

INTRODUCCION A LA ASTROFISICA

Por

Jorge I. Zuluaga C.

Departamento de Física
Universidad de Antioquia

Prefacio

La astrofísica es quizás la más vasta área de la física. Como otras es también una de las más activas. Su preocupación principal es la de comprender el funcionamiento de los sistemas físicos que constituyen el Universo y el de este como un todo. En ella convergen la mayor parte de las demás áreas de la física desde la teoría general de la relatividad hasta las más modernas teorías de las partículas elementales.

El presente texto persigue introducir al estudiante de nivel medio en el pregrado de física, matemáticas o ingeniería, en las principales herramientas teóricas con las que trabaja el astrofísico. El tema se presenta en tres partes, cada una de las cuales dedicada a las principales áreas de la astrofísica contemporánea : la astrofísica estelar, la astrofísica del medio interestelar y la astrofísica galáctica. Más que una presentación exhaustiva y una descripción detallada de las principales resultados y teorías que las constituyen, se pretende presentar de manera completa el "lenguaje", los métodos y las cantidades físicas que usa el astrofísico en el estudio de cada uno de los sistemas mencionados.

En la primera parte se aborda el estudio de la física de las estrellas, probablemente los más abundantes sistemas astrofísicos, ladrillos primarios con los que se construyen las galaxias las componentes fundamentales del universo. Se presenta en un primer capítulo, los distintos parámetros físicos que las caracterizan, y que sirven más adelante para facilitar la descripción del funcionamiento de ellas. El segundo y el tercer capítulo se dedican a estudiar la anatomía de una estrella, el comportamiento de la materia en su interior y la manera como es emitida la radiación desde su superficie. Particular interés se ha puesto en el problema del origen y naturaleza de los espectros estelares, cuyo análisis representa una de las principales herramientas con las que entendemos estos sistemas astrofísicos. Aquí se presenta de manera relativamente detallada los distintos elementos del análisis espectral tan fundamental en todas las áreas de la astrofísica. El último capítulo de esta parte aborda el problema de la *evolución estelar*, donde se presentan los principales resultados del estudio de los cambios que sufre una estrella en el tiempo, causados por la sucesión de una serie de crisis energéticas. Se ha puesto especial interés en el estudio de la física de los residuos de la evolución estelar, algunos de los objetos más bizarros del universo; una sección completa de este capítulo ha sido dedicada a este problema particular.

La segunda parte esta dedicada al estudio de las propiedades del Medio Interestelar. Gas, polvo y radiación llenan el espacio aparentemente vacío entre las estrellas. En el primer capítulo de esta parte (el capítulo 5 del libro) presentamos una serie de argumentos y pruebas que demuestran la existencia de esta aparentemente invisible materia.

El segundo capítulo (capítulo 6) se concentra en el estudio detallado de las propiedades físicas y químicas de este medio.

La tercera y última parte del texto esta dedicada al estudio de la física de las galaxias, las unidades primarias de las que esta hecho el universo. El capítulo 7 se concentra en la galaxia que mejor conocemos, la nuestra, describiendo sus propiedades y comportamiento, además de las ingeniosas formas de las que se ha valido el hombre para conocerla desde su incómoda posición. En el capítulo 8, se estudian de manera más general, las propiedades, estructura y dinámica de las galaxias.

Este libro ha resultado de la reunión y adaptación de información dispersa en textos de astrofísica de muy diverso nivel. Su elaboración fue motivada por la realización de un curso introductorio de astrofísica, con una duración de 1 semestre, que ofreció el autor en 1997 en el Departamento de Física de la Universidad de Antioquia. Probablemente se constituya en el primer texto de astrofísica, de este nivel, escrito en español en nuestro país. Con esto el autor desea realizar un aporte personal a el crecimiento del interés profesional de la Astrofísica en Colombia. Si de alguna forma, lo que esta consignado en él pudiera ser de alguna utilidad para introducir a alguien en un estudio serio de la astrofísica, el autor se sentiría completamente complacido.

Agradezco a mi asesor, el profesor Alonso Sepúlveda, por su apoyo en la realización de este proyecto didáctico y por su paciencia en la corrección del manuscrito. Al jefe del Departamento de Física de la Universidad de Antioquia, profesor Orlando Quintero, por su apoyo y ayuda con la "burocracia". Al Director del Planetario de Medellín y amigo, Doctor Kevin Marshall, por facilitarme, de su biblioteca personal, una buena parte del material bibliográfico que hizo posible la realización de este trabajo. A mi novia Olga Lucía, quien representa para mí un apoyo e incentivo fundamental en todos los aspectos de mi vida, y que además me presto su computadora, sin la cual me hubiera sido imposible elaborar tan comodamente este trabajo ; a ella se lo dedico. Y finalmente a mis padres por aguantarme el encierro y las noches en vela, además de estar siempre ahí para animarme y brindarme su apoyo. También a ellos dedico el presente trabajo.

Jorge Zuluaga
Medellín, Noviembre de 1998.

Contenido

Prefacio	3
I ASTROFISICA ESTELAR	15
1 Parámetros físicos de las estrellas	17
1.1 Introducción	17
1.2 Magnitud y brillo aparente de las estrellas	17
1.3 las distancias estelares	20
1.4 La escala absoluta de magnitudes estelares	24
1.5 El color de las estrellas y su temperatura efectiva	27
1.6 Magnitud bolométrica y luminosidad estelar	32
1.7 Radio y masa de las estrellas	35
1.8 Los espectros estelares	44
1.9 El Diagrama de Hertzsprung - Russell	47
1.10 Ejercicios	51
2 Atmósferas Estelares	55
2.1 Introducción	55
2.2 Transferencia Radiativa en la Materia	56
2.3 Transferencia Radiativa en la Atmósfera Estelar	61
2.4 Líneas espectrales estelares	69
2.4.1 Formación de las líneas espectrales estelares	70
2.4.2 Estructura de las líneas espectrales	74
2.5 Análisis Espectral	84
2.5.1 La curva de crecimiento	85
2.5.2 Las ecuaciones de Boltzmann y Saha	87
2.6 Ejercicios	92
3 El Interior Estelar	97
3.1 Introducción	97
3.2 Primeras observaciones y supuestos	97
3.3 Equilibrio Hidrostático	98

3.4	Equilibrio térmico o radiativo	103
3.5	La Fuente de Energía de las Estrellas	104
3.6	Transporte de la energía en el interior estelar	114
3.6.1	Transporte Radiativo	115
3.6.2	Transporte Convectivo	116
3.7	Solución a las ecuaciones de la estructura estelar	119
3.8	Ejercicios	121
4	Evolución estelar	123
4.1	Introducción	123
4.2	La formación de las estrellas	123
4.3	Madurez Estelar	132
4.4	Vejez y Muerte de las Estrellas	134
4.5	Residuos de la evolución estelar	140
4.5.1	Enanas Blancas	142
4.5.2	Estrellas de neutrones	146
4.5.3	Agujeros Negros	148
4.6	Ejercicios	153
	Bibliografía Parte I	157
II	ASTROFISICA DEL MEDIO INTERESTELAR	159
5	La observación del medio interestelar	161
5.1	Introducción	161
5.2	Pruebas de la existencia del medio interestelar	162
5.3	Enrojecimiento y extinción interestelar	165
5.4	Líneas de absorción interestelar	167
5.5	Emisión de radiación por el medio interestelar	168
5.6	Ejercicios	169
6	Física y química del medio interestelar	171
6.1	Introducción	171
6.2	Las fases del medio interestelar	171
6.3	Nebulosas difusas	172
6.3.1	Ionización y recombinación	173
6.3.2	Mecanismos de emisión de las nebulosas difusas	175
6.4	Nubes Difusas	178
6.4.1	Extinción y enrojecimiento de la luz estelar	178
6.4.2	Propiedades emisivas de las nubes difusas	181
6.5	Nubes densas	183
6.5.1	El polvo interestelar	185
6.5.2	La química en las regiones HI	187

6.5.3	Radioemisión de las nubes interestelares en las regiones HI	190
6.6	Nebulosas Planetarias	193
6.6.1	Origen y formación de las nebulosas planetarias	195
6.7	Remanentes de supernova	196
6.8	Gas internebular	198
6.9	Características generales de las fases del medio interestelar	199
6.10	Ejercicios	200
	Bibliografía Parte II	203

III ASTROFISICA GALACTICA 205

7	La Vía Lactea	207
7.1	Introducción	207
7.2	Morfología de la Galaxia	210
7.2.1	El disco galáctico	211
7.2.2	El Abultamiento Central	213
7.2.3	Halo Galáctico	214
7.3	Cinemática de la Galaxia	215
7.4	Ejercicios	223
8	Estructura y Dinámica de las galaxias	225
8.1	Introducción	225
8.2	Clasificación Morfológica de las galaxias	227
8.3	Galaxias espirales e irregulares	232
8.3.1	Parámetros físicos de las galaxias espirales	232
8.3.2	La curva de rotación de las galaxias espirales	235
8.3.3	La estructura espiral	239
8.4	Galaxias Elípticas	243
8.5	Ejercicios	246
	Bibliografía Parte III	247

Apéndice A 249

Lista de Figuras

1.1	Método del paralaje trigonométrico en agrimensura.	21
1.2	Método del paralaje trigonométrico en astrofísica.	22
1.3	Espectro solar.	27
1.4	El color de las estrellas deducido de su curva de Planck.	28
1.5	Respuesta espectral de los filtros en el sistema fotométrico estándar.	29
1.6	La técnica de la interferometría óptica.	37
1.7	Trayectorias de las componentes de un sistema doble.	39
1.8	Efecto de la inclinación del plano orbital de las componentes de un sistema binario visual.	41
1.9	La relación masa luminosidad deducida de las observaciones de estrella binarias.	43
1.10	El diagrama de Russell.	48
1.11	Las clases de luminosidad de Morgan-Keenan en el diagrama H-R.	52
2.1	Definición de intensidad específica.	56
2.2	Radiación atravesando un trozo rectangular de materia.	57
2.3	La estructura en capas de una atmósfera para la que se supone válida la condición de equilibrio termodinámico local.	60
2.4	Atmósfera plano-paralela.	61
2.5	Distribución de la energía en un haz de radiación que emerge por la superficie de la estrella.	63
2.6	Fenómeno del oscurecimiento del limbo estelar.	64
2.7	Fotografía del Sol en el visible.	65
2.8	Dependencia de la intensidad específica con la dirección en el seno de una atmósfera estelar en la denominada <i>Aproximación de Eddington</i>	68
2.9	Sobre un cuerpo incide radiación de intensidad específica I_{λ_0} . ¿ Cuáles son las características espectrales de la radiación que emerge de él ?	70
2.10	Espectro de la radiación que emerge de un cuerpo a una temperatura T_o y sobre el que no incide radiación.	71
2.11	Espectro de la radiación que emerge de un cuerpo con gran emisión y sobre el que incide radiación muy tenue con un espectro continuo.	73

2.12	Espectro de la radiación que emerge de un cuerpo con una emisión menor a la intensidad de la radiación incidente. Este es el caso para las capas superiores de la atmósfera estelar.	74
2.13	Naturaleza del espectro de absorción de una estrella en un diagrama de flujo de radiación contra longitud de onda.	75
2.14	Estructura de una línea espectral en u diagrama normalizado.	75
2.15	Tipos de líneas espectrales.	76
2.16	Un medio formado por partículas esféricas de radio r_a	82
2.17	Perfil de Voigt de una línea espectral.	84
2.18	La curva de crecimiento.	86
2.19	Variación con la temperatura de la concentración de átomos de Hidrógeno en el primer estado excitado, y que producen las líneas de Balmer.	91
2.20	Dependencia de la intensidad de las líneas de otros elementos con la temperatura.	92
3.1	Un elemento de voumen de la estrella en equilibrio hidrostático.	99
3.2	Potencial propuesto para el núcleo dispersor.	108
3.3	Forma general de la función de onda de una partícula puntual de carga Z_2 en el potencial típico de una colisión nuclear.	110
3.4	La cadena protón - protón y sus ramas.	113
3.5	Las reacciones que constituyen el ciclo CNO.	114
4.1	La nebulosa del Aguila, una típica nebulosa difusa, en cuyo seno se pueden estar formando estrellas.	124
4.2	Trayectoria evolutiva de una estrella desde sus primeros estadios hasta alcanzar finalmente la secuencia principal.	130
4.3	La estructura de estrellas de la secuencia principal alta y la secuencia principal baja.	132
4.4	Trayectoria evolutiva que recorre una estrella después de que han cesado en su núcleo los procesos de fusión del Hidrógeno y que representa lo que hemos denominado la <i>vejez</i> de la estrella.	136
4.5	El proceso <i>Triple-Alfa</i>	137
4.6	La Nebulosa Anular de la Lira, una típica nebulosa planetaria.	139
4.7	La nebulosa del Velo, el remanente de una antigua explosión de Supernova.	141
4.8	La estructura calculada de una estrella de neutrones.	147
4.9	Estructura del campo magnético de un <i>Pulsar</i>	149
5.1	La nebulosa de la Trífida o <i>M20</i> , uno de los típicos objetos difusos observados por Messier.	163
5.2	Imagen de la Vía Láctea en la que resaltan características regiones oscuras.	164
5.3	Un <i>Saco de Carbón</i> , regiones de la Vía Láctea en las que parecen hacer falta estrellas.	164
5.4	Efecto de la presencia del medio interestelar en el espectro de una estrella.	167

6.1	La nebulosa de la Trífida, una típica <i>Nebulosa Difusa</i>	173
6.2	La Nebulosa del Aguila, una asociación entre una nebulosa difusa (regiones brillantes) y una nube densa (regiones oscuras).	184
6.3	La Nebulosa Anular de la Lira, una nebulosa planetaria.	193
6.4	El efecto de la expansión de una nebulosa planetaria sobre su espectro. . .	194
6.5	La nebulosa del Velo, un remanente de supernova.	196
6.6	La nebulosa del Cangrejo, el remanente de supernova mejor conocido. . . .	198
7.1	La Vía Láctea.	207
7.2	La distribución de cúmulos globulares en nuestra Galaxia.	209
7.3	La morfología de la Vía Láctea.	210
7.4	Coordenadas Galácticas.	216
7.5	Explicación de la manera como se determina la velocidad de rotación galáctica en función de la distancia galactocéntrica	218
7.6	Las componentes tangencial y radial de estrellas en el vecindario solar a distintas longitudes galactocéntricas.	220
7.7	La dependencia de la velocidad radial y tangencial con la longitud galactocéntrica.	221
7.8	Típica topología de la línea de los 21 cm cuando es medida en una cierta dirección sobre el plano de la Galaxia.	222
7.9		223
7.10	La curva de rotación de la Vía Láctea.	224
8.1	Nebulosa en espiral M51 cuya regular estructura fue por primera descubierta por el tercer Conde de Rose.	226
8.2	Definición de elipticidad.	228
8.3	Definición del <i>Pitch Angle</i>	229
8.4	La Gran Nube de Magallanes.	230
8.5	El diagrama <i>diapasón</i>	231
8.6	La vecina galaxia de Andrómeda.	231
8.7	Características generales de la curva de rotación de las galaxias espirales. .	235
8.8	Las curvas de rotaciones de diversas galaxias espirales, que reflejan la existencia de la relación de Tully-Fisher.	238
8.9	Tipos de estructuras espirales en función de la relación entre la dirección de los brazos y el sentido de rotación del disco.	240
8.10	El problema del enrollamiento de los brazos espirales.	241
8.11	El resultado de una simulación en la que se muestra el efecto que tiene la propagación de una onda de densidad sobre el medio presente en el disco de una galaxia y que induce la formación de nuevas estrellas.	242
8.12	Tipos de elipsoide.	245

Lista de Tablas

1.1	Magnitud aparente de algunas estrellas sobresalientes.	18
1.2	Pralaje y distancia de algunas estrellas.	23
1.3	Magnitud absoluta de algunas estrellas conocidas.	26
1.4	Índice de color de algunas estrellas.	30
1.5	Relación del índice de color B-V con el factor de corrección bolométrica . .	33
1.6	Diametros estelares determinados con la interferometría.	38
1.7	Masa de las componentes de algunas binarias visuales.	42
1.8	Masa de binarias espectroscópicas.	43
1.9	Características de los tipos de Morgan y Keenan.	47
1.10	Tipo espectral de algunas estrellas conocidas.	49
2.1	Composición química de nuestro Sol obtenida con las herramientas del análisis espectral.	93
4.1	Duración de la fase de presecuencia principal para estrellas de distinta masa.	131
4.2	La duración de lo que hemos llamado la <i>madurez estelar</i> o el período en el que estrellas de diversa masa queman hidrógeno en su núcleo.	134
8.1	Carácterísticas de los distintos tipos de galaxias elípticas (1).	243
8.2	Carácterísticas de los distintos tipos de galaxias elípticas (2).	243
A.1	Cosntantes Físicas.	250
A.2	Constantes Astronómicas.	250

