



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

A LEI DE HUBBLE

Lucas Porto Alegre de Almeida Duarte

Ioav Waga

Marta Feijó Barroso

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Lucas Porto Alegre de Almeida Duarte, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
02/2016

Um Plano de Ensino para todos ensinar

Objetivo

Apresentar a Lei de Hubble como uma evidência experimental da expansão do universo e, portanto, uma forte evidência a favor da Teoria do Big Bang.

Sequência

Aula 1

Começar debatendo sobre o tema Astronomia. Conversar sobre o que os alunos conhecem sobre os corpos celestes (estrelas, planetas, satélites naturais nosso Sistema Solar, etc.). Neste ponto, pedir para os alunos escreverem (bem resumidamente) sobre o que eles sabem acerca desses corpos celestes. Falar sobre distâncias e tempo na escala astronômica (sugestões: usar os vídeos, imagens e tabelas da seção B.10 do Apêndice B). Seguir com uma breve discussão do tema “modelos cosmológicos”, perguntando o que os alunos entendem de um, discutindo alguns modelos (científicos) e o atual (Big bang). As folhas com o que foi escrito por cada aluno devem ser entregues ao professor ao final da aula.

Sugestão de atividade para casa: Pesquisar sobre o surgimento de novos modelos (não precisa ser os cosmológicos, ou mesmo ligado à astronomia). Os alunos podem, por exemplo, pesquisar sobre a proposição do modelo atômico de Rutherford, ou sobre o modelo Copernicano. O ponto central é pesquisar sobre o contexto histórico da “descoberta” em questão, sobretudo da reação da comunidade (científica e não científica) à novidade. O tema não precisa necessariamente estar ligado à Física, mas à outra ciência.

Aula 2

No início da aula, possibilitar a troca dos trabalhos (proposto para casa) entre os alunos, de forma que cada um leia o trabalho de um colega. Após isso, segue-se um breve debate sobre o porquê de a Teoria do Big Bang “existir” (ser proposto e aceito no meio científico). Discutir possíveis causas da resistência das pessoas a eles (aqui,

utilizando-se os trabalhos feitos ao final da aula 1, pode ser feita uma abordagem histórica sobre a aceitação de novos modelos em geral ao longo da história, e como se deu a aceitação destes, fazendo-se um paralelo com a situação “atual”). Evidenciar que, para uma visão coerente, devemos buscar provas (evidências) para um modelo, seja ele qual for (esse modelo deve ser suscetível à teste e comprovação). Para tanto, retome o assunto dos modelos cosmológicos (da aula 1), enfatizando suas consistências com a observação (e sua substituição quando novas evidências apontavam inconsistências delas com as experimentações).

Sugestão de atividade para casa: Pedir aos alunos que pesquisem sobre evidências experimentais da Teoria do Big Bang.

Aula 3

Fazer uma breve revisão do que foi estudado até o momento, recapitulando os pontos centrais. A seguir, discutir o trabalho dos alunos da aula anterior, apresentando a Lei de Hubble como uma evidência da expansão do universo (e portanto, uma das evidências do Big Bang). Fazer a atividade do gráfico da Lei de Hubble (ela é descrita na seção C.1), e seguir com a interpretação do gráfico da referida lei. Após isso, discutir sobre os métodos indiretos. Propor aos alunos que formulem como eles acham que Hubble mediu daqui da Terra as distâncias e as velocidades de afastamento de galáxias. Debater sobre outras situações na qual métodos indiretos de medida são usados, enfatizando o poder e alcance desses métodos, ressaltando o potencial investigativo e criativo do intelecto humano.

Sugestão de atividade para casa: Propor aos alunos que pesquisem sobre outros exemplos de métodos indiretos para uma investigação científica, exaltando seus benefícios.

Aula 4

Discutir os métodos indiretos que os alunos pesquisaram em seus trabalhos, e, a seguir, apresentar o método de Leavitt da determinação da distância de uma estrela do tipo cefeida até nós usada por Hubble para se medir a distância das galáxias.

Sugestão de atividade para casa: Propor aos alunos que pesquisem sobre o fenômeno conhecido como efeito Doppler, e como esse pode ser usado (através de um método indireto) para se determinar a velocidade de certos corpos (como o “radar de velocidade” que multa os carros).

Aula 5

Apresentar o método usado por Hubble para se determinar a velocidade (radial) das galáxias em seu trabalho (usar o trabalho dos alunos como ponte para a discussão). Fazer (ou propor) a atividade da determinação da velocidade de um carro da fórmula 1 através do efeito Doppler com o programa audacity (Dias A. 2009)¹.

Aula 6

Finalizar sintetizando tudo o que foi discutido até o momento.

Sugestão de atividade (em sala)

Que cada aluno escreva uma breve redação sobre o que aprendeu ao longo deste ciclo de estudo.

Aplicação da avaliação formativa final.

Total de horas-aula: 6 a 10.

¹ Disponível em <http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/anais/2009snef/MarcoAdrianoT0092-1.pdf> Acesso em out.2015.

Atividade do gráfico da Lei de Hubble

Objetivo

Discutir e interpretar o gráfico da Lei de Hubble através da construção de um gráfico linear.

Atividade

Dividir os alunos em grupos de três a cinco alunos. Um dos integrantes de cada grupo deve andar em linha reta com passadas iguais enquanto os demais tomam as medidas do número de passadas e da correspondente distância ao ponto de partida. O aluno que andar deve dar 10 passos. Todas as medidas devem ser feitas! O resultado deve ser expresso em um gráfico com no eixo horizontal o número de passadas e no eixo vertical a medida da distância da ponta do pé do aluno ao ponto de partida.

Após a construção do gráfico, é feito aos grupos perguntas que o levam a tirar conclusões sobre o gráfico, como o padrão que ele possui e o fato de haver uma equação matemática que o descreve. Neste ponto é possível também fazer uma discussão sobre o erro das medidas (se o professor julgar conveniente). Alguns exemplos de perguntas:

- Qual linha melhor representa os pontos do seu gráfico?
- Você consegue estabelecer uma relação matemática entre as duas grandezas do seu gráfico (número de passos e distância à origem)?
- Observe o número de um dos passos, e anote a distância correspondente a ele. Agora encontre o ponto correspondente a duas vezes o número de passos do primeiro. Qual a medida da distância correspondente? Repita a operação para três vezes e depois quatro vezes o número de passos do primeiro ponto escolhido. Anote todos os resultados em fileiras.
- Escolha um ponto qualquer do gráfico. Divida o valor da distância ao ponto inicial pelo número de passos. Repita a operação para dois outros pontos quaisquer. Agora você consegue estabelecer uma relação matemática entre as duas grandezas do seu gráfico?
- A reta do seu gráfico cobre perfeitamente todos os seus pontos?

Transparências para a discussão com os alunos – um exemplo



Astronomia	
Segundo o Dicionário:	
Minidicionário Língua Portuguesa:	"Ciência do movimento e constituição dos astros."
Aurélio online:	"Ciência que estuda a posição, os movimentos e a constituição dos corpos celestes."
Outras definições, segundo o minidicionário	
Ciência	"Conhecimento, instrução, erudição; sabedoria; soma os conhecimentos humanos considerados em conjunto, segundo sua natureza e progresso."
Astros	"Nome dado a qualquer corpo celeste."

Corpos celestes

Quais corpos celestes você conhece?

O que você sabe dizer sobre eles?

Escreva numa folha!

estrela:



planeta:



Satélite natural (lua):



asteróide:



Corpos celestes

planeta anão:



cometa:



meteoróide, meteoro e meteorito:



“conjunto” de corpos celestes

constelação:



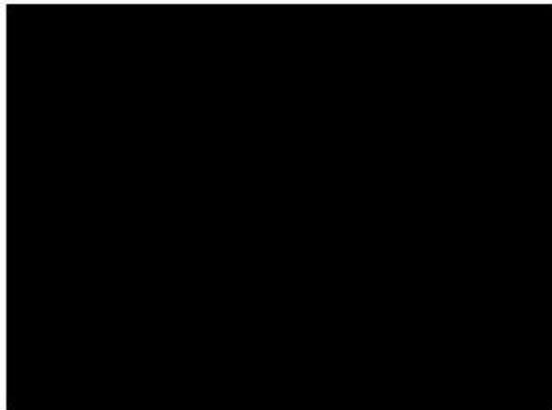
Sistemas planetários:



galáxia:

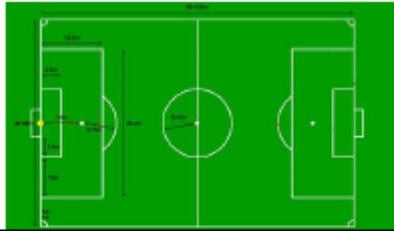


Tamanho, distância e tempo



Distância

Microscópio Tamanho: 200 mil vezes de um grão de arroz distância de luz: 41,4 metros	União Tamanho: 6,7 km (largura de um rio) distância de luz: 17,7 metros
Terra Tamanho: 3,7 mil km (um grão de milho) distância de luz: 9,7 metros	Mapa Tamanho: 6 metros (largura de um grão de milho) distância de luz: 1,6 metros
Carro Tamanho: 10,2 m (uma carrocinha) distância de luz: 33 metros	Estreito Tamanho: 336 m (uma parreira de uva) distância de luz: 1,25 km
Brasil Tamanho: 7,07 mil km (dois blocos de maciço) distância de luz: 22,5 km	Natureza Tamanho: 3,33 mil km (um ano de viagem) distância de luz: 10,1 km



Tempo

- Universo – ~ 14 bilhões de anos
- Terra – 4,5 bilhões de anos (45 anos)
- Primeiras formas de vida (35 anos atrás)
- A vida nos oceanos floresce abundantemente (6 anos atrás)
- Plantas e animais na terra (4 anos atrás)
- Dinossauros atingem o máximo 1 ano atrás e desaparecem há ~ 4 meses.
- Os primeiros humanóides aparecem na última semana.
- A nossa espécie (homo sapiens) só surge há 4 horas.
- A agricultura foi inventada na última hora.
- O Brasil foi descoberto há 3 minutos.

Astronomia

Minidicionário Língua Portuguesa:	"Ciência do movimento e constituição dos astros."
Aurélio online:	"Ciência que estuda a posição, os movimentos e a constituição dos corpos celestes."
Ciência	"Conhecimento, instrução, erudição; sabedoria; soma os conhecimentos humanos considerados em conjunto, segundo sua natureza e progresso."

Cosmologia

"Ramo de Astronomia que estuda a origem, estrutura e a evolução do universo."

Modelos cosmológicos

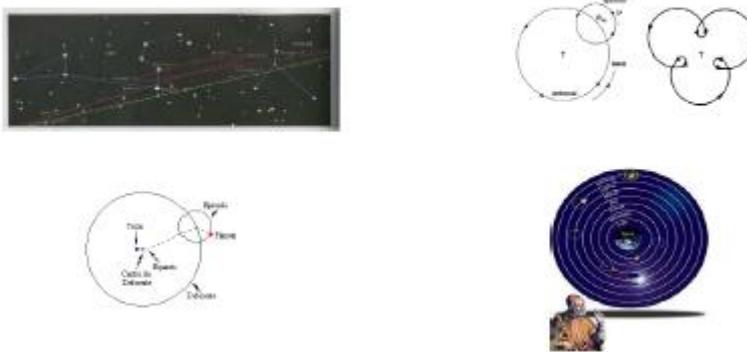
"São modelos (estudos sistematizados e organizados de forma lógica e coerente com a observação) ligados à cosmologia."

Alguns dos “primeiros” modelos

Aristóteles



Ptolomeu



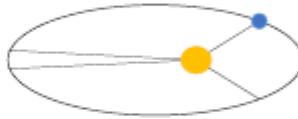
Copérnico



Planeta	Data média de órbita em U.A.		Planeta	Período (dias)	
	Copérnico	Atual		Copérnico	Atual
Mercúrio	0,2568	0,2872	Mercúrio	87,97 dias	87,97 dias
Vênus	0,7181	0,7221	Vênus	224,70 dias	224,70 dias
Marte	1,5180	1,5237	Terra	365,25 dias	365,25 dias
Júpiter	5,2181	5,2028	Júpiter	4,332 anos	4,332 anos
Saturno	9,5181	9,5196	Saturno	11,957 anos	11,952 anos
			Urano	29,44 anos	29,457 anos

Tycho Brahe e Kepler

Lei das órbitas e Lei das Áreas



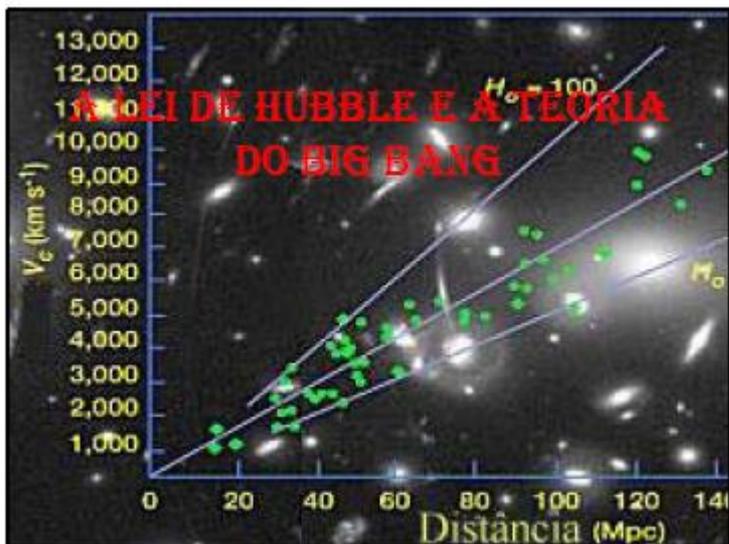
Lei dos Períodos

$$\frac{T^2}{R^3} = \text{const.}$$

Isaac Newton	➔	Teoria da Gravitação Universal
Albert Einstein	➔	Teoria da Relatividade Geral
Friedmann	➔	Considerações acerca do trabalho de Einstein: Um universo dinâmico
Lemaître	➔	Aprofundamento do trabalho de Friedmann (de forma independente): O Átomo primordial
Gamow	➔	Teoria do Big Bang

Atividade para casa:

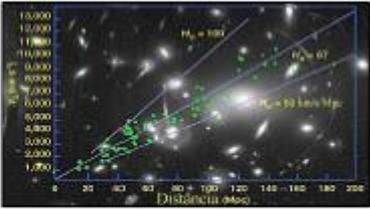
Pesquisar sobre o surgimento de novos modelos (não precisa ser os cosmológicos, ou mesmo ligado à astronomia). Vocês podem, por exemplo, pesquisar sobre a proposição do modelo atômico de Rutherford, ou sobre o modelo Copernicano. O ponto central é pesquisar sobre o contexto histórico da "descoberta" em questão, sobretudo da reação da comunidade (científica e não científica) à novidade. O modelo foi bem aceito por eles? Quanto tempo levou para que fosse completamente aceito? O tema não precisa necessariamente estar ligado à Física, mas à outra ciência.



A Lei de Hubble



Edwin Hubble
(1889/1953)



Vimos nas duas últimas aulas como se formaram os primeiros modelos cosmológicos, e como sua ocorrência e aceitação dependem, acima de tudo, das evidências experimentais.

Neste caso, quais as evidências experimentais da Teoria do Big Bang?

Das três consideradas como principais, discutiremos uma delas.

O objetivo de Hubble

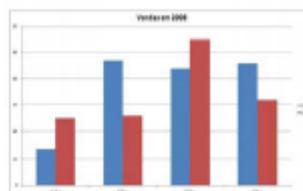
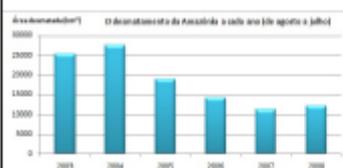
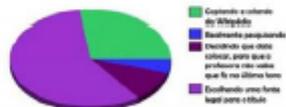
O objetivo de Hubble era investigar se existia uma relação matemática entre duas grandezas “recém medidas” acerca das galáxias: Sua distância até nós e sua velocidade radial.

Na Física, grande parte dos resultados experimentais são determinados e/ou expressos por gráficos.

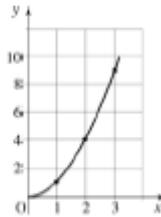
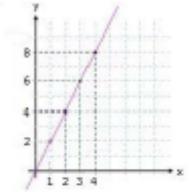
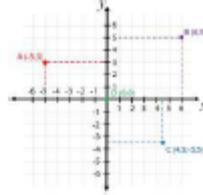
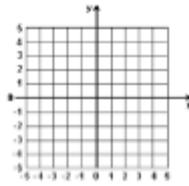
Alguns gráficos



Tempo gasto em meus trabalhos



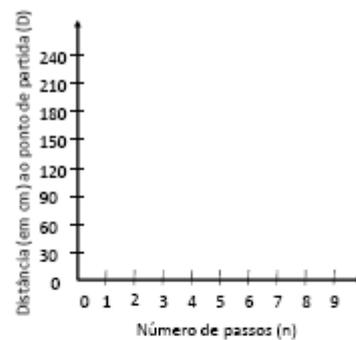
Gráficos cartesianos



Atividade: Um gráfico simples

- Formem grupos de três à cinco alunos.
- Um integrante de cada grupo deve andar em linha reta com passadas iguais enquanto os demais tomam as medidas do número de passadas e da correspondente distância ao ponto de partida. O aluno que andar deve dar pelo menos 5 passos. Todas as medidas devem ser feitas!
- O resultado deve ser expresso em um gráfico cujo eixo horizontal terá o número das passadas e o eixo vertical possuirá a medida da distância da ponta do pé do aluno ao ponto de partida.

Gráfico



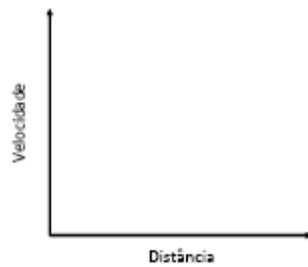
Perguntas

- ✓ Qual linha melhor representa os pontos do seu gráfico?
- ✓ Você consegue estabelecer uma relação matemática entre as duas grandezas do seu gráfico (número de passos e distância à origem)?
- ✓ Observe o número de um dos passos, e anote a distância correspondente a ele.
- ✓ Agora encontre o ponto correspondente a duas vezes o número de passos do primeiro.
- ✓ Qual a medida da distância correspondente?
- ✓ Repita a operação para três vezes e depois quatro vezes o número de passos do primeiro ponto escolhido. Anote todos os resultados em fileiras.

Perguntas

- ✓ Escolha um ponto qualquer do gráfico.
- ✓ Divida o valor da distância ao ponto inicial pelo número de passos.
- ✓ Repita a operação para dois outros pontos quaisquer.
- ✓ Agora você consegue estabelecer uma relação matemática entre as duas grandezas do seu gráfico?
- ✓ A reta do seu gráfico cobre perfeitamente todos os seus pontos?

De volta ao Hubble



O Resultado das medidas: A Lei de Hubble



$$v = H_0 \cdot D$$

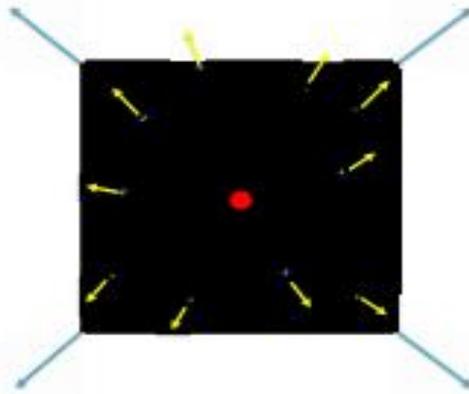
v → Velocidade

D → Distância

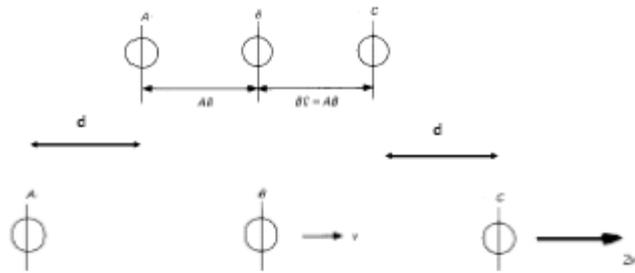
H_0 → Constante de Hubble

$$H_0 \cong 67,15 \pm 1,2 \text{ km/s Mpc}$$

A interpretação do resultado



A interpretação do resultado



Se A se afastou de B uma distância d

então C também se afastou de B uma distância d

portanto A e C foram afastados um do outro por uma distância $2d$ neste intervalo de tempo

Logo, chamando de v a velocidade com que B se afastou de A, a velocidade com que C se afastou de A é igual a $2v$

Uma analogia

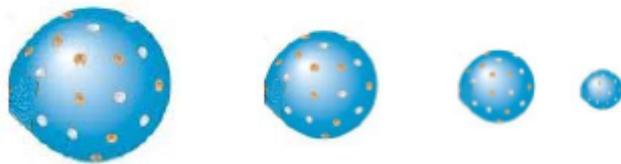


Algumas considerações

- O que representa o universo em nossa analogia é a superfície do balão, e não o seu interior!
- O seu ponto de vista deve ser uma das marcas do balão.
- A expansão dos pontos marcados no balão é irrelevante em comparação a expansão do balão como um todo.

De volta ao início: A Teoria do Big Bang

Se nosso universo cresce a cada dia, isso quer dizer que ontem ele era menor do que é hoje



E na semana passada ele era menor do que ontem...

Se voltarmos no tempo, ele será cada vez menor...

Até um instante em que ele estava todo concentrado em um único ponto.

Fora desse ponto, nada existia.

Todo a matéria do nosso universo estava contida neste único ponto.

E, a matéria não era como nós a conhecemos hoje.

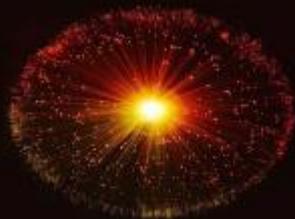


Ela estava derretida, super quente e densa

Toda concentrada em um único ponto.

E, devido uma instabilidade nesse aglomerado de matéria, uma expansão começou.

E a cada dia, o universo ficava maior



Até a matéria existente nele se combinar no que conhecemos hoje em dia

Uma vez compreendido como as medidas dos gráficos do Hubble sugerem a expansão do universo...

Talvez seja natural nos perguntarmos: Como Hubble “chegou” a essas medidas?

Ele certamente não foi até as galáxias para medir suas distâncias diretamente.

O mesmo pode ser dito das velocidades delas.

Então, para determina-las, ele teve de recorrer à algum artifício que lhe proporcionasse a capacidade de estimar essas medidas.

Você consegue pensar em algo semelhante a isso?

Algum método indireto que lhe permita obter dados que não são possíveis de se obter diretamente?

Atividade para casa

Pesquise sobre um (ou mais) exemplo (s) de métodos indiretos para uma investigação científica, exaltando seus benefícios.

O método não precisa ser da Astronomia, ou da Física.

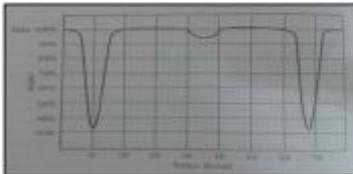
Se você pensou em algum método na discussão anterior, pesquise sobre ele e veja se ele é de fato o que você esperava que fosse.

A "CONSTRUÇÃO" DA LEI DE HUBBLE

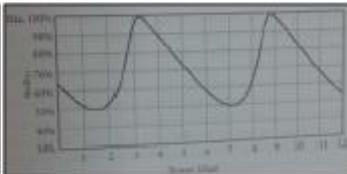
Determinando a distância à uma galáxia



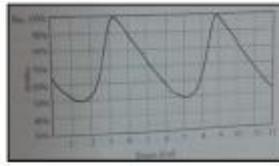
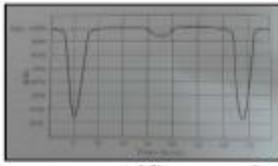
Observe os gráficos abaixo:



Algol



Delta de Cefeu



O que esses gráficos medem?

Eles estão na mesma escala?

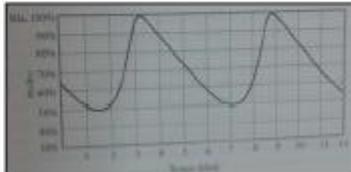
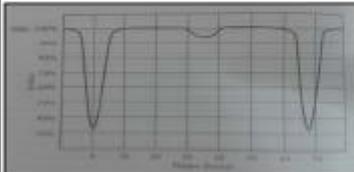
O brilho das estrelas dos gráficos são constantes?

Eles variam da mesma forma?

Qual das duas estrelas leva mais tempo para completar um ciclo de seu brilho?

Quanto tempo cada uma das estrelas leva para completar um ciclo do seu brilho?

As cefeidas



Algor – Estrela variável

Delta de Cefeus - Cefeida



John Goodricke
(1764/1786)



Henrietta Leavit
(1868/1921)

Henrietta Leavit foi a responsável pela criação de um método para determinar nossa distância às estrelas. Por ser grande estudiosa das cefeidas, conseguiu tal proeza em uma investigação a esse tipo de estrela.

Atividade

Formem grupos de três a cinco alunos.

Respondam as perguntas a seguir individualmente e, após uma breve discussão, coletivamente.

Usem qualquer material que vocês tenham disponíveis para responder as perguntas, mas não saiam de seus lugares durante a atividade.

O problema do brilho aparente

Observe a imagem abaixo:



É possível dizer qual das estrelas na imagem é a mais brilhante?

É possível dizer qual delas é a maior?

É possível dizer qual delas está mais próxima de nós?

O problema da medida indireta

Ao **observar** dois corpos parecidos que estão longe um do outro e longe de você, é possível dizer qual deles é o **maior**?

É possível **comparar** o tamanho de objetos apenas pelo tamanho de suas sombras?

Um problema semelhante



Qual o maior dos pássaros na figura?

Uma hipótese e a solução

Se duas cefeidas se encontram num mesmo aglomerado de estrelas, o problema do brilho aparente pode ser desprezado, uma vez que a distância das estrelas do aglomerado é irrelevante em relação à distância deles até nós.



Período VS Brilho

Quanto maior o período de uma cefeída, maior o seu brilho.

Há uma relação matemática entre essas duas grandezas.

Sabendo o período é possível calcular o brilho "real" da estrela.

Brilho real VS Brilho aparente

O brilho de um corpo diminui com o quadrado da distância. Assim, se um corpo que brilha dobra sua distância até nós, seu brilho cai quatro vezes ($2^2=4$);

Se ele triplica a distância? ($3^2=?$)

Se ele quadruplica a distância?

Se a distância é aumentada em cinco vezes?

O raciocínio inverso - a distância relativa entre duas cefeidas

Se duas cefeidas A e B possuem o mesmo período, elas possuirão o mesmo brilho.

Se A parece 16 vezes mais brilhante do que B, então A está 4 vezes mais perto de nós do que B.

Se parecer 36 vezes mais brilhante?

Se parecer 81 vezes mais brilhante?

Se parecer 100 vezes mais brilhantes?

Isso vale para qualquer duas cefeidas!

A medida da distância

Encontrar duas cefeida no céu.

Medir seus períodos.

Determinar o brilho real de cada uma delas.

Medir o brilho aparente das duas.

Determinar que distância transforma o brilho real em brilho aparente.

Uma vez determinada a distância a uma cefeida é possível, com o método de Leavitt, determinar a distância a todas as outras!

A distância a uma Cefeida

Uma vez determinada a distância a uma cefeida é possível, com o método de Leavitt, determinar a distância a todas as outras!

O método vale para **qualquer cefeida**.

É possível estimar a distância a qualquer estrela que esteja “perto” de uma cefeida.

É possível determinar a distância a uma galáxia, desde que ela possua uma cefeida.

O Grande Debate

A “CONSTRUÇÃO” DA LEI DE HUBBLE

Parte 2: A medida da velocidade
radial das galáxias.

A espectroscopia

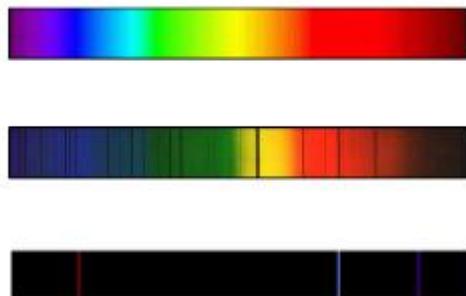
A espectroscopia estuda algumas propriedades de certos materiais incandescentes através da análise da luz emitida por eles.

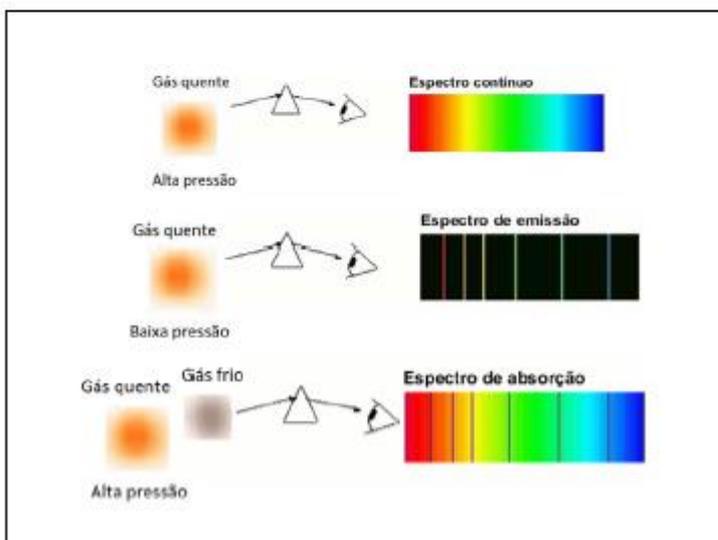
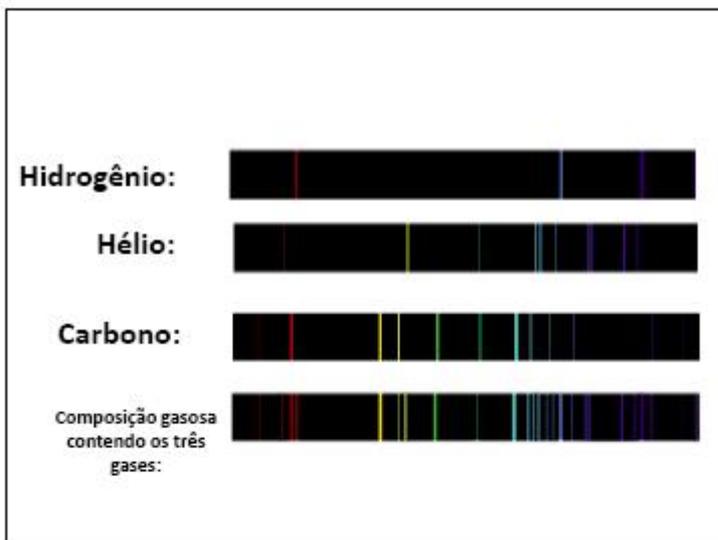


O prisma e a decomposição da luz



Avanços na espectroscopia





Desvios nas linhas de absorção: O Efeito Doppler

No dia a dia, quando uma fonte sonora está em movimento, é comum notarmos uma diferença no som emitido. De alguma forma, ele parece ser diferente de quando está parado.



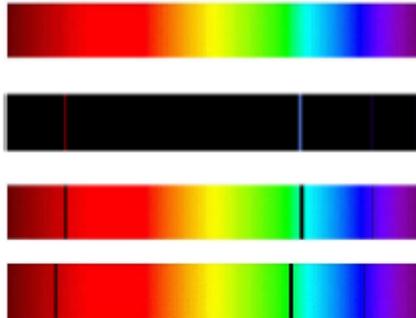
E quanto maior a velocidade do corpo que se move, maior é o efeito da mudança no som emitido por ele.



Os espectros das estrelas também sofrem esse efeito proveniente do movimento relativo entre a fonte e o observador.

Por se tratar de luz, a mudança que ocorre devido o movimento é visual.

Desvios nas linhas de absorção:
O Efeito Doppler



A determinação da velocidade

Assim como no caso do período e do brilho das cefeidas, há uma relação matemática entre o desvio das linhas espectrais e a velocidade do corpo que a emite.

Assim, conhecendo o desvio das linhas é possível determinar a velocidade do corpo que emite o espectro e se esse corpo se aproxima ou se afasta de nós.