

Astronomia e Astrofísica

Programa

1^o Sem. 2003/04

Dezembro 2003

PREÂMBULO

No ano Lectivo 2003/2004 é oferecida pela primeira vez esta disciplina, naturalmente integrada nas Licenciaturas em Física, mas agora também como disciplina opcional de formação geral para as diversas licenciaturas da FCUL.

O seu conteúdo reflete ainda a necessidade de preparar os futuros docentes do Ensino Secundário nestes temas tão importantes, que complementam o ensino formal da Física e Química (nestes anos escolares), assim como deve conferir uma cultura geral sólida e muito actualizada sobre o Cosmos, a todas as pessoas que a frequentem.

Sendo uma disciplina do 1^o ano e tendo em consideração a formação diversificada dos alunos da FCUL, decidiu-se que seriam abordados temas recorrentes da Astrofísica na nossa cultura cívica, assim como corrigir, discutir, ensinar e *fundamentar cientificamente* conceitos que usualmente são erradamente passados na formação escolar anterior, seja por omissão, por ficarem incompletos, serem mal explicados, ou porque na nossa sociedade o dito senso comum está simplesmente errado.

Assim, percorreu-se o universo desde o infinitamente grande até ao nosso Sistema Solar, ou seja, começando pelo Big Bang, fazendo a história da sua evolução até aos dias de hoje no planeta Terra.

Foram sistematicamente apresentados conceitos básicos e fundamentais, onde se incluiu uma discussão sobre a Teoria do Big Bang descrevendo em detalhe todos os fenómenos físicos que o comprovam: a expansão universal acelerada (lei de Hubble), as abundâncias relativas dos elementos químicos, a radiação cósmica de fundo. Foram conceptualmente abordados conceitos como curvatura do espaço, universo plano, universos paralelos e infinitos, espaço-tempo, matéria e energia, energia e matéria escuras, de que é feito o universo.

Estudou-se de modo completo a formação dos elementos químicos no universo, o que é um aspecto fundamental para entender a estrutura do mesmo. Seguiu-se em paralelo uma discussão sobre evolução estelar, abordando os princípios físicos básicos que a controlam. Fases particulares da evolução tais como gigantes vermelhas, anãs brancas, estrelas de neutrões, pulsares e buracos negros foram discutidos e explicados. Demonstrou-se a evolução futura do Sol.

Mostrou-se a estratificação que o universo tem em termos de galáxias e como estas se agregam e evoluem. Na evolução individual de galáxias tomou-se a Via Láctea como exemplo, e detalhou-se a sua estrutura e dinâmica internas, assim como o lugar do Sol nesta. Falou-se de galáxias activas e quasares.

Levantou-se o problema da medição de distancias e explicaram-se métodos fundamentais deduzindo expressões e mostrando como estas são calibradas. Definiram-se grandezas obtidas observacionalmente como a paralaxe e o parsec. Fundamentaram-se cientificamente conceitos como luminosidade, magnitude, fluxo, banda fotométrica, e como as magnitudes se interligam com as distâncias.

Sobre o Sistema Solar debateram-se problemas polémicos tais como a não existência de eclipses todos os meses, a rotação da Lua sobre o seu eixo, a existência de estações do ano na Terra, a variação da temperatura dos planetas com a distância ao sol, porque é que a Lua vira sempre a mesma face para a Terra. Haverá vida noutros planetas? no universo? o que podemos afirmar sobre isso e com que certezas?

Abordaram-se outros tópicos muito actuais tais como: planetas extra-solares, a família dos transneptunianos, de que são feitos os cometas, porque têm duas caudas, em que condições um planeta tem atmosfera, etc.

Para ser um bom auxiliar de estudo, apresenta-se aqui um programa muito detalhado, onde se explicitam todos os tópicos mencionados e estudados nas aulas. Estão ordenados pela ordem seguida nas aulas. Faz-se ainda referência às equações, parâmetros ou condições numéricas mais importantes, que foram apresentadas.

Rui Jorge Agostinho

PARTE I

O Big-Bang e a Evolução Primitiva do Universo

1– A Expansão Isotrópica do Universo.

L.1– O Problema da Medição da Distância às Galáxias.

1.1– Existência da Relação Magnitude–Distância.

- i) Magnitudes Padrão.
- ii) Supernovas Tipo Ia. Um Brilho Constante.

L.2– A Medição da Velocidade Radial.

2.1– O Efeito de Doppler.

- i) O Deslocamento para o Vermelho: $z = \frac{v}{c} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$.

L.3– A Expansão do Espaço-Tempo ou Cosmos.

3.1– A Lei de Hubble.

- i) Últimos Resultados.

3.2– Cosmologias com uma Lei de Hubble.

- i) Prova da Existência do Big-Bang.
- ii) O Início do Tempo.
- iii) A Entropia e a Flecha do Tempo.
- iv) Universos Paralelos e a Noção de Sub-Espaços.

2– Consequências da Lei de Hubble.

L.4– A Idade do Universo.

4.1– A Constante de Hubble.

- i) A Idade Associada à Expansão.

4.2– Medições da Idade da Terra e da Lua.

L.5– A Idades das Estrelas.

5.1– Descrição de Modelos de Estrutura Estelar.

- i) A Interação Radiação-Matéria.
- ii) Propagação da Energia: Radiação e Convecção
- iii) Estrutura Estelar e Equilíbrio Hidrostático.

5.2– Produção Energética Estelar

- i) Reacções Nucleares no Núcleo.
- ii) Equivalência Massa-Energia $E = mc^2$.

- 5.3– As Estrelas Mais Velhas do Universo.
- Enxames Globulares de Estrelas.
 - Discrepâncias com a Idade Cosmológica

L.6– A Expansão Acelerada.

- 6.1– O Termo da Constante Cosmológica.
- Uma Força Repulsiva à Larga Escala.
 - O Universo Plano.
- 6.2– De que é Feito o Cosmos?
- Conteúdo Energético Global.
 - Energia Escura.
- 6.3– A Evolução Final do Universo.
- Universo Oscilante?
 - O Big-Crunch?

3– Nucleosíntese Primordial.

L.7– A Isotropia do Universo.

- 7.1– O Universo Inflacionário.
- Velocidade da Luz Variável?
- 7.2– A isotropia das Leis Físicas
- As 4 Forças Fundamentais.
 - A Sua Evolução Inicial.

L.8– A Expansão Adiabática e o Decréscimo da Temperatura.

- 8.1– Relação Energia–Temperatura: $E_c = K_B \cdot T$
- 8.2– $R_z \cdot T_z = const.$ e $T_\gamma \propto t^{1/2}$
- $T_\gamma(z) = T_{\gamma 0} \cdot (1 + z)$ com $1 + z = \frac{R_0}{R_z}$

L.9– A Materialização da Energia.

- 9.1– A Energia do Fóton: $E_\gamma = h \cdot \nu$
- Fótons \Leftrightarrow Partícula+Anti-partícula.
 - Temperatura Limite para a Criação das partículas.
 - Instabilidade dos Neutrões Livres.
- 9.2– Assimetria matéria \Leftrightarrow anti-matéria.

L.10– A Criação dos Elementos Leves.

- 10.1– Interação Fraca e a Produção de Deutério.
- Barreira de Coulomb em p-p.
- 10.2– Cadeia p-p.
- ^3He e ^4He .

L.11– Abundâncias dos Elementos Leves.

- 11.1– Os Três Primeiros Minutos.
- A Produção do Li, Be e B.
 - O Falhanço na Produção do ^{12}C .
- 11.2– Modelos e Resultados Observacionais.
- Deutério: a prova do Big-Bang.

11.3– A Tabela Periódica Universal.

- i) O Hidrogénio, o Hélio e os Outros. . .

4– A Radiação Cósmica de Fundo

L.12– A Era da Recombinação.

12.1– O Desacoplamento radiação–energia.

- i) O Universo Transparente aos Fotões.

L.13– A Expansão do Universo e a RCF

13.1– A Perda de Energia dos Fotões Primordiais.

- i) O Abaixamento da sua Temperatura.
- ii) As Interações Matéria-Radiação.

L.14– Existência de Radiação Fóssil.

14.1– Isotropicidade da Radiação Cósmica de Fundo.

- i) Resultados dos Satélites COBE e Planck.
- ii) A Curva de Planck a 2,7326 kelvin.

14.2– Flutuações na Densidade de Fotões da RCF.

- i) Variações relativas de 10^{-5} .
- ii) A Formação das Primeiras Galáxias.
- iii) A Prova do Big-Bang.

PARTE II

A Evolução Pós Big-Bang

5– Os Primeiros 10^8 Anos

L.15– O Universo Dominado pela Matéria.

15.1– Gás em Expansão Adiabática Pura.

- i) O Abaixamento de Temperatura.
- ii) Balanço entre Expansão Térmica e Colapso Gravítico.

L.16– Formação das Primeiras Estruturas.

16.1– Estrelas e Galáxias Primordiais.

- i) Fragmentação e Colapso Gravítico.
- ii) Escala de Tempo: 10^7 – 10^8 Anos.
- iii) Galáxias com Poeiras? um mistério.

6– Estrelas Pequenas e de Massa Solar

L.17– Modelo de Formação Estelar.

17.1– Distribuição de Massa.

- i) Composição Química Primordial e Actual.
- ii) Rotação.
- iii) Formação de Planetas?

L.18– Estabilidade na Sequência Principal.

18.1– Fontes de energia.

- i) Queima do H até ao He.
 - ii) Escalas de Tempo: 10^{10} Anos.
- 18.2– Estratificação Hidroestática do Núcleo.
- i) Um Núcleo Radiativo.
- L.19– Instabilidade Estrutural.
- 19.1– Colapso Gravítico do Núcleo Estelar.
- i) A Deflagração da Reação $3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$.
 - ii) A Variação da Temperatura Central.
- 19.2– A Expansão para Gigante Vermelha.
- i) Baixas Temperaturas e Cór.
 - ii) Produção de Poeiras em Estrelas Quimicamente Evoluídas.
- L.20– Fase Final da Vida.
- 20.1– Nebulosas Planetárias.
- 20.2– Anãs Brancas.
- i) Massa Limite: $< 1,44 \cdot M_{\odot}$.
 - ii) Estabilidade Estrutural e Densidade.
 - iii) Evolução Posterior.
- L.21– Supernovas Tipo Ia.
- 21.1– Sistemas Binários de uma Anã Branca com uma Gigante.
- i) Transferência de Massa e Quebra de Equilíbrio Mecânico.
 - ii) Colapso Gravitacional e Explosão sempre de $1,44M_{\odot}$.
- 21.2– Importância Cosmológica das SNIa.
- i) Magnitude Característica da Explosão.
 - ii) O Supernova Cosmology Project.
- 7– Estrelas de Grande Massa.**
- L.22– Frequência na Formação Estelar.
- 22.1– Temperatura e Massa Inicial.
- i) Escalas de Tempo: 10^6 Anos.
- 22.2– Formação de Planetas?
- i) Pressão de Radiação na Nebulosa Primordial.
- L.23– Estabilidade na Sequência Principal.
- 23.1– Fontes de energia.
- i) Escalas de Tempo: 10^7 Anos.
- 23.2– Estratificação Hidroestática do Núcleo.
- i) Camadas: Elementos Pesados \rightarrow Leves.
 - ii) Um Núcleo Convectivo.
- L.24– Instabilidades Estruturais.
- 24.1– Sucessivos Colapsos Gravíticos do Núcleo.
- i) Deflagrações Sucessivas: $\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} \rightarrow \text{O}$.
 - ii) A Crescente Temperatura Central.
 - iii) A Expansão para Gigante.

L.25– Produção dos Elementos Químicos até ao Ferro.

25.1– Evolução Quiescente e Rápida.

- i) Condição das Reacções Exoenergéticas.

8– Estágio Final de Estrelas com $M > 8M_{\odot}$.

L.26– Supernovas Tipo II.

26.1– Instabilidade Gravitacional Central.

- i) Colapso em Queda Livre.
- ii) Sobrevivência do Núcleo de Ferro e Níquel.

L.27– Produção dos Elementos Químicos Além-Ferro.

27.1– Reacções Endoenergéticas.

- i) Existência de Protões e Neutrões de Grande Energia.
- ii) Processos Nucleares p e r .

L.28– Restos de Supernovas.

28.1– Estrelas de Neutrões.

- i) Neutronização e Estabilidade Mecânica.
- ii) $1,44M_{\odot} < Massa < 3M_{\odot}$.
- iii) Tamanho e Densidade da Matéria.
- iv) Campo Magnético e Pulsares.

28.2– Buracos Negros.

- i) A $Massa > 3M_{\odot}$ e o Tamanho.
- ii) Campo Gravítico e Horizonte de Acontecimentos.

28.3– Sua Detecção Indirecta.

- i) Em Sistemas Binários Estelares.
- ii) Aceleração de p e e em campos gravíticos.
- iii) Emissão de Radiação X e γ .

9– Resumo da Evolução Temporal do Universo.

L.29– Em Composição Química

29.1– A Formação da Tabela Periódica em Três Etapas

- i) Nucleosíntese Primordial
- ii) Elementos até ao Ferro. Fases Estelares Quiescentes.
- iii) Elementos pós Ferro. Fases Estelares Explosivas.

29.2– Evolução das Abundâncias Químicas

- i) Diminuição Gradual do H e He.
- ii) Aumento Maior na Concentração de O, C e N e Fe.
- iii) Aumento Genérico dos Outros.

29.3– Processos de Disseminação.

- i) Ejeção em Nebulosas.
- ii) Ejeção em Novas e Supernovas.

29.4– Processos de Concentração de Matéria Bariónica.

- i) Núcleos de Estrelas Arrefecidos.
- ii) Planetas e planetesimais.

L.30– Estruturas de Larga Escala.

30.1– Galáxias: as Partículas do Universo.

- i) Grupos e Super-grupos.
- ii) Estrutura Homogénea e Esponjosa do Universo.
- iii) Movimentos de Larga Escala.

PARTE III

Elementos Estruturais do Universo Actual.

10– A Forma e Organização das Galáxias.

L.31– Galáxias Espirais

31.1– Formação: o Momento Angular Inicial.

- i) Estrutura em Disco Suportada pela Rotação Rápida.
- ii) Componentes de Gás e Poeira.

L.32– Galáxias Elípticas.

32.1– Formação. Colisões Galácticas.

- i) Estrutura Suportada por Movimentos Desordenados.
- ii) A Falta da Poeira.

L.33– Galáxias Irregulares

33.1– As Nuvens de Magalhães.

- i) Satélites da Via Láctea.
- ii) Movimento Dinâmico.

L.34– O Grupo Local.

34.1– Dinâmica Interna.

- i) A Gigante Andrómeda.
- ii) Galáxias Anãs e Satélites.
- iii) Canibalismo Galáctico.

11– A Via Láctea

L.35– Populações de Estrelas: sua Caracterização.

35.1– O Halo, o Bojo Central e o Disco

- i) Dimensões, Idades e Movimentos.
- ii) Composição Química.

L.36– Os Enxames de Estrelas Globulares e Abertos.

36.1– Formação e Distribuição Espacial.

- i) Idades e Composição Química.

L.37– O Meio Inter-Estelar.

37.1– O Gás.

- i) Hidrogénio e outros.
- ii) Grau de ionização.

37.2– A Poeira.

- i) Distribuição e Existência.
 - ii) Vermelhação das cores das Estrelas.
- 37.3– A Formação de Estrelas.
- i) Acção das Supernovas.
 - ii) Presença de Estrelas Azuis Próximas.
- L.38– O Sol na Via Láctea
- 38.1– Posição e Dinâmica.

12– Astrometria Estelar

- L.39– Magnitudes das Estrelas.
- 39.1– Conceito de Luminosidade L .
- i) Conceito de Fluxo Energético Emitido por Comprimento de Onda: $F_\lambda \propto J \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot \lambda^{-1}$
 - ii) Potência Emitida cm^{-2} , Lei de Stefan–Boltzmann: $F = \sigma \cdot T^4 (J \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2})$
 - iii) Potência Total Emitida: $L=(\text{área superficial}) \cdot F$
- 39.2– Fluxo Energético Recebido de uma Estrela.
- i) Variação com a Distância: $f \propto F \cdot d^{-2}$
- 39.3– Magnitude Aparente m .
- i) $m = -2,5 \cdot \log f + (\text{const. telescópio})$
 - ii) Definição de Magnitude Absoluta M , para $d = 10$ pc.
 - iii) Relação com Modelos Estelares.
- L.40– Distância e a sua Determinação
- 40.1– Determinação Geométrica: a Paralaxe.
- i) A Unidade Astronómica
 - ii) O Parsec e o Ano-Luz.
- 40.2– Distância Fotométrica.
- i) Relação magnitude–distância: $m - M = 5 \log d - 5$
 - ii) Magnitudes Absolutas das Estrelas.

PARTE IV

O Sistema Solar.

13– As Órbitas dos Planetas

- L.41– Leis de Kepler.
- 41.1– Elipses: Excentricidade, Periélio e Afélio.
- i) $P^2 = a^3$.
 - ii) Inclinações das Órbitas.
- 41.2– Viagens Inter-Planetárias.
- i) Telecomunicações de Rádio.
 - ii) Tempos de viagem em Sondas.
- L.42– Satélites Naturais.
- 42.1– Determinação da Massa dos Planetas.
- i) Aceleração Centrípeta = Aceleração Gravítica

- ii) A Rotação da Lua. Porque Existe Sincronização?

14 – Dinâmica do Sol-Terra-Lua.

L.43 – Estações do Ano.

43.1 – Insolação de Uma Cidade.

- i) Albedo.
- ii) Inclinação do Eixo de Rotação.
- iii) Sucessão dos Dias e das Noites.
- iv) Variação da Temperatura Média com a Distância ao Sol.

L.44 – Existência de Eclipses

44.1 – Condições Geométricas Necessárias.

- i) Inclinação da Órbita da Lua.
- ii) Eclipses Totais e Parciais.

44.2 – Ocorrência Anual dos Eclipses.

- i) Porque não há Eclipses Todos os Meses.
- ii) Eclipses em Sequência.

15 – Características Físicas Genéricas dos Planetas.

L.45 – Densidade Média, Estrutura e Composição Química.

45.1 – Planetas Terrestres.

45.2 – Planetas Jovianos.

45.3 – Planetas Trans-neptunianos.

45.4 – Asteróides.

L.46 – Cometas.

46.1 – O Núcleo. O Cometa Halley.

46.2 – Dinâmica Gasosa da Cabeleira.

46.3 – Evolução Dinâmica das Caudas.

L.47 – Atmosferas Planetárias.

47.1 – Condições para a Existência.

- i) Temperatura e Velocidade Média das Moléculas.
- ii) Aceleração Gravítica à Superfície: $a = G \cdot \frac{M_p}{R_p^2}$
- iii) Conceito de Velocidade de Escape de um Planeta.

47.2 – Um Céu Diurno Azul?

- i) Dispersão Selectiva da Luz: $\sigma \propto \frac{1}{\lambda^4}$
- ii) Absorção Selectiva na Superfície Planetária.
- iii) Um pôr de Sol Vermelho.
- iv) Um Céu Escuro na Lua.
- v) Um Céu Branco-Avermelhado em Marte.

16 – A Formação do Sistema Solar.

L.48 – A Conservação do Momento Angular \vec{L} .

48.1 – Evolução para Órbitas Coplanares.

- i) Instabilidades Orbitais e a Formação dos Asteróides.

- ii) O Problema do Colapso da Matéria para o Centro.
- iii) Jactos de Matéria e a Perda de \vec{L} .

L.49– Diferenciação da Nebulosa Primordial.

49.1– Teoria Cinética dos Gases.

- i) Energia Cinética Média é Proporcional à Temperatura: $\langle E_c \rangle = \frac{3}{2} \cdot K_B \cdot T$
- ii) Velocidade Quadrática Média de uma Molécula de massa m à Temperatura T :

$$V_{qm} = \sqrt{\langle V^2 \rangle} = \sqrt{3 \cdot K_B \cdot \frac{T}{m}}$$

- iii) Conceito de Velocidade de Escape de um Proto-planeta.

49.2– Temperatura em função da Distância.

- i) Pressão de Radiação e afastamento das Poeiras.
- ii) Gás Quente e Rápido Perto do Sol.
- iii) Gás Frio e Lento Longe do Sol.

L.50– Acreção dos Materiais em Planetesimais.

50.1– Seleção dos Materiais que Fazem os Planetas.

- i) Planetas Rochosos e Gasosos.
- ii) Planetas e Luas com e sem Atmosferas.
- iii) Composição Química das Atmosferas.

50.2– A Lição dos Planetas Extrasolares.

- i) Planetas Gasosos Gigantes extra-solares.
- ii) Migração das Órbitas.

Dezembro 2003

Rui Jorge Agostinho