
Astrofísica Moderna

Plano de aulas e fichas de estudo

49 aulas

Este documento reúne as fichas de estudo aula a aula. A apostila principal fica reservada aos capítulos de conteúdo; este arquivo serve como roteiro de acompanhamento, preparação e revisão de cada encontro.

Sumário

Como usar este plano de aulas	1
Distribuição das 49 aulas	1
Aula 1 – O céu como laboratório físico	2
Aula 2 – Paralaxe, brilho e luminosidade	3
Aula 3 – Movimentos, unidades e fotometria	5
Aula 4 – Órbitas elípticas e leis de Kepler	6
Aula 5 – Gravitação newtoniana e teorema do virial	7
Aula 6 – Luz, magnitudes e corpo negro	8
Aula 7 – Fótons, espectros e telescópios	9
Aula 8 – Sistemas binários e massas estelares	9
Aula 9 – Classificação espectral e diagrama HR	10
Aula 10 – Atmosferas estelares e opacidade	11
Aula 11 – Equilíbrio hidrostático	12
Aula 12 – Fontes de energia das estrelas	13
Aula 13 – Transporte de energia no interior estelar	13
Aula 14 – Modelos estelares e sequência principal	14
Aula 15 – O Sol como estrela padrão	15
Aula 16 – Meio interestelar: gás e poeira	16
Aula 17 – Formação estelar e protoestrelas	16
Aula 18 – Evolução na sequência principal	17
Aula 19 – Gigantes, queima de hélio e estágios tardios	18

Aula 20 – Pulsção estelar e sismologia	19
Aula 21 – Estrelas massivas e supernovas	19
Aula 22 – Anãs brancas e matéria degenerada	20
Aula 23 – Estrelas de nêutrons e pulsares	21
Aula 24 – Relatividade geral e buracos negros	22
Aula 25 – Sistemas binários próximos e acreção	23
Aula 26 – Síntese da astrofísica estelar	23
Aula 27 – Processos físicos no Sistema Solar	24
Aula 28 – Planetas terrestres	25
Aula 29 – Gigantes gasosos, luas e anéis	26
Aula 30 – Corpos menores: asteroides, cometas e cinturão de Kuiper	26
Aula 31 – Formação do Sistema Solar	27
Aula 32 – Exoplanetas: métodos de detecção	28
Aula 33 – Arquiteturas planetárias e habitabilidade	29
Aula 34 – Escalas, populações e inventário planetário	30
Aula 35 – Revisão aplicada: do céu local aos sistemas planetários	30
Aula 36 – A Via Láctea: estrutura geral	31
Aula 37 – Cinemática galáctica e matéria escura	32
Aula 38 – O centro galáctico	33
Aula 39 – Tipos de galáxias e sequência de Hubble	33
Aula 40 – Estrutura espiral e formação estelar em galáxias	34
Aula 41 – Galáxias elípticas, interações e fusões	35
Aula 42 – Escada de distâncias extragalácticas	36

Aula 43 – Expansão do universo e grandes estruturas	36
Aula 44 – Galáxias ativas e quasares	37
Aula 45 – Cosmologia newtoniana e parâmetros cósmicos	38
Aula 46 – Radiação cósmica de fundo	39
Aula 47 – Cosmologia relativística e energia escura	40
Aula 48 – Universo primordial e inflação	40
Aula 49 – Síntese final: uma narrativa física do universo	41
Como estudar ao longo do semestre	43
Projetos de estudo possíveis	43
Bibliografia	43

Como usar este plano de aulas

Este documento é o roteiro de estudo do semestre. Cada ficha apresenta uma pergunta inicial, objetivos, ideias-chave, uma atividade curta e exercícios. Use a pergunta inicial como gatilho: tente responder antes da aula, volte a ela depois e observe o que mudou.

A leitura conceitual completa está na apostila principal, `apostila_astrofisica_moderna.tex`. Aqui, a função das fichas é organizar o ritmo do curso e indicar o que preparar, revisar e praticar em cada encontro.

Distribuição das 49 aulas

Aulas	Tema	Bloco
1–7	Ferramentas observacionais: céu, órbitas, luz e telescópios	Fundamentos
8–22	Estrelas: parâmetros, espectros, interiores, Sol, formação e evolução	Astrofísica estelar
23–26	Compactos, relatividade e binárias interagentes	Altas energias
27–35	Sistema Solar, corpos menores e exoplanetas	Astrofísica planetária
36–43	Via Láctea, galáxias, evolução galáctica e estrutura cósmica	Galáxias
44–49	Galáxias ativas, cosmologia, CMB, energia escura e universo primordial	Cosmologia

Aula 1 – O céu como laboratório físico

Aula 1

O céu como laboratório físico

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 1

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **O céu como laboratório físico**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Reconhecer a astronomia como ciência observacional e conectar fenômenos aparentes do céu a modelos físicos.

Ideias-chave

- A esfera celeste é uma construção geométrica útil, não uma superfície real: coordenadas celestes fixam direção, não posição tridimensional.
- Medir uma direção é medir um ângulo. A constante 206265 converte radianos em segundos de arco, e o céu inteiro tem 41 253 graus quadrados.
- Existem quatro sistemas de coordenadas em uso, e a escolha entre eles é operacional: horizontal para saber se dá para observar, equatorial para catalogar, eclíptico para o Sistema Solar, galáctico para a Via Láctea.
- A lei dos cossenos esférica resolve a conversão entre sistemas e produz a equação da altura, $\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H$, da qual saem culminação, arco diurno e circumpolaridade.
- As estações vêm da obliquidade de $23^\circ 26'$, não da excentricidade: esta produz apenas 7% de variação de fluxo, e com o sinal trocado entre hemisférios.
- O eixo da Terra precessa a $50,3''$ por ano, período de 25 800 anos, porque Sol e Lua exercem torque sobre o bojo equatorial. É por isso que todo catálogo precisa declarar sua época.
- O sistema de referência moderno, o ICRS, é ancorado em quasares, e não no equador terrestre — e por isso não precisa de correção de precessão.

Roteiro de 50 minutos

Tempo	Atividade
0–8 min	Abertura: por que a astronomia é uma ciência de inferência à distância. A cadeia observável → grandeza física.
8–18 min	Ângulos, pequenos ângulos e ângulo sólido. Calibrar intuição: olho ($1'$), Lua ($0,5^\circ$), difração de 8 m ($0,015''$), VLBI ($20\mu\text{as}$).
18–32 min	Os quatro sistemas de coordenadas; dedução da equação da altura pela lei dos cossenos esférica; aplicação imediata à latitude local.
32–42 min	Eclíptica, obliquidade e estações, com o argumento quantitativo de $\sin h$ e do arco diurno. Mencionar a equação do tempo.
42–50 min	Precessão e nutação: por que catálogos têm época; ICRS e Gaia-CRF; a cadeia de reduções da posição.

Leitura de apoio: Capítulo 1 da apostila, completo, mais o laboratório do capítulo — **o céu de Joinville**, em que azimute e altura medidos viram coordenadas equatoriais e, por ajuste, a inclinação do plano galáctico e a obliquidade da eclíptica.

Para praticar

Desenhe a esfera celeste local: horizonte, zênite, polos celestes e equador celeste para a latitude de sua cidade. Depois abra o laboratório e registre meia dúzia de objetos, conferindo uma das conversões à mão.

Exercícios

1. Explique por que estrelas diferentes são visíveis em épocas diferentes do ano.
2. Qual é a altura aproximada do polo celeste sul para um observador em Joinville, SC, latitude cerca de 26° S?

Aula 2 – Paralaxe, brilho e luminosidade**Aula 2****Paralaxe, brilho e luminosidade**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 1

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Paralaxe, brilho e luminosidade**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Medir distância por geometria pura e converter brilho aparente em luminosidade, declarando as hipóteses de cada passo.

Ideias-chave

- A paralaxe é geometria pura, $d [\text{pc}] = 1/p ["]$, e o parsec é definido exatamente para que essa inversão valha. O trânsito de Vênus foi o método clássico para fixar a UA em quilômetros.
- Medir uma paralaxe em uma imagem é medir um deslocamento em pixels e convertê-lo pela escala da imagem — e dividir por dois, porque janeiro a julho cobre a elipse inteira.
- O erro relativo passa intacto da paralaxe para a distância: $\sigma_d/d = \sigma_p/p$. Acima de 20% a inversão deixa de ser legítima.
- Fluxo e luminosidade se ligam pela lei do inverso do quadrado, $F = L/4\pi d^2$, sob duas hipóteses que podem falhar: emissão isotrópica e meio transparente.
- A escala de magnitudes é logarítmica por construção: $m_2 - m_1 = -2,5 \log_{10}(F_2/F_1)$, com o 2,5 forçado pela escolha de que cinco magnitudes valem um fator 100.
- O módulo de distância, $m - M = 5 \log_{10} d - 5 + A$, é a ponte entre brilho observado e distância — e o termo A de extinção não é opcional no plano galáctico.
- A cor é independente da distância, e por isso mede temperatura sem exigir que se saiba onde o objeto está — mas só na ausência de poeira.

Roteiro de 50 minutos

Tempo	Atividade
0–10 min	De onde vem 1 UA em quilômetros: o trânsito de Vênus e a geometria que o converte em escala.
10–22 min	Paralaxe: geometria, definição do parsec, ordem de grandeza dos ângulos. Medir uma paralaxe em uma imagem, e o fator 2.
22–30 min	Propagação da incerteza, $\sigma_d/d = \sigma_p/p$, e quando inverter a paralaxe deixa de valer.
30–42 min	Fluxo, luminosidade e lei do inverso do quadrado; dedução da escala de Pogson e do módulo de distância.
42–50 min	Cores, extinção e avermelhamento: $A_\lambda = 1,086 \tau_\lambda$, excesso de cor e R_V . Fechamento com a cadeia observável $\rightarrow$ grandeza física.

Leitura de apoio: Capítulo 2 da apostila, completo, mais o Laboratório de dados 1. **É este capítulo que o primeiro artigo do semestre cobra.**

Para praticar

Abrir o laboratório do Capítulo 2 e medir a paralaxe de uma estrela na régua, conferindo o resultado com a coluna do catálogo.

Exercícios

1. Por que o deslocamento entre janeiro e julho vale duas paralaxes, e não uma?
2. Duas estrelas têm a mesma magnitude aparente e distâncias na razão 1:10. Qual a razão entre as luminosidades?

Aula 3 – Movimentos, unidades e fotometria**Aula 3****Movimentos, unidades e fotometria**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 1

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Movimentos, unidades e fotometria**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Separar paralaxe dos outros dois efeitos anuais de posição e entender o que virou exato por definição nas unidades astronômicas.

Ideias-chave

- Aberração ($20,5''$) e paralaxe (menos de $1''$) são efeitos distintos, defasados de um quarto de período, e só o segundo depende da distância. A constante de aberração é quase trinta vezes a maior paralaxe do céu.
- Movimento próprio mais distância dão velocidade tangencial, $v_t = 4,74 \mu d$; com velocidade radial fecha-se o vetor velocidade completo.
- O fator 4,74 não é constante física: é a razão entre unidades escolhidas por seres humanos — 1 UA por ano, em km/s.
- Desde 2012 a UA é exata por convenção, e o parsec é consequência dela. Adota-se $GM_\odot$, e não $M_\odot$, porque o produto é medido com muito mais algarismos que G .
- Inverter a paralaxe é enviesado quando $\sigma_p/p \gtrsim 0,2$, por efeito de volume — o viés de Lutz-Kelker.
- Medir em uma banda nunca é medir a luminosidade: a correção bolométrica corrige a fração do fluxo que o filtro deixa passar, e depende quase inteiramente da temperatura efetiva.

Roteiro de 50 minutos

Tempo	Atividade
0–12 min	Aberração e movimento próprio: os dois efeitos que se confundem com paralaxe, e como a defasagem os separa.
12–24 min	Velocidade tangencial e espacial; dedução do fator 4,74; a estrela de Barnard como caso extremo.
24–34 min	As unidades modernas: o que virou exato por definição, e por que se adota $GM_{\odot}$.
34–44 min	O viés de Lutz-Kelker, com populações sintéticas; a regra prática de σ_p/p .
44–50 min	Correção bolométrica e o zero da escala fixado em 2015; sistemas fotométricos, Vega contra AB.

Leitura de apoio: Capítulo 3 da apostila. Nada aqui é pré-requisito para o artigo — o que o artigo exige está no Capítulo 2.

Para praticar

Abrir o arquivo de 2000 estrelas do Gaia e localizar a de maior movimento próprio; conferir a velocidade tangencial obtida.

Exercícios

1. Por que a aberração não depende da distância da estrela?
2. Uma estrela tem $\mu = 2''/\text{ano}$ e $p = 100$ mas. Qual a sua velocidade tangencial?

Aula 4 – Órbitas elípticas e leis de Kepler

Aula 4

Órbitas elípticas e leis de Kepler

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 2

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Órbitas elípticas e leis de Kepler**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Interpretar as leis de Kepler e aplicá-las a planetas, satélites e estrelas binárias.

Ideias-chave

- A elipse possui semieixo maior a , excentricidade e e foco ocupado pelo corpo central em órbitas keplerianas.
- A segunda lei de Kepler expressa conservação do momento angular.
- A terceira lei relaciona escala orbital e período: $P^2 \propto a^3$ para massas fixas.

Para praticar

Comparar órbitas com $e = 0, 0,3$ e $0,8$ e discutir onde a velocidade orbital é maior.

Exercícios

1. Se a dobra em torno do Sol, por qual fator o período orbital muda?
2. O que aconteceria com a velocidade de um planeta ao passar pelo periélio?

Aula 5 – Gravitação newtoniana e teorema do virial

Aula 5

Gravitação newtoniana e teorema do virial

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 2

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Gravitação newtoniana e teorema do virial**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Relacionar força gravitacional, energia orbital e sistemas autogravitantes.

Ideias-chave

- A gravitação universal explica queda, órbitas planetárias e dinâmica de aglomerados.
- Em órbitas ligadas, energia total é negativa.
- Para muitos sistemas em equilíbrio, o teorema do virial dá $2K + U = 0$.

Para praticar

Estimar a massa do Sol a partir de $P = 1$ ano e $a = 1$ UA.

Exercícios

1. Derive a forma proporcional $M \propto a^3/P^2$ para uma órbita circular.
2. Por que aquecer um sistema autogravitante pode fazê-lo expandir?

Aula 6 – Luz, magnitudes e corpo negro

Aula 6**Luz, magnitudes e corpo negro**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 3

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Luz, magnitudes e corpo negro**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Usar brilho aparente, fluxo, magnitude e radiação de corpo negro para extrair informação física.

Ideias-chave

- Fluxo diminui com a distância como $F = L/(4\pi d^2)$.
- A escala de magnitudes é logarítmica: diferença de 5 magnitudes equivale a fator 100 em fluxo.
- A lei de Wien, $\lambda_{\max}T \simeq 2,9 \times 10^{-3} \text{ m K}$, liga cor e temperatura.

Para praticar

Comparar espectros de corpos negros de 3000 K, 5800 K e 10000 K.

Exercícios

1. Uma estrela é 100 vezes mais brilhante que outra. Qual é a diferença de magnitude?
2. Estime o comprimento de onda de máximo de emissão do Sol usando $T \approx 5800 \text{ K}$.

Aula 7 – Fótons, espectros e telescópios

Aula 7

Fótons, espectros e telescópios

Referência principal no Carroll & Ostlie: caps. 5 e 6

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Fótons, espectros e telescópios**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Compreender como linhas espectrais e instrumentos transformam luz em diagnóstico astrofísico.

Ideias-chave

- Energia de fóton: $E = h\nu = hc/\lambda$.
- Linhas de absorção e emissão revelam composição, temperatura, densidade e velocidade.
- A resolução angular de um telescópio melhora com abertura maior e comprimento de onda menor.

Para praticar

Identificar, em um espectro simples, contínuo, linhas de absorção e linhas de emissão.

Exercícios

1. Um fóton azul tem energia maior ou menor que um fóton vermelho? Justifique.
2. Por que rádio telescópios costumam ter antenas grandes?

Aula 8 – Sistemas binários e massas estelares

Aula 8

Sistemas binários e massas estelares

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 7

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Sistemas binários e massas estelares**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Mostrar por que estrelas binárias são fundamentais para medir massas.

Ideias-chave

- Binárias visuais, espectroscópicas e eclipsantes oferecem informações complementares.
- Curvas de velocidade radial revelam movimento ao longo da linha de visada.
- Massa é o parâmetro mais importante para a evolução estelar.

Para praticar

Interpretar uma curva de luz de binária eclipsante e localizar eclipse primário e secundário.

Exercícios

1. Por que estrelas isoladas têm massas mais difíceis de medir?
2. Que informação adicional uma binária eclipsante fornece em relação a uma binária apenas espectroscópica?

Aula 9 – Classificação espectral e diagrama HR

Aula 9**Classificação espectral e diagrama HR**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 8

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Classificação espectral e diagrama HR**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Ler o diagrama Hertzsprung-Russell e relacionar classe espectral, temperatura, luminosidade e raio.

Ideias-chave

- A sequência OBAFGKM organiza estrelas por temperatura decrescente.
- No diagrama HR, a sequência principal reflete fusão estável de hidrogênio no núcleo.
- Gigantes e anãs brancas ocupam regiões distintas por terem raios muito diferentes.

Para praticar

Posicionar Sol, Sirius, Betelgeuse e uma anã branca típica em um diagrama HR esquemático.

Exercícios

1. Duas estrelas têm a mesma temperatura, mas uma é 100 vezes mais luminosa. Qual deve ter raio maior?
2. Por que a cor de uma estrela é um indicador imperfeito, mas útil, de temperatura?

Aula 10 – Atmosferas estelares e opacidade

Aula 10**Atmosferas estelares e opacidade**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 9

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Atmosferas estelares e opacidade**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Entender por que a radiação que observamos vem de camadas externas e como a opacidade molda espectros.

Ideias-chave

- A fotosfera é aproximadamente a região de profundidade óptica $\tau \sim 1$.
- Opacidade mede quão eficientemente a matéria bloqueia ou absorve radiação.
- Perfis de linha dependem de temperatura, pressão, rotação e campos magnéticos.

Para praticar

Discutir por que não vemos diretamente o núcleo do Sol, embora a energia venha de lá.

Exercícios

1. Defina, em palavras, profundidade óptica.
2. Cite dois mecanismos que podem alargar uma linha espectral.

Aula 11 – Equilíbrio hidrostático

Aula 11**Equilíbrio hidrostático**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 10

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Equilíbrio hidrostático**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Derivar a ideia física de equilíbrio entre gravidade e gradiente de pressão no interior estelar.

Ideias-chave

- Estrelas são esferas de plasma sustentadas por pressão interna.
- Em equilíbrio, $dP/dr = -Gm(r)\rho/r^2$.
- A pressão precisa crescer para dentro porque o peso das camadas superiores aumenta.

Para praticar

Fazer uma analogia quantitativa com pressão no fundo de uma coluna de fluido.

Exercícios

1. O que ocorreria se a pressão interna de uma estrela diminuísse subitamente?
2. Por que o centro de uma estrela tem temperatura maior que a superfície?

Aula 12 – Fontes de energia das estrelas

Aula 12

Fontes de energia das estrelas

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 10

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Fontes de energia das estrelas**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Comparar contração gravitacional, reações nucleares e escalas de tempo estelares.

Ideias-chave

- A fusão de hidrogênio em hélio é a fonte dominante na sequência principal.
- Cadeia próton-próton domina em estrelas como o Sol; ciclo CNO cresce em importância em estrelas mais massivas.
- Pequenas diferenças de massa nuclear aparecem como energia via $E = mc^2$.

Para praticar

Estimar a fração de massa convertida em energia na fusão $H \rightarrow He$ e discutir a longevidade solar.

Exercícios

1. Por que reações nucleares exigem temperaturas tão altas?
2. Explique por que estrelas mais massivas vivem menos, apesar de terem mais combustível.

Aula 13 – Transporte de energia no interior estelar

Aula 13

Transporte de energia no interior estelar

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 10

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Transporte de energia no interior estelar**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Distinguir transporte radiativo, convectivo e condutivo em estrelas.

Ideias-chave

- Transporte radiativo ocorre por absorções e reemissões sucessivas.
- Convecção aparece quando o gradiente de temperatura torna o fluido instável.
- Condutividade é crucial em matéria degenerada, como anãs brancas.

Para praticar

Comparar água aquecida numa panela com uma camada estelar convectiva.

Exercícios

1. Por que fótons podem levar muito tempo para escapar do interior solar?
2. Que condição qualitativa favorece convecção?

Aula 14 – Modelos estelares e sequência principal

Aula 14**Modelos estelares e sequência principal**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 10

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Modelos estelares e sequência principal**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Entender o conjunto mínimo de equações de estrutura estelar e a relação massa-luminosidade.

Ideias-chave

- Modelos estelares combinam massa, pressão, luminosidade e temperatura como funções do raio.

- Para estrelas de sequência principal, luminosidade cresce rapidamente com a massa.
- A posição no HR é resultado da estrutura interna e da taxa de geração de energia.

Para praticar

Esboçar como muda uma estrela de sequência principal ao aumentar a massa.

Exercícios

1. Se $L \propto M^{3,5}$, uma estrela de $2M_{\odot}$ é quantas vezes mais luminosa que o Sol?
2. Por que a sequência principal não é uma linha de idade única?

Aula 15 – O Sol como estrela padrão

Aula 15

O Sol como estrela padrão

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 11

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **O Sol como estrela padrão**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Usar o Sol como laboratório para estrutura, atmosfera e atividade magnética estelar.

Ideias-chave

- A fotosfera produz o contínuo visível; cromosfera e coroa mostram plasma magnetizado.
- Manchas solares são regiões mais frias associadas a campos magnéticos intensos.
- Neutrinos e heliossismologia sondam o interior solar.

Para praticar

Analisar uma imagem solar em luz branca ou H-alfa e identificar estruturas.

Exercícios

1. Por que a coroa solar pode ser mais quente que a fotosfera?
2. O que a detecção de neutrinos solares confirma sobre o núcleo?

Aula 16 – Meio interestelar: gás e poeira

Aula 16

Meio interestelar: gás e poeira

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 12

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Meio interestelar: gás e poeira**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Descrever fases do meio interestelar e seus efeitos sobre observações.

Ideias-chave

- O meio interestelar contém gás ionizado, atômico, molecular e poeira.
- Poeira causa extinção e avermelhamento da luz estelar.
- Linhas como 21 cm do hidrogênio neutro mapeiam estrutura galáctica.

Para praticar

Comparar a cor observada de uma estrela sem poeira e com avermelhamento interestelar.

Exercícios

1. Diferencie extinção e avermelhamento.
2. Por que nuvens moleculares são locais naturais de formação estelar?

Aula 17 – Formação estelar e protoestrelas

Aula 17

Formação estelar e protoestrelas

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 12

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Formação estelar e protoestrelas**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula,

volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Explicar colapso gravitacional, critério de Jeans e evolução pré-sequência principal.

Ideias-chave

- Uma nuvem colapsa quando a gravidade vence pressão, turbulência e campos magnéticos.
- A massa de Jeans expressa uma escala crítica de instabilidade.
- Discos circumstelares surgem por conservação de momento angular.

Para praticar

Estimar qualitativamente por que uma nuvem ao contrair tende a girar mais rápido.

Exercícios

1. O que impede uma nuvem qualquer de colapsar imediatamente?
2. Por que estrelas jovens costumam estar associadas a nebulosas?

Aula 18 – Evolução na sequência principal

Aula 18

Evolução na sequência principal

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 13

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Evolução na sequência principal**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Relacionar massa inicial, composição e tempo de vida durante a queima de hidrogênio.

Ideias-chave

- A sequência principal é uma fase longa de equilíbrio térmico e hidrostático.
- A composição central muda com a fusão, alterando pressão, temperatura e luminosidade.
- Massa inicial define grande parte do destino evolutivo.

Para praticar

Comparar trajetórias evolutivas de estrelas de baixa e alta massa no HR.

Exercícios

1. Por que aglomerados estelares são úteis para testar evolução estelar?
2. O que significa ponto de saída da sequência principal em um aglomerado?

Aula 19 – Gigantes, queima de hélio e estágios tardios

Aula 19

Gigantes, queima de hélio e estágios tardios

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 13

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Gigantes, queima de hélio e estágios tardios**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Descrever a evolução pós-sequência principal de estrelas de baixa e massa intermediária.

Ideias-chave

- Ao esgotar hidrogênio central, a estrela reajusta sua estrutura e pode virar gigante vermelha.
- Queima de hélio produz carbono e oxigênio.
- Perda de massa e nebulosas planetárias antecedem anãs brancas em muitos casos.

Para praticar

Interpretar o HR de um aglomerado com ramo de gigantes.

Exercícios

1. Por que uma estrela expande quando o núcleo contrai?
2. Uma nebulosa planetária tem relação direta com planetas? Explique.

Aula 20 – Pulsação estelar e sismologia

Aula 20

Pulsação estelar e sismologia

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 14

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Pulsação estelar e sismologia**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Entender pulsação como ferramenta de distância e de estrutura interna.

Ideias-chave

- Cefeidas obedecem uma relação período-luminosidade essencial para a escala de distâncias.
- Pulsação resulta de mecanismos de armazenamento e liberação de energia em camadas ionizadas.
- Heliossismologia e asterossismologia usam oscilações para sondar interiores.

Para praticar

Usar uma relação período-luminosidade simplificada para estimar distância de uma Cefeida.

Exercícios

1. Por que Cefeidas são chamadas de velas padrão?
2. Qual é a vantagem de medir frequências de oscilação em uma estrela?

Aula 21 – Estrelas massivas e supernovas

Aula 21

Estrelas massivas e supernovas

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 15

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Estrelas massivas e supernovas**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Explicar evolução de estrelas massivas, colapso de núcleo e produção de elementos.

Ideias-chave

- Estrelas massivas podem queimar sucessivamente elementos até formar núcleos ricos em ferro.
- Ferro não libera energia por fusão em condições estelares comuns.
- Supernovas de colapso de núcleo enriquecem o meio interestelar e deixam remanescentes compactos.

Para praticar

Montar o “modelo de cebola” de uma estrela massiva evoluída.

Exercícios

1. Por que o ferro marca uma fronteira energética na fusão nuclear?
2. Cite dois efeitos astrofísicos de uma supernova na galáxia.

Aula 22 – Anãs brancas e matéria degenerada

Aula 22**Anãs brancas e matéria degenerada**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 16

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Anãs brancas e matéria degenerada**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Introduzir pressão de degenerescência e limite de Chandrasekhar.

Ideias-chave

- Anãs brancas são remanescentes sustentados por pressão de degenerescência dos elétrons.
- A massa máxima típica é próxima de $1,4M_{\odot}$.
- Elas esfriam lentamente, funcionando como fósseis térmicos de populações estelares.

Para praticar

Comparar qualitativamente pressão térmica e pressão de degenerescência.

Exercícios

1. Por que uma anã branca não precisa de fusão ativa para se sustentar?
2. O que pode ocorrer se uma anã branca em binária ganhar massa demais?

Aula 23 – Estrelas de nêutrons e pulsares

Aula 23**Estrelas de nêutrons e pulsares**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 16

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Estrelas de nêutrons e pulsares**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Descrever remanescentes compactos, conservação de momento angular e emissão pulsada.

Ideias-chave

- Estrelas de nêutrons têm massas solares comprimidas em raios de ordem dezenas de quilômetros.
- Pulsares são estrelas de nêutrons magnetizadas em rotação.
- Campos magnéticos intensos e rotação rápida tornam esses objetos laboratórios extremos.

Para praticar

Estimar o aumento de rotação quando um núcleo estelar colapsa conservando momento angular.

Exercícios

1. Por que pulsares parecem piscar?
2. Qual propriedade torna estrelas de nêutrons muito mais densas que anãs brancas?

Aula 24 – Relatividade geral e buracos negros

Aula 24**Relatividade geral e buracos negros**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 17

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Relatividade geral e buracos negros**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Apresentar gravidade como geometria e definir horizonte de eventos e raio de Schwarzschild.

Ideias-chave

- Relatividade geral descreve gravidade como curvatura do espaço-tempo.
- O raio de Schwarzschild é $R_s = 2GM/c^2$.
- Buracos negros são detectados por seus efeitos gravitacionais e por acreção, não por luz emitida do horizonte.

Para praticar

Calcular R_s para uma massa solar e comparar com o raio do Sol.

Exercícios

1. O que é horizonte de eventos?
2. Por que um buraco negro em binária pode ser brilhante em raios X?

Aula 25 – Sistemas binários próximos e acreção

Aula 25

Sistemas binários próximos e acreção

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 18

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Sistemas binários próximos e acreção**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Entender lóbulos de Roche, transferência de massa e discos de acreção.

Ideias-chave

- Em binárias próximas, uma estrela pode preencher seu lóbulo de Roche.
- A matéria transferida forma disco quando possui momento angular suficiente.
- Novas, supernovas Ia e binárias de raios X dependem de acreção sobre objetos compactos.

Para praticar

Desenhar equipotenciais em uma binária e localizar o ponto de Lagrange interno.

Exercícios

1. Por que discos de acreção aquecem?
2. Qual é a diferença geral entre nova e supernova Ia?

Aula 26 – Síntese da astrofísica estelar

Aula 26

Síntese da astrofísica estelar

Referência principal no Carroll & Ostlie: caps. 7–18

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Síntese da astrofísica estelar**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula,

volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Integrar nascimento, vida e morte das estrelas em uma narrativa física coerente.

Ideias-chave

- Massa inicial é a variável que mais organiza a evolução estelar.
- Observações de espectros, luminosidades e variabilidade testam modelos.
- Remanescentes compactos conectam evolução estelar, relatividade e altas energias.

Para praticar

Construir um mapa conceitual: nuvem molecular $\rightarrow$ estrela $\rightarrow$ remanescente.

Exercícios

1. Compare os destinos prováveis de estrelas de $1M_{\odot}$, $8M_{\odot}$ e $30M_{\odot}$.
2. Que observações permitiriam estimar idade de um aglomerado?

Aula 27 – Processos físicos no Sistema Solar

Aula 27

Processos físicos no Sistema Solar

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 19

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Processos físicos no Sistema Solar**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Aplicar gravitação, equilíbrio térmico, atmosferas e marés ao Sistema Solar.

Ideias-chave

- Planetas refletem e emitem radiação; equilíbrio térmico depende de distância, albedo e atmosfera.
- Marés surgem de diferenças espaciais na força gravitacional.
- Atmosferas planetárias dependem de gravidade, temperatura, composição e história.

Para praticar

Comparar temperatura de equilíbrio de Mercúrio, Terra e Marte ignorando atmosfera.

Exercícios

1. Por que a Lua mostra quase sempre a mesma face para a Terra?
2. Como o albedo altera a temperatura de equilíbrio?

Aula 28 – Planetas terrestres

Aula 28**Planetas terrestres**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 20

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Planetas terrestres**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Comparar Mercúrio, Vênus, Terra, Lua e Marte como corpos rochosos.

Ideias-chave

- Planetas terrestres têm superfícies sólidas e histórias geológicas diversas.
- Efeito estufa explica a temperatura elevada de Vênus.
- Marte registra evidências de água passada e evolução atmosférica importante.

Para praticar

Montar uma tabela comparativa de atmosfera, campo magnético, água e atividade geológica.

Exercícios

1. Por que Vênus é mais quente que Mercúrio na superfície?
2. Cite uma evidência de água líquida antiga em Marte.

Aula 29 – Gigantes gasosos, luas e anéis

Aula 29

Gigantes gasosos, luas e anéis

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 21

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Gigantes gasosos, luas e anéis**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Descrever estrutura de planetas gigantes e diversidade de satélites.

Ideias-chave

- Júpiter e Saturno são ricos em hidrogênio e hélio; Urano e Netuno têm mais compostos voláteis pesados.
- Luas gigantes podem ter oceanos internos, vulcanismo ou atmosferas.
- Anéis são sistemas de partículas moldados por gravidade, colisões e ressonâncias.

Para praticar

Comparar Io, Europa, Titã e Encélado como mundos ativos.

Exercícios

1. Por que Europa é alvo de interesse astrobiológico?
2. O que mantém anéis planetários finos e estruturados?

Aula 30 – Corpos menores: asteroides, cometas e cinturão de Kuiper

Aula 30

Corpos menores: asteroides, cometas e cinturão de Kuiper

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 22

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Corpos menores: asteroides, cometas e cinturão de Kuiper**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Entender corpos menores como registros da formação do Sistema Solar.

Ideias-chave

- Asteroides concentram-se principalmente entre Marte e Júpiter, mas há muitas populações dinâmicas.
- Cometas preservam material volátil e desenvolvem coma e cauda ao se aproximarem do Sol.
- Objetos transnetunianos ajudam a reconstruir a história externa do Sistema Solar.

Para praticar

Interpretar a diferença entre cauda de poeira e cauda iônica de um cometa.

Exercícios

1. Por que meteoritos são amostras importantes?
2. Qual é a diferença entre meteoróide, meteoro e meteorito?

Aula 31 – Formação do Sistema Solar

Aula 31**Formação do Sistema Solar**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 23

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Formação do Sistema Solar**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Apresentar a hipótese nebular, acreção planetesimal e diferenciação planetária.

Ideias-chave

- O Sistema Solar nasceu de um disco protoplanetário ao redor do jovem Sol.
- A linha de gelo influenciou a composição dos planetas.
- Migração planetária e impactos gigantes ajudaram a moldar a arquitetura atual.

Para praticar

Desenhar um disco com gradiente de temperatura e localizar regiões de planetas rochosos e gigantes.

Exercícios

1. Por que planetas gigantes se formaram preferencialmente longe do Sol?
2. Como a conservação de momento angular explica a formação de um disco?

Aula 32 – Exoplanetas: métodos de detecção

Aula 32**Exoplanetas: métodos de detecção**

Referência principal no Carroll & Ostlie: caps. 7 e 23

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Exoplanetas: métodos de detecção**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Explicar velocidade radial, trânsito, imageamento direto, microlente e astrometria.

Ideias-chave

- Velocidade radial mede o balanço gravitacional estrela-planeta.
- Trânsitos medem queda de fluxo e fornecem raio relativo.
- Métodos diferentes favorecem tipos diferentes de planetas e órbitas.

Para praticar

Calcular a profundidade de trânsito aproximada de um planeta do tamanho de Júpiter diante de uma estrela solar.

Exercícios

1. Por que planetas grandes e próximos são mais fáceis de detectar por trânsito?
2. Que combinação de medidas permite obter densidade média de um exoplaneta?

Aula 33 – Arquiteturas planetárias e habitabilidade

Aula 33**Arquiteturas planetárias e habitabilidade**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 23

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Arquiteturas planetárias e habitabilidade**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Comparar sistemas exoplanetários observados com o Sistema Solar e discutir habitabilidade com cautela.

Ideias-chave

- Sistemas exoplanetários mostram grande diversidade: Júpiteres quentes, super-Terras e cadeias ressonantes.
- Zona habitável é condição orbital, não garantia de vida.
- Atmosferas, atividade estelar e história geológica são essenciais para avaliar habitabilidade.

Para praticar

Debater critérios mínimos para priorizar alvos de busca por atmosferas.

Exercícios

1. Por que uma zona habitável depende da luminosidade da estrela?
2. Cite duas razões pelas quais “habitável” não significa “habitado”.

Aula 34 – Escalas, populações e inventário planetário

Aula 34

Escalas, populações e inventário planetário

Referência principal no Carroll & Ostlie: caps. 19–23

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Escalas, populações e inventário planetário**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Consolidar o Sistema Solar e exoplanetas por escalas de massa, distância e composição.

Ideias-chave

- A classificação de objetos planetários envolve composição, dinâmica e história de formação.
- O Sistema Solar é uma referência, mas não representa toda a diversidade planetária.
- Pequenos corpos e discos de detritos conectam sistemas jovens e maduros.

Para praticar

Construir uma escala logarítmica de distâncias: raio terrestre, UA, cinturão de Kuiper, parsec.

Exercícios

1. Por que escalas logarítmicas são úteis em astronomia?
2. Escolha um corpo menor e explique que informação ele traz sobre formação planetária.

Aula 35 – Revisão aplicada: do céu local aos sistemas planetários

Aula 35

Revisão aplicada: do céu local aos sistemas planetários

Referência principal no Carroll & Ostlie: caps. 1–23

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Revisão aplicada: do céu local aos sistemas planetários**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese

curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Preparar avaliação integrando observação, luz, estrelas e planetas.

Ideias-chave

- A astrofísica combina medidas indiretas: posição, fluxo, espectro, tempo e polarização.
- Modelos simples permitem estimativas de ordem de grandeza poderosas.
- A interpretação depende de hipóteses explícitas e incertezas.

Para praticar

Resolva um problema aberto: estime propriedades de uma estrela com planeta em trânsito a partir de uma curva de luz simplificada.

Exercícios

1. Liste cinco grandezas observáveis e cinco grandezas inferidas em astrofísica.
2. Explique por que uma mesma observação pode admitir mais de uma interpretação.

Aula 36 – A Via Láctea: estrutura geral

Aula 36

A Via Láctea: estrutura geral

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 24

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **A Via Láctea: estrutura geral**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Descrever componentes da Galáxia: disco, bojo, halo, braços espirais e matéria escura.

Ideias-chave

- A Via Láctea é uma galáxia espiral barrada.
- Poeira dificulta observação no visível, mas rádio e infravermelho revelam estrutura.
- Populações estelares diferentes indicam histórias de formação distintas.

Para praticar

Desenhar a Via Láctea vista de lado e de cima, com localização aproximada do Sol.

Exercícios

1. Por que é difícil mapear a Via Láctea estando dentro dela?
2. Diferencie disco fino, bojo e halo.

Aula 37 – Cinemática galáctica e matéria escura

Aula 37**Cinemática galáctica e matéria escura**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 24

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Cinemática galáctica e matéria escura**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Usar curvas de rotação para inferir distribuição de massa.

Ideias-chave

- Velocidades orbitais no disco revelam a massa interna à órbita.
- Curvas de rotação aproximadamente planas indicam massa não luminosa extensa.
- Matéria escura é inferida gravitacionalmente em várias escalas.

Para praticar

Comparar curva esperada para massa concentrada com curva observada plana.

Exercícios

1. Se a massa estivesse concentrada no centro, como a velocidade orbital mudaria com o raio?
2. Cite outra evidência de matéria escura além de curvas de rotação.

Aula 38 – O centro galáctico

Aula 38

O centro galáctico

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 24

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **O centro galáctico**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Apresentar evidências para o buraco negro supermassivo central da Via Láctea.

Ideias-chave

- Órbitas de estrelas próximas ao centro permitem medir uma massa compacta.
- Sgr A* é a fonte associada ao buraco negro central.
- O centro galáctico combina densidade estelar alta, gás, poeira e campos magnéticos.

Para praticar

Interpretar um gráfico de órbita de uma estrela ao redor de Sgr A*.

Exercícios

1. Por que órbitas estelares são evidência forte de massa compacta?
2. Por que observar o centro galáctico no infravermelho é vantajoso?

Aula 39 – Tipos de galáxias e sequência de Hubble

Aula 39

Tipos de galáxias e sequência de Hubble

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 25

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Tipos de galáxias e sequência de Hubble**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Classificar galáxias e reconhecer limitações de classificações morfológicas.

Ideias-chave

- Galáxias elípticas, espirais e irregulares diferem em forma, gás e formação estelar.
- Morfologia não é necessariamente sequência evolutiva simples.
- Cor integrada ajuda a distinguir populações jovens e antigas.

Para praticar

Classificar imagens de galáxias e justificar critérios usados.

Exercícios

1. Por que galáxias espirais tendem a ter regiões azuis nos braços?
2. O que uma galáxia avermelhada e pobre em gás sugere sobre formação estelar atual?

Aula 40 – Estrutura espiral e formação estelar em galáxias

Aula 40**Estrutura espiral e formação estelar em galáxias**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 25

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Estrutura espiral e formação estelar em galáxias**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Explicar braços espirais como padrões dinâmicos e locais de formação estelar.

Ideias-chave

- Braços espirais podem ser ondas de densidade ou estruturas transientes.
- Gás comprimido favorece formação de estrelas massivas, brilhantes e azuis.

- Estrelas velhas e jovens traçam componentes diferentes da galáxia.

Para praticar

Usar uma analogia de tráfego para discutir onda de densidade sem transportar sempre as mesmas estrelas.

Exercícios

1. Por que braços espirais são destacados por estrelas jovens?
2. Qual observação ajudaria a mapear gás molecular em uma galáxia?

Aula 41 – Galáxias elípticas, interações e fusões

Aula 41

Galáxias elípticas, interações e fusões

Referência principal no Carroll & Ostlie: caps. 25 e 26

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Galáxias elípticas, interações e fusões**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Relacionar morfologia, dinâmica e evolução galáctica por interações.

Ideias-chave

- Galáxias elípticas costumam ter pouco gás frio e populações estelares antigas.
- Encontros gravitacionais geram caudas de maré, pontes e surtos de formação estelar.
- Fusões contribuem para crescimento de galáxias e buracos negros centrais.

Para praticar

Analisar imagens de galáxias em interação e identificar marcas dinâmicas.

Exercícios

1. Por que colisões de galáxias raramente significam colisões diretas entre estrelas?
2. Como uma fusão pode intensificar formação estelar?

Aula 42 – Escada de distâncias extragalácticas

Aula 42

Escada de distâncias extragalácticas

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 27

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Escada de distâncias extragalácticas**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Compreender paralaxe, Cefeidas, supernovas Ia e redshift como etapas de distância.

Ideias-chave

- Cada indicador de distância calibra o próximo em uma cadeia.
- Cefeidas e supernovas Ia são importantes por relacionarem luminosidade observável e intrínseca.
- Incertezas sistemáticas se propagam pela escada de distâncias.

Para praticar

Montar a sequência: paralaxe → Cefeidas → supernovas Ia → Hubble.

Exercícios

1. Por que paralaxe não basta para medir distâncias cosmológicas?
2. O que torna supernovas Ia úteis como indicadores de distância?

Aula 43 – Expansão do universo e grandes estruturas

Aula 43

Expansão do universo e grandes estruturas

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 27

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Expansão do universo e grandes estruturas**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Introduzir redshift cosmológico, lei de Hubble-Lemaître e aglomerados de galáxias.

Ideias-chave

- Redshift cosmológico expressa expansão do espaço em grandes escalas.
- A lei $v = H_0 d$ é uma relação estatística para galáxias distantes no fluxo cósmico.
- Galáxias formam grupos, aglomerados, filamentos e vazios.

Para praticar

Fazer um modelo com pontos em uma bexiga ou malha elástica para visualizar expansão relativa.

Exercícios

1. Por que a expansão não deve ser imaginada como galáxias fugindo de um centro comum?
2. Se $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, estime a velocidade recessional de uma galáxia a 100 Mpc.

Aula 44 – Galáxias ativas e quasares

Aula 44**Galáxias ativas e quasares**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 28

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Galáxias ativas e quasares**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Explicar núcleos ativos como acreção em buracos negros supermassivos.

Ideias-chave

- AGNs podem emitir enorme luminosidade a partir de regiões compactas.
- O modelo unificado envolve disco de acreção, toro de poeira, jatos e orientação.
- Quasares permitem estudar o universo distante e o meio intergaláctico.

Para praticar

Desenhar o modelo unificado de AGN e prever como muda a aparência com a orientação.

Exercícios

1. Por que variabilidade rápida indica região emissora pequena?
2. Como acreção pode converter energia gravitacional em radiação?

Aula 45 – Cosmologia newtoniana e parâmetros cósmicos

Aula 45**Cosmologia newtoniana e parâmetros cósmicos**

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 29

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Cosmologia newtoniana e parâmetros cósmicos**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Apresentar densidade crítica, curvatura efetiva e componentes do universo.

Ideias-chave

- A densidade crítica separa comportamentos dinâmicos em modelos simples.
- O universo atual contém matéria bariônica, matéria escura, radiação e energia escura.
- Parâmetros cosmológicos são medidos combinando observações independentes.

Para praticar

Construir um gráfico de pizza aproximado dos componentes energéticos do universo atual.

Exercícios

1. Por que matéria bariônica não pode ser toda a matéria escura?
2. O que significa dizer que o universo é aproximadamente plano?

Aula 46 – Radiação cósmica de fundo

Aula 46

Radiação cósmica de fundo

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 29

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Radiação cósmica de fundo**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Entender a CMB como relíquia térmica do universo jovem.

Ideias-chave

- A CMB tem espectro quase perfeito de corpo negro com temperatura próxima de 2,7 K.
- Ela foi emitida quando o universo se tornou transparente à radiação.
- Pequenas anisotropias registram sementes das estruturas cósmicas.

Para praticar

Comparar o espectro de corpo negro da CMB com o de uma estrela.

Exercícios

1. Por que a CMB aparece hoje em micro-ondas?
2. Que informação física está codificada nas anisotropias da CMB?

Aula 47 – Cosmologia relativística e energia escura

Aula 47

Cosmologia relativística e energia escura

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 29

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Cosmologia relativística e energia escura**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Discutir expansão acelerada, supernovas Ia e interpretação de energia escura.

Ideias-chave

- Em cosmologia moderna, o fator de escala descreve a expansão do universo.
- Supernovas Ia distantes indicaram expansão acelerada.
- Energia escura é uma descrição fenomenológica do componente associado à aceleração cósmica.

Para praticar

Comparar, qualitativamente, universos com desaceleração, expansão constante e aceleração.

Exercícios

1. Por que supernovas Ia testam a história de expansão?
2. Qual é a diferença entre matéria escura e energia escura?

Aula 48 – Universo primordial e inflação

Aula 48

Universo primordial e inflação

Referência principal no Carroll & Ostlie: cap. 30

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Universo primordial e inflação**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Apresentar nucleossíntese primordial, inflação e origem das estruturas.

Ideias-chave

- No universo quente e denso, partículas, radiação e núcleos leves estiveram em interação intensa.
- Nucleossíntese primordial produziu principalmente hidrogênio, hélio e traços de lítio.
- Inflação é proposta para explicar homogeneidade, planura e origem de flutuações.

Para praticar

Construir uma linha do tempo: inflação, nucleossíntese, recombinação, primeiras estrelas, galáxias.

Exercícios

1. Por que elementos pesados não foram produzidos em grande quantidade no Big Bang?
2. Que problema a inflação ajuda a resolver?

Aula 49 – Síntese final: uma narrativa física do universo

Aula 49**Síntese final: uma narrativa física do universo**

Referência principal no Carroll & Ostlie: todo o livro

Pergunta inicial

Que observação, escala física ou impasse conceitual torna necessário estudar **Síntese final: uma narrativa física do universo**? Antes de ler os objetivos, escreva uma hipótese curta. Ao final da aula, volte a ela e corrija o que mudou.

Ao final, você deve conseguir

Integrar escalas e métodos da astrofísica moderna em uma visão de conjunto.

Ideias-chave

- A mesma física aparece em escalas muito diferentes: gravidade, radiação, termodinâmica, plasma e partículas.
- A astrofísica é uma ciência de inferência: observamos luz e movimento para reconstruir propriedades distantes.
- O universo observável tem história: expansão, formação de estruturas, nascimento e morte de estrelas, enriquecimento químico e formação planetária.

Para praticar

Escolha um objeto astronômico e responda: como medir distância, massa, composição, idade aproximada e contexto evolutivo?

Exercícios

1. Escolha três equações da apostila e explique o papel físico de cada uma.
2. Escreva uma síntese de uma página conectando estrelas, galáxias e cosmologia.

Como estudar ao longo do semestre

- **Listas curtas:** resolva problemas de estimativa, interpretação de gráficos e leitura de espectros sem esperar dominar todos os detalhes algébricos.
- **Diário observacional:** registre céu, fases da Lua, planetas visíveis, mapas ou simulações. O objetivo é conectar coordenadas e tempo astronômico com experiência concreta.
- **Sínteses de uma página:** ao terminar um bloco, escreva uma explicação curta conectando observação, modelo físico e principal equação.
- **Revisão 1:** fundamentos, luz, estrelas e Sistema Solar.
- **Revisão 2:** galáxias, cosmologia e síntese conceitual.
- **Projeto final:** escolha um sistema astrofísico e estude-o com dados públicos simples, sempre separando observação direta, cálculo e interpretação.

Projetos de estudo possíveis

1. Estimar temperatura de estrelas por cor usando fotometria pública.
2. Construir um diagrama HR de um aglomerado com dados do Gaia.
3. Modelar uma curva de trânsito exoplanetário simplificada.
4. Comparar curvas de rotação e inferir matéria escura em galáxias.
5. Reproduzir uma versão simples da lei de Hubble-Lemaître com catálogo de galáxias.
6. Fazer uma linha do tempo quantitativa do universo, do Big Bang ao Sistema Solar.

Bibliografia

- Carroll, B. W.; Ostlie, D. A. *An Introduction to Modern Astrophysics*. 2ª ed. Cambridge University Press, 2017.
- Karttunen, H. et al. *Fundamental Astronomy*. Springer.
- Ryden, B.; Peterson, B. M. *Foundations of Astrophysics*. Cambridge University Press.
- NASA/IPAC Extragalactic Database, SIMBAD, ESA Gaia Archive e NASA Exoplanet Archive para consultas orientadas de dados.