y estructura **201**
1 Nubes moleculares interestelares en la Vía Láctea y en otras galaxias . . . 202
2 El gas y el polvo interestelares . . . 204
3 Observaciones relacionadas con su estructura y con la formación estelar . . . 205
4 Cierre y valoración . . . 207

61 Regiones de formación estelar **209**
1 Regiones de formación estelar . . . 210
2 Estabilidad . . . 210
3 Relevancia de los campos magnéticos y de los vientos estelares . . . 212
4 Observaciones en ondas de radio . . . 214
5 Cierre y valoración . . . 215

62 El Centro Galáctico y la región de Sgr A* **217**
1 El Centro Galáctico: distribución de la materia . . . 218
2 Radiofuentes en su entorno . . . 219
3 Estructura y características de la región Sgr A* . . . 221
4 Utilidad de la radioastronomía para su estudio . . . 222
5 Cierre y valoración . . . 223

63 El espectro del medio interestelar en ondas de radio **225**
1 El espectro del medio interestelar en ondas de radio . . . 226
2 Polvo y gas . . . 228
3 Emisión en el continuo y diferentes líneas espectrales . . . 229
4 Cierre y valoración . . . 230

64 Espectros de galaxias en ondas de radio **232**
1 Espectros de galaxias en ondas de radio . . . 233
2 Emisión en el continuo . . . 234
3 Principales líneas de emisión y absorción . . . 235
4 Relevancia del desplazamiento hacia el rojo . . . 235
5 Cierre y valoración . . . 236

65 Materia oscura y su relevancia en radioastronomía **239**
1 Materia oscura y su relevancia en radioastronomía . . . 240
2 Fundamentos observacionales de su existencia . . . 241
3 Hipótesis principales sobre su naturaleza . . . 243
4 Relación de masa respecto a la materia ordinaria . . . 244
5 Cierre y valoración . . . 245

66 Agujeros negros: fundamentos, evidencias y radioastronomía **247**
1 Agujeros negros. Características . . . 248
2 Fundamentos teóricos . . . 250

3 Evidencias observacionales y perspectivas . . . 251
4 Utilidad de la radioastronomía para su estudio . . . 252
5 Cierre y valoración . . . 253

67 Eventos transitorios: FRB, GRB y ondas gravitacionales 255
1 Eventos transitorios . . . 256
2 Ráfagas rápidas en ondas de radio (FRBs) . . . 257
3 Ráfagas de rayos gamma (GRBs) . . . 259
4 Ondas gravitacionales y fusión de agujeros negros y estrellas de neutrones . . . 260
5 Cierre y valoración . . . 262

68 Emisión molecular de galaxias externas 264
1 El censo molecular no resuelto . . . 265
2 Principales trazadores . . . 266
3 Emisión a alto desplazamiento al rojo . . . 267
4 Cierre y valoración . . . 268

69 Galaxias activas y modelo unificado 270
1 Observaciones . . . 271
2 Taxonomía y su reducción . . . 272
3 El modelo unificado . . . 273
4 Chorros extragalácticos . . . 273
5 Cierre y valoración . . . 275

70 El fondo cósmico de microondas 277
1 Descubrimiento y cuerpo negro . . . 278
2 Recombinación, dipolo y medidas sucesivas . . . 280
3 El espectro de potencias angular . . . 280
4 Los parámetros del modelo estándar . . . 281
5 Sunyaev-Zeldovich y contaminantes . . . 282
6 Cierre y valoración . . . 282

71 Calibración absoluta de radiotelescopios 285
1 Observación de líneas y cadena de escalas . . . 286
2 Fuentes celestes y método directo . . . 287
3 Método del chopper-wheel . . . 288
4 Skydips . . . 289
5 Cold-chopper y presupuesto de error . . . 289
6 Cierre y valoración . . . 290

72 Cartografiado con antena única 292
1 El mapa como muestreo en el tiempo . . . 293
2 Rasters y "on the fly" en posición . . . 294
3 "On the fly" en frecuencia . . . 295
4 Resolución angular óptima . . . 295
5 Posiciones de referencia . . . 296
6 Receptores multipíxel . . . 297
7 Cierre y valoración . . . 297

73 Observaciones con interferómetros 299

1 Procedimientos básicos . . . 300
2 Rango dinámico . . . 301
3 Procedimientos de observación . . . 302
4 Filtrado espacial . . . 303
5 Efectos de la atmósfera . . . 303
6 Polarimetría: respuesta a los parámetros de Stokes . . . 304
7 Polarización instrumental . . . 304
8 Procesado de datos . . . 305
9 Cierre y valoración . . . 305

74 Preparación de observaciones: efemérides, eficiencia y Doppler 308
1 Visibilidad, marcos y posición aparente . . . 309
2 Software para el cálculo de efemérides . . . 311
3 Ciclos típicos de uso y eficiencia temporal . . . 312
4 Correcciones Doppler para observaciones espectrales . . . 313
5 Cierre y valoración . . . 314

75 Análisis de datos, formatos y software 316
1 La cadena de reducción por capas . . . 317
2 FITS: la estructura autodescriptiva . . . 318
3 VDIF y los formatos de visibilidad . . . 319
4 Programas: cada paquete en su capa . . . 319
5 Procedimientos de análisis y trazabilidad . . . 320
6 Cierre y valoración . . . 321

76 IA para programar, compilación e interpretación 323
1 Uso de la IA para la programación de código . . . 324
2 Opciones disponibles . . . 326
3 Conversión de lenguajes . . . 326
4 Lenguajes compilados e interpretados . . . 327
5 Cierre y valoración . . . 329

77 Gestión del código software 331
1 El código como historia de cambios . . . 332
2 Repositorios y flujo de trabajo . . . 334
3 Licencias de código abierto . . . 334
4 Entornos colaborativos, dependencias y citación . . . 336
5 Cierre y valoración . . . 337

78 Seguridad informática, red interna segura y ENS 339
1 Dimensiones, riesgo y principios de diseño . . . 340
2 Diseño de una red interna segura . . . 341
3 Contraseñas y sistemas de doble factor . . . 343
4 ENS: Esquema Nacional de Seguridad . . . 344
5 Cierre y valoración . . . 345

79 Astrometría VLBI con referencia de fase 347
1 La fase como observable astrométrico . . . 348
2 La técnica: calibrador, conmutación y cancelación . . . 349
3 Presupuesto de error y precisión alcanzable . . . 350

4 Mismo haz y observación simultánea . . . 351
5 Resultados . . . 351
6 Cierre y valoración . . . 352

80 Proyectos científicos de astronomía 354
1 Ciclo del proyecto y anatomía de la propuesta . . . 355
2 Procedimientos de evaluación . . . 357
3 Métodos de observación . . . 358
4 Datos, periodo propietario y publicación . . . 358
5 Datos abiertos, reproducibilidad y Observatorio Virtual . . . 359
6 Cierre y valoración . . . 359

81 Señal digital: muestreo, Fourier, FFT y Lomb-Scargle 361
1 Representación temporal y espectral de la señal astronómica . . . 362
2 Muestreo, digitalización, reproducibilidad y relación señal a ruido . . . 363
3 Transformadas de Fourier . . . 364
4 Implementaciones: FFT y Lomb-Scargle . . . 365
5 Casos de uso de las FFT en radioastronomía . . . 366
6 Cierre y valoración . . . 367

82 Síntesis de apertura y función de visibilidad 369
1 Síntesis de apertura . . . 370
2 Función de visibilidad . . . 371
3 Métodos para la mejora de la imagen . . . 371
4 Calibración y correcciones a las medidas . . . 372
5 Cierre y valoración . . . 373

83 Clima espacial 376
1 Clima espacial: agentes, relojes y alcance . . . 377
2 La ionosfera, la atmósfera y el campo magnético terrestres . . . 378
3 Impacto del viento solar en la magnetosfera . . . 379
4 Daños en órbita y en tierra . . . 380
5 Predicción y modelos . . . 381
6 Cierre y valoración . . . 382

84 Medida de distancias en astronomía 385
1 La escalera de distancias: el principio generador . . . 386
2 Métodos directos: geometría sin hipótesis físicas . . . 387
3 Métodos indirectos: la vela estándar . . . 388
4 Relaciones de escala y métodos físicos independientes . . . 389
5 Unidades habituales empleadas . . . 389
6 Limitaciones de cada método . . . 390
7 Criterio práctico: qué método en cada régimen . . . 390
8 Cierre y valoración . . . 391

85 El Observatorio Astronómico Nacional 393
1 Naturaleza del OAN y principios del tema . . . 394
2 Historia . . . 395
3 Funciones . . . 396
4 Instrumentación y criterios de diseño . . . 397

5 Líneas actuales de investigación . . . 398
6 Cierre y valoración . . . 399

86 Redes de VLBI: EVN, VLBA, GMVA, KVN, AVN, KaVa; SKA y ngVLA 401
1 Criterios de diseño de una red de VLBI . . . 402
2 Redes consolidadas de banda centimétrica: EVN y VLBA . . . 404
3 La apuesta por la frecuencia: GMVA, KVN y KaVa . . . 405
4 La red africana AVN: geometría y capacitación . . . 405
5 Proyectos futuros que incorporan VLBI: SKA y ngVLA . . . 406
6 Cifras de trabajo derivadas . . . 406
7 Cierre y valoración . . . 407

87 Principales observatorios radioastronómicos del mundo 409
1 Observatorios: cuatro variables de diseño . . . 410
2 Platos únicos grandes en centimétricas . . . 412
3 Platos únicos milimétricos y submilimétricos . . . 413
4 Interferómetros conectados . . . 413
5 Rangos de funcionamiento y aplicaciones . . . 414
6 Criterio de elección y complementariedad . . . 414
7 Cierre y valoración . . . 415

88 Misiones espaciales para el estudio del universo 417
1 Por qué se va al espacio y qué órbita se elige . . . 418
2 Infrarrojo: criogenia, parasol y vida útil . . . 420
3 Óptico y ultravioleta: estabilidad y astrometría . . . 420
4 Rayos X y gamma: óptica rasante y área frente a nitidez . . . 421
5 Materia oscura, energía oscura y ondas gravitatorias . . . 422
6 Cierre y valoración . . . 422

Parte I

Bloque B) Radioastronomia (temas 35 a 88)

Tema 35

Radioastronomía general, ventana atmosférica y radiotelescopios

Índice del tema

1. Radioastronomía general: rango espectral, detección coherente y límite de difracción.
2. Su importancia en astrofísica: extinción, emisión no térmica y gas frío.
3. Transmisión atmosférica en el espectro de radiofrecuencias: cortes, subventanas y criterios de planificación.
4. Generalidades sobre radiotelescopios y tipología: óptica, monturas, superficie y eficiencias.
5. Cierre y valoración.

NUCLEO — lo unico que hay que memorizar; todo lo demas se deduce de aqui

Principios generadores

P1 Difraccion: $\theta \simeq 1{,}2\,\lambda/D$ — en radio λ es 10^5–10^7 veces la optica, luego el plato solo no resuelve y hay que sintetizar D con interferometria.

P2 Atenuacion y emision atmosfericas acopladas: la senal va como $e^{-\tau}$ con $\tau = \tau_z\,A$, $A \simeq 1/\sin(\mathrm{el})$, y el cielo emite $T_{\mathrm{sky}} = T_{\mathrm{atm}}(1 - e^{-\tau})$; τ_z crece con ν y con el vapor de agua precipitable (PWV).

P3 Tolerancia de superficie (Ruze): $\eta_R = \exp[-(4\pi\sigma/\lambda)^2]$ — la rugosidad rms σ del primario fija la frecuencia maxima util de la antena.

P4 Teorema de antena y cadena de eficiencias: $A_{\mathrm{ef}}\,\Omega_A = \lambda^2$ y $\eta_A = A_{\mathrm{ef}}/A_{\mathrm{geo}} = \eta_R\,\eta_s\,\eta_b$, de donde la ganancia $\Gamma = 2k/(\eta_A A_{\mathrm{geo}})$ en Jy/K — genera resolución, sensibilidad y escala de flujo.

Datos indeducibles (en orden: el ultimo es el primero que se sacrifica)

D1 **Ventana de radio desde tierra: de ∼10–30 MHz (corte inferior por reflexion ionosferica, $\nu < \nu_p$) hasta ∼1 THz (corte superior por vapor de agua); dentro de ella τ_z crece con ν y esta troceada en subventanas.**

D2 Bordes de subventana: O_2 en 60 GHz y 118 GHz (opacidad seca, no mejora con sitio seco); H_2O en 22,2 GHz y 183 GHz (opacidad humeda, escala con PWV).

D3 Lineas de trabajo: HI 1420,406 MHz; NH_3(1,1) 23,694 GHz; SiO v=1 J=1–0 43,122 GHz; CO(1–0) 115,271 GHz; CO(2–1) 230,538 GHz; CO(3–2) 345,796 GHz.

D4 Yebes RT40m: $D = 40$ m, σ del orden de 0,2 mm rms, receptores de ∼2 a 50 GHz mas banda W (∼86–116 GHz); RT13.2m: $D = 13,2$ m, VGOS geodesico de banda ancha ∼2–14 GHz.

D5 IRAM 30m (Pico Veleta, ∼2900 m): $D = 30$ m, σ del orden de 60 μm rms, cobertura ∼80–360 GHz.

D6 NOEMA (Plateau de Bure, ∼2550 m): 12 antenas de 15 m, ∼70–280 GHz, bases hasta ∼1,7 km. ALMA (Chajnantor, 5050 m): 50 antenas de 12 m mas ACA, ∼84–950 GHz, bases hasta ∼16 km.

D7 Criterio de planificacion por PWV: $\lesssim$1 mm exige el sitio alto y seco para $\nu \gtrsim 300$ GHz; con 2–5 mm solo son razonables $\nu \lesssim 115$ GHz.

D8 Tipología óptica: foco primario; Cassegrain (secundario hiperbólico, foco tras el vértice); Gregoriano (secundario elipsoidal, foco real intermedio); Nasmyth (tercer espejo al eje de elevación). Montura altacimutal estándar, con rotación del campo y del plano de polarización; primario de superficie activa medido por holografía.

D9 Constantes y conversiones: $c = 3 \times 10^8$ m s^{-1}, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J K^{-1}, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J s, 1 Jy $= 10^{-26}$ W m^{-2} Hz^{-1}, 1 rad $= 206265''$.

D10 Hitos: Jansky detecta la emisión galáctica en 1933; HI de 21 cm predicha en 1944 y detectada en 1951; fondo cósmico de microondas en 1965; púlsares en 1967.

Total: 14 items.

Como se escribe este tema en 57 minutos

Minutos 0–4: índice en el folio 1 y núcleo volcado en sucio al margen (P1–P4 y D1–D10 en cuatro líneas). Es la única memoria que se usa después.
Minutos 4–13: apartado 1, una cara. La definición de la banda, la detección coherente y el cálculo de θ para el HI.
Minutos 13–24: apartado 2, una cara. Tres razones con un número cada una.
Minutos 24–39: apartado 3, cara y media. La figura se dibuja hacia el minuto 27 y no debe pasar de dos minutos: ejes, curva, cuatro picos y las bandas sombreadas.
Minutos 39–52: apartado 4, cara y media. Ruze y eficiencias con sus dos cálculos; tipología en lista.
Minutos 52–56: cierre en media cara, sin enumeraciones.
Minuto 56–57: repaso de unidades y de los cuatro números que sostienen el tema ($84''$, $\eta_R = 0,60$, 49 K, 7,8 Jy/K). Total previsto: cinco caras.

1 Radioastronomía general

La radioastronomía estudia la radiación electromagnética de origen cósmico entre unos 10 MHz y 1 THz, es decir, entre unos 30 m y 0,3 mm de longitud de onda ⟨D1⟩. Los dos extremos no los elige el observador: el inferior lo impone la reflexión ionosférica y el superior la absorción por vapor de agua, de modo que la banda útil desde tierra es un dato atmosférico antes que instrumental ⟨P2,D1⟩.

Tres rasgos la separan de la astronomía óptica, y de ellos se deduce casi todo lo demás:

1. **Detección coherente.** Se mide el campo eléctrico con amplitud y fase, y no un recuento de fotones, porque el ruido cuántico $h\nu/k$ es despreciable frente al ruido térmico del receptor: a 100 GHz, $h\nu/k = 6,63 \times 10^{-34} \times 10^{11}/1,38 \times 10^{-23} = 4,8$ K,

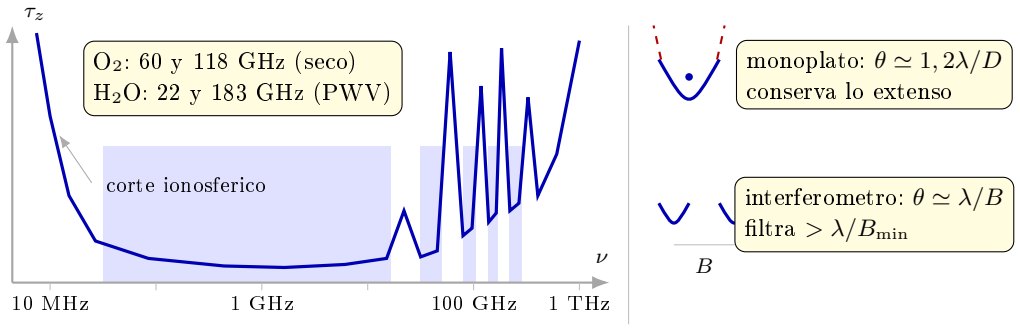


Figura 35.1: [Dibujable en 2 min: sí] Lo que hay que leer: la ventana no es continua, sino troceada por cuatro picos, y solo dos de ellos mejoran con el emplazamiento; en el panel derecho, que las dos tipologías no compiten en resolución sino que se reparten escalas angulares complementarias.

frente a decenas o centenas de K de temperatura de sistema ⟨D9⟩. De ahí que sean posibles la interferometría, el VLBI y la espectroscopía de resolución altísima.

2. **Régimen de Rayleigh-Jeans.** Como $h\nu \ll kT$ en casi toda la banda, la intensidad es lineal en la temperatura y se expresa como temperatura de brillo T_B, lo que convierte toda la radiometría en una medida de temperaturas ⟨D9⟩.

3. **Resolución pobre.** Por difracción, $\theta \simeq 1,2\,\lambda/D$, y λ es aquí entre 10^5 y 10^7 veces la óptica ⟨P1⟩. El RT40m de Yebes en la línea del HI de 1420,406 MHz ($\lambda = c/\nu = 3\times10^8/1,42\times10^9 = 0,211$ m) da $\theta = 1,2\times0,211/40 = 6,3\times10^{-3}$ rad $= 6,3\times10^{-3}\times206265'' \simeq 22'$, casi el diámetro aparente de la Luna ⟨P1,D3,D4,D9⟩.

El tercer rasgo manda sobre todo el diseño instrumental. Un plato de decenas de metros produce haces de minutos o segundos de arco, y como el área recolectora crece solo como D^2 mientras el coste de un plato rígido crece mucho más deprisa, la única salida es sintetizar el diámetro combinando antenas separadas ⟨P1⟩.

De ahí la división básica de la tipología: monoplato, que conserva toda la emisión extensa pero resuelve poco, frente a interferómetro, que gana resolución con la base máxima y pierde las escalas mayores que $\lambda/B_{\min}$ ⟨P1⟩.

De donde sale — la derivacion; no se escribe en el examen

El factor 1,2. Una apertura circular uniformemente iluminada produce un patrón de Airy cuyo primer cero cae en $\theta = 1,22\,\lambda/D$; la anchura a media potencia del lóbulo principal vale $\simeq 1,02\,\lambda/D$ con iluminación uniforme y sube hacia $1,2\,\lambda/D$ cuando se apodiza el borde del primario para reducir los lóbulos laterales, que es lo que se hace siempre en radio.
Por tanto $1,2\,\lambda/D$ no es una constante universal sino el valor típico de una antena con iluminación cónica real, y conviene decirlo así en el examen.
Teorema de antena. De la reciprocidad entre emisión y recepción se sigue $A_{\rm ef}\,\Omega_A = \lambda^2$, con Ω_A el ángulo sólido del haz. Como $\Omega_A \simeq \theta^2$ y $A_{\rm ef} \simeq \eta_A \pi D^2/4$, se recupera $\theta \simeq \lambda/D$ salvo factores de orden uno.
Dimensionalmente: $[\mathrm{m}^2][\mathrm{sr}] = [\mathrm{m}^2]$, con el estereorradián adimensional. La misma relación da la ganancia en Jy/K sin más que igualar la potencia recogida $\frac{1}{2}A_{\rm ef}S$ con kT_A.

2 Su importancia en astrofísica

La radioastronomía no es una versión de baja resolución de la óptica: ve poblaciones que en el visible son invisibles por principio. Tres razones independientes lo explican.

1. **La extinción es despreciable**, porque la sección eficaz del polvo decrece fuertemente con la longitud de onda: hacia el centro galáctico el visible sufre decenas de magnitudes de extinción y en milimétricas la línea de visión es transparente. De ahí que el interior de las nubes moleculares, el centro de la Galaxia y los núcleos activos oscurecidos sean objetos accesibles solo aquí ⟨D3⟩.

2. **Domina la emisión no térmica**, sincrotrón y libre-libre, con espectros en ley de potencias decreciente que hacen que radiogalaxias, restos de supernova y chorros relativistas sean esencialmente fenómenos de radio; el inventario de mecanismos corresponde a otro tema.

3. **Las transiciones útiles son de energía mínima.** Para el HI, $\Delta E/k = h\nu/k = 6,63\times10^{-34}\times1,42\times10^{9}/1,38\times10^{-23} = 0,068$ K, y para CO(1–0) a 115,271 GHz sale $5,5$ K ⟨D3,D9⟩. Por tanto se excitan colisionalmente a 10–100 K y son los únicos trazadores directos del gas frío, que es donde se forma todo lo demás ⟨D3⟩.

Las consecuencias históricas encadenan con lo anterior. Jansky identifica en 1933 una emisión que no podía ser térmica estelar; la línea de 21 cm, predicha en 1944 y detectada en 1951, permite pesar y cinematizar el gas atómico de toda la Galaxia, incluida la curva de rotación plana que sostiene la hipótesis de materia oscura ⟨D3,D10⟩.

El fondo cósmico de microondas, descubierto en 1965, y los púlsares, en 1967, son descubrimientos radio puros: el primero porque su espectro de cuerpo negro a unos 3 K tiene el máximo en milimétricas, el segundo porque exige resolución temporal de milisegundos sobre emisión no térmica intensa ⟨D10⟩.

A esto se añade la métrica: el VLBI da resoluciones de microsegundos de arco y es, a la vez, la técnica que materializa el sistema de referencia celeste y mide la orientación de la Tierra, de donde procede buena parte del interés institucional del Instituto Geográfico Nacional por la radioastronomía ⟨P1,D4⟩.

3 Transmisión atmosférica en el espectro de radiofrecuencias

La ventana de radio queda definida por dos cortes de naturaleza distinta y por un troceado interior ⟨D1⟩.

1. **Corte inferior, ionosférico.** Un plasma refleja toda onda con $\nu < \nu_p$, y la frecuencia de plasma vale $\nu_p \simeq 9\sqrt{n_e}$ kHz con n_e en cm^{-3}: con $n_e \sim 10^6$ cm^{-3} en la capa F se obtiene $\nu_p \simeq 9\times10^3\times10^3$ Hz $= 9$ MHz, que es el orden del corte observado ⟨D1⟩. Por tanto el límite depende del ciclo solar y de la hora, y por debajo de él solo se observa desde el espacio.

2. **Troceado interior.** Dos moléculas rompen la ventana: el O_2, con transiciones en 60 GHz y 118 GHz, y el H_2O, en 22,2 GHz y 183 GHz ⟨D2⟩. La distinción es operativa: el oxígeno está bien mezclado y su opacidad no mejora subiendo a un sitio seco, mientras que la del vapor de agua escala con el PWV y sí se compra con altitud y clima ⟨D2,D7⟩.

3. **Corte superior.** Por encima de ∼1 THz las alas de las líneas de vapor de agua se solapan y la atmósfera es opaca desde cualquier emplazamiento terrestre, de modo que el submilimétrico extremo es dominio de aviones, globos y satélites ⟨D1⟩.

La dependencia con la dirección apuntada sale de un modelo plano-paralelo: si τ_z es la opacidad en el cenit, una línea de visión a elevación el atraviesa un camino $1/\sin(\text{el})$ veces mayor, de donde la masa de aire $A \simeq 1/\sin(\text{el})$ y $\tau = \tau_z A$ ⟨P2⟩. A elevación 30°, $A = 1/0,5 = 2$ ⟨P2,D9⟩.

Lo decisivo es que la atmósfera no solo atenúa, sino que emite, porque la misma masa de aire que absorbe radia a su temperatura física:

$$T_{\text{sig}} \propto e^{-\tau_z A}, \qquad T_{\text{sky}} = T_{\text{atm}}\left(1 - e^{-\tau_z A}\right). \tag{35.1}$$

Con $\tau_z = 0,10$ y elevación 30° la transmisión es $e^{-0,20} = 0,82$, es decir, un 18 % de pérdida, y con $T_{\text{atm}} = 270$ K el cielo aporta $270 \times 0,18 = 49$ K que se suman a la temperatura de sistema ⟨P2,D9⟩.

En consecuencia la penalización es doble y el tiempo de integración necesario crece como $e^{2\tau}$, no como e^{τ}: la señal baja por un factor $e^{-\tau}$ y el ruido sube porque T_{sys} incorpora T_{sky} ⟨P2⟩. Esa es la razón física de que la planificación se decida con dos números y no con uno.

Los dos números son el PWV y la elevación mínima. Con PWV $\lesssim$ 1 mm se abren las ventanas por encima de 300 GHz, mientras que con 2–5 mm solo son razonables las frecuencias $\lesssim$ 115 GHz, y por eso ALMA está a 5050 m y el 30m de IRAM a 2900 m ⟨D5,D6,D7⟩. La elevación mínima operativa suele fijarse en torno a 20–30° porque más abajo A crece deprisa y el modelo plano-paralelo deja de valer por la curvatura terrestre ⟨P2⟩.

De donde sale — la derivacion; no se escribe en el examen

De dónde sale la pareja atenuación-emisión. Se parte de la solución de la ecuación de transferencia para una capa isoterma a T_{atm}: la intensidad emergente es la incidente atenuada más la emitida por la capa, $I = I_0 e^{-\tau} + B(T_{\text{atm}})(1 - e^{-\tau})$.
En régimen de Rayleigh-Jeans las intensidades son proporcionales a temperaturas, de modo que la expresión se lee directamente como $T = T_0 e^{-\tau} + T_{\text{atm}}(1 - e^{-\tau})$, que es P2. Las hipótesis son tres: capa isoterma, equilibrio termodinámico local y plano-paralelismo.
Comprobación de límites. Si $\tau \to 0$ queda $T = T_0$, sin atmósfera; si $\tau \to \infty$ queda $T = T_{\text{atm}}$, cielo opaco a temperatura ambiente. Ambos casos son los esperados, lo que valida la forma funcional sin necesidad de recordarla.

Si lo olvido — como se regenera en el examen

Si se olvidan las frecuencias exactas de D2, basta con el reparto cualitativo: dos picos de O_2 por debajo de 130 GHz y dos de H_2O, uno cerca de 20 GHz y otro cerca de 200 GHz. Lo que no puede olvidarse es cuál es seco y cuál húmedo, porque es lo que decide el emplazamiento.
Si se olvida el corte inferior, se regenera con la frecuencia de plasma: densidad electrónica ionosférica del orden de 10^6 cm^{-3} y $\nu_p \simeq 9\sqrt{n_e}$ kHz dan decenas de MHz sin más datos.
Si se olvida el criterio de PWV de D7, se escribe la idea general: el vapor de agua integrado en la columna es la variable de control, y cada salto de una subventana a la siguiente en frecuencia exige aproximadamente dividir por dos el PWV tolerable.

4 Generalidades sobre radiotelescopios y tipología

Un radiotelescopio se clasifica por cuatro ejes, y cada uno responde a un compromiso distinto:

1. **Número de elementos**: monoplato frente a interferómetro, porque uno conserva el flujo extenso y el otro compra resolución ⟨P1⟩.
2. **Configuración óptica**: foco primario, Cassegrain, Gregoriano o Nasmyth, porque cada una sitúa el receptor en un lugar distinto y eso decide su tamaño y su ruido ⟨D8⟩.
3. **Montura**: altacimutal en casi todo instrumento moderno, porque es mecánicamente más barata, a cambio de rotación del campo ⟨D8⟩.
4. **Rango de frecuencia**: la elección de σ, de emplazamiento y de criogenia se deduce del techo de frecuencia deseado ⟨P3,D7⟩.

La óptica se elige por dónde va el receptor. El **foco primario** da la máxima área efectiva y la mínima temperatura de sistema en centimétricas, pero la cabina es pequeña e incómoda. El **Cassegrain**, con secundario hiperbólico y foco tras el vértice, admite criostatos grandes y hace que el desbordamiento del haz mire al cielo frío en vez de al suelo a 300 K, y por eso es el estándar en milimétricas ⟨D8,D5⟩.

El **Gregoriano** interpone un foco real intermedio donde se puede calibrar o colocar un corrector de campo, y el **Nasmyth** lleva el haz al eje de elevación, de manera que el receptor queda fijo respecto a la gravedad: ideal para criostatos pesados y para VLBI, a costa de la rotación del campo y del plano de polarización ⟨D8⟩.

La resolución se calcula siempre igual. El RT40m a 22 GHz tiene $\lambda = 3\times10^8/2{,}2\times10^{10} = 13{,}6$ mm, luego $\theta = 1{,}2\times0{,}0136/40 = 4{,}1\times10^{-4}$ rad $\times206265 \simeq 84''$; el IRAM 30m a 230,538 GHz, con $\lambda = 1{,}30$ mm, da $\theta = 1{,}2\times1{,}3\times10^{-3}/30 = 5{,}2\times10^{-5}$ rad $\simeq 10{,}7''$ ⟨P1,D3,D4,D5,D9⟩.

El techo de frecuencia de cada antena lo fija la superficie. Por la fórmula de Ruze, la fracción de potencia que sobrevive a una rugosidad rms σ es

$$\eta_R = \exp\left[-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2\right], \qquad \eta_R = e^{-1} \text{ cuando } \lambda = 4\pi\sigma \simeq 12{,}6\,\sigma. \tag{35.2}$$

Para el IRAM 30m, con $\sigma = 60$ μm y $\lambda = 1{,}3$ mm, $4\pi\sigma/\lambda = 0{,}58$ y $\eta_R = e^{-0{,}34} = 0{,}71$ ⟨P3,D5⟩. Para el RT40m, con $\sigma = 0{,}2$ mm y $\lambda = 3{,}5$ mm en banda W, $4\pi\sigma/\lambda = 0{,}72$ y $\eta_R = e^{-0{,}52} = 0{,}60$ ⟨P3,D4⟩.

La regla del $1/e$ lo resume sin memorizar nada: con $\sigma = 0{,}2$ mm el límite cae en $\lambda \simeq 2{,}5$ mm, o sea 120 GHz, que es exactamente donde acaba la banda W del RT40m; con $\sigma = 60$ μm cae en $0{,}75$ mm, unos 400 GHz, coherente con la cobertura declarada del 30m hasta 360 GHz ⟨P3,D4,D5⟩.

De ahí se deduce el resto de la ingeniería: un primario de superficie activa con actuadores, medido por holografía, para conservar σ frente a la deformación gravitatoria y a los gradientes térmicos, y un modelo de apuntado con error muy inferior al haz, porque desapuntar una fracción apreciable de θ cuesta flujo directamente ⟨P3,D8⟩.

La cadena de eficiencias cierra el cálculo de sensibilidad: $\eta_A = \eta_R\eta_s\eta_b$ recoge superficie, desbordamiento y bloqueo, y la ganancia se obtiene de $\Gamma = 2k/(\eta_A A_{\text{geo}})$. Para el 30m, con $A_{\text{geo}} = \pi\times15^2 = 707$ m^2 y $\eta_A = 0{,}5$, resulta $\Gamma = 2\times1{,}38\times10^{-23}/(0{,}5\times707) = 7{,}8\times10^{-26}$ W m^{-2} Hz^{-1} K^{-1} $= 7{,}8$ Jy/K ⟨P4,D5,D9⟩.

El Observatorio Astronómico Nacional cubre este abanico con el RT40m de Yebes, de 2

a 50 GHz más banda W, que es el elemento español en redes de VLBI, y el RT13.2m geodésico de banda ancha; a ello se suma la participación española en IRAM, con el 30m para mapas extensos y flujo total y NOEMA para alta resolución ⟨D4,D5,D6⟩.

De donde sale — la derivacion; no se escribe en el examen

De dónde sale la fórmula de Ruze. Un error de superficie δ normal al reflector introduce un error de camino 2δ en el haz reflejado y, por tanto, un error de fase $\varphi = 2\pi(2\delta)/\lambda = 4\pi\delta/\lambda$.
Si los errores son gaussianos, de media nula y desviación σ, el campo coherente se reduce por el promedio $\langle e^{i\varphi}\rangle = e^{-\langle\varphi^2\rangle/2}$, y la potencia, que es el cuadrado, cae como $e^{-\langle\varphi^2\rangle} = \exp[-(4\pi\sigma/\lambda)^2]$.
Las hipótesis son que los errores son aleatorios, pequeños frente a λ y con escala de correlación pequeña frente a D. Si el error es sistemático, por ejemplo una deformación gravitatoria global, la potencia no se pierde en un halo difuso sino que deforma el haz, y la fórmula subestima el daño.

Si lo olvido — como se regenera en el examen

Si se olvidan las cifras de D4 o D5, se razona al revés desde P3: la banda máxima declarada de una antena implica $\sigma \simeq \lambda_{\min}/12,6$, de modo que una antena de 3 mm necesita del orden de 0,2 mm rms y una de 0,8 mm necesita decenas de micras. El tribunal valora más esa inversión que la cifra memorizada.
Si se olvida el factor 206265 de D9, se sustituye por la cadena $1\ \text{rad} = 57,3^\circ = 3438'$: multiplicar por 3438 y dar el resultado en minutos de arco es igual de válido.
Si se olvida el valor exacto de η_A, basta con decir que en un plato bien ajustado está entre 0,4 y 0,6 y que el resultado en Jy/K es del orden de varios Jy/K para un plato de decenas de metros.

5 Cierre y valoración

Todo lo anterior se reduce a tres tensiones. La primera es la longitud de onda, que regala penetración a través del polvo y acceso a transiciones de energía mínima, pero cobra el precio de una resolución difractiva pobre que obliga a la interferometría. La segunda es la atmósfera, que no es un filtro pasivo sino un medio que absorbe y emite a la vez, de modo que su efecto sobre el tiempo de telescopio es cuadrático y convierte el vapor de agua y la elevación en los dos parámetros de toda planificación.

La tercera es la superficie del reflector, cuya rugosidad fija el techo de frecuencia útil con una única exponencial. Para el Instituto Geográfico Nacional esto no es teoría: el RT40m de Yebes vive exactamente en el compromiso entre su diámetro, su rugosidad y las subventanas disponibles, y su papel en las redes internacionales depende de mantener ese equilibrio. Queda abierto lo más difícil de modelar: la variabilidad del vapor de agua en escalas de minutos, que degrada la fase interferométrica y limita hoy la observación milimétrica más que cualquier otro factor.

Lo que preguntara el tribunal — y el camino para responder

1. ¿Por qué 1,2 y no 1,22 en la fórmula de resolución? Camino: el 1,22 es el primer cero de Airy con iluminación uniforme; la anchura a media potencia es $1,02\lambda/D$ uniforme y sube al apodizar el borde para bajar los lóbulos laterales. El 1,2 es el valor típico de una antena real, no una constante universal.
2. ¿Por qué subir a Chajnantor no sirve de nada en 60 GHz? Camino: distinguir opacidad seca de húmeda. El O_2 está bien mezclado y su columna escala solo con la presión, mientras que el H_2O se condensa y su columna cae con la altitud y el frío. Consecuencia: los sitios altos

compran ventanas de H_2O, no de O_2.
3. ¿Hasta qué frecuencia puede observar el RT40m? Camino: aplicar P3 con $\sigma \simeq 0,2$ mm; la regla del $1/e$ da $\lambda \simeq 12,6\sigma = 2,5$ mm, es decir unos 120 GHz, que coincide con el final de su banda W. Añadir que la cifra útil es la σ verificada por holografía, no la de proyecto.
4. ¿Por qué el tiempo de integración crece como $e^{2\tau}$? Camino: la señal se atenúa por $e^{-\tau}$ y el ruido sube porque T_{sky} entra en T_{sys}; como el tiempo va con el cuadrado de la relación señal-ruido, se acumulan los dos efectos.
5. Pregunta incómoda: si el interferómetro resuelve mil veces mejor, ¿para qué se conserva un monoplato de 40 m? Camino: porque el interferómetro filtra todo lo mayor que λ/B_{min} y no mide el flujo total. El monoplato aporta las escalas extensas, las curvas de luz, los barridos espectrales de gran cobertura y es, además, una estación de la red. No compiten: se complementan.
6. ¿Por qué en radio se detecta de forma coherente y en óptico no? Camino: comparar $h\nu$ con kT. A 100 GHz, $h\nu/k = 4,8$ K, despreciable frente a un receptor de decenas de K; en el visible $h\nu/k$ vale decenas de miles de K y el ruido cuántico por modo hace inviable la amplificación coherente.

Errores que penalizan

- Tratar la atmósfera como simple atenuador y olvidar que emite: es el error conceptual que más descuenta, porque desmonta la mitad del apartado 3.
- Situar el corte inferior de la ventana en la troposfera o atribuirlo al vapor de agua. Es ionosférico y depende del ciclo solar.
- Dar θ sin el paso a segundos de arco o sin comprobar unidades: un resultado en radianes presentado como arcosegundos invalida el número.
- Confundir la eficiencia de apertura η_A con la del haz principal η_{mb}, o aplicar Ruze con la rugosidad nominal de proyecto en lugar de la verificada por holografía.
- Afirmar que un sitio seco mejora todas las ventanas. Las de O_2 no mejoran, y decirlo demuestra que no se ha entendido D2.
- Confundir la tipología óptica con la tipología instrumental: Cassegrain frente a Nasmyth es una elección de dónde va el receptor, no de monoplato frente a interferómetro.

Enlaces con otros temas

Tema 36: la descripción de la onda y su polarización con los parámetros de Stokes, que aquí se dan por supuestos al hablar de detección coherente.
Tema 38: la ley de Planck y el límite de Rayleigh-Jeans, que es la misma física que justifica trabajar en temperaturas de brillo en todo este tema.
Temas 39 y 41: los mecanismos de emisión de continuo y la ecuación de transferencia formal, de la que aquí solo se usa la solución de capa isoterma.
Tema 42: la estructura de la atmósfera y la medida de τ_z con skydips, cuyo resultado se emplea aquí como criterio de planificación.
Temas 73, 82 y 86: la síntesis de apertura y las redes de VLBI, que son el desarrollo natural del límite de difracción P1 planteado en el apartado 1.

Tema 36

Ondas electromagnéticas, Stokes y rotación de Faraday

Índice del tema

1. Ondas electromagnéticas. Ecuaciones de Maxwell.
2. Solución general de las ecuaciones de Maxwell.
3. Velocidad de grupo.
4. Polarización de ondas electromagnéticas.
5. Parámetros de Stokes.
6. Rotación de Faraday: aplicaciones en radioastronomía.
7. Polarización de radiofuentes.
8. Cierre y valoración.

NUCLEO — lo unico que hay que memorizar; todo lo demas se deduce de aqui

Principios generadores

P1 Maxwell en el vacío $\Rightarrow \nabla^2\mathbf{E} = \mu_0\varepsilon_0\,\partial_t^2\mathbf{E}$: toda solución es superposición de ondas planas transversales con $c = (\mu_0\varepsilon_0)^{-1/2}$.

P2 Dos modos ortogonales con amplitudes y fase relativa fijas $\Rightarrow$ el estado se describe por la matriz de coherencia 2×2, cuyas cuatro componentes reales son I, Q, U, V.

P3 En un plasma magnetizado los dos modos circulares tienen $n_{\mathrm{R}} \neq n_{\mathrm{L}} \Rightarrow$ birrefringencia: el plano de polarización gira $\propto \lambda^2$ y la energía viaja a $v_g = d\omega/dk < c$.

P4 El transporte de energía es $\mathbf{S} = \mathbf{E}\times\mathbf{B}/\mu_0$ con $|E|/|H| = Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$: genera flujo, densidad de energía y el enlace con la densidad de flujo en Jy.

P5 La polarización la fija el mecanismo emisor: aceleración en un campo $\mathbf{B}$ ordenado polariza (lineal si es ultrarrelativista, circular si es no relativista o hay Zeeman) y un proceso isótropo no polariza.

Datos indeducibles

D1 $\mathrm{RM} = 0{,}812\int n_e B_{\parallel}\,dl$ **en rad m^{-2}, con** n_e **en cm^{-3},** $B_{\parallel}$ **en** μ**G y** dl **en pc.**

D2 $\nu_p = 8{,}98\,\mathrm{kHz}\sqrt{n_e[\mathrm{cm}^{-3}]}$; $\nu_B = 2{,}8\,\mathrm{MHz}\,(B[\mathrm{G}])$.