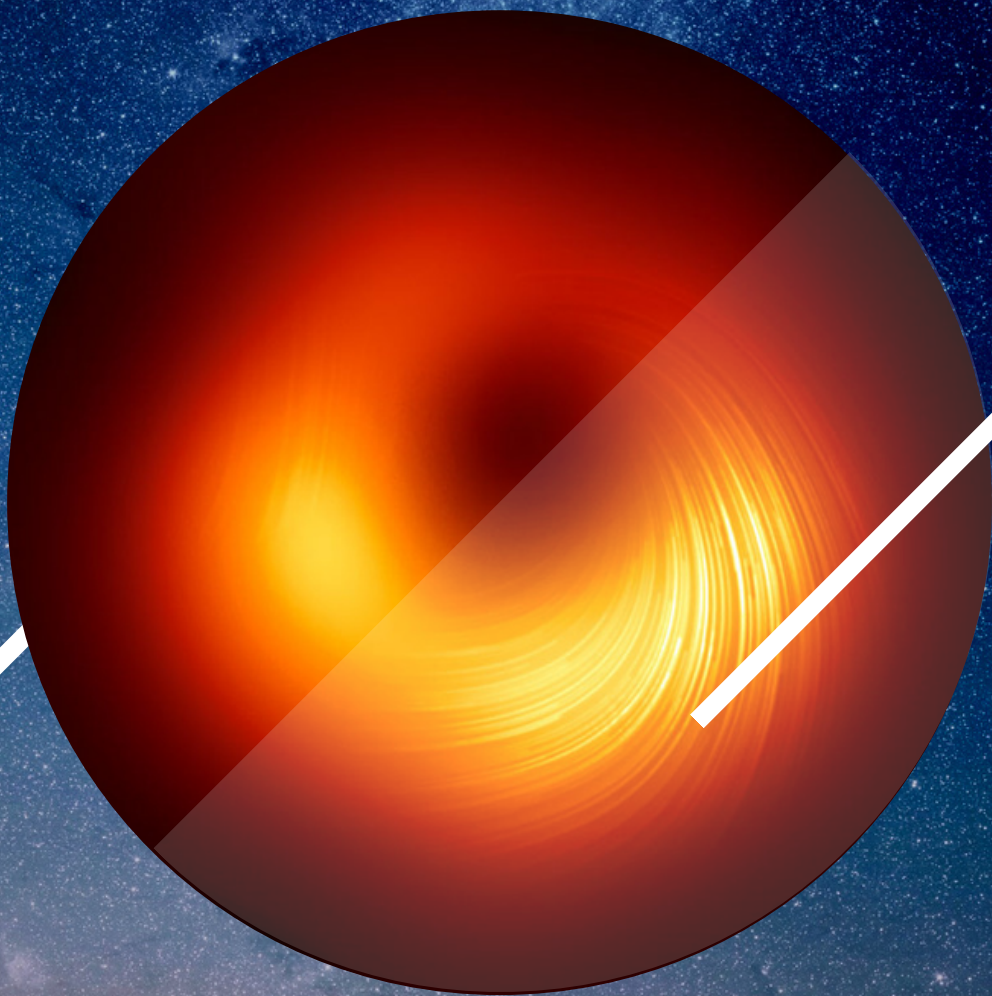


ESTRELAS, GALÁXIAS E BURACOS NEGROS

UMA PROPOSTA DE ENSINO SOBRE EVOLUÇÃO ESTELAR,
GALÁXIAS E BURACOS NEGROS



Marcos Venicios Oliveira
Sérgio Mascarello Bisch
Flávio Gimenes Alvarenga

A mente é um fogo a ser acesso, não um vaso a ser
preenchido. (Plutarco)



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

Marcos V. Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Mascarello Bisch

Coorientador: Prof. Dr. Flávio Gimenes Alvarenga

*Uma Proposta de Ensino sobre Evolução Estelar,
Galáxias e Buracos Negros*

Sumário

1	Apresentação	3
2	Referencial teórico	3
3	Estrutura e Objetivos da proposta	5
4	Princípios físicos básicos	7
4.1	Evolução estelar	7
4.2	O equilíbrio hidrostático	7
4.3	Processos de fusão nuclear	9
4.4	Diagrama H-R	10
4.5	Galáxias - morfologia e o centro galáctico	12
4.6	Buracos Negros	14
4.6.1	Estrelas escuras na gravitação newtoniana	15
4.6.2	Buracos negros na Relatividade Geral	17
4.7	A primeira imagem de um buraco negros	19
5	Primeira imagem de um buraco negro	22
6	O Sol, as Estrelas e a Evolução Estelar	23
7	As galáxias e a Via Láctea	25
8	Buracos negros e suas propriedades físicas	27
9	Considerações finais sobre estrelas, galáxias e buracos negros	28
10	Imagens e recursos utilizados	29
11	Questionários para atividades online	35
11.1	Questionário sobre evolução estelar	35
11.2	Questionário sobre galáxias e a Via Láctea	36
11.3	Questionário sobre buracos negros	37
	Referências	39
	ANEXO A Textos das tarefas de leituras	41
	ANEXO B Exemplo de Apresentação das aulas	71

1 Apresentação

Este é o Produto da Dissertação de Mestrado de Marcos Venícios Oliveira, orientado pelos Professores Dr. Sérgio Mascarello Bisch e Dr. Flávio Gimenes Alvarenga, que foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física - Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ofertado pela Sociedade Brasileira de Física em parceria com a Universidade Federal do Espírito Santo.

Nos textos a seguir apresentaremos a proposta didática elaborada para o ensino de evolução estelar, galáxias e buracos negros no Ensino Médio utilizando a dinâmica dos Três Momentos Pedagógicos (3MPs) (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002) vinculados à Situação de Estudo (SE) (AUTH, 2002) para a organização do conhecimento (GEHLEN, 2009; GEHLEN; MALDANER; DELIZOICOV, 2012). Para estabelecer uma significação conceitual durante as abordagens e aprendizagens, consideraremos os pressupostos de Vygotsky (2001), que desenvolve a ideia de formação de conceitos científicos. Espera-se que a proposta possa servir de referência e ser adaptada para atender a diversos contextos escolares.

2 Referencial teórico

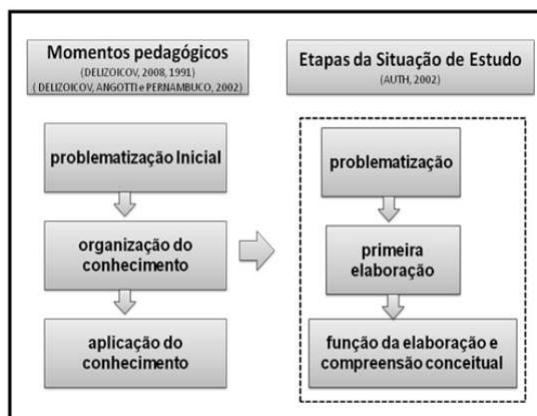
De acordo com Pereira e Junior (2014), Vygotsky em seus escritos e estudos, se baseava nas ações práticas desenvolvidas ou em desenvolvimento pelo indivíduo, como lembrar, raciocinar, entre outras, para verificar ações e comportamentos, tendo em vista a função da mente neste quesito como aquilo que se realiza, externaliza. Essas funções mentais foram distinguidas como funções mentais *elementares* e *superiores*, onde as formas superiores de funcionamento da mente, tendo em vista suas ações, estão relacionadas à formação de conceitos científicos na consciência, mediadas por signos como ferramentas psicológicas auxiliares no processo de apropriação do conhecimento.

De acordo com Gehlen (2009) aqueles conceitos primeiros que os estudantes trazem consigo para sala de aula são os espontâneos, são conhecimentos que surgem por assimilação e são empregados pelas crianças a partir do contato que tem com as pessoas ao seu redor, no seu contexto social. Sintetizando essas informações, podemos dizer que os conceitos espontâneos são aquelas ideias ou noções imediatas que o sujeito possui e/ou adquiriu de modo informal. Já os conceitos científicos (não espontâneos) são aqueles adquiridos como resultado da aprendizagem escolar, auxiliados por ferramentas psicológicas como os signos linguísticos por exemplo, para proporcionar novas aprendizagens e um conhecimento mais racional, mais elaborado.

Como o ensino de evolução estelar, galáxias e buracos negros apresenta vários fenômenos com vários conceitos relacionados para sua compreensão, e pelo próprio tema de buracos negros despertar grande interesse, de eles serem fascinantes e desafiadores, sempre apresentando muitos questionamentos sobre sua natureza, são, portanto, muito adequados a uma proposta de ensino que se inicie por problematizações, que sejam capazes de motivar e envolver os estudantes de maneira ativa na busca de resposta e construção de seus conhecimentos. Sendo assim, adotou-se como referência para essa proposta os 3MPs juntamente com a SE, conforme Figura 1, a fim de que se obtenha uma estrutura bem organizada de aplicação das aulas, que sirva como ferramenta mediadora para introdução e aprendizagem dos conceitos científicos.

Os três momentos pedagógicos (3MPs) consistem em uma dinâmica didático-

Figura 1 – Etapas da SE agregada aos 3MPs para a organização do conhecimento.



Fonte: Gehlen (2009, p. 199)

pedagógica que sempre se inicia por uma problematização e que pode ser usada como uma proposta para dinamizar e organizar o desenvolvimento das aulas e a atuação do professor (MUENCHEN, 2010), fazendo com que este não seja apenas expositor de argumentos, mas alguém que incentiva e cria oportunidades para que o aluno tenha participação ativa e se aproprie do conhecimento desejado.

Esses momentos foram definidos como: *Problematização Inicial*, *Organização do Conhecimento* e *Aplicação do Conhecimento* (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002). No primeiro momento, da *Problematização inicial*, os estudantes são desafiados a expor os seus entendimentos sobre determinadas situações significativas através de questões desafiadoras. Depois vem o segundo momento pedagógico, que é de *Organização do Conhecimento*, este é o momento do desenvolvimento da conceituação física, momento de pesquisa, discussão e busca de sistematização, aqui serão estudados os conhecimentos científicos necessários para a compreensão do tema apresentado na etapa anterior. E, por último, o momento de *Aplicação do Conhecimento*, tido como o momento de explorar o potencial explicativo dos alunos por meio de atividades que busquem evidenciar os conhecimentos que vem se apropriando.

A situação de estudo (SE) é a etapa que vai dar significado aos conceitos (MIGUEL; CORRÊA; GEHLEN, 2014), estabelecendo uma conexão entre as concepções espontâneas e os conceitos científicos, elevando gradualmente o nível de compreensão do tema estudado. É estruturada em três etapas diferentes, sendo a primeira etapa chamada de *Problematização*, onde se busca explicitar os primeiros entendimentos que os alunos tem dos conceitos. A segunda etapa é chamada de *Primeira Elaboração*, etapa de aprofundamento e distanciamento das concepções incoerentes. A terceira e última etapa é conhecida como *Função da Elaboração e Compreensão Conceitual*. Aqui é retomado o problema em foco ou a problematização inicial, atribuindo um novo nível de compreensão.

Com a abordagem conjunta dos 3MPs e da SE se busca promover maior aprendizagem e significação aos conceitos científicos abordados, possibilitando de forma progressiva o deslocamento das concepções iniciais que não estejam de acordo com o que a ciência já explorou e descobriu sobre o tema abordado, promovendo assim o *nível de pensamento consciente* (BARBOSA; BATISTA, 2018).

3 Estrutura e Objetivos da proposta

Na presente proposta, buscamos vincular os 3MPs e a SE para apresentar os conceitos associados à evolução estelar, galáxias e buracos negros, sendo que as etapas de SE serão estruturadas dentro da organização do conhecimento dos 3MPs. Mais especificamente, a proposta será estruturada, toda ela, com base nos 3MPs de maneira tal que haverá uma grande problematização inicial, a partir da apresentação da famosa “primeira imagem de um buraco negro”¹ e, questionamentos a respeito do que aparece nesta imagem, o que seria um buraco negro, qual sua origem, que tipos existem, onde se localizam etc., cujo esclarecimento mais completo demandará a abordagem dos temas evolução estelar, galáxias e buracos negros. Portanto, deverá existir ainda uma grande organização do conhecimento, que será desenvolvida por meio da abordagem, em etapas sucessivas, desses três temas, cada um deles também apresentado com base nos 3MPs e na SE e significação conceitual. Por fim, haverá a síntese, onde se fará a grande aplicação do conhecimento, através de uma atividade que possibilite aos alunos desenvolver e articular os conhecimentos científicos apreendidos.

O resultado que se espera com esta proposta é de contribuir para uma nova visão de mundo, explorando o Universo e a nossa posição dentro dele, bem como apresentar as descobertas científicas, por meio do qual interpretamos e compreendemos o mundo que nos cerca. Para isso, através de uma postura dialógica e indagadora a ser tomada pelo professor, os estudantes poderão apresentar suas hipóteses e questões como forma de participação na construção de seus conhecimentos (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2002). Portanto, espera-se que os alunos sejam sujeitos ativos nas aprendizagens desenvolvidas ao se aplicar este produto².

O objetivo geral de ensino da proposta é de promover uma maior consciência e conhecimento, por parte dos estudantes, acerca da estrutura e composição do Universo e de nossa posição dentro dele, a partir da abordagem dos temas da evolução estelar, galáxias e buracos negros.

Os objetivos de ensino específicos da proposta consistem em:

- problematizar e discutir as semelhanças e diferenças entre o Sol e as estrelas e abordar a evolução estelar, considerando as forças envolvidas no equilíbrio de uma estrela e seus estágios finais evolutivos (objetos compactos), principalmente o surgimento de buracos negros estelares;
- problematizar a visão que temos da Via Láctea e estudar as estruturas galácticas, sua formação e morfologia, e os buracos negros supermassivos;
- abordar as propriedades físicas dos buracos negros, detalhando alguns conceitos relacionados aos efeitos produzidos por estes objetos no espaço-tempo;
- retomar principais conceitos e problemas para estabelecer uma síntese final (consideração final) englobando os tópicos de evolução estelar, galáxias e buraco negro conjuntamente e os relacionando (retomando) à primeira imagem de um buraco negro.

¹ Imagem do centro da galáxia M87 obtida pelo consórcio global EHT em abril de 2019.

² Os detalhes da teoria e da metodologia de aplicação podem ser consultadas no texto da dissertação.

Em todas as etapas deve-se buscar promover uma articulação que leve ao saber científico de modo participativo e colaborativo para a aprendizagem dos estudantes através de uma dinâmica problematizadora para cada tópico que deverá ser abordado, seguindo conjuntamente a dinâmica dos momentos pedagógicos e as etapas da situação de estudo.

Deve-se considerar também como objetivo de ensino e pesquisa uma análise do próprio processo de ensino-aprendizagem e sua natureza social, em que, por meio das interações e mediações estabelecidas durante as atividades, as respostas dos alunos e suas primeiras concepções serão coletadas e analisadas, bem como suas apropriações dos conceitos durante a abordagem de cada tópico no decorrer do processo da aplicação das aulas e das sistematizações feitas pelo professor. Esse, por sua vez, também poderá identificar essas apropriações posteriores analisando diretamente as respostas dos alunos às questões e atividades avaliativas desenvolvidas durante a sequência de ensino, podendo ainda adotar um diário de bordo ou gravação das aulas para a coleta de dados acerca da aplicação da proposta.

Nas seções seguintes apresentaremos o plano de cada aula com os respectivos exercícios e recursos necessários. Nos objetivos específicos, dispomos os códigos de algumas habilidades específicas propostas na BNCC e da versão preliminar do currículo. Ainda deixamos à disposição as imagens usadas, as atividades e questões desenvolvidas, incluindo um anexo dos slides (anexo B) da proposta de cada aula de acordo com a sequência de ensino a seguir indicada. Para uma visão mais geral da quantidade de aulas, segue abaixo uma tabela com o tema e o número aproximado de aulas, considerando que cada aula tenha uma duração de 50 minutos.

Figura 2 – Quadro de Aulas

Seções	Momento/Etapa	Tema	Nº de Aulas
seção 5	Grande Problematização inicial	1ª imagem de um Buraco Negro	1 a 2 aulas
seção 6	Grande Organização do Conhecimento	O Sol, estrelas e evolução estelar	5 a 6 aulas
seção 7	Grande Organização do Conhecimento	As galáxias e a Via Láctea	2 aulas
seção 8	Grande Organização do Conhecimento	Buracos Negros e suas propriedades físicas	3 aulas
seção 9	Grande Aplicação do Conhecimento	Considerações finais	2 aulas

Como cada seção apresentada no quadro acima possui os 3MP's e a SE independente da próxima seção ou da anterior, a aplicação apenas de alguns conteúdos, ou do conteúdo de interesse do professor é possível e não interfere na aprendizagem dos conceitos escolhidos. Apenas o entendimento mais amplo envolvido com a grande problematização inicial é que pode ser comprometido, para isso o professor deve escolher as questões problemas que mais se relacionam com o tema que deseja aplicar.

4 Princípios físicos básicos

No que segue, serão apresentadas as teorias físicas e matemáticas os estágios evolutivos das estrelas, sua classificação e os processos de seus finais como objetos compactos. Da mesma forma, apresentaremos as galáxias suas estruturas e morfologia. E, por fim, os buracos negros, sua definição e propriedades físicas básicas, apresentando um pouco da teoria dos buracos negros de Schwarzschild.

4.1 Evolução estelar

As estrelas são formadas dentro de grandes concentrações de gás e matéria interestelar, denominadas *nuvens moleculares*, a uma temperatura de 10 a 30 K, compostas por mais de 110 moléculas atômicas, mas principalmente de H e He (PICAZZIO, 2011; MILONE, 2019). Devido à baixa temperatura dessas nuvens, em seu interior ocorre a formação de moléculas, sobretudo moléculas de hidrogênio (H_2), e podem se formar glóbulos mais densos, pois a baixa temperatura, e a consequente menor agitação térmica das moléculas, favorece a ação da gravidade, aproximando as moléculas. O gatilho que propicia a formação desses glóbulos dentro dessas nuvens pode ser a colisão entre nuvens próximas ou ondas de choque de explosão de supernovas, além da turbulência interna natural da nuvem provocada pelo movimento de seus gases. Esse cenário pode causar um desequilíbrio nessas nuvens, que podem entrar em colapso, ou seja, começam a se contrair e fragmentar-se formando glóbulos com cerca de 10 a 50 $M_\odot$ (NASCIMENTO... , 2021).

Os fatores que influenciam na forma como se dará o colapso dos glóbulos são: uma pressão externa, devido ao fato de os glóbulos estarem dentro da nuvem de gás, o movimento de rotação, devido à contração, o campo magnético e a gravidade.

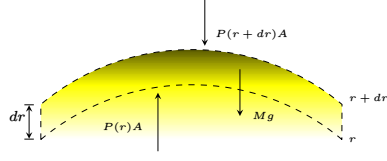
A queda de matéria em direção ao centro do núcleo faz os glóbulos aquecerem, ao suas partículas colidirem, produzindo uma transformação de energia potencial gravitacional em energia térmica. Os átomos e moléculas (H_2O , CO , H_2) também são responsáveis pelo desequilíbrio do glóbulo conforme Milone (2019). Ao receberem energia devido às colisões, esses átomos e moléculas emitem uma radiação que deixa a nuvem, diminuindo sua temperatura e consequentemente sua pressão, levando todo glóbulo a um novo colapso. O centro do glóbulo aquece muito, quando a temperatura atinge, no mínimo, $8 \cdot 10^6 K$, isso faz com que 4 átomos de H sofram fusão, formando 1 átomo de He, liberando muita energia neste processo, dando origem a uma *protoestrela* (MILONE, 2019).

A partir do momento que começa a fusão de H, a protoestrela vai se ajustando e se moldando até atingir um estado de *equilíbrio hidrostático*. Nesse processo, parte da energia produzida é expulsa para a superfície em forma de radiação. Ao chegar a um estado de equilíbrio, essa protoestrela permanece produzindo energia por meio da fusão, se tornando uma estrela de *sequência principal*, onde, dependendo de sua massa, pode ficar durante bilhões de anos simplesmente transformando H em He (PICAZZIO, 2011; MILONE, 2019).

4.2 O equilíbrio hidrostático

Vamos demonstrar como uma estrela se estabiliza durante sua fase de sequência principal através do equilíbrio entre pressão e peso, sustentado por reações nucleares, é possível inferir que a soma dessas forças deve ser nula, ou seja:

Camada esférica no interior de uma estrela.



$$\begin{aligned} P(r + dr)A + Mg &= P(r)A, \\ P(r + dr) - P(r) &= -\frac{Mg}{A} \end{aligned} \quad (1)$$

Seja m a massa das cascas esféricas desta estrela, então podemos substituir esta massa pela densidade e o volume, de modo que $m = \rho A dr$ e logo após tornar a camada infinitesimal, e a equação (1) toma a seguinte forma;

$$\begin{aligned} P(r + dr) - P(r) &= -\rho dr g, \\ \frac{dP}{dr} &= -\rho g. \end{aligned} \quad (2)$$

A gravidade g pode ser obtida da segunda lei de Newton e da lei de gravitação universal, e a equação do equilíbrio hidrostático com base na pressão, densidade e massa em função de r fica,

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(r)}{r^2}. \quad (3)$$

O sinal negativo aqui indica que a pressão diminui à medida que r aumenta, ou seja, a pressão é maior no centro da estrela, o que impede que o núcleo colapse, e ainda, desta equação, é possível inferir que a energia térmica é da mesma ordem da energia potencial gravitacional, e que depende apenas da distância r ao centro da estrela. Conforme mostra [Kippenhahn, Weigert e Weiss \(1990, p. 19\)](#), podemos multiplicar ambos os lados desta equação por r vezes um elemento de volume e integrar em relação a dr desde o centro da estrela até sua superfície R onde a estrela acaba, de modo que;

$$\int_0^R \frac{dP}{dr} 4\pi r^3 dr = - \int_0^R \frac{GM(r)\rho(r)}{r^2} 4\pi r^3 dr. \quad (4)$$

Agora integrando por partes o lado esquerdo primeiro e simplificando o direito depois,

$$4\pi R^3 P(R) - 4\pi 0^3 P(0) - \int_0^R 3P(r) 4\pi r^2 dr = - \int_0^R 3P(r) 4\pi r^2 dr. \quad (5)$$

$$- \int_0^R \frac{GM(r)\rho(r) 4\pi r^2 dr}{r} = - \int_0^R \frac{GM(r) dm}{r} = E_g. \quad (6)$$

Da equação (6) a densidade e o elemento de volume fornecem um elemento de massa naquela camada, e esse elemento de massa multiplicado pelo potencial gravitacional a uma distância r do centro se transforma na energia potencial gravitacional da massa situada na casca esférica a uma distância r do centro, cuja integral de 0 a R (raio da estrela) corresponderá à energia potencial gravitacional total da estrela. Então das equações (6) e (5) resulta.

$$- \int_0^R 3P(r) 4\pi r^2 dr = E_g. \quad (7)$$

Se considerarmos o elemento de volume que aparece no interior da integral como contendo um gás ideal, a pressão então é dada por $P(r) = nk_B T(r)$, cuja a energia por unidade de volume é $u(r) = \frac{3}{2}nk_B T(r)$, e se multiplicarmos $u(r)$ pelo elemento de volume e integrarmos de 0 a R temos a energia térmica, ou seja:

$$E_{term} = \int_0^R \frac{3}{2}nk_B T(r)4\pi r^2 dr = \frac{1}{2} \int_0^R 3P(r)4\pi r^2 dr = -\frac{1}{2}E_g. \quad (8)$$

Logo, a energia total de uma estrela que seria a soma da energia potencial gravitacional com a energia térmica, é dada por:

$$\begin{aligned} E_{total} &= E_{term} + E_g, \\ &= -\frac{1}{2}E_g + E_g, \\ &= \frac{1}{2}E_g. \end{aligned} \quad (9)$$

O resultado da [Equação 9](#) acima, que relaciona a energia potencial gravitacional e a energia interna de uma estrela em equilíbrio hidrostático que consiste em um gás ideal, está de acordo com o *teorema Virial*, que mostra a existência de relação entre a energia cinética de uma sistema de muitas partículas e sua energia potencial gravitacional, aplicável aos modelos estelares mais simples.

4.3 Processos de fusão nuclear

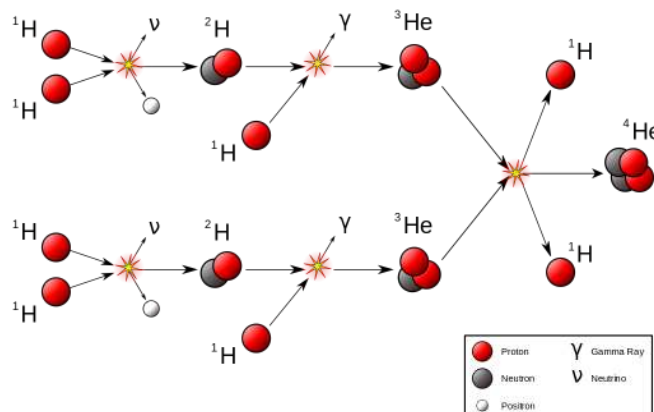
No centro das estrelas ocorrem processos de fusão nuclear em que núcleos atômicos mais leves, sobretudo de hidrogênio, são combinados, formando núcleos mais pesados, como os de Hélio, liberando, neste processo, grande quantidade de energia. Essa energia liberada é chamada *energia de ligação* do núcleo e a combinação ou junção desses núcleos mais leves em núcleos mais pesados, que ocorre no centro das estrelas, é um processo de *fusão termonuclear*, assim denominado porque a fusão ocorre em consequência da altíssima temperatura, de milhões de Kelvin, existente no centro das estrelas.

Para que ocorra a fusão dos núcleos no interior das estrelas, é preciso que as partículas estejam próximas o suficiente. Para isso precisam vencer a barreira coulombiana repulsiva entre elas. A contração que ocorre durante a formação das estrelas transforma energia potencial gravitacional em energia térmica, aumentando a velocidade das partículas fazendo com que, durante as colisões, elas se aproximem o suficiente para que as forças de atração nucleares superem as de repulsão elétrica iniciando o processo de fusão, liberando a energia necessária para manter a alta temperatura e pressão e equilibrar as forças de contração gravitacional. Assim a estrela brilha e a temperatura em seu centro se mantém muito alta. Por exemplo a temperatura no interior do Sol é de cerca 15 milhões de Kelvin e em estrelas mais massivas é da ordem de 500 milhões de Kelvin ([MILONE, 2019; PICAZZIO, 2011](#)).

Um dos processos de fusão nuclear mais importantes que ocorre em estrelas como o nosso Sol é o de uma reação chamada *cadeia próton-próton (p-p)* [Figura 3](#). Na primeira etapa da cadeia p-p, dois núcleos de átomos de H se fundem para formar um núcleo de deutério, um pósitron e um neutrino. O neutrino escapa da estrela, mas o pósitron colide com um elétron do meio, ambos se aniquilam e liberam energia na forma de raios gama. Na segunda etapa, o deutério se funde com outro átomo de H, formando o isótopo de

hélio (^3H) com dois prótons e um nêutron, liberando fótons (γ). Na terceira reação, dois isótopos de fundem para formar um átomo de hélio ^4He e dois núcleos de H.

Figura 3 – Reação em cadeia tipo próton-próton.



Como uma estrela tem uma enorme reserva de hidrogênio, essas rea   es se mant m constantes e a estrela atinge temperatura e tamanho ideais para o seu equilíbrio, ficando estável por um longo período. Quando a estrela se mant m nesse estado de equilíbrio, queimando apenas hidrogênio em seu núcleo, transformando-o em hélio, ela se encontra na chamada fase de *sequência principal*. A cadeia p-p   o principal processo de produ   o de energia em estrelas de massa não muito elevada, como o Sol.

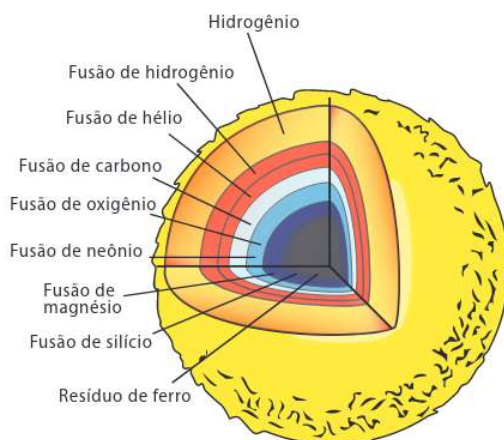
Quando começar a se esgotar o hidrogênio disponível no núcleo da estrela, que serve de combustível para o processo de fusão de hidrogênio em hélio, isso diminuir  a geração de energia e a pressão interna, fazendo com que ocorra uma contração deste núcleo e uma consequente conversão de energia potencial gravitacional em energia térmica, elevando sua temperatura. Dependendo, então, da massa da estrela e do consequente aumento de temperatura produzido, isso poderá desencadear novos ciclos de fusão de elementos mais leves em elementos mais pesados. Uma estrela com massa semelhante   do nosso Sol, será capaz de realizar a fusão do hélio em carbono e deste em oxig nio. Se a estrela tiver massa suficiente para gerar temperaturas internas ainda mais elevadas, esse processo de fusão prosseguirá, formando elementos cada vez mais pesados, até chegar na síntese do ferro conforme Figura 4.

Para elementos mais pesados que o ferro, a energia potencial nuclear por núcleon torna-se maior e não haverá mais liberação de energia ao se realizar a fusão, ao contrário, será necessária a absorção de energia para que ela se realize. Somente em eventos altamente energéticos, como em explos  es de supernovas, os elementos de maior número atômico da tabela per dica são formados. A todo esse processo de síntese de elementos químicos mais pesados por meio da fusão de elementos mais leves, no interior das estrelas, se d  o nome de nucleossíntese (PICAZZIO, 2011).

4.4 Diagrama H-R

As estrelas apresentam algumas características de modo que   possível classificá-las em determinados grupos. O principal parâmetro que determina essas características é a massa inicial das estrelas, e as propriedades físicas que serão usadas para essa classificação são a cor e a luminosidade.

Figura 4 – Camadas de uma estrela massiva que contém progressivamente elementos mais pesados, raios cada vez menores e temperaturas mais elevadas.



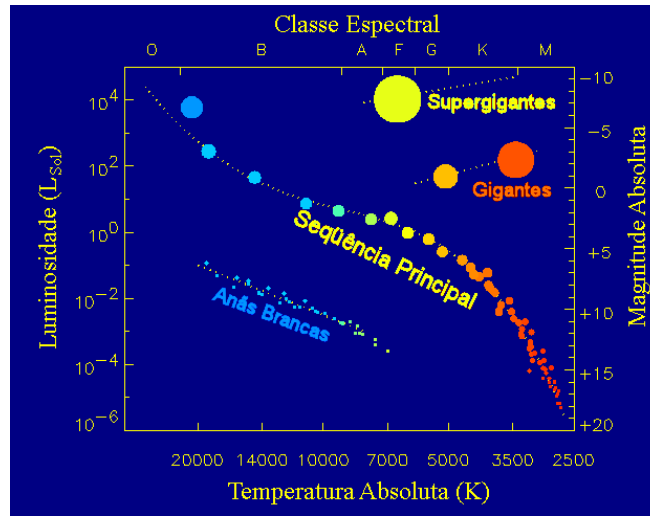
A cor de uma estrela é determinada pela temperatura em que se encontra a sua superfície, enquanto que a sua luminosidade é dada pela quantidade total de energia luminosa que ela irradia por segundo. Pela simples observação de uma estrela, podemos identificar seu espectro, com isso através de uma curva de distribuição da intensidade espectral emitida por um corpo negro, a temperatura pode ser obtida por meio da comparação. A chamada *temperatura efetiva* da estrela será, então, dada pela temperatura do corpo negro cujo espectro melhor se ajuste ao espectro da estrela.

Podemos determinar a luminosidade da estrela medindo o fluxo de radiação dela que chega até nós se também conhecermos a distância r a que ela se encontra usando a equação $L = 4\pi r^2 F$, onde $F = \sigma T^4$ é o fluxo. A sua temperatura efetiva pode ser obtida a partir de seu espectro (cor). Uma vez determinadas a luminosidade e a temperatura efetiva, é possível obter o raio da estrela, e comparar com o do Sol para saber o tipo da estrela que está sendo observada. A luminosidade L e a temperatura T da superfície emissora, permitem fazer uma análise física das estrelas (cor, temperatura, tamanho, estágio evolutivo). Estes dados deram origem a um diagrama que relaciona a luminosidade e a temperatura das estrelas, informando qual seu tamanho, podendo ser agrupadas e classificadas (FILHO; SARAIVA, 2014). Esse diagrama foi elaborado por volta de 1910 pelos astrônomos Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell, e ficou conhecido como diagrama H-R.

Nota-se no diagrama abaixo que estrelas anãs como o Sol ocupam a faixa de sequência principal, a maioria das estrelas se encontram nesta faixa, realizando a fusão de hidrogênio em hélio em seu núcleo. Nela as estrelas mais vermelhas são mais frias e menos luminosas, enquanto as mais azuis são mais quentes e mais luminosas. Ainda na sequência principal, as estrelas que tem maior massa são as mais brilhantes, logo mais azuis e mais quentes. A maioria tem massa menor que $0.8M_{\odot}$, mas existem estrelas que podem chegar a $60M_{\odot}$, 10 milhões de vezes mais brilhantes que o Sol (MILONE, 2019, p. 233).

Quando se esgota o hidrogênio em seu núcleo, as estrelas começam a sair da sequência principal, então se expandem e se transformam em gigantes vermelhas, ocupando a parte superior do diagrama. São estrelas frias e luminosas, que embora tenham uma baixa temperatura, suas áreas superficiais são muito grandes, chegando a ser maiores que a órbita da Terra, por isso tem grande luminosidade (FILHO; SARAIVA, 2014). Abaixo

Figura 5 – Classificação e estágios evolutivos das estrelas.



da sequência principal ficam as anãs-brancas, são estrelas com o tamanho próximo ao da Terra, porém, possuem uma massa de até $1.4M_{\odot}$. É o ultimo estágio de evolução de muitas estrelas, incluindo o Sol.

As estrelas supermassivas consomem suas reservas de H muito rápido, produzindo núcleos cada vez mais pesados passando por várias etapas de fusão até o ferro. Ao final, como não conseguem gerar mais energia em seu núcleo por meio de reações de fusão, este núcleo implode, liberando uma imensa quantidade de energia em muito pouco tempo: a estrela explode como uma supernova, lançando diversos elementos mais pesados no meio interestelar, restando apenas um caroço compacto em seu centro (FILHO; SARAIVA, 2014). O caroço que sobra no núcleo pode se tornar uma estrela de nêutrons, que ocorre devido a alta densidade do caroço diminuindo a distância entre os elétrons, fazendo-os se unirem aos prótons deixando apenas nêutrons no núcleo, que formam uma estrutura cristalina que contém o colapso gravitacional e distribui energia por toda a estrela tornando sua temperatura uniforme (MILONE, 2019; PICAZZIO, 2011).

Se a massa inicial da estrela for maior que cerca de $40M_{\odot}$, após a explosão como supernova, restará em seu centro um objeto muito mais denso, chegando a ter uma densidade infinita formando um buraco negro (PICAZZIO, 2011). Geralmente estrelas da ordem de 50 a $100 M_{\odot}$ produzirão buracos negros, mesmo assim são considerados pequenos quando comprado aos buracos negros no centro das galáxias.

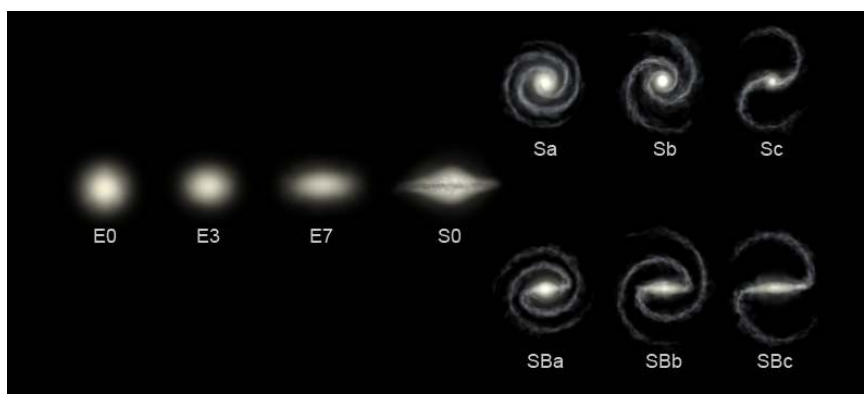
4.5 Galáxias - morfologia e o centro galáctico

Uma galáxia é definida como um grande aglomerado gravitacionalmente ligado que compreende estrelas, remanescentes de estrelas e um meio interestelar, tudo permeado pela matéria escura, um componente ainda desconhecido que corresponde cerca de 85% da massa dos aglomerados de galáxias (PICAZZIO, 2011). No universo observável, se estima que devem existir centenas de bilhões de galáxias. Muitas delas contendo, também, centenas de bilhões de estrelas.

Existem bilhões de galáxias com formas e tamanhos variados, mas a maioria

apresenta um formato que se repete em outras galáxias, o que levou o astrônomo Hubble (1889-1953) a descrever as galáxias baseada em sua aparência visual, ou seja, em sua morfologia, conforme [Figura 6](#). A classificação de Hubble divide as galáxias em elípticas, espirais (normais e barradas), lenticulares e irregulares. As elípticas, apresentam pouca matéria interestelar, contendo estrelas mais velhas e evoluídas que orbitam o centro galáctico. Devido ao seu formato elipsoidal elas são classificadas segundo seu grau de achatamento. As que têm formato quase esféricas são identificadas como E0, passando por E3 até as E7, que são mais excêntricas e, portanto, mais achatadas.

Figura 6 – Classificação de Hubble para as galáxias.



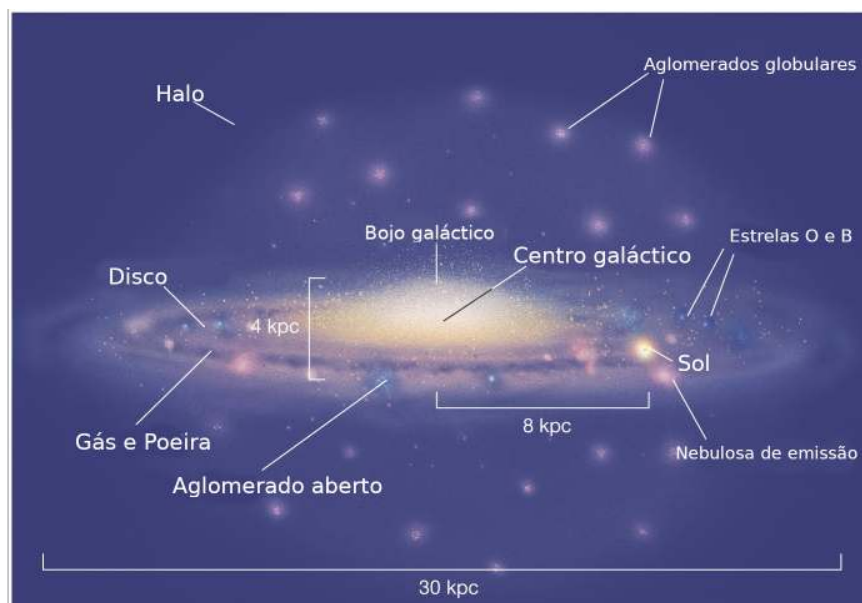
As galáxias espirais, como a Via Láctea e Andrômeda, apresentam um bojo central composto por estrelas velhas, um disco giratório de estrelas jovens, gás e poeira, braços espirais que se estendem sobre o disco desde o bojo e um halo, uma região de simetria esférica que engloba o disco. Na classificação de Hubble elas foram definidas como tipo S e subdividas entre normais e barradas, ganhando um B no nome se apresentarem uma barra no centro. Elas também são classificadas como sendo do tipo a, b ou c, de acordo com o grau de enrolamento dos braços e brilho do bojo: as que possuem braços mais enrolados e bojo mais brilhante são classificadas como “a”, enquanto as que apresentam os braços mais abertos e menor brilho do bojo são do tipo “c”, sendo o tipo “b” um caso intermediário ([PICAZZIO, 2011](#)).

Ainda há uma classe intermediária de galáxias que apresenta um pequeno disco e um grande bojo, mas não mostram evidência de braços espirais, sendo, então, denominadas “lenticulares” e classificadas como “S0”. Por fim, as galáxias que não se enquadram em nenhuma dos três tipos anteriormente descritos são classificadas como irregulares, apresentando formas arbitrárias e ausência de um eixo de simetria.

A Via Láctea, a galáxia onde se situa o sistema solar, é uma galáxia espiral barrada. Assim como as demais galáxias, é formada por estrelas, gás e poeira, mantendo-se unida por sua própria gravidade. Em um céu noturno, na ausência de iluminação artificial, pode ser identificada como uma faixa brilhante e difusa que corta toda a esfera celeste. Possui um diâmetro aproximado de 100 mil anos-luz, com disco de aproximadamente 2 mil anos-luz de espessura, com uma estimativa de possuir entre 100 - 400 bilhões de estrelas e mais de 100 bilhões de planetas rochosos. O nosso Sol fica situado a 27 mil anos-luz de distância do centro galáctico na borda interna de um de seus 4 braços espirais, no chamado Braço de Órion ([FILHO; SARAIVA, 2014](#)).

O bojo ou centro galáctico é a região mais proeminente da Via Láctea, e o centro de rotação desta. Foi a primeira parte que se formou, portanto a parte mais velha da Galáxia. É a região mais densamente povoada da Galáxia com bilhões de estrelas, em sua maioria velhas, mas também contém estrelas jovens. Elas apresentam velocidades cada vez maiores à medida que se aproximam do centro. Tudo indica que no centro da galáxia existe um buraco negro supermassivo, com um forte campo gravitacional, que provoca essa um movimento muito rápido das estrelas que estão próximas a ele (PICAZZIO, 2011).

Figura 7 – Estrutura da Via Láctea.



Diferente dos buracos negros estelares, os buracos negros supermassivos, no centro das maiores galáxias, não surgem da evolução de estrelas de grande massa, mas são formados por grandes nuvens de gás e/ou por aglomerados de milhões de estrelas que colapsaram sobre sua própria gravidade quando o Universo era mais denso e jovem. Buracos negros supermassivos também podem surgir a partir de buracos negros estelares que se formaram no centro de uma galáxia e foram progressivamente se fundindo formando um buraco negro de massa entre 10^5 a $10^{10} M_{\odot}$.

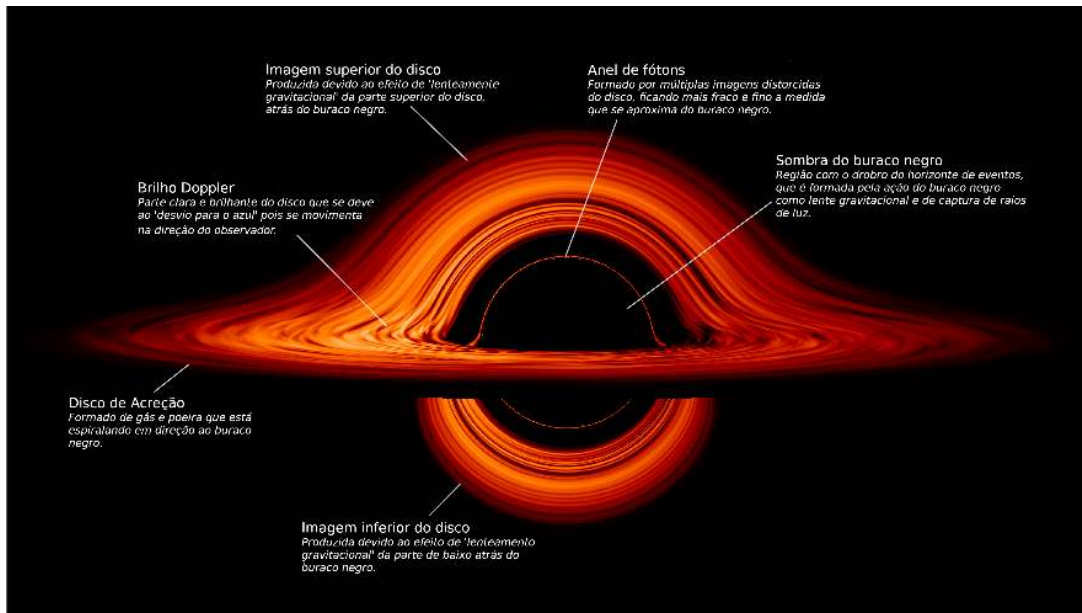
4.6 Buracos Negros

Um buraco negro não é uma estrela como visto anteriormente, mas pode ser um remanescente de estrela, um objeto compacto, superdenso, que produz um fortíssimo campo gravitacional e uma enorme deformação no espaço-tempo à sua volta, que não possui superfície, mas é delimitado por um horizonte de eventos, que é um ponto de não retorno, a partir do qual é possível a entrada, mas não a saída de luz e matéria. Também há evidências da existência de buracos negros com massa de milhões ou bilhões de massas solares localizados no centro de grandes galáxias, como a nossa, a Via Láctea, denominados *buracos negros supermassivos*. As únicas características físicas, ou grandezas clássicas que caracterizam um buraco negro são *massa*, *carga* e *momento angular*.

Um buraco negro, em geral, apresenta uma estrutura formada por: um disco de

acrecção, um horizonte de eventos com limites e um raio específico, uma esfera de fótons e uma singularidade, conforme [Figura 8](#).

Figura 8 – Impressão artística de um buraco negro supermassivo.



Nas seções seguintes abordaremos sobre alguns conceitos a respeito das propriedades físicas dos buracos negros, primeiro para o caso newtoniano onde se faz uso de uma formulação clássica, e depois no contexto da relatividade apresentando as equações de Einstein e a solução dada por Schwarzschild. Por último, é apresentado uma seção sobre a formação da primeira imagem de um buraco negro, ao qual inspirou a produção desta dissertação.

4.6.1 Estrelas escuras na gravitação newtoniana

Quando a força resultante que causa o movimento acelerado de uma partícula massiva sempre aponta para um ponto fixo, o movimento resultante é chamado de movimento de força central ([MCCUSKEY, 1963](#)). O ponto fixo é o centro de força. Este tipo de movimento é predominante no Universo, por exemplo, os planetas movem-se em torno do Sol em órbitas tais que a força de atração devido ao Sol sempre aponta para este último. A maioria das aplicações astronômicas envolve a lei de inverso do quadrado da distância r de Newton que descreve a atração entre duas partículas massivas m e M , exemplo de força central:

$$F(r) = -\frac{GMm}{r^2}, \quad (10)$$

onde $G \simeq 6,7 \times 10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} s^{-1}$ é a constante da gravitação universal de Newton.

Para o movimento de uma partícula sob a ação de uma força central, a soma da energia cinética K mais a energia potencial $V(r)$ é constante:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + V(r) . \quad (11)$$

Esta é a lei da conservação da energia para o sistema, onde E é uma constante que decorre da segunda integral das equações de movimento.

A velocidade na órbita em uma distância r do centro de força, é portanto

$$v = \sqrt{\frac{2}{m}(E - V)} . \quad (12)$$

Assim, a velocidade em todas as órbitas de mesma energia total, independentemente de suas formas, é a mesma em uma dada distância r do centro de força.

Decorre de (10) que a energia potencial gravitacional da interação de uma partícula de massa m com uma massa M de um planeta é

$$U(r) = -\frac{GMm}{r} . \quad (13)$$

Portanto, para a energia $E = 0$, a velocidade na órbita em uma distância r do centro de força, é expressa como

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}} . \quad (14)$$

Esta é a velocidade que seria necessária para que uma partícula se movesse de uma distância infinita até r sob a lei de força (10). Ou ainda, se a partícula tem esta velocidade em uma distância r , ela irá se afastar indefinidamente do centro de força. Assim, a velocidade de escape v_e (FREEDMAN; YOUNG, 2016) é a velocidade mínima com que uma partícula deva ser lançada para escapar da interação gravitacional de um planeta de massa m e raio r . A velocidade de escape v_e independe da massa da partícula.

Se um corpo com a massa do Sol ($M_S \simeq 2 \times 10^{30}$ kg) fosse tão denso que tivesse um raio $r \simeq 3$ km, a velocidade de escape de qualquer partícula seria da ordem da velocidade da luz:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM_S}{r}} \simeq 3 \times 10^8 \text{ m/s} . \quad (15)$$

Portanto, para qualquer corpo de massa M que tenha um raio menor que

$$r_S = \frac{2GM}{c^2} \simeq 10^{-27} M , \quad (16)$$

nem a própria luz conseguiria escapar de sua atração gravitacional. Dessa forma, o corpo, caracterizado unicamente por sua massa, não permitiria nenhum outro objeto escapar. Foram o físico britânico John Mitchell (1724-1793) e o físico e matemático francês Pierre Laplace (1749-1827) que primeiramente especularam, de forma independente, sobre a possibilidade de existência de estrelas cuja velocidade de escape fosse maior que a da luz. Era comum se considerar a luz como uma partícula que viajasse com uma velocidade

finita, sendo possível em princípio, que uma estrela seja compacta o suficiente para que a velocidade de escape seja a velocidade da luz, de modo tal que estrelas fiquem invisíveis (negras), as chamadas *estrelas escuras*

Como descreveremos na subseção seguinte, r_S é o raio de Schwarzschild, o raio crítico que uma estrela muito densa deverá atingir para se transformar no que denominamos hoje de buracos negro³. É importante ressaltar, que embora o resultado (16) esteja correto, ele foi obtido por meio de duas premissas erradas, a definição da energia cinética como $mc^2/2$ e uso da expressão de energia potencial gravitacional (13).

4.6.2 Buracos negros na Relatividade Geral

A dinâmica da Relatividade Geral (D'INVERNO, 1998; SCHUTZ, 2009; SABBATA; GASPERINI, 1986) é descrita pelas equações de campo de Einstein, que evidenciam a equivalência da geometria com matéria e energia:

$$R_{ab} - \frac{1}{2}g_{ab}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ab} , \quad (17)$$

onde g_{ab} é a métrica do espaço-tempo, R_{ab} e R são respectivamente, o tensor e escalar de curvatura de Ricci, enquanto T_{ab} é o tensor momento-energia.

Na Relatividade Geral, o elemento fundamental é a métrica que descreve a geometria do espaço-tempo, pois fornece a distância entre dois pontos vizinhos no espaço-tempo. Para uma métrica geral descrevendo espaços-tempo estáticos com simetria esférica, temos

$$ds^2 = -e^{2\Phi(r)}c^2dt^2 + e^{2\varphi(r)}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) , \quad (18)$$

onde $\Phi(r)$ e $\varphi(r)$ são as chamadas funções métricas a partir das quais certas propriedades de estrelas ou buracos negros podem ser obtidas.

Para o vácuo, região fora da estrela, a substituição de (18) em (17) identifica (SCHUTZ, 2009; WEBER, 2015; CARROLL; TRASCHEN, 2003)

$$\bar{M}(r) = M = \text{const} \quad \text{e} \quad e^{2\Phi(r)} = 1 - \frac{2M}{c^2r} , \quad (19)$$

onde $\bar{M}(r) = \frac{1}{2}c^2r(1 - e^{2\varphi(r)})$. Neste ponto, Portanto, a métrica torna-se

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2r}\right)c^2dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{c^2r}\right)^{-1}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) . \quad (20)$$

Esta é a chamada métrica de Schwarzschild (HARTLE, 2003; SCHUTZ, 2003), proposta pelo físico e astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916). A solução de Schwarzschild descreve de forma exata o campo gravitacional exterior a uma estrela esférica. Quando $r \rightarrow \infty$ ou $M = 0$ o espaço-tempo de Schwarzschild aproxima-se assintoticamente de um espaço-tempo plano, o chamado espaço-tempo de Minkowski. No interior a métrica é diferente, dependendo das propriedades do corpo como por exemplo, a equação de estado. É importante destacar que o parâmetro M na métrica de Schwarzschild é originado como uma constante de integração na resolução das equações de Einstein. A comparação do

³ O termo buraco negro somente foi atribuído em 1968, pelo físico americano John Wheeler.

movimento de um corpo na métrica de Schwarzschild com o movimento de um corpo sob a ação de um campo gravitacional de massa M , permite justificar M como sendo a massa total da estrela.

Notamos facilmente que algo diferente acontece nos valores de raio $r = 0$ e $r_S = 2GM/c^2$. Este último valor é o raio de Schwarzschild, obtido anteriormente em (16), mas agora determinado no contexto de uma teoria completa de Gravitação, a *Relatividade Geral*. Para $r = 0$, $\left(1 - \frac{2M}{c^2 r}\right) \rightarrow \infty$, enquanto para $r = r_S$, $\left(1 - \frac{2M}{c^2 r}\right)^{-1} \rightarrow \infty$, indicando a presença de singularidades na métrica. Na verdade, $r = r_S$ não é uma singularidade do espaço-tempo, mas somente uma singularidade que pode ser removida com uma adequada escolha de coordenadas.

Um forma mais conveniente de apresentar a métrica (20) pode ser obtida através do uso das unidades geométricas. Podemos definir a massa geométrica m com unidade de comprimento (metro),

$$m = \frac{GM}{c^2}, \quad (21)$$

com M em metros e $c = G = 1$. Para simplificar ainda mais, substituiremos $t \rightarrow ct$, de modo a ter $t(\text{metros}) = c \times t(\text{segundos})$. Em unidades geométricas a métrica de Schwarzschild pode ser escrito como

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2m}{r}\right)dt^2 + \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2). \quad (22)$$

Dentro da Relatividade Geral, o buraco negro é uma região esfericamente simétrica para um objeto de massa m , estático, com vácuo à sua volta.

Algumas propriedades importantes decorrem diretamente da métrica (22). Ela tem as componentes $\left(-\left(1 - \frac{2m}{r}\right), \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1}, r^2, r^2\sin^2\theta\right)$. Nesta convenção, ds^2 é negativo para um intervalo tipo tempo e positivo para um intervalo tipo espaço, quando da descrição do movimento de partículas. A distinção geométrica entre intervalos tipo tempo e tipo espaço é baseada nos dispositivos utilizados para medi-los. Para $ds^2 < 0$, $(-ds^2)^{1/2} = d\tau$, onde $d\tau$ é o intervalo de tempo próprio entre os eventos cuja separação espacial é nula. Para um relógio numa posição fixa (r, θ, ϕ) , $dr = d\theta = d\phi = 0$, de modo que para o tempo próprio

$$d\tau = \sqrt{1 - \frac{2m}{r}} dt. \quad (23)$$

A expressão acima revela que os relógios tornam-se mais lentos em um campo gravitacional. Numa situação imaginária em que um astronauta, próximo à superfície de um buraco negro, começasse a enviar sinais luminosos para um observador distante e estacionário numa nave espacial, este último perceberia o intervalo de tempo de emissão dos sinais aumentar à medida que o astronauta se aproxima do raio de Schwarzschild, horizonte de eventos. No limite $r \rightarrow 2m$, o observador distante não mais receberá sinais luminosos, uma vez que qualquer intervalo de tempo infinitesimal $d\tau$ de emissão de sinais pelo astronauta corresponderá a um tempo infinito de recepção para o observador na nave espacial. Para $ds^2 > 0$, $ds = dl$, onde dl é distância própria entre os eventos. Se agora considerarmos uma régua para a qual a coordenada t é constante e as coordenadas θ e ϕ fixas, então

$dt = d\theta = d\phi = 0$, de modo que

$$dl = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2m}{r}}} dr, \quad (24)$$

revelando que as réguas encurtam em um campo gravitacional.

De fato, existem muitos outros aspectos a serem abordados na física de buracos negros, como a presença de carga elétrica e momento angular, aspectos termodinâmicos e a radiação Hawking, entre outros, que fogem ao escopo dessa dissertação mas que podem ser encontrados em referências como (D'INVERNO, 1998; SCHUTZ, 2003; RAINE; THOMAS, 2010).

4.7 A primeira imagem de um buraco negro

Em abril de 2019 foi divulgada a primeira imagem de um buraco negro, denominado M87*, localizado na constelação de Virgem, a 53 milhões de anos-luz da Terra, no centro de uma galáxia elíptica chamada de *Messier 87* (M87), uma das mais massivas do Universo. Conforme explicado por Matsuura (2020), é utilizado o termo *imagem* ao nos referirmos a ela, mas é importante notar que não se trata de uma figura que obtemos quando observada no espectro da luz visível, mas em ondas de rádio, e as cores que vemos que formam a silhueta da sombra do buraco negro se acham associadas à intensidade da radiação e temperatura da região emissora. As partes mais claras e brilhantes possuem temperatura maior, conforme mostra a imagem da Figura 9 abaixo.

Figura 9 – Imagem do buraco negro M87*

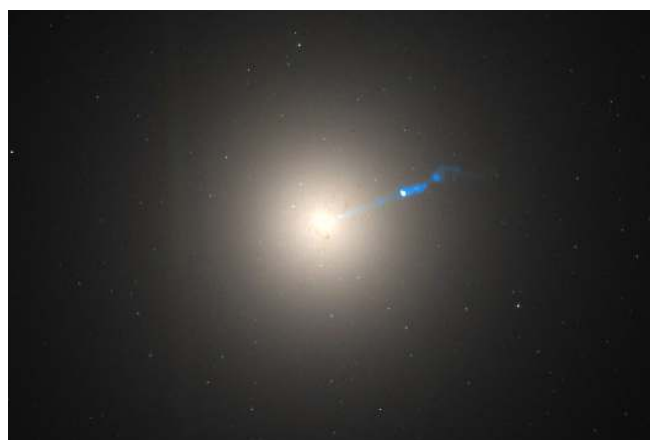


Uma rede de radiotelescópios, em conjunto, formaram um consórcio global chamado EHT (Event Horizon Telescope) que praticamente usou a Terra como um grande detector de ondas de rádio. Formado por oito telescópios nos quatro continentes, o consórcio acumulou dados suficientes durante dois anos para formar a imagem do buraco negro da galáxia M87, que é a galáxia dominante do aglomerado de galáxias de Virgem. Essa galáxia apresenta um notável jato de partículas relativísticas que se estende por mais de 5000 anos-luz, sinalizando que em seu núcleo existe um buraco negro ativo.

Na Figura 10, abaixo, vemos o brilho da galáxia M87. Possuindo mais que o dobro do diâmetro da Via Láctea, aproximadamente 240 mil anos-luz, e com cerca de 200 vezes a massa da Via Láctea. Porém, está 2000 vezes mais distante da Terra do que o centro

da nossa própria galáxia, a Via Láctea. Um dos motivos para a escolha da galáxia M87 para a captura da primeira imagem de um buraco negro é o tamanho do horizonte de eventos do buraco negro em seu núcleo, cujo raio é cerca de 20 bilhões de km, enquanto o de Sagitário A*, no centro da Via Láctea, é de aproximadamente 12 milhões de km. Isso influencia diretamente no tamanho angular da região central da galáxia que será capturada na imagem obtida pelos telescópios. Se comparados, o tamanho angular do buraco negro de Sgr A* é 1,25 vezes maior que o buraco negro M87*, o que de certo modo são até comparáveis (MATSUURA, 2020), o grande problema, para se observar Sgr A*, é que ele está situado no centro de nossa própria galáxia.

Figura 10 – Núcleo galáctico da M87 emitindo um jato azul de plasma visível a velocidade próxima da luz.



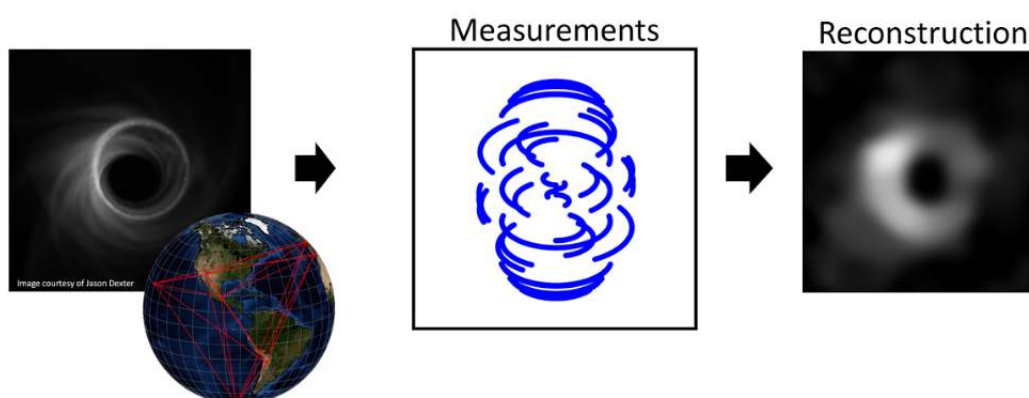
Como a Terra se situa no interior da Via Láctea, em um de seus braços espirais, onde há maior concentração de gás e poeira, a qual absorve parte da radiação e impede que ela chegue até a Terra vinda do centro da Via Láctea e, portanto, até aos telescópios, isso dificulta a observação desta região central. Além disso, outro problema apontado por (MATSUURA, 2020) é o fato de sagitário A* ser um buraco negro quiescente, isto é, com pouca atividade que gere radiação que possa ser capturada numa imagem. Por outro lado, o único problema em relação ao buraco negro M87* seria a distância, ou seja, precisaríamos de um telescópio do tamanho do planeta Terra para conseguir captar alguma radiação do núcleo de sua galáxia, o que com a ajuda do consórcio EHT pôde ser possível.

Este consórcio global de telescópios conectados entre si, revelou a primeira evidência visual direta de um buraco negro supermassivo e de sua sombra. Cada telescópio coletou parte da radiação vinda do buraco negro M87* dando indicação de parte de sua estrutura, a obtenção da imagem total é como um quebra-cabeça onde cada telescópio recebeu algumas peças da imagem. Para solucionar o quebra-cabeça, foi desenvolvido um algoritmo que preenche as lacunas que faltam para formar a imagem do buraco negro.

No processo de formação da imagem é feito uma filtragem que elimina dados indesejados que são captados; como ruídos terrestres (de rádio-comunicações, relâmpagos entre outros), ruídos cósmicos (de outros objetos do Universo) e/ou ruídos do próprio telescópio. Essa limpeza desses ruídos é feita eliminando alguns comprimento de ondas maiores e incoerentes (MATSUURA, 2020, p.81). Para a escolha da melhor imagem, ou da mais correta, selecionam-se as imagens mais coerentes com as medições feitas pelos

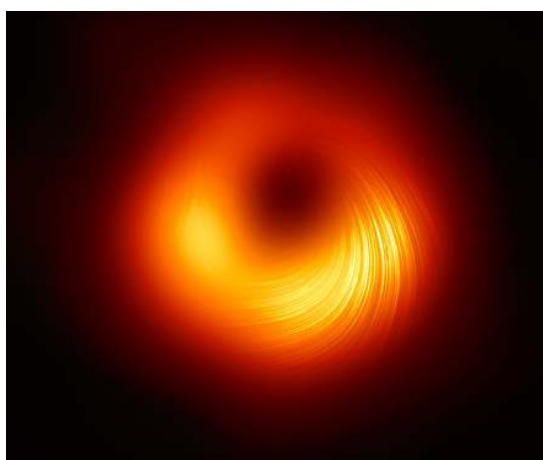
telescópios, e classifica-se a de aparência mais consistente com os dados do telescópio e das lacunas preenchidas pelo algoritmo ([SCIENCE, 2017](#)) que vai reconstruindo a imagem ([Figura 11](#)), resultando na imagem de maior credibilidade. Ainda, para uma validação, quatro equipes cada uma com um algoritmo diferente trabalharam na construção da imagem processando os dados e testando vários modelos sem se comunicarem ou trocarem informações, e todas as equipes, ao final obtiveram um resultado em comum, que foi identificada como a primeira imagem de um buraco negro.

Figura 11 – Coleta de dados dos telescópios e formação de possíveis imagens o algoritmo matemático.



Em março de 2021, os astrônomos conseguiram detectar campos magnéticos na borda do buraco negro *M87** medindo a polarização da radiação emitida. Segundo o [Event Horizon Telescope](#), esse campo magnético é fundamental para explicar como a galáxia M87 é capaz de lançar jatos de matéria de seu núcleo a velocidades relativísticas e que se estendem muito além da galáxia, e também como exatamente a matéria cai no buraco negro, como indicado na imagem em luz polarizada. Analisando essa polarização e o campo magnético, será possível entender melhor a interação entre a matéria que está circulando o buraco negro e também sendo ejetada por ele.

Figura 12 – Esta imagem mostra o buraco negro da M87 em luz polarizada.



5 Primeira imagem de um buraco negro

Objetivos:

- Apresentar a primeira imagem de um buraco negro, conforme [Figura 13](#).
- Promover uma problematização inicial, questionando os estudantes acerca do que aparece na imagem e da natureza, características, origem e localização dos buracos negros.
- Elaboração de hipóteses iniciais pelos estudantes e construção de questões a serem investigadas para esclarecimento e busca de respostas à grande problematização inicial.
- Apresentar, discutir e interpretar leis e conceitos físicos.
- Estimular e avaliar a participação ativa dos estudantes.
- Conscientizar acerca da estrutura do Universo e de nossa posição no contexto cósmico.
- Habilidades desenvolvidas: EM13CNT201FIS/ES, EM13CNT303FISa/ES.

Recursos pedagógicos:

- Imagem do buraco negro da galáxia M87 ([Figura 13](#)).
- Software de questões com feedback em tempo real a ser utilizado: [Pingo](#). Outras ferramentas alternativas são: [Kahoot](#) e [Quizizz](#). O google formulários também pode ser usado para a coleta das respostas das questões.
- Projetor multimídia.

Momento/Etapa:

- Grande Problematização inicial.

Procedimentos Metodológicos

Grande Problematização inicial:

Inicia-se a metodologia de ensino por meio de uma grande problematização inicial acerca do que seriam os buracos negros utilizando a [Figura 13](#) da primeira imagem deste objeto, então apresentar as seguintes questões problematizadoras acerca desta imagem:

- a) Vocês já viram esta imagem? O que acham que ela representa?
- b) O que é um buraco negro? Quais suas características?
- c) Onde se encontram os buracos negros?
- d) Como surgem os buracos negros?
- e) Existe alguma relação entre estrelas, galáxias e buracos negros? Qual(is)?

Deve-se, então, formar grupos com 3 ou 4 alunos para refletirem e anotarem suas primeiras hipóteses do que aparece na imagem, sendo que a primeira questão deve aparecer inicialmente separada das demais, para não ter sua resposta induzida pelas questões seguintes. Somente após ela ter sido respondida é que se deve apresentar as demais questões.

Através de uma ferramenta online de questões com feedback imediato chamada [Pingo^a](#), o professor e os alunos terão acesso às principais respostas de cada aluno, que serão coletadas individualmente no *Pingo*, logo após a reflexão em grupo. Em seguida, o professor deve desafiar os alunos, promovendo um debate e questionamento das respostas por eles apresentadas, buscando mostrar que suas concepções são insuficientes e conscientizá-los que mais estudos são necessários para entender o que a ciência já descobriu sobre os buracos negros, que essas descobertas serão exploradas ao longo das próximas aulas e que essas questões iniciais serão retomadas, buscando respondê-las de acordo com o que a ciência já descobriu, que nesse caminho vamos percorrer todo o Universo, buscando compreendê-lo!

^a Nesta Sequência de Ensino, utilizamos o software Pingo por se tratar de uma ferramenta open source sem limite de questões.

6 O Sol, as Estrelas e a Evolução Estelar

Objetivos:

- Partindo de uma problematização inicial, abordar a natureza do Sol e das estrelas.
- Mediar a compreensão dos processos físicos que ocorrem no Sol e nas estrelas, sua produção de energia brilho e transferência da calor.
- Mediar a compreensão de como ocorre a evolução das estrelas e quais são seus possíveis estágios finais.
- Apresentar, discutir e interpretar leis e conceitos físicos.
- Estimular e avaliar a participação ativa dos estudantes.
- Conscientizar acerca da estrutura do Universo e de nossa posição no contexto cósmico.
- Habilidades: EM13CNT201FIS/ES, EM13CNT303FISa/ES, EM13CNT205FISa/ES, EM13CNT209.

Recursos pedagógicos:

- Imagens do Sol ([Figura 14](#)) e de algumas estrelas ([Figura 15](#)), diagrama H-R ([Figura 17](#)) e infográfico dos estágios evolutivos das estrelas([Figura 20](#)).
- Software de questões com feedback em tempo real: [Pingo](#).
- Projetor multimídia.

Momento/Etapa:

- Grande organização do conhecimento: problematização inicial, organização do conhecimento (etapas da SE), aplicação do conhecimento sobre o Sol e as estrelas.

Procedimentos Metodológicos:

Problematização inicial:

Iniciar a aula apresentando imagens do Sol e de outras estrelas no céu noturno ([Figura 14](#) e [Figura 15](#)), coletando as concepções espontâneas dos alunos (suas primeiras respostas individuais) com as seguintes questões:

- a) Existe alguma semelhança entre o Sol e as estrelas? Se existir, qual(is) seria(m)?
- b) Que diferença(s) existe(m) entre o Sol e as estrelas?
- c) De onde vem a energia que faz o Sol brilhar?
- d) Será que um dia o seu brilho pode acabar?
- e) E as estrelas, de onde vem o seu brilho? A origem do seu brilho é semelhante ao do Sol? Os alunos devem responder de forma individual as questões acima, que devem ser coletadas na ferramenta [Pingo](#) de feedback imediato, que serão usadas para análise e debate com a turma. Depois seguir com uma simulação da atividade solar ([Fiery Looping Rain on the Sun](#)) e com uma breve exposição sobre o que a simulação apresenta, buscando desafiar e despertar o interesse dos alunos, se referindo ao estado de plasma da matéria no Sol e à força magnética exercida sobre cargas elétricas, que tendem a espiralar em torno das linhas de campo magnético, movendo-se ao longo delas. Depois apresentar algumas estrelas que geralmente são visíveis no céu, como as do Cruzeiro do Sul (ver [Figura 15](#)). O professor então segue ao quadro de respostas das questões anteriores, indagando os alunos suas

respectivas concepções sobre o Sol e as estrelas suas semelhanças e diferenças. Ainda apenas questionando, e apresentando as insuficiências dessas respostas. Então seguir para as seguintes etapas da SE, que se iniciará na próxima aula.

Organização do Conhecimento:

Problematização: Tarefa de leitura individual do texto [O Sol e as estrelas](#). Após a leitura, os alunos devem destacar no texto as palavras que não sabem explicar e que não conhecem, mas que tem relação direta com o tema. Essas palavras destacadas serão inseridas no software *Pingo* pelos alunos, e a ferramenta mostrará em tempo real os destaques dos alunos. Assim o professor iniciará a sistematização explorando as dúvidas dos alunos. Os conceitos abordados aqui pelo professor serão a formação/nascimento das estrelas apresentando imagens ([Figura 16](#)) e vídeos simulação do “berçário” de estrelas mais próximo da Terra da [Nebulosa de Órion](#), depois abordar os conceitos de energia e suas transformações (na formação do Sol), processo de transferência de calor (no interior do Sol e do Sol até a Terra), equilíbrio hidrostático e de força magnética (vídeo [Fiery Looping Rain on the Sun](#)). Duas aulas devem ser separadas para essa primeira parte dessa etapa de problematização.

Continuando a etapa de problematização, esta aula se iniciará com uma segunda tarefa de leitura do texto [Evolução estelar - Nascimento, vida e morte das estrelas](#) e, depois, revisar os conceitos dos estudantes, sua compreensão do diagrama H-R, que foi apresentado nesta tarefa de leitura. Então seguir na próxima aula para etapa seguinte da SE.

Primeira elaboração: Aqui o professor deve ampliar o nível dos conceitos por meio de uma atividade de identificação de estrelas no diagrama H-R (ver [Figura 17](#)). Deve-se fornecer aos alunos o nome de algumas estrelas a serem pesquisadas na Wikipédia. Os alunos, por sua vez, devem identificar a luminosidade das estrelas e a temperatura de sua superfície, então marcar sua posição no diagrama. Para isso é preciso descobrir a temperatura da superfície da estrela, que pode ser encontrada pesquisando na internet. Com os dados de luminosidade e temperatura, basta cruzar esses valores para obter a posição aproximada da estrela no diagrama H-R. Para essa atividade será fornecido aos alunos um diagrama H-R vazio para preencher (ver [Figura 18](#)). Então seguir na próxima aula, para a terceira etapa da SE.

Função da elaboração: Neste momento a situação que deve apresentar explicação científica será com base em um infográfico dos estágios evolutivos das estrelas ([Figura 20](#)), seguido das seguintes questões:

- a) Você poderia identificar a linha de evolução que seria seguida pelo Sol nesta imagem (ver [Figura 20](#))? Qual? Por quê? Qual será o seu estágio final?
- b) E se a massa da estrela for muito grande e todo o combustível já tiver sido esgotado, o que acontece no final?
- c) Com base na figura, qual é a relação que existe entre estrelas e buracos negros?
- d) Qual a diferença que faz com que algumas estrelas terminem como anã branca, outras como estrela de nêutrons ou buraco negro?
- e) Coloque em ordem decrescente de tamanho e massa os seguintes objetos compactos resultantes de evolução estelar: buraco negro, anã branca e estrela de nêutrons.

Então, com as respostas expostas pelos alunos através do *Pingo*, o professor segue para a sistematização dos objetos compactos, finalizando as etapas da SE com o retorno da atividade do diagrama H-R, onde os alunos devem descrever os estágios evolutivos das estrelas que eles identificaram durante etapa anterior (por Ex., explicar como tal estrela surgiu, como irá findar e os processos envolvidos).

Aplicação do Conhecimento:

No próximo momento, de aplicação do conhecimento, os alunos devem retomar o texto da tarefa de leitura ([O Sol e as estrelas](#)), juntamente com o texto [Evolução estelar - Nascimento, vida e morte das estrelas](#) para responder o questionário online (ver [subseção 11.1](#)) contendo as perguntas feitas na problematização inicial e outras sobre a estabilidade das estrelas, como apresentado na sistematização do professor. Esta tarefa deve ser feita individualmente e os alunos devem resolver como uma tarefa avaliativa para casa.

7 As galáxias e a Via Láctea

Objetivos:

- Problematizar o que seria uma galáxia a partir da apresentação de uma imagem da Via Láctea vista da superfície da Terra.
- Apresentar e comparar as formas de diferentes galáxias, incluindo a Via Láctea.
- Apresentar as principais partes da estrutura da Via Láctea: halo, disco, braços espirais, e bojo.
- Estimular e avaliar a participação ativa dos estudantes.
- Conscientizar acerca da estrutura do Universo e de nossa posição no contexto cósmico.
- Habilidades: EM13CNT201FIS/ES, EM13CNT303FISa/ES, EM13CNT204FISb/ES.

Recursos pedagógicos:

- Imagens da Via Láctea ([Figura 21](#)) e de outras galáxias como a de [Andromeda](#).
- Software de questões com feedback em tempo real: [Pingo](#).
- Aplicativos e/ou programas observação astronômica [Stellarium](#).
- Projetor multimídia.

Momento/Etapa:

- Grande organização do conhecimento: problematização inicial, organização do conhecimento (Etapas da SE), aplicação do conhecimento.

Procedimentos Metodológicos

Problematização Inicial:

Com a imagem do céu da Via Láctea da região de Pedra Azul, Domingos Martins ([Figura 21](#)) entre outras imagens da [Via láctea](#), indagar com as seguintes questões:

- a) Que mancha é esta que aparece no céu?
- b) Que lugar é esse, de onde foi tirada essa foto? É algum lugar do ES?
- c) Será que essa mancha também pode ser vista de outros lugares da Terra?
- d) (Apresentar uma imagem panorâmica do [Site da ESO](#)) Vocês conseguem perceber que é a mesma mancha, só que agora numa foto que pega um ângulo bem maior e mostra que ela cruza todo o céu?

- e) Alguém consegue identificar, nesta imagem (Apresentar uma imagem panorâmica da plataforma de observação da [ESO](#)), a mesma região desta mancha que aparece na foto de Pedra Azul?
- f) O que ela é? Como ela é chamada? Do que ela é formada?
- g) Será que a visão que temos desta mancha, que cruza todo o céu, tem alguma coisa a ver com a posição da Terra e do Sol no Universo? Se tiver, qual é essa relação? Onde o Sol e a Terra estão localizados?

h) Há outras manchas como essa visíveis no céu a olho nu? E com telescópios?

Iniciar a sistematização dos conceitos através das repostas individuais dos alunos às questões anteriores coletadas com o Pingo, apenas indagando suas conclusões sem fornecer as respostas, como nas aulas anteriores, então seguir para as etapas da SE.

Organização do Conhecimento:

Problematização: Continuando, seguir para a tarefa de leitura que será com o texto [Galáxias e a Via Láctea](#), os alunos após a leitura devem anotar as palavras ou ideias apresentadas que não sabem seus significados e inseri-las no software *Pingo* para acesso e exploração dos conceitos pelo professor, finalizando assim a primeira aula dessa etapa.

Primeira elaboração: Os conceitos a serem desenvolvidos são os relativos à classificação morfológica das galáxias, proposta por Hubble, à estrutura da Via Láctea (halo, disco, com braços espirais, e bojo) e à localização do Sol na Via Láctea. Ainda deve-se apresentar imagens de algumas galáxias por meio do aplicativo Stellarium (pela internet ou aplicativo), sem abordar diretamente a forma da nossa galáxia, então pedir que os alunos respondam às questões seguintes no *Pingo*:

- a) De que tipo é a nossa Via Láctea (apresentar novamente as imagens da problematização inicial)?
- b) Por que apenas a vemos no céu como uma mancha que se estende de um horizonte a outro?
- c) O que há no bojo galáctico da Via Láctea?

Função da elaboração: Apresentada as respostas dos alunos e após algumas inferências, mostrar algumas imagens de concepções artísticas de como seria a Via láctea vista de fora e qual é a localização do Sol na Via Láctea, mostrar o vídeo [Guide to our Galaxy](#) comentando da morfologia de nossa galáxia. Apresentar/discutir o movimento/órbita do Sol em torno do centro galáctico, conforme é apresentado em [Movimento do Sol](#). Depois, mostrar o vídeo [A Full Orbit of the Star S2](#) e, depois, também um vídeo mostrando as órbitas das estrelas próximas ao buraco negro supermassivo ([The Centre of our Galaxy](#)). Ainda, apresentar/discutir imagens de algumas galáxias com buracos negros supermassivos (ver figuras [22](#), [23](#)). Então abordar sobre o buraco negro do centro da Via Láctea finalizando as etapas de sistematização.

Aplicação do Conhecimento:

Para a aplicação do conhecimento um questionário online (ver [subseção 11.2](#)) sobre as aulas de galáxias a ser respondido individualmente como tarefa avaliativa para casa, com auxílio do texto [Galáxias e a Via Láctea](#).

8 Buracos negros e suas propriedades físicas

Objetivos:

- Mediar a compreensão sobre as propriedades físicas básicas dos buracos negros.
- Abordar sobre a ocorrência de eventos na imediações de um buraco negro.
- Apresentar definições físicas acerca dos buracos negros.
- Estimular e avaliar a participação ativa dos estudantes.
- Conscientizar acerca da estrutura do Universo e de nossa posição no contexto cósmico.
- Habilidades: EM13CNT201FIS/ES, EM13CNT303FISa/ES, EM13CNT209.

Recursos pedagógicos:

- Imagens como a da [Figura 13](#) e simulações de buracos negros ([Zooming in to the Heart of Messier 87](#)).
- Software de questões com feedback em tempo real: [Pingo](#).
- Projetor multimídia.

Momento/Etapa:

- Grande organização do conhecimento: problematização inicial, organização do conhecimento (etapas da SE), aplicação do conhecimento.

Procedimentos Metodológicos

Problematização inicial:

A problematização aqui será iniciada com a simulação do buraco negro da galáxia M87 [Zooming in to the Heart of Messier 87](#) com as perguntas para as primeiras concepções dos alunos:

- a) Por que os buracos negros recebem essa denominação?
- b) Por que dizem que é impossível escapar de um buraco negro?
- c) Se o nosso Sol se transformasse num buraco negro, o que aconteceria com a Terra e os outros planetas?
- d) Se um objeto (uma pessoa?...) caísse em direção a um buraco negro, o que aconteceria?
- e) O que acontece com a luz que passa próximo de um buraco negro? O que acontece com sua trajetória?

De modo semelhante anteriormente, depois da reflexão em grupo, as respostas individuais dos alunos devem ser expostas por meio do software *Pingo* para discussão e indagações do professor aos alunos dando início as etapas da SE na aula seguinte.

Organização do Conhecimento:

Problematização: Texto [Características dos buracos negros](#) para tarefa de leitura e destaque das palavras que os alunos não sabem significar de acordo com o tema proposto. Então apresentar as respostas dos alunos com o *Pingo* para início das explorações e sistematização dos conceitos científicos.

Primeira elaboração Por intermédio de uma imagem ([Figura 24](#) entre outras) que ilustra as características física de um buraco negro, o professor então continua a sistematização destacando a física dos buracos negros de Schwarzschild, abordando primeiro um pouco do contexto histórico dos buracos negros e do próprio Schwarzschild^a. Depois apresentar, assim como descrito no texto principal, como identificar um buraco negro.

Abordar sobre o que aconteceria se o Sol e a Terra se tornasse um buraco negro. Falar da distorção do espaço-tempo e dos fenômenos de dilatação do tempo e contração do comprimento nas proximidades do horizonte de eventos, exemplificar abordando o fenômeno de lentes gravitacionais (deflexão da luz) e velocidade de escape. Seguir então para a última etapa da SE na aula seguinte.

Função da elaboração: Nesta aula o professor deve solicitar aos alunos individualmente que anote (no software Pingo), outras eventuais dúvidas que tenham lhes ocorrido sobre o conteúdo apresentado na tarefa de leitura e/ou do que foi abordado em aula sobre as propriedades físicas dos buracos negros. Com essas questões expostas, o professor pedirá uma primeira resposta da turma sobre cada questão apresentada, para logo após afirmar ou trazer a resposta correta sobre as questões levantadas.

Aplicação do Conhecimento:

Para a aplicação do conhecimento um questionário online (ver [subseção 11.3](#)) será aplicado, abordando os conteúdos visto sobre as propriedades dos buracos negros. Os alunos devem responder a este questionário com auxílio do texto [Características dos buracos negros](#) visto anteriormente.

^a Para um contexto histórico da física dos buracos negros um pouco mais completo ver referência [Almeida \(2021\)](#).

9 Considerações finais sobre estrelas, galáxias e buracos negros

Recursos pedagógicos:

- Interpretar textos de divulgação científica que tratem das temáticas relacionadas.
- Elaborar explicações, previsões a respeito dos corpos celestes.
- Conscientizar acerca da estrutura do Universo e de nossa posição no contexto cósmico.
- Habilidades: EM13CNT303FISa/ES, EM13CNT209.

Momento/Etapa:

- Grande Aplicação do conhecimento.

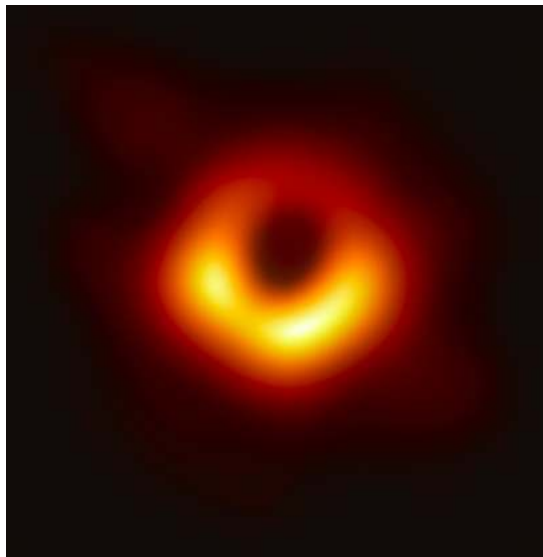
Procedimentos Metodológicos

Grande Aplicação do Conhecimento:

Os próximos momentos devem ser separados para que os alunos em grupos façam uma apresentação dos conteúdos vistos em aula. Os alunos devem escolher um tema e montar uma apresentação, podendo ser um audiovisual, um estande, um seminário; a ideia é deixar que os estudantes expressem sua criatividade e suas aprendizagens dos conteúdos vistos. Antes ainda, o professor deve abordar sobre o contexto e a produção da primeira imagem de um buraco. O professor iniciará a aula com a leitura do texto [Universo observável e a primeira imagem de um buraco negro](#), do capítulo sobre *A primeira imagem de um buraco negro*, que os alunos farão individualmente. Após a leitura os alunos então devem fazer registro de suas dúvidas e curiosidades no software *Pingo*. Então, com os questionamentos dos alunos, o professor fará uma sistematização, explicando sobre a produção da imagem e respondendo aos questionamentos, e logo após os alunos seguem para a produção de suas apresentações.

10 Imagens e recursos utilizados

Figura 13 – Primeira imagem de um buraco negro do centro da galáxia M87.



Fonte: [Event Horizon Telescope collaboration et al.](#)

Figura 14 – Nascer do Sol no solstício sobre Stonehenge.



Fonte: [NASA - APOD.](#)

Figura 15 – Localização de Próxima Centauri no céu austral.



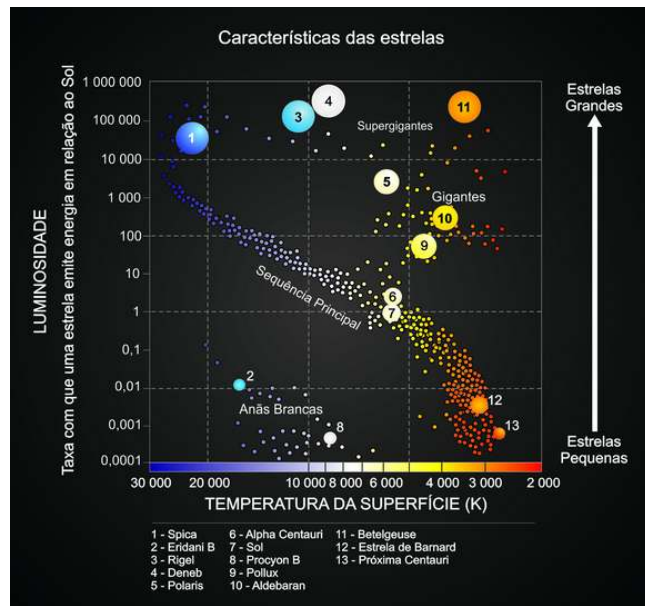
Fonte: [ESO/ESA](#).

Figura 16 – Nebulosa de Órion, local de nascimento de estrelas mais próximo da Terra.



Fonte: [ESO/ESA](#).

Figura 17 – Diagrama dos estágios evolutivos das estrelas.



Fonte: [Astronomia e Astrofísica](#).

Figura 18 – Diagrama H-R para atividade de identificação de estrelas.

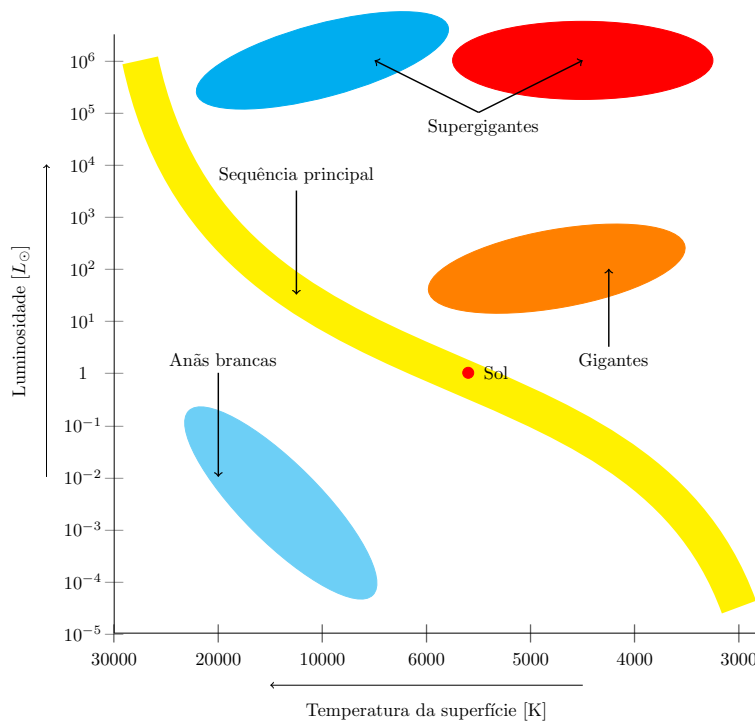
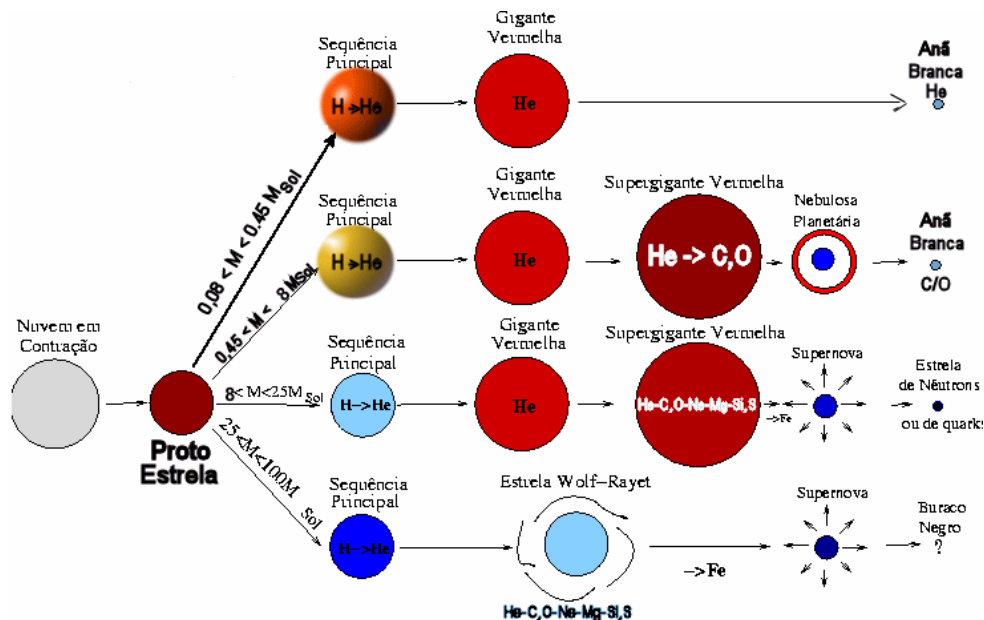


Figura 19 – Tabela de evolução e lista de estrelas para atividade de aula sobre evolução estelar.

Tabela de evolução estelar / Exemplo de estrelas		
Tabela 2 - Destino final das estrelas		
Massa inicial ($M_{\odot}$)	Evolução	Estado final
< 0.01	-	Planeta
$0.01 - 0.08$	Não funde H	Anã marrom
$0.08 - 0.25$	Fusão de H	Anã branca formada de He
$0.25 - 8$	Funde H e He	Anã branca formada de C e O
$8 - 10$	Fusão de C, captura de elétrons	Anã branca de O/Ne/Mg
$10 - 40$	Fusão de H, He, Ne, O, Si, Fe	Supernova - estrela de neutrons
> 40	Fusão de H, He, Ne, O, Si, Fe	Supernova - buraco negro

Spica
Rigel
Polaris
Procyon
Eta Carinae
Sirius A e B
Orionis(Delta, Epsilon, Zeta)

Figura 20 – Infográfico dos estágios evolutivos das estrelas.



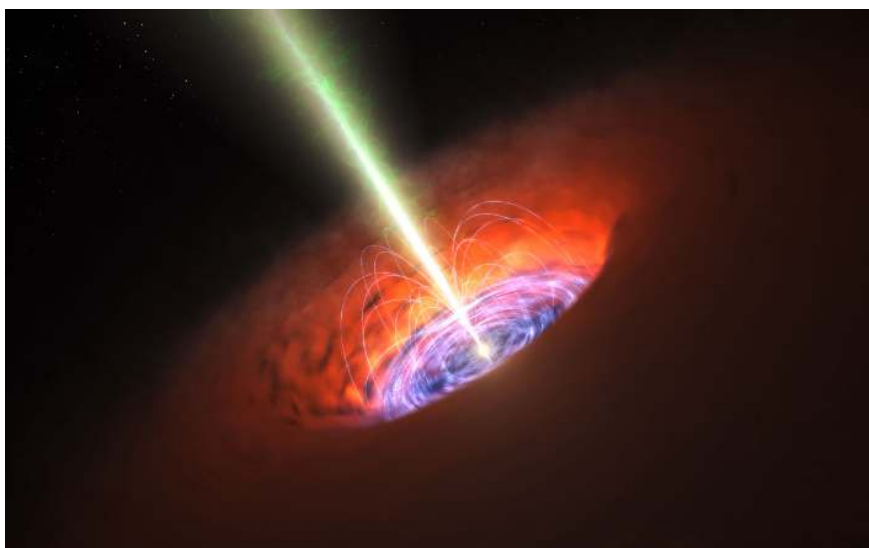
Fonte: [Astronomia e Astrofísica](#).

Figura 21 – Fotografia tirada da região de Pedra Azul em Domingos Martins, ES.



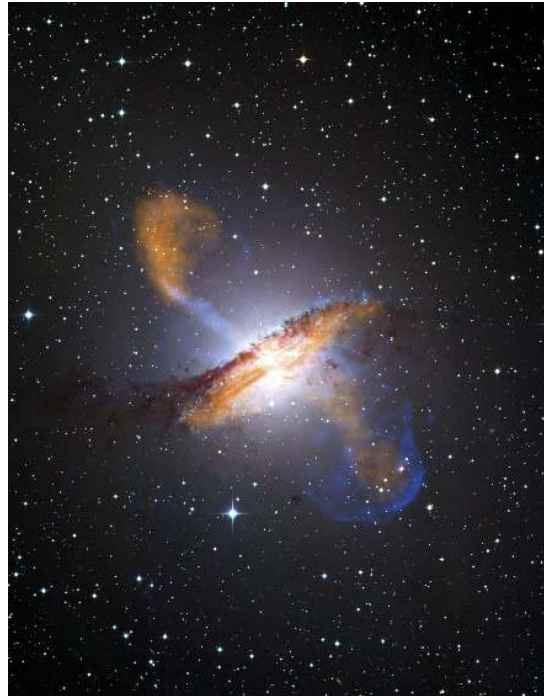
Fonte: [Wikipédia](#).

Figura 22 – Impressão artística de um buraco negro supermassivo.



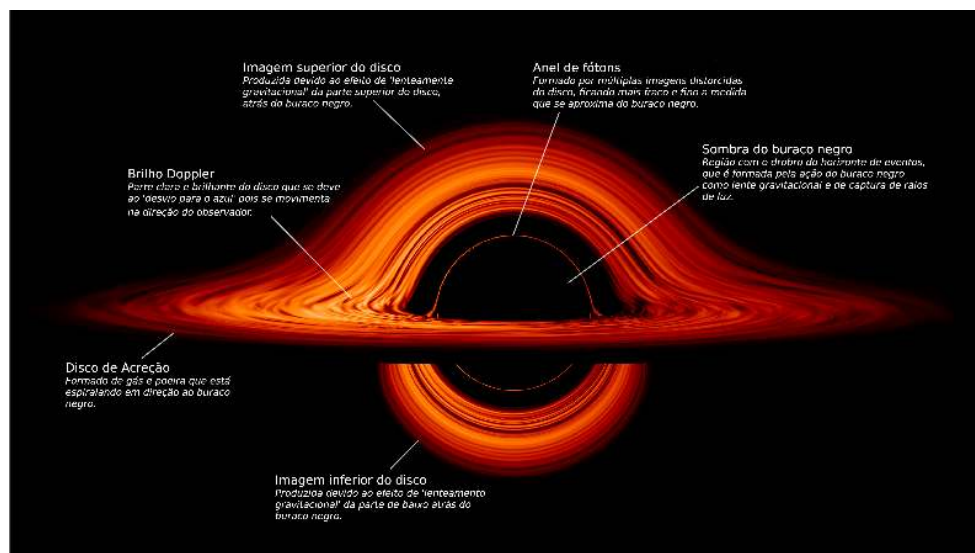
Fonte: [ESO](#).

Figura 23 – Galáxia Centaurus A com um buraco negro supermassivo emitindo intensa radiação de seu núcleo



Fonte: [Wikipédia](#).

Figura 24 – Ilustração de um buraco negro distorcendo o espaço-tempo.



Fonte: [NASA's Goddard Space Flight Center](#).

11 Questionários para atividades online

11.1 Questionário sobre evolução estelar

- a) O que faz com que a aparência do Sol seja tão diferente da aparência das estrelas quando os vemos da Terra?
Apenas a distância: o Sol está próximo da Terra (8 minutos-luz), enquanto as outras estrelas estão a anos-luz de distância.
- b) De onde vem a energia que faz com que o Sol e as estrelas consigam manter o seu brilho por tanto tempo?
Ela vem de processos de fusão nuclear de elementos mais leves em elementos mais pesados que ocorrem em seu interior, que liberam muita energia.
- c) Quais forças são responsáveis por garantir a estabilidade das estrelas?
A força peso ou da gravidade, dirigida para o centro da estrela, que é equilibrada pela força dirigida para fora produzida pela alta pressão interna, gerada pela alta temperatura do núcleo, mantida pela fusão de núcleos atômicos mais leves, formando núcleos mais pesados.
- d) Qual é o principal processo de fusão de elementos químicos que ocorre no interior do Sol?
A chamada cadeia próton-próton, na qual 4 núcleos (prótons) de hidrogênio são transformados em um núcleo de hélio.
- e) Quais os principais elementos químicos que dão origem a uma estrela?
Os principais são H e He, sendo o H o elemento mais abundante do Universo.
- f) Qual o fator relevante para que uma estrela sintetize elementos cada vez mais pesados?
A massa da estrela. Quanto mais massiva for uma estrela, maior será a temperatura e pressão no núcleo ao longo de sua evolução, que propicia a formação de elementos cada vez mais pesados.
- g) O que é o diagrama H-R? Para que ele serve?
O diagrama H-R é um gráfico em que são representadas a temperatura (que determina a cor) e a luminosidade das estrelas. Ele serve para agrupá-las em estrelas de sequência principal, gigantes, supergigantes e anãs brancas e indicar como ocorre a evolução estelar.
- h) Quanto mais massiva for uma estrela maior será seu ciclo evolutivo (tempo de vida). Justifique essa afirmação?
A afirmação não está correta, quanto mais massiva for uma estrela, mas rapidamente ela consome sua reserva de H, para conseguir sustentar o peso de suas camadas mais externas, e mais rapidamente produz outros elementos fazendo seu ciclo evolutivo ser mais curto do que estrelas de pouca massa.
- i) Quais são os possíveis estágios finais da evolução estelar e de que eles dependem?
Dependem da massa inicial da estrela. Estrelas com massa semelhante à do Sol ou menor, terminam sua evolução como anãs brancas. Estrelas com massa maior que 8 vezes, mas menor que 25 vezes a do Sol, terminam como estrelas de nêutrons. Já estrelas com massa inicial maior que 25 vezes a do Sol, terminam como buraco negro.

11.2 Questionário sobre galáxias e a Via Láctea

a) O que é uma galáxia?

Um enorme sistema, gravitacionalmente ligado, que compreende de dezenas de milhões a trilhões de estrelas (no caso das galáxias gigantes), remanescentes de estrelas (objetos compactos que correspondem aos estágios finais da evolução estelar, como anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros), meio interestelar (gás e poeira interestelar) e matéria escura (cuja existência pode ser inferida por métodos indiretos, como, p. Ex., pela observação do movimento das estrelas e do gás em uma galáxia, mas cuja natureza permanece desconhecida). Muitas galáxias, como a nossa também apresentam um buraco negro supermassivo em seu centro.

b) O que é maior, o sistema solar ou uma galáxia? Justifique sua resposta.

Uma galáxia é muitíssimo maior que o Sistema Solar. Em geral, uma galáxia é composta por bilhões de estrelas, grande parte delas com seus respectivos sistemas planetários, enquanto no Sistema Solar há uma única estrela, que é o nosso Sol. Uma galáxia é tão grande e há tanto espaço entre as estrelas que a probabilidade de uma colisão entre duas de suas estrelas é praticamente nula.

c) Quais os principais formatos que podem ter uma galáxia?

Conforme a classificação de Hubble, as galáxias se dividem em: elípticas, espirais normais, espirais barradas, lenticulares e irregulares.

d) Qual o tipo de nossa galáxia e quais são as principais regiões de sua estrutura?

A nossa galáxia é uma espiral barrada, composta por um disco com braços espirais, um bojo central e um halo aproximadamente esférico.

e) Por que não conseguimos visualizar a nossa galáxia como visualizamos as demais?

Porque estamos situados no interior da Via Láctea em um de seus braços espirais. Por isso, quando a observamos aqui da Terra, a vemos como uma mancha esbranquiçada que se estende por 360 graus a nossa volta, pois estamos num ponto no interior do seu disco.

f) Quais indícios temos de que, no centro da nossa galáxia, existe um buraco negro supermassivo?

Primeiramente foi detectada a presença de uma fonte de rádio compacta na direção do centro da Via Láctea, que foi denominada de Sagitário A. Posteriormente, a observação das trajetórias descritas por estrelas nessa região mostrou que elas orbitam em torno de um objeto compacto de massa de cerca de 4 milhões de vezes a massa do Sol, indicando que este objeto deve ser um buraco negro supermassivo. Mais recentemente, também foram observadas nuvens de gases girando em torno desse objeto com velocidade de cerca de 30% da velocidade da luz, de maneira consistente com o que seria esperado de um gás orbitando próximo ao horizonte de eventos - o ponto de não retorno - de um buraco negro, mais uma forte evidência de sua existência.*

g) O Sol apresenta algum movimento em relação ao centro da galáxia? Qual?

O Sol enquanto descreve sua órbita ao redor do centro da Via Láctea, também apresenta um movimento oscilatório acima e abaixo do plano galáctico.

11.3 Questionário sobre buracos negros

Para solução considere: $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$, $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} kg$ e $c = 3.0 \cdot 10^8 m/s$.

- a) Explique com suas palavras o que é um buraco negro?

É uma região do espaço em que a atração gravitacional é tão intensa (devido ao acúmulo excessivo de matéria e energia) que nada consegue escapar de seu interior, em particular nem mesmo a luz, daí seu sugestivo nome. Um buraco negro forma-se quando o campo gravitacional se torna tão intenso que a velocidade de escape do corpo aproxima-se da velocidade da luz.

- b) Como podem ser classificados os buracos negros com relação ao seu processo de formação e tamanho inicial?

Teoricamente a Relatividade Geral pode permitir a existência de buracos negros de todos os tamanhos, porém os mecanismos astrofísicos conhecidos preveem a formação de buracos com pelo menos algumas massas solares. Um buraco negro estelar é um buraco negro formado pelo colapso gravitacional de uma estrela massiva (maior do que cerca de 10 vezes a massa do Sol) ao final de seu tempo de vida. Um buraco negro supermassivo é originado a partir da evolução de estrelas de massa elevada, imensas nuvens de gás ou por aglomerados de milhões de estrelas que colapsaram sobre a sua própria gravidade quando o universo ainda era bem mais jovem e denso. Os buracos negros supermassivos possuem uma massa milhões ou até bilhões de vezes maior que a massa do Sol. Os buracos negros primordiais são buracos negros muito pequenos (com massa inferior a uma massa solar) criados no Universo primordial (Big Bang).

- c) Apesar de um buraco negro ser um aniquilador de informações, pois nem mesmo a luz pode escapar do mesmo, quais propriedades remanescentes podem descrevê-lo ?

Sob esse aspecto, os buracos negros parecem os objetos mais simples do Universo, pois eles só possuem massa, carga e rotação (momento angular), enquanto a completa descrição de uma estrela compreende uma variedade maior de elementos, tais como a sua composição química, pressão e densidade. Baseado nesta conclusão John A. Wheeler propôs o famoso teorema: “Buracos Negros não têm cabelo”.

- d) O que são os buracos negros de Schwarzschild?

São buracos negros que contém somente massa, sem carga e nenhuma rotação. Em 1916, o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) mostrou que os mesmos são soluções esféricas das equações de Einstein da Relatividade Geral.

- e) O que é horizonte de eventos e qual sua relação com o raio de Schwarzschild?

É uma fronteira que determina o limite do buraco negro, do qual nenhuma matéria pode escapar e de onde nenhum sinal poderá ser recebido por um observador externo. Por sua vez, o raio de Schwarzschild é o raio crítico que uma estrela deverá atingir para se transformar num buraco negro. Portanto, o raio de Schwarzschild é o raio do horizonte de eventos que envolve um buraco negro de Schwarzschild.

- f) Cite as principais regiões de um buraco negro de Schwarzschild e do seu entorno.
- O buraco negro possui singularidade, horizonte de eventos e ao redor um disco de acreção (disco de matéria (poeira e gás)), e esfera de fótons (órbita de fótons ao redor de um buraco negro.)*

g) O que é a singularidade de um buraco negro?

A singularidade é uma região do espaço-tempo onde as leis da física perdem a validade. Em um buraco negro de Schwarzschild, a singularidade é o centro do horizonte de eventos.

h) Considere a possibilidade do Sol torna-se um buraco negro.

– Qual seria seu raio de Schwarzschild?

Se um buraco negro tem velocidade de escape igual a velocidade da luz, e nada pode ser maior que a velocidade da luz, então

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM_{Sol}}{R_{Schw}^{Sol}}},$$

de modo que

$$R_{Schw}^{Sol} = \frac{2GM_{Sol}}{c^2} = \frac{2 \cdot (6,67 \cdot 10^{-11} N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}) \cdot (1,99 \cdot 10^{30} kg)}{(3 \cdot 10^8 m/s)^2} = 3km.$$

– As órbitas dos planetas seriam afetadas?

Não, pois não haveria alteração em relação a atuação gravitacional do Sol no sistema solar. A massa do Sol não mudaria, ele apenas ficaria menor e mais denso.

i) O que aconteceria se um astronauta munido de uma lanterna e instruído a piscar feixes de luz uma vez por segundo em direção à tripulação de sua nave, viajasse rumo ao horizonte de eventos de um buraco negro?

À medida que o astronauta se aproxima do buraco negro ele sente seu corpo ser esticado. Seus pés, mais próximos do buraco sofrem o efeito gravitacional mais intensamente do que sua cabeça, ou seja, ele sofre uma tensão resultante, este é o chamado efeito das marés. Por outro lado, a medida que ele se aproxima do horizonte, ele parece mover-se para um observador na nave cada vez mais vagarosamente, sua imagem aparece mais avermelhada e os pulsos de luz começam a chegar para a nave em intervalos de tempos cada vez mais espaçados. Este é o chamado desvio gravitacional para o vermelho (redução que o tempo de um relógio sofre quando funciona na presença de um campo gravitacional). Depois de adentrar o buraco negro o astronauta segue uma jornada sem volta rumo a singularidade, sofrendo efeitos de marés cada vez mais intensos, terminando por fazer parte da própria singularidade.

Referências

- ALMEIDA, C. R. Buracos negros: mais de 100 anos de história. *Cadernos de Astronomia*, v. 2, n. 1, p. 93–93, 2021. Citado na página 28.
- AUTH, M. A. *Formação de professores de ciências naturais na perspectiva temática e unificadora*. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Educação)—Centro de Ciências da educação, 2002. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/93822/280146.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 22 Abril. 2020. Citado na página 3.
- BARBOSA, R. G.; BATISTA, I. de L. Vygotsky: Um referencial para analisar a aprendizagem e a criatividade no ensino da física. *Revista Brasileira de pesquisa em Educação em Ciências*, p. 49–67, 2018. Citado na página 4.
- CARROLL, S. M.; TRASCHEN, J. *Spacetime and geometry: An introduction to general relativity*. [S.l.]: São Francisco: Addison-Wesley, 2003. Citado na página 17.
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A.; PERNAMBUCO, M. M. C. A. Ensino de ciências: fundamentos e métodos. In: . [S.l.]: Cortez, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 3, 4 e 5.
- D'INVERNO, R. A. *Introducing Einstein's relativity*. [S.l.]: Oxford: Oxford University Press, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- FILHO, K. d. S. O.; SARAIVA, M. d. F. O. *Astronomia e Astrofísica*. 2014. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/>>. Acesso em: 01 abr 2020. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 13.
- FREEDMAN, R. A.; YOUNG, H. D. *Física II: Termodinâmica e Ondas*. [S.l.]: São Paulo: Pearson, 14 ed., 2016. Citado na página 16.
- GEHLEN, S. T. *A função do problema no processo ensino-aprendizagem de ciências: contribuições de Freire e Vygotsky*. Tese (Doutorado) — UFSC, Florianópolis, SC., 2009. Disponível em: <http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/2010/artigos_teses/2011/pedagogia/tprobvygotskyfreire.pdf>. Acesso em: 1 Abril. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.
- GEHLEN, S. T.; MALDANER, O. A.; DELIZOICOV, D. Momentos pedagógicos e as etapas da situação de estudo: complementaridades e contribuições para a educação em ciências. *Ciência & Educação (Bauru)*, SciELO Brasil, v. 18, n. 1, p. 1–22, 2012. Citado na página 3.
- HARTLE, J. B. *Gravity: An introduction to Einstein's general relativity*. [S.l.]: São Francisco: Pearson Education, 2003. Citado na página 17.
- KIPPENHAHN, R.; WEIGERT, A.; WEISS, A. *Stellar structure and evolution*. [S.l.]: Springer, 1990. v. 192. Citado na página 8.
- MATSUURA, O. T. A primeira imagem de um buraco negro. *Cadernos de Astronomia*, v. 1, n. 1, p. 52–82, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- MCCUSKEY, S. W. *Introduction to Celestial Mechanics*. [S.l.]: Massachusetts: Addison-Wesley, 1963. Citado na página 15.

MIGUEL, J. C.; CORRÊA, H. P. S.; GEHLEN, S. T. A significação conceitual na estruturação dos momentos pedagógicos: um exemplo no ensino de física. *Experiências em Ensino de Ciências*, v. 9, n. 2, 2014. Citado na página 4.

MILONE, A. d. C. e. a. *Introdução à Astronomia e Astrofísica*. 2019. Disponível em: <http://www.inpe.br/ciaa2019/arquivos/pdfs/apostila_ciaa_2019_completa-compactado.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2020. Citado 4 vezes nas páginas 7, 9, 11 e 12.

MUENCHEN, C. *A disseminação dos três momentos pedagógicos: um estudo sobre práticas docentes na região de Santa Maria/RS*. 2010. 273 f. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica)—Centro de Ciências . . . , 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/93822/280146.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 22 Abril. 2020. Citado na página 4.

NASCIMENTO das Estrelas. In: FUNDAMENTOS de Astronomia e Astrofísica. Hipertexto de Astronomia - ufrgs, 2021. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/oei/stars/formation/form_st.htm>. Acesso em: 15 Dez. 2021. Citado na página 7.

PEREIRA, A. P. de; JUNIOR, P. L. Implicações da perspectiva de wertsch para a interpretação da teoria de vygotsky no ensino de física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 31, n. 3, p. 518–535, 2014. Citado na página 3.

PICAZZIO, E. *O céu que nos envolve: Introdução à astronomia para educadores e iniciantes*. 2011. Disponível em: <<http://www.astro.iag.usp.br/OCeuQueNosEnvolve.pdf>>. Acesso em: 03 abril 2020. Citado 6 vezes nas páginas 7, 9, 10, 12, 13 e 14.

RAINE, D. J.; THOMAS, E. G. *Black holes: an introduction*. [S.l.]: Imperial College Press, 2 ed., 2010. Citado na página 19.

SABBATA, V. D.; GASPERINI, M. *Introduction to gravitation*. [S.l.]: World Scientific Publishing Company, 1986. Citado na página 17.

SCHUTZ, B. *Gravity from the ground up: An introductory guide to gravity and general relativity*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.

SCHUTZ, B. F. *A First Course in General Relativity*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2 ed., 2009. Citado na página 17.

SCIENCE. In: EVENTHORIZONTELESCOPE.ORG. Event Horizon Telescope, 2017. Disponível em: <<https://eventhorizontelescope.org/science>>. Acesso em: 05 Jan. 2022. Citado na página 21.

VYGOTSKY, L. *A construção do pensamento e da linguagem [The construction of thought and language]*. [S.l.]: São Paulo: Martins Fontes.(Original work published 1934), 2001. Citado na página 3.

WEBER, F. *Introdução à Relatividade Geral e à Física de Estrelas Compactas*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2015. Citado na página 17.

ANEXO A – Textos das tarefas de leituras

Os anexos que seguem são hipertextos retirados do site [Sidereus Nuncius](#).

O Sol E as Estrelas

Artigo sobre o nosso Sol e sua produção de energia.

Você já se perguntou como o nosso Sol produz luz e calor? Como produz a grande quantidade de energia necessária para sustentar a vida na Terra? Acredito que sim! Ou pelo menos já pensou sobre isso. Neste texto vamos aprender um pouco como é nosso Sol e como ele funciona, e ainda, se o mesmo vale para as demais estrelas.



Em 1833 o astrônomo e matemático John Herschel descreveu o papel da luz do Sol para a vida em seu tratado de astronomia:

Os raios do Sol são a fonte última de quase todos os movimentos que ocorrem na superfície da terra. Por seu calor são produzidos todos os ventos... Por sua ação vivificante, os vegetais são elaborados a partir de matéria inorgânica e tomam-se, por sua vez, o apoio de animais e do homem, e as fontes desses grandes depósitos de eficiência dinâmica que são criados para o ser humano.

E de fato sem o Sol a vida seria impossível na Terra!

O nosso Sol detém mais de 99% de toda massa do sistema solar que inclui planetas, suas luas e os corpos menores do sistema solar (meteoros, cometas, asteroides...). Fica a quase 150 000 000 Km de distância da Terra, ou a 1 UA (unidades astronômicas). Em um avião normal, viajando a 1000 km/h, demoraria cerca de 20 anos, para chegar ao Sol. Para nós é uma distância extraordinária, mas em termos astronômicos é algo como ao alcance do braço. Mas a nossa questão é como Sol produz brilho e calor, isto é, como ele produz energia? E qual(is) semelhanças ou diferenças em relação as estrelas.

O Sol nada mais é do que uma imensa esfera de gás incandescente, sustentada pelo equilíbrio hidrostático, ou seja o equilíbrio entre forças devido à pressão (*empuxo*) e à gravidade (peso), que nos permite determinar a pressão e a temperatura no núcleo solar, que é cerca de 15 000 000 K (cerca de 15000000°C), fazendo com que este suporte o peso das camadas externas. Na imagem abaixo vemos o que sustenta uma estrela:

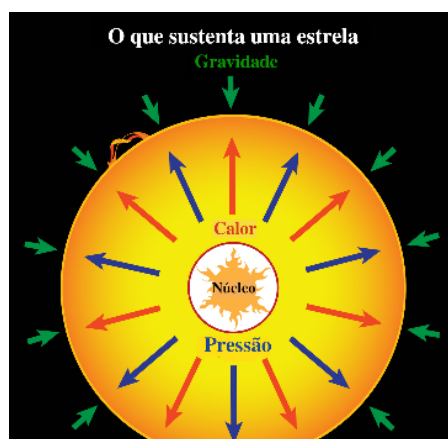




Fig.1 - O equilíbrio hidrostático de uma dada camada ou porção de uma estrela, se dá entre forças devido à pressão, em cima e embaixo desta camada (o empuxo) e seu peso.

Na verdade ainda existem duas grandezas físicas importantes para a atividade solar, como o $\vec{B}$ (campo magnético), gerado pelo movimento plasmático e responsável pela [ejeção de massa coronal](#), e a rotação do Sol, provocada pela sua contração do Sol, que o faz girar em torno de seu próprio eixo. Mas se ficarmos apenas em função do empuxo (E) e da força peso (F), poderemos compreender bem seu funcionamento, equilíbrio e estabilidade.

Assim como um balão cheio de ar (ou gases) o nosso Sol é composto basicamente de hidrogênio e hélio (cerca de 81% de H, 18% de He e 1% outros elementos como carbono, oxigênio,...), os mesmos *H* e *He* da tabela periódica. Na verdade, o *H* é o elemento mais abundante do Universo que se formou na [nucleossíntese primordial](#). Ele é o elemento responsável pela geração de energia no núcleo do Sol através de reações termonucleares, as quais convertem o hidrogênio em hélio. A cada segundo, o Sol transforma aproximadamente 600 milhões de toneladas de *H* em *He*!

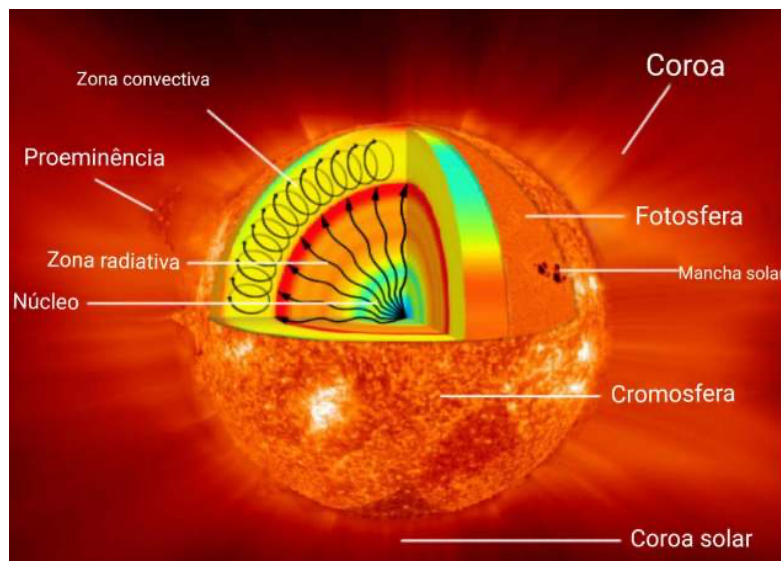


Fig.2 - Estrutura e divisão em camadas que fazem parte do nosso Sol, desde o núcleo até a superfície.

Na imagem acima é possível observar algumas partes que compõem o Sol. Começando pela fotosfera, a camada externa do Sol, forma na superfície algo parecido com um líquido fervente, gerando uma espécie de granulação (ou bolhas) a uma temperatura de cerca de 6000 K (Aproximadamente 5726°C). Cada bolha que se forma tem algo em torno de 5.000 km de diâmetro, e duram cerca de 15 minutos aproximadamente. Ainda na parte externa temos a cromosfera que geralmente é invisível, formando-se acima da fotosfera, podendo ser observada durante eclipses solares.

Existem ainda as [proeminências](#), que formam laços ancorados na superfície do Sol, podendo gerar uma ejeção de massa coronal ou [CME](#) quando se rompem, uma radiação provocada pelo campo magnético que força a ejeção de plasma da superfície solar, que é um estado físico da matéria similar ao gás, mas este, devido ao superaquecimento, se ioniza (ganha e/ou perde elétrons) formando íons positivos e elétrons livres em movimento. No vídeo que segue, temos uma dessas erupções de plasma solar, que ocorreu em 19 de julho de 2012, emitindo luz e radiação a uma temperatura de 50.000 K com uma duração aproximada de 10 horas.

NASA | Fiery Looping Rain on the Sun



Vídeo 1 - [Erupção solar](#) mostrando ejeção de matéria solar.

Continuando na fotosfera, temos ainda as manchas solares, são regiões escuras e irregulares que podem ser observadas a olho nu, Galileu Galilei foi um dos primeiros a observar as manchas solares, publicando sobre elas em 1613. Galileu conseguiu demonstrar que o Sol estava em rotação ao acompanhar o movimento dessas manchas. Algo interessante é que essas manchas marcam o *ciclo de atividade solar*. Elas tem duração aproximada de 7 dias, e são mais intensas e numerosas em um ciclo de 11 anos. Durante esses períodos as erupções solares são mais intensas, gerando grandes proeminências que se desprendem da coroa solar, liberando gás ionizado e uma grande quantidade de energia, equivalente a cerca de 100 milhões de bombas nucleares, que viajam a mais de 1.000.000 km/h atingindo a Terra em cerca de 4 dias, podendo causar alguns danos na Terra, de satélites a torres de transmissão.

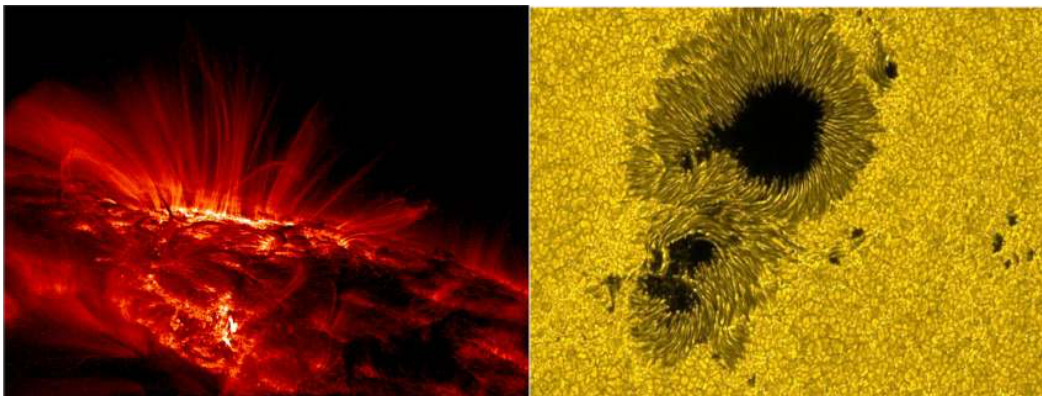


Fig.3 - Manchas solares individuais e em grupos marcando a intensa atividade magnética na superfície da fotosfera.

Em torno do núcleo ficam as zonas radiativas e convectivas, onde a energia se propaga por radiação na primeira, sendo transportadas pelos fótons (partícula de luz sem massa). E a zona convectiva, onde a energia se propaga por convecção pelo movimento molecular do gás devido à diferença de temperatura entre a parte superior e inferior desta região.

Mas a parte mais intrigante e responsável pelo que vimos até aqui é o núcleo solar, local onde ocorrem intensas reações nucleares e produção de energia, e tudo começa na formação do Sol, em uma região do Universo em que havia uma imensa nuvem de gás e poeira interestelar.

Quando uma onda de choque proveniente de explosão de supernovas ou da colisão de duas galáxias atinge esta nuvem, ela fica gravitacionalmente instável e começa a se contrair, formando glóbulos de até 1 ano-luz de extensão. Esses glóbulos ou nuvens de gás, são em sua maioria formados por átomos de hidrogênio que, devido à sua autogravidade, começam a se contrair e adquirir uma forma esférica, que atrai mais massa de gás e poeira que esteja ao seu redor. Então, as partículas que compõem o gás estão em queda livre, uma em direção às outras, transformando energia potencial gravitacional em energia cinética, chegando a colidir entre si, aumentando assim sua agitação térmica, transformando a energia cinética da queda em energia térmica. A temperatura então começa a se elevar cada vez mais, até chegar ao ponto de iniciar as reações de transmutação de H em He .





Fig.4 - Imagem da Barnard 68, é um glóbululo molecular, uma nuvem escura e fria com cerca de duas vezes a massa do Sol.

A esse ponto a temperatura no núcleo solar é de 15 milhões de graus Celsius. Essa imensa quantidade de energia vai ter que ser liberada de alguma forma. Mas antes falta um detalhe! Voltando na imagem da figura 1, se as forças geradas pela grande pressão interna for muito grandes a nuvem ou o glóbululo se desfaz, se o peso vencer ela colapsa. Mas se a atração e repulsão forem iguais, o equilíbrio permanece e o Sol se mantém estável e, liberando energia na forma de radiação e calor.

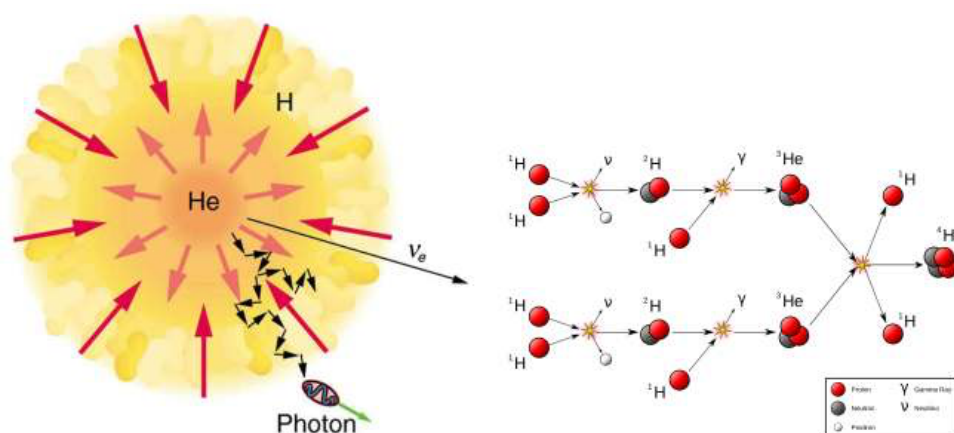


Fig.5 - Produção de energia solar. Do lado esquerdo ocorre a fusão de H em He com a liberação de fóton, do outro lado a reação em cadeia das partículas ao colidirem.

O processo de fusão inicial envolvem estes núcleos de hidrogênio apresentados na figura acima, numa reação chamada cadeia próton-próton (cadeia p-p). Na primeira etapa da cadeia p-p (lado direito da Figura 5 acima), dois átomos de H se fundem para formar um núcleo de deutério, um pósitron e um neutrino. O neutrino escapa da estrela, mas o pósitron colide com o elétron, liberando energia na forma de radiação. Na segunda etapa o deutério se funde com outro H, formando o isótopo de hélio (^3H) com dois prótons e um nêutron, liberando fótons (raios gama γ). E na terceira reação, dois isótopos de fundem para formar um átomo de hélio ^4He e dois núcleos de H.

Como dito anteriormente, o Sol tem uma enorme reserva de hidrogênio, que faz com que seja possível manter essas reações constantes, ficando estável por um longo período. Mas o que pode acontecer com o Sol se essa reserva de hidrogênio se esgotar?

Quando todo aquele hidrogênio virar hélio, o Sol se tornará uma gigante vermelha com tamanho e massa suficiente para retomar os processos de fusão em seu núcleo, desta vez colidindo átomos de He, formando carbono. Daí em diante a temperatura do núcleo é insuficiente para fundir carbono em elementos mais pesados. Então o Sol se desestabiliza, isto é, perde seu equilíbrio e entra em colapso, marcando o fim de sua produção de energia. Com o colapso a parte externa é ejetada lançando matéria e poeira no espaço formando uma *nebulosa planetária*. O que sobra é um núcleo muito denso composto em sua maior parte de carbono, mais ainda muito brilhante denominado de *anã-branca*.

O nosso Sol já percorreu metade do seu ciclo evolutivo, estando com uma idade de cerca de 4,5 bilhões de anos e devendo durar por mais uns 5 ou 6 bilhões de anos até consumir todo seu estoque de hidrogênio. Quando se tornar uma gigante vermelha o seu raio atingirá a órbita da Terra, engolindo Mercúrio e Vênus. Nesse ponto, a vida na Terra já terá se extinguido há muito tempo! Daqui a aproximadamente 1.1 bilhões de anos o Sol será 10% maior, elevando a temperatura terrestre, provocando um efeito estufa mais acentuado. Daqui a 3.5 bilhões de anos o Sol será 40% maior, a radiação solar fará com que a água dos oceanos evapore e a temperatura na superfície da Terra chegue a 700°C , vaporizando toda água da Terra.





Fig.4 - Ciclo evolutivo do Sol marcando seu nascimento como uma nuvem de gás e seu fim como nebulosa planetária e anã branca.

A pergunta que falta responder é: o Sol tem alguma relação com as estrelas? Elas parecem frias e não brilham como Sol. Mas na verdade, o processo de formação e evolução das estrelas é exatamente igual ao que foi descrito aqui para o Sol. A grande diferença é a distância, pois as estrelas estão muito, mas muito longe, a anos-luz de distância! A mais próxima de nós é [Alpha Centauri](#) a cerca de 4,3 anos-luz, bem longe do sistema solar e por isso não notamos o seu brilho como notamos o do Sol, mas é tão brilhante e massiva quanto o Sol (na verdade Alpha Centauri é um sistema duplo, formado por duas estrelas, uma um pouco maior, outra um pouco menor que o nosso Sol). Outra importante diferença é a massa inicial das estrelas que irá influenciar no seu processo evolutivo, e que vai definir a sua capacidade de produzir elementos mais pesados que o carbono.

Referências

- How the sun shines. THE NOBEL PRIZE, 2000.
Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/themes/how-the-sun-shines/>.
Acesso em: 03, out 2020.
- O Sol - a nossa estrela. Astronomia e Astrofísica, 2019.
Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>.
Acesso em: 03, out 2020.
- FALCIANO, Felipe Tovar. Nós, as estrelas e o universo. Ilustríssima Física, 2019.
Disponível em: <https://www2.cbpf.br/downloads/divulgacao-cientifica/livros/Ilustrissima-fisica.pdf>.
Acesso em: 03, out 2020.
- Sol. Wikipédia, 2020.
Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Sol>.
Acesso em: 03, out 2020.
- PICAZZIO, Enos. O céu que nos envolve: Introdução à astronomia para educadores e iniciantes, 2011.
Disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/OCeuQueNosEnvolve.pdf>.
Acesso em 03, out 2020.

® Todos Direitos Reservados. Criado com [Bootstrap](#)



Evolução Estelar - Nascimento, Vida e Morte das Estrelas

Artigo sobre o ciclo de formação e destruição das estrelas.

No texto sobre o Sol, já esclarecemos que os fatores básicos que o fazem brilhar e transmitir calor também ocorrem nas estrelas, e que as principais diferenças entre o Sol e as estrelas são a distância – as estrelas se acham a anos-luz de distância, enquanto o Sol está a apenas 8 minutos-luz da Terra – e a massa inicial. Agora estamos preparados para entender um pouco mais sobre as estrelas e sobre aspectos que fazem com que elas se diferenciem do Sol, por exemplo, em cor, luminosidade e tamanho. Mas o principal objetivo aqui é saber se as estrelas vão terminar seu ciclo evolutivo assim como o Sol, e como se dará esse processo, que, já adiantado aqui, pode ser bastante violento e destrutivo.

O Nascimento

Nos braços de galáxias espirais, semelhantes à nossa, a Via Láctea, existem grandes nuvens de gás e poeira interestelar, cuja massa pode chegar a milhares ou milhões de vezes a massa do Sol (Fig.1).



Fig.1 - [Galáxia de Andromeda](#), também conhecida como M31. É a galáxia espiral mais próxima, podemos notar em seus braços espirais manchas escuras que são as grandes nuvens de gás e poeira interestelar.

Essas nuvens são compostas principalmente de hidrogênio e alguns traços de outros elementos da tabela periódica. Em regiões mais frias dessas grandes nebulosas, existem as denominadas “nuvens moleculares”, onde, devido à sua baixa temperatura, ocorre a formação de moléculas, sobretudo moléculas de hidrogênio (H_2), e podem se formar glóbulos mais densos, pois a baixa temperatura, e consequente agitação térmica das moléculas favorece a ação da gravidade, aproximando as moléculas (Fig.2).

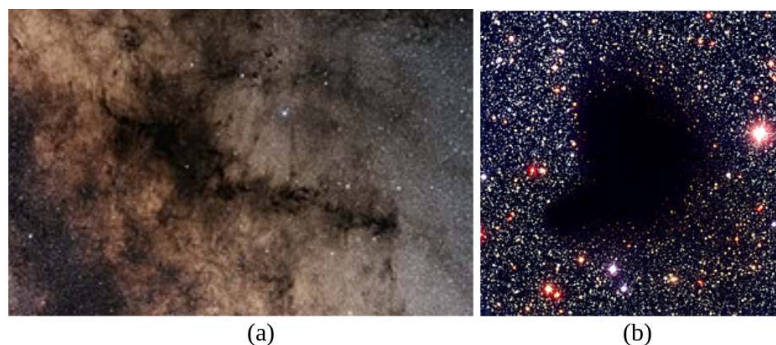


Fig.2 - (a) Nebulosa na [constelação do Ofiúco](#) (denominada Pipe Nebula, em inglês): uma imensa nuvem de gás e poeira interestelar. (b) Nuvem molecular [Barnard 68](#), um glóbulo de gás e poeira interestelar.

cuja massa é cerca de duas vezes a do Sol e mede cerca de meio ano-luz de diâmetro.

O gatilho que propicia a formação desses glóbulos dentro dessas nuvens pode ser a colisão entre nuvens próximas ou ondas de choque de explosão de supernovas, além da turbulência interna natural da nuvem provocada pelo movimento de seus gases. Esse cenário é perfeito para causar um desequilíbrio nessas nuvens aglomeradas, que começam a entrar em colapso, ou seja, começam a se contrair e fragmentar-se formando glóbulos. O vídeo a seguir é uma simulação que busca indicar como ocorre esse processo.

Star formation by collapse of molecular clouds



Vídeo 1 - Simulação da formação a partir do colapso gravitacional que pode ocorrer em certas regiões dentro de uma nuvem molecular. Fonte: <https://www.ukaff.ac.uk/starcluster/>

Os glóbulos de gás mais frios e densos (Fig. 2b) são os locais perfeitos para o nascimento de estrelas. Devido à baixa temperatura desse gás, as forças devido à sua pressão, que poderiam fazê-lo expandir, acabam sendo menores que as forças produzidas pela sua "autogravidade", ou seja, gravidade produzida pela sua própria massa. O glóbulo, então, se contrai, colapsa e, se sua massa for grande o suficiente, maior que cerca de 10% da massa do Sol, pode formar uma estrela.

Certas regiões dessas grandes nuvens moleculares se transformam, assim, em verdadeiros "berçários" de estrelas, formando dezenas, centenas ou até milhares de estrelas, como é o caso da famosa Nebulosa de Órion (Fig.3), visível a olho nu na constelação de Órion.



Fig.3 - [Nebulosa de Órion](#), situada a cerca de 1350 anos-luz de distância. No campo de visão desta imagem é possível observar a imensa nuvem de gás e poeira, com aproximadamente 24 anos-luz de diâmetro e massa milhares de vezes maior que a do Sol, que consiste no mais próximo grande "berçário" de estrelas – inúmeras estrelas se formaram e vêm se formando em seu interior nos últimos milhões de anos.

O glóbulo colapsado pode, assim, evoluir para uma *protoestrela*, com uma concentração maior de massa em seu centro e um disco de matéria ao seu redor que continua caindo em direção ao centro, fazendo ele crescer, num processo denominado de "acrecção" de matéria. Depois de alguns milhares ou milhões de anos, se a massa acrescentada for suficiente para que a conversão de energia

Loading [Contrib]/a11y/accessibility-menu.js

potencial gravitacional em energia térmica, durante a queda da matéria em direção ao centro, eleve a temperatura deste centro até cerca de 10 milhões de kelvins, terão início, então, reações termonucleares de fusão de H em He, liberando enorme quantidade de energia – a estrela nasce!

Nessa fase, denominada de protoestrela, a temperatura na superfície atingirá entre 2.000 K a 3.000 K, e, a partir do disco protoplanetário, de gás e poeira, ao seu redor, poderão se formar planetas.

No vídeo a seguir, podemos observar a simulação de uma protoestrela com um disco protoplanetário no interior da nuvem conhecida como McNeil's nebula. A protoestrela completa cerca de uma volta por dia, gira mais rápido que o disco ao seu redor e apresenta dois pontos mais quentes, que emitem raios X, produzidos por feixes de matéria que ainda está sendo transferida do disco para a protoestrela.

NASA | A Young Star Flaunts its X-ray Spots



Vídeo 2 - Exemplo de uma protoestrela com um disco protoplanetário ao seu redor. Neste estágio já possui 80% da massa do Sol e uma temperatura superficial de 3700 K, um terço menor que a temperatura da superfície do Sol.

Fonte: <https://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a010000/a010900/a010991/index.html>

Para as estrelas mais massivas (acima de 10 massas solares) que se formam, o glóbulo é completamente consumido ou disperso e a intensa radiação emitida pela jovem estrela ioniza e faz brilhar as regiões mais próximas da grande nuvem ao seu redor, a partir da qual se formou, como no caso da nebulosa de Órion (Fig.3), tudo isso em um período da ordem de dezenas de milhares de anos, bem diferente de estrelas com massa semelhante à do Sol, que levam um tempo da ordem de dezenas de milhões de anos para sair da fase de protoestrela e não destroem todo o glóbulo, preservando a nuvem de gás e poeira em forma de disco ao seu redor, a partir da qual poderão se formar planetas.

A transição de protoestrela para estrela ocorre quando o processo de fusão termonuclear, de hidrogênio em hélio, se estabiliza. Isso acontece porque quando a liberação de energia nuclear aumenta, a pressão local também aumenta e a estrela se expande; porém, com a expansão, o gás no interior da estrela tende a esfriar e, conseqüentemente, devido à temperatura mais baixa, a liberação de energia por fusão termonuclear diminui. Assim, a estrela acaba atingindo a temperatura e o tamanho ideais para que haja um equilíbrio entre expansão e contração, um estado de equilíbrio hidrostático entre a ação da gravidade (força peso), que tende a fazer a estrela colapsar, e as forças produzidas pelo aumento da pressão com a profundidade (empuxo), que tendem a fazer a estrela se expandir, permitindo assim que a estrela fique estável por um longo período.

Essa fase de estabilidade, em que a estrela permanece a maior parte de sua vida, realizando apenas a fusão de hidrogênio em hélio, é denominada de fase de sequência principal. Conforme indicado na Fig.4, nessa fase as estrelas se situam numa região bem definida do chamado “diagrama de Hertzsprung-Russel” (ou, mais simplesmente, diagrama H-R), muito usado na descrição de como se classificam e como ocorre a evolução das estrelas.

Classificação e o diagrama H-R

Duas propriedades físicas muito usadas na descrição e estudo das estrelas e de sua evolução são a temperatura de sua superfície – que determina a sua cor – e sua luminosidade. Essa última definida como sendo a energia luminosa total emitida pela estrela, em todas as direções, por unidade de tempo, ou seja, corresponde à sua potência luminosa.

Por volta de 1910, dois astrônomos, Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell, elaboraram um diagrama – que, em sua homenagem, passou a ser conhecido como diagrama H-R (Hertzsprung-Russel) – no qual essas duas propriedades são representadas: no eixo horizontal, a temperatura, numa escala logarítmica, com o sentido de crescimento para a esquerda, e, no eixo vertical, a luminosidade, também numa escala logarítmica, já que a variação de brilho das estrelas é muito grande. Ao se representar as posições de estrelas

Loading [Contrib]/a11y/accessibility-menu.js

nesse diagrama (Fig.4) é possível verificar que elas não se distribuem aleatoriamente, mas formam agrupamentos específicos, podendo ser classificadas, de acordo com suas posições, como estrelas de sequência principal, gigantes, supergigantes ou anãs brancas.

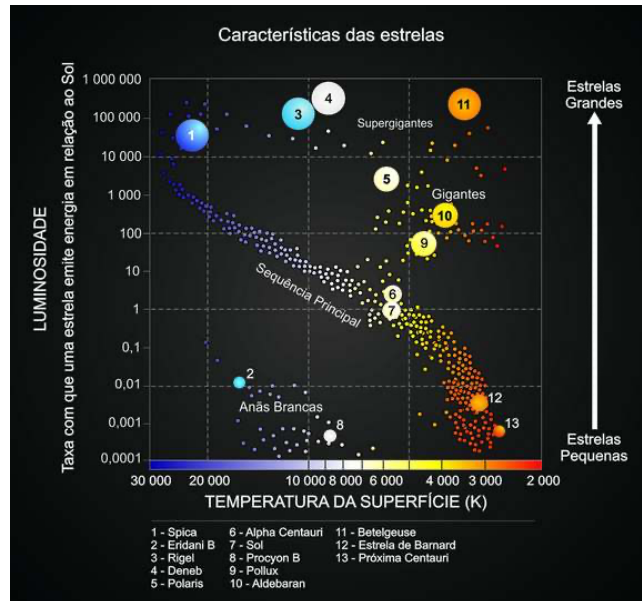


Fig.4 - Diagrama H-R, onde são representadas a luminosidade e temperatura das estrelas, sendo usado para indicar sua classificação e estágios. Fonte: [Astronomia e Astrofísica](#).

Conforme dito no final da seção anterior, depois que as estrelas nascem e atingem um estado de equilíbrio, realizando a fusão de hidrogênio em hélio em seu núcleo, elas se situam na região de sequência principal desse diagrama e nela permanecem a maior parte (cerca de 90%) de sua vida. Contudo, quando o hidrogênio se esgota em seu núcleo, elas evoluem e deixam a sequência principal, podendo evoluir para o ramo das gigantes ou supergigantes e, em alguns casos, chegar a um estágio final de anã branca. Como veremos, o caminho evolutivo seguido será fortemente determinado pela massa inicial da estrela, e quanto maior a massa, mais rápida será a evolução.

Fazendo uma analogia, podemos dizer que o diagrama H-R é semelhante a uma tabela periódica das estrelas. Da mesma forma que, na tabela periódica, os elementos são organizados de acordo com suas propriedades físicas e químicas, no diagrama H-R as estrelas das mesmas regiões compartilham um conjunto comum de características, porém, diferentemente da tabela periódica, as características físicas das estrelas mudam com o tempo e, portanto, sua posição no diagrama também muda, de modo que podemos pensar no diagrama H-R como um gráfico visual da evolução estelar.

Após uma estrela nascer e ingressar na sequência principal, atingindo um estado de equilíbrio, transformando hidrogênio em hélio em seu núcleo, sua posição nesta sequência vai depender fundamentalmente de sua massa. Tanto sua temperatura quanto sua luminosidade serão determinadas pela sua massa. Quanto maior a massa, maior será a gravidade da estrela e mais quente deverá ser o seu núcleo para que a pressão gerada pela alta temperatura e densidade de seu interior sejam suficientes para equilibrar o peso das camadas externas e conter o colapso gravitacional. Em consequência disso, quanto maior a massa, maior será a temperatura no núcleo e na superfície da estrela, e também sua luminosidade. No diagrama H-R, na faixa da sequência principal, as estrelas de menor massa – o limite inferior é de 0,08 massas solares, só para massas iguais ou superiores a essa a temperatura no núcleo é suficientemente alta para iniciar reações nucleares estáveis – serão anãs vermelhas e estarão situadas no canto inferior direito do diagrama. As de maior massa, por sua vez, serão estrelas gigantes azuladas e estarão situadas no canto superior esquerdo do diagrama. As estrelas de massa intermediária, como o nosso Sol, serão brancas ou amareladas e estarão situadas próximas ao centro do diagrama (Fig.4).

Conforme dito acima, a principal propriedade física que será determinante, tanto da posição de ingresso da estrela na sequência principal, como na sua posterior evolução, é a sua massa. Contrariamente ao que se poderia imaginar, estrelas mais massivas, embora possuam mais hidrogênio e, portanto, mais combustível a ser “queimado” em reações de fusão nuclear, acabam por evoluir muito mais rapidamente do que as de pequena massa, pois, para manter o equilíbrio hidrostático entre gravidade e pressão em seu interior, mantendo uma alta temperatura em seu núcleo, precisam liberar muita energia e, para tanto, necessitam queimar o hidrogênio a uma taxa muito mais alta que as de pequena massa. Por exemplo, o tempo de vida na sequência principal de uma estrela de massa equivalente à do nosso Sol está estimada em 10 bilhões de anos (dos quais, no caso do Sol, 4,5 bilhões já se passaram). Uma estrela de 0,1 massas solares levará 3 trilhões de anos para sair da sequência principal. Já uma estrela de 10 massas solares ficará na sequência principal “apenas” 100 milhões de anos.

À medida que o processo de reação termonuclear de fusão de hidrogênio em hélio vai se desenrolando no núcleo de uma estrela de sequência principal, a quantidade de hidrogênio disponível neste núcleo irá diminuindo, a de hélio irá aumentando e o núcleo irá se

um ponto em que a fusão do hidrogênio em hélio só ocorrerá em uma camada mais externa, um pouco acima do núcleo, o que fará as camadas mais externas se expandirem, aumentando o tamanho da estrela e, ao mesmo tempo, diminuindo a temperatura em sua superfície: será o fim da vida da estrela na sequência principal e ela se deslocará para a região das gigantes vermelhas do diagrama H-R. Dependendo da massa da estrela, a temperatura que será atingida no núcleo de hélio poderá chegar a cerca de 100 milhões de kelvins, que será suficiente para iniciar reações de fusão do hélio em elementos mais pesados, como o carbono e o oxigênio.

Estrelas de grande massa, poderão prosseguir atingindo temperaturas ainda mais altas em seu núcleo, conseguindo realizar a fusão de elementos de maior número atômico, até o ferro. A partir do ferro e outros elementos químicos mais pesados (maior número atômico) que ele, não há mais liberação de energia ao ser realizada em uma reação de fusão nuclear. Ao contrário, é necessário adicionar energia para que a fusão ocorra. Elementos químicos mais pesados que o ferro só liberam energia em processos de fissão nuclear, quando se dividem e dão origem a elementos mais leves. Portanto, em algum momento na vida da estrela, cessará a liberação de energia por fusão nuclear que mantém o núcleo com alta temperatura e pressão, capaz de equilibrar o peso das camadas externas. Em algum momento, então, ocorrerá o colapso gravitacional da estrela que, dependendo de sua massa, pode ser um processo relativamente suave ou extremamente catastrófico.

Estágios finais da evolução estelar

No diagrama a seguir (Fig. 5) é apresentada uma síntese de como se dá a evolução das estrelas, desde sua formação, como protoestrela, até seus estágios finais. Note que a propriedade física determinante de como se dará a evolução de uma estrela, por qual fases ela irá passar, que elementos químicos ela irá sintetizar em seu núcleo e qual será seu estágio final é a sua massa. Na coluna mais à esquerda do diagrama são indicados os intervalos de valores de massa de cada caminho evolutivo.

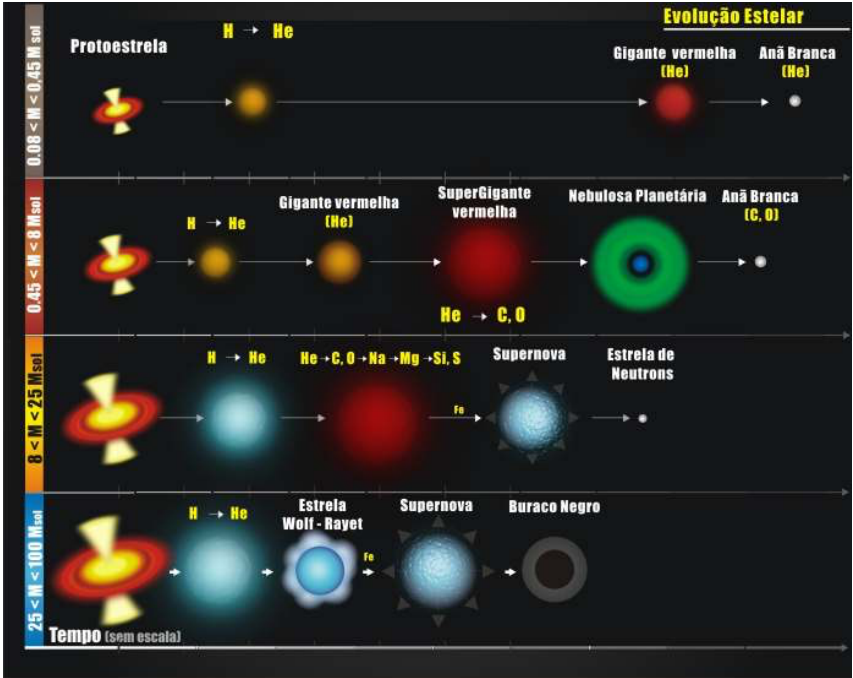


Fig. 5 - Etapas evolutivas de estrelas de diferentes massas. Em letras amarelas se acham indicados os processos de síntese de elementos químicos mais pesados a partir de elementos mais leves, que ocorrem, por fusão nuclear, no interior das estrelas. O eixo do tempo, na horizontal, se acha fora de escala: a evolução das estrelas de maior massa é muito mais rápida que as de pequena massa e todas elas passam cerca de 90% de suas vidas na fase de sequência principal, apenas realizando a fusão de hidrogênio em hélio. Fonte: [Astronomia e Astrofísica](#).

A seguir descrevemos, resumidamente, conforme descrito por Saraiva, Oliveira Filho e Muller (2014), como ocorre a evolução das estrelas após deixarem a sequência principal, dependendo de sua massa inicial.

Apenas notamos, como o fazem os autores anteriormente citados, que o destino das estrelas, depois de consumir todo o seu combustível nuclear, também depende do fato de a estrela ser sozinha, ou ter uma ou mais companheiras. No caso de estrelas sozinhas, a massa com que ela se forma determina toda a sua evolução. Para estrelas que fazem parte de sistemas binários ou múltiplos, a evolução depende tanto da massa inicial quanto da separação entre as estrelas, que determinará quando e como as estrelas interagirão durante a evolução.

No presente texto, consideramos apenas a evolução de estrelas sozinhas, que só depende da massa com que elas são formadas, conforme descrito a seguir.

Massa inicial entre 0,08 e 0,45 massas solares

Estrelas com massa entre 0,08 e 0,45 massas solares tem a evolução mais simples de todas. Elas nascem e entram na sequência

principal como anãs vermelhas, podendo permanecer trilhões de anos nesta fase, realizando a fusão de hidrogênio em hélio, mas nunca atingem temperatura alta o suficiente no núcleo para fundir o hélio. Ao final de suas vidas, elas vão passar por uma fase de gigante vermelha e, depois de esgotar seu combustível e transformar a maior parte de seu hidrogênio em hélio, acabam se tornando anãs brancas com núcleo de hélio (Fig.5).

Massa inicial entre 0,45 e 8 massas solares

Se a estrela iniciar sua vida com massa entre 0,45 e $8 M_{\text{Sol}}$ (massas solares), após consumir o hidrogênio no núcleo, passará pela fase de gigante e depois de supergigante, lançará para o espaço suas camadas mais externas, formando uma nebulosa planetária (Fig.6) e terminará sua vida como uma anã branca, um objeto extremamente denso, com massa da ordem de $0,6 M_{\text{Sol}}$, tamanho semelhante ao da Terra, mas uma densidade da ordem de 10^6 g/cm^3 , um milhão de vezes maior que a densidade da água.



Fig. 6 – [Nebulosa planetária Olho de Gato](#) (NGC 6543). Camadas externas da estrela, que se tornará uma anã branca, foram ejetadas, formando uma nebulosa planetária.

Em uma anã branca, os elétrons não se encontram mais presos aos núcleos, mas estão distribuídos entre eles, amontoados tão próximos entre si que efeitos quânticos, como o princípio da exclusão de Pauli, passam a atuar, impedindo que dois elétrons possam ocupar o mesmo estado quântico, o que força os elétrons a vibrarem tão rapidamente que geram um tipo de pressão, chamada pressão de degenerescência, que contrabalança a atração gravitacional. É essa pressão que sustenta a anã branca.

A anã branca solitária terminará aqui sua evolução. Sem mais produzir energia nuclear, só lhe resta agora a energia térmica, e ela continuará brilhando cada vez mais fracamente à medida em que for esfriando, e hipoteticamente um dia, num futuro distante, se tornará um objeto frio, denso e escuro chamado anã negra.

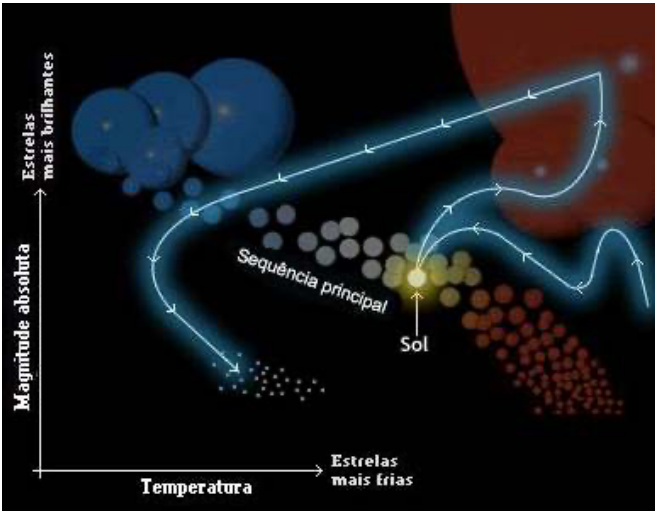


Fig.7 - Trajetória evolutiva no Diagrama H-R de uma estrela como o Sol, desde a formação até chegar à Sequência Principal (linha inferior da direita), sua evolução para gigantes e supergigantes (linha ascendente à direita) e finalmente a evolução final para anã branca (linha descendente do canto superior direito ao canto inferior esquerdo). Fonte: Saraiva, Oliveira Filho e Muller (2014, aula 20, p. 10)

Se a estrela iniciar sua vida com massa entre 8 e 25 M Sol , ela terá uma morte catastrófica. Após a fase de supergigante e a formação do núcleo de ferro, a estrela não terá mais combustível para gerar energia, pois sendo o ferro o elemento cujo núcleo apresenta a maior energia de ligação, ele não libera energia ao ser fundido, ao contrário, absorve. Desprovida de sua fonte de energia para gerar alta pressão para balançar a gravidade, o núcleo colapsa violentamente sob seu próprio peso em alguns segundos. As camadas superiores, contendo aproximadamente 90% da massa da estrela, colapsam sobre este núcleo e, após liberarem uma imensa quantidade de energia potencial gravitacional em pouquíssimo tempo, produzem uma explosão em que são empurradas para fora com velocidades de milhares de quilômetros por segundo, um fenômeno chamado explosão de supernova. Tanta energia é liberada na explosão que a estrela brilha tanto quanto todas as estrelas da galáxia juntas.

Hubble Captures Supernova's Light Echo



Vídeo 3 - Exemplo de uma explosão de Supernova que ocorreu na galáxia M82, conhecida como [SN 2014J](#) descoberta em 21 de janeiro de 2014.

Todos os elementos mais pesados do que o ferro são gerados por acréscimo de nêutrons nas explosões de supernovas. Essas explosões espalham os elementos pesados no espaço, os quais se misturam ao gás e poeira existentes nas galáxias para serem incorporados na geração de novos sistemas estelares, planetas e possivelmente seres vivos.

Depois deste espetáculo, a supernova começa a esmaecer, deixando como resíduo, se não houver disrupção total, um núcleo extremamente compacto, uma estrela de nêutrons, com uma temperatura superficial acima de 1 milhão de kelvins, massa de cerca de $1,46 M_{\text{Sol}}$, raio de cerca de 20 km e densidade de 10^{14} g/cm^3 .

Os nêutrons também obedecem ao princípio da exclusão de Pauli, mas tendo massa 2.000 vezes maior que o valor da massa dos elétrons, podem ser comprimidos a distâncias 2.000 vezes menores do que os elétrons em uma anã branca. As estrelas de nêutrons formam então um gás de nêutrons degenerados, e a pressão de degenerescência dos nêutrons impede que a estrela continue colapsando desde que sua massa final seja menor do que 3 massas solares.

Se a estrela tiver um campo magnético forte, como se acredita que a maioria das estrelas de nêutrons têm, ela emitirá radiação em dois feixes polares que varrem o espaço à medida que a estrela gira. Se a Terra estiver em uma das direções do feixe, será atingida por pulsos periódicos de radiação, e a estrela de nêutrons será detectada como um pulsar.

Massa inicial maior que 25 massas solares

Para as estrelas muito massivas, a fase de gigante e supergigante são contíguas, sem nenhum evento que marque o início da queima de hélio, do carbono, do oxigênio, do neônio, do magnésio, do silício, e assim sucessivamente, até transformar o núcleo em ferro. Durante esse estágio as estrelas passam pela fase de Wolf-Rayet em que são de brilho variável e têm um envoltório de poeira ejetado pela estrela devido à forte pressão de radiações. Quando o núcleo chega ao ferro e a estrela colapsa, ejetando a maior parte de sua massa como supernova, restará um buraco negro, com massa da ordem de $6 M_{\text{Sol}}$, e raio do horizonte de cerca de 18 km.

O raio do horizonte é o raio de uma região esférica, em torno da singularidade central onde o campo gravitacional é tão intenso que nem a luz escapa. É também chamado de raio de Schwarzschild, em homenagem a Karl Schwarzschild, que derivou o seu valor como:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Onde G é a constante da Gravitação Universal, M é a massa do buraco negro e c é a velocidade da luz no vácuo.

Essa expressão nos mostra que o raio do horizonte de eventos depende apenas da massa do buraco negro, e é diretamente proporcional a ela.

Essa, então, é a origem dos chamados “buracos negros estelares” que correspondem ao estágio final da evolução de estrelas de

Loading [Contrib]/a11y/accessibility-menu.js

grande massa inicial, maiores que $25 M_{\text{Sol}}$.

O centro do buraco negro é descrito como singularidade gravitacional – uma região onde a curvatura do espaço-tempo se torna infinita, contendo volume zero e densidade infinita. Na simulação seguinte, podemos observar um buraco negro que se encontra com uma estrela e, devido ao seu intenso campo gravitacional, absorve a matéria da estrela e forma um disco de acreção ao seu redor.

NASA | Massive Black Hole Shreds Passing Star



Vídeo 4 - Quando uma estrela vagueia próximo de um buraco negro, o intenso campo gravitacional puxa matéria da estrela para seu interior. Fonte: <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=12005>.

Resumo

As estrelas se formam em imensas nuvens moleculares imersas em nebulosas gasosas existentes nas galáxias.

A massa mínima para se formar uma estrela é de aproximadamente 10% da massa do Sol. Sendo a massa inferior a esse valor, forma-se uma anã marrom.

As estrelas situam-se na Sequência Principal enquanto estiverem transformando hidrogênio em hélio no núcleo. Quando as estrelas tiverem todo hidrogênio nuclear convertido em hélio, elas saem da Sequência Principal.

Estrelas com massa entre 0,08 a $0,45 M_{\text{Sol}}$ nunca vão chegar a fundir o hélio, vão se transformar em anãs brancas com núcleo de hélio.

Estrelas com massa entre 0,45 e $8 M_{\text{Sol}}$ se transformam em gigantes vermelhas, queimando hidrogênio em uma casca em torno do núcleo. Quando o hélio nuclear se esgota passam ao ramo das supergigantes, ejetarão uma nebulosa planetária e terminarão a vida como anãs brancas com núcleo de carbono.

Estrelas com massa entre 8 e $25 M_{\text{Sol}}$, depois de esgotarem o hélio no núcleo, fundirão o carbono e sucessivamente neônio, magnésio, silício. Com a formação do núcleo de ferro, na fase de supergigantes, não têm mais como gerar a energia por fusão e explodem como supernovas. Após a explosão a supernova começa a esmaecer e o caroço residual forma uma estrela de nêutrons.

Nas estrelas com massas maiores que $25 M_{\text{Sol}}$ as fases gigante e supergigante são contíguas. Quando o núcleo chega a ferro a estrela colapsa ejetando a maior parte de sua massa como supernova, restando daí um buraco negro.

Referências

- Stellar Evolution. Chandra X-ray Observatory, 2019.
Disponível em: https://chandra.harvard.edu/edu/formal/stellar_ev/.
Acesso em: 06, ago 2020.
- Evolução e interiores estelares. Astronomia e Astrofísica, 2019.
Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/evol/node1.htm>.
Acesso em: 06, ago 2020.
- FALCIANO, Felipe Tovar. Nós, as estrelas e o universo. Ilustríssima Física, 2019.
Disponível em: <https://www2.cbpf.br/downloads/divulgacao-cientifica/livros/Ilustrissima-fisica.pdf>.
Acesso em: 06, ago 2020.

- Evolução Estelar. Wikipédia, 2020.
Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Evolu%C3%A7%C3%A3o_estelar.
Acesso em: 09, ago 2020.
- PICAZZIO, Enos. O céu que nos envolve: Introdução à astronomia para educadores e iniciantes, 2011.
Disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/OCeuQueNosEnvolve.pdf>.
Acesso em 06, ago 2020.
- SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira; OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; MULLER, Alexei Machado. Fundamentos de Astronomia e Astrofísica para EAD.
Instituto de Física da UFRGS, 2014. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~fatima/faad.htm>.
Acesso em: 08 set 2021.
- NETO, Augusto Damineli.; JABLONSKI, Francisco José. Nascimento, Vida e Morte das Estrelas (parte 01).
Revista Brasileira de Física, 1979, Vol. 1, Ed. 2. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol01a13.pdf>.
Acesso em: 28, ago 2021.
- NETO, Augusto Damineli.; JABLONSKI, Francisco José. Nascimento, Vida e Morte das Estrelas (parte 02).
Revista Brasileira de Física, 1980, Vol. 2, Ed. 1. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol02a04.pdf>.
Acesso em: 28, ago 2021.
- NETO, Augusto Damineli.; JABLONSKI, Francisco José. Nascimento, Vida e Morte das Estrelas (parte 03).
Revista Brasileira de Física, 1980, Vol. 2, Ed. 3. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol02a28.pdf>.
Acesso em: 28, ago 2021.

® Todos Direitos Reservados. Criado com [Bootstrap](#)



Galáxias e a Via Láctea

As galáxias e a Via Láctea, morfologia e estrutura

No Universo, além de estrelas, existem corpos difusos que muito intrigaram os astrônomos. A princípio se pensava que esses objetos fossem nebulosas pertencentes à Via Láctea. Immanuel Kant (1724-1804) foi o primeiro filósofo a propor que essas nebulosas são, na verdade, outros sistemas estelares, semelhantes ao que vivemos, aos quais denominou de *universos ilhas*.



Fig.1 - [Galáxia M104](#), ou Galáxia do Sombrero, localizada na constelação de Virgem a 50 milhões de anos-luz, composta principalmente por estrelas velhas e muitas nuvens de gás e poeira entre estas estrelas.

A ideia de existência de galáxias independentes ainda era incerta no início do século XX, pois até então as distâncias e dimensões desses objetos de aparência nebulosa eram desconhecidas, e, portanto, não se podia afirmar se pertenciam, ou não, à nossa galáxia. Em 1923, Edwin Powell Hubble (1889-1953) mediu a distância de algumas nebulosas mais próximas e constatou que estavam realmente distantes, exteriores à Via Láctea. Trabalhando com um telescópio de 2,5 m de diâmetro do Observatório de Monte Wilson, Hubble conseguiu identificar estrelas individuais em várias nebulosas brilhantes em forma de espiral, incluindo a M31 (Messier 31), na constelação de Andrômeda. Após um trabalho meticuloso, ele estimou que a galáxia de Andrômeda estava a cerca de 900 mil anos-luz. A essa enorme distância, ela deveria ser uma galáxia separada, com suas próprias estrelas, localizada bem fora dos limites da Via Láctea. Na simulação abaixo vemos a localização da galáxia de Andrômeda, a galáxia espiral mais próxima da Terra.

Zooming in on the Andromeda Galaxy



Vídeo 1 - [Galáxia de Andrômeda](#), localizada a cerca de 2,54 milhões de anos-luz de distância da Terra, na direção da constelação de Andrômeda.

Morfologia e Estrutura das Galáxias

Uma galáxia é definida como um grande aglomerado gravitacionalmente ligado que compreende estrelas, remanescentes de estrelas e um meio interestelar, contendo as nuvens de gás e poeira e raios cósmicos. Tudo permeado por uma forma de matéria desconhecida, transparente à luz e invisível, que só interage gravitacionalmente com o meio. Este componente ainda desconhecido, corresponde a cerca de 85% da massa dos aglomerados de galáxias, e é denominado de *matéria escura*. No universo observável, se estima que devem existir centenas de bilhões de galáxias. Muitas delas contendo, também, centenas de bilhões de estrelas.

Como dito, existem bilhões de galáxias com formas cores e tamanhos variados, mas a maioria possui formatos bem semelhantes, o que levou o astrônomo Hubble a descrever as galáxias baseada em sua aparência visual, ou seja, em sua morfologia. A classificação de Hubble divide as galáxias em elípticas, espirais (normais e barradas), lenticulares e irregulares. A figura abaixo apresenta as formas e divisão dos principais tipos de galáxias.

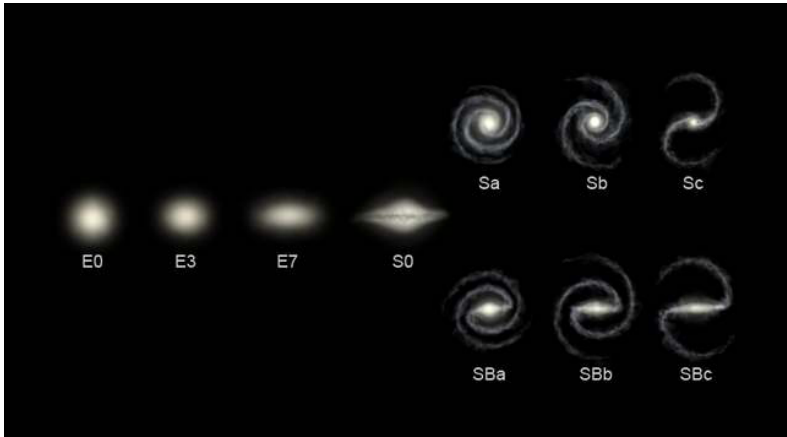


Fig.2 - [Classificação de Hubble](#). Um "E" indica uma galáxia elíptica, "S" é uma espiral e "SB" uma espiral barrada.

Começando pelas galáxias elípticas, elas são as que consistem de estrelas mais velhas, mais avermelhadas e evoluídas, que orbitam o centro da galáxia em direções aleatórias e apresentam pouca matéria interestelar. Uma gigante elíptica pode ter até $10^{13} M_{\text{Sol}}$ (massas solares), e um diâmetro de centenas de milhares de anos-luz. As galáxias elípticas anãs são as mais numerosas, e as maiores galáxias do Universo são elípticas gigantes, que se formaram devido a colisões e junções de galáxias. Devido seu formato elipsoidal, elas são classificadas segundo o seu grau de achatamento, por exemplo, na figura anterior, as que tem aparência quase esférica são definidas como E0, passando por E3 até as E7, que são as mais excêntricas e, portanto, mais achatadas.

As galáxias espirais, como Andrômeda e a Via Láctea, consistem de um bojo central contendo estrelas mais velhas, um disco giratório de estrelas mais novas, gás, poeira e braços espirais que se estendem a partir do bojo e um halo - uma região de simetria esférica que engloba o disco e onde se encontram os aglomerados globulares, compostos de estrelas mais velhas, a figura 3 abaixo apresenta esses detalhes da estrutura galáctica.

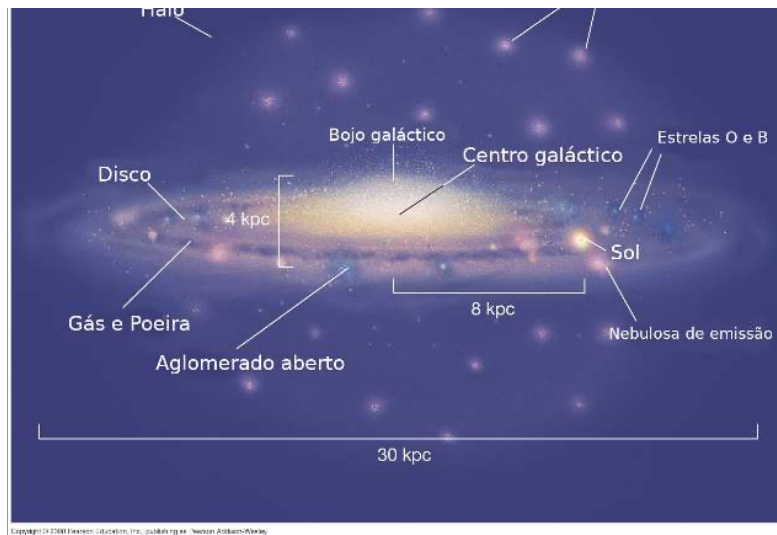


Fig.3 - Estrutura de uma galáxia como a Via Láctea com um diâmetro de aproximadamente 100.000 anos-luz (30 kpc) e espessura do disco de aproximadamente 3.000 anos-luz (4 kpc).

A massa da porção visível das galáxias espirais variam de $10^9 M_{\odot}$ a $10^{12} M_{\odot}$, com diâmetro que podem variar entre 20 000 a 100 000 anos luz. Na classificação de Hubble elas foram definidas como tipo S e subdividas entre normais e barradas, ganhando um B no nome quando mostram uma barra no centro. Outra importante característica é que essas galáxias apresentam certas diferenças entre si quanto ao tamanho do núcleo e o grau de afastamento e comprimento dos braços, seguindo assim as letras a, b e c que se referem ao grau de aperto dos braços e ao tamanho do bojo. Por exemplo, uma galáxia Sa ou SBa são galáxias com braços mais enrolados e com bojo mais brilhante, enquanto que uma Sc ou SBc tem braços mais afastados e bojos menores.

Algumas galáxias tem bojo, disco e halo mas não tem braços espirais. São as lenticulares, classificadas como S0. Possuem propriedades tanto de galáxias elípticas quanto de espirais, tendo consumido a maior parte de sua matéria interestelar. Existe ainda as galáxias que não possuem nenhuma simetria, apresentando estruturas distorcidas ou formas arbitrárias, portanto classificadas como irregulares.



Fig.4 - [Grande e Pequena Nuvens de Magalhães](#), que são galáxias irregulares, satélites da Via Láctea, localizadas a 150 e 200 mil anos-luz.

A Via Láctea

A Via Láctea, a galáxia onde se situa o sistema solar, é uma galáxia espiral barrada tipo SBc. Assim como as demais galáxias, ela é formada por estrelas, gás e poeira, isolada no espaço e mantida por sua própria gravidade. Em um céu noturno na ausência de iluminação artificial, pode ser identificada como uma faixa brilhante e difusa que corta toda a esfera celeste. Possui um diâmetro aproximado de 100 mil anos-luz, com disco de aproximadamente 2 mil anos-luz de espessura, com uma estimativa de uma quantidade entre 100 a 400 bilhões de estrelas, com mais de 100 bilhões de planetas rochosos. O nosso Sol fica situado a 27 mil anos-luz de distância do centro galáctico, na borda interna de um de seus 4 braços espirais, conhecido como braço de Órion. Na figura abaixo podemos ver alguns detalhes da faixa brilhante que vemos no céu noturno em um local com pouca iluminação artificial.





Fig.5 - [Imagem panorâmica da Via Láctea](#), cobrindo toda a esfera celeste, revelando a paisagem cósmica que rodeia o nosso planeta.

Artist's impression of the Milky Way



Vídeo 2 - [Concepção artística](#) da forma da Via Láctea quando vista a partir de perspectivas muito diferentes da que temos a partir da Terra.

A maior parte das estrelas fica localizada no disco galáctico, onde se situam os braços espirais. O disco apresenta uma grande concentração de gás e poeira, possuindo massa o suficiente para formar várias estrelas. Muitas estrelas que habitam o disco são como o Sol, mas a maioria são anãs vermelhas, que são estrelas pequenas. Poucas são supergigantes como Rígel e Betelgeuse.

A nossa galáxia possui movimento orbital em torno do centro galáctico. Logo, é fato que as estrelas de fundo que observamos, estão longe de serem fixas, é a distância em que estão que não nos deixa notar sua mudança de posição. O movimento de rotação de regiões do disco em torno do centro galáctico tem um período médio de cerca de 300 milhões de anos para uma volta completa. O Sol descreve uma órbita com velocidade de 220 km/s, com um período orbital de cerca de 225 milhões de anos. Desde de sua formação o Sol já completou 20 vezes o seu trajeto ao redor do bojo galáctico. Na figura abaixo podemos detalhar as partes e componentes de nossa Via-láctea.

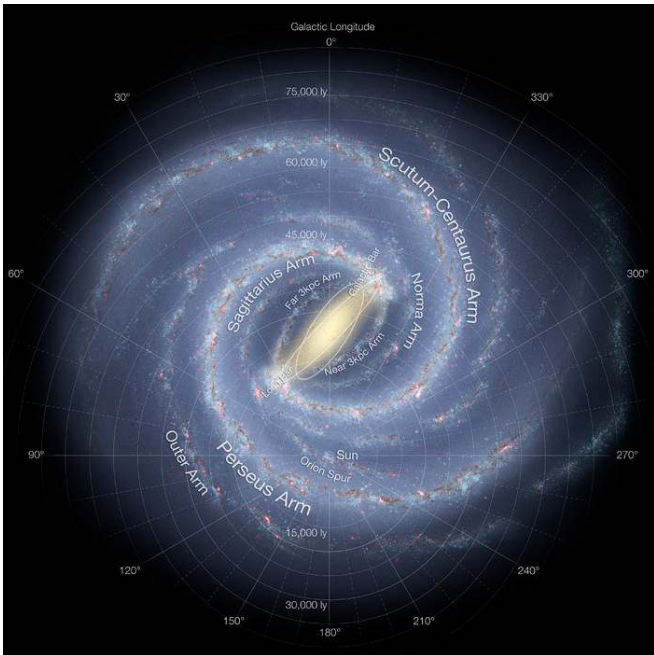


Fig.6 - [Imagem artística](#) detalhada mostrando a [estrutura da Via Láctea](#), incluindo a localização do Sol (Sun) e dos

braços espirais.

O Sol apresenta, ainda, um movimento de oscilação harmônico em relação ao plano galáctico, cruzando-o com um período entre 52 a 74 milhões de anos, com amplitude máxima entre 49 a 93 parsecs (1 parsec equivale 30,9 trilhões de quilômetros) acima ou abaixo do plano galáctico. Atualmente estamos a cerca de 15 parsecs acima do plano da Via Láctea. O período destas oscilações da órbita solar aproximadamente coincidem com eventos de extinção em massa, levantando suspeitas de que, ao cruzar regiões densas de nuvens moleculares ou dos braços espirais, perturbações gravitacionais modificariam a órbita de cometas distantes do Sistema Solar que, por sua vez, atingiam nosso planeta.

How the Solar System really moves (Update!)



Vídeo 3 - [How the Solar System really moves](#), mostra uma simulação do movimento do sistema solar incluindo o Sol e os demais objetos do sistema solar (planetas, asteroides, outros) na Via Láctea, a uma enorme velocidade de 828 000 km/h.

O bojo ou centro galáctico é a região mais proeminente da Via Láctea e o centro de rotação desta, foi a primeira parte que se formou, portanto é a parte mais velha da galáxia. É a região mais densamente povoada da galáxia com bilhões de estrelas, em sua maioria velhas, mas também contém estrelas jovens. Nessa região as estrelas apresentam velocidades cada vez maiores à medida que se aproximam do centro. Mas o que existe no bojo de uma galáxia para essa intensa atividade estelar? Tudo indica que no centro da galáxia existe um buraco negro supermassivo, com um intenso campo gravitacional que provoca essa intensa atividade estelar.

Buracos Negros Supermassivos

Diferentemente dos buracos negros estelares, os buracos negros supermassivos, que existem no centro da maioria das galáxias maiores, não surgem da evolução de estrelas de grande massa, mas são formados por imensas nuvens de gás e/ou por aglomerados de milhões de estrelas que colapsaram sobre sua própria gravidade, quando o Universo era mais denso e jovem. Buracos negros supermassivos também podem surgir a partir de buracos negros estelares que se formaram no centro de uma galáxia e foram progressivamente se fundindo, formando um buraco negro de massa entre 10^5 a $10^{10} M_{\text{Sol}}$.

A região mais interna do bojo da Via Láctea, onde foi descoberta uma intensa e compacta fonte de rádio, é denominada Sagitário A*, é uma região de grande concentração de massa, contendo várias anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros estelares. As estrelas muito próximas do centro apresentam órbitas muito fechadas, porém, ao olhar diretamente para região mais central não se vê absolutamente nada!

Observações e estudos desta região têm mostrado que o grande acúmulo de matéria e as órbitas excêntricas descritas pelas estrelas no entorno desta região indicam a existência de um intenso campo gravitacional produzido por uma massa de milhões de massas solares em uma esfera maior que a órbita de Mercúrio. Uma forte evidência de que em Sagitário A* há um buraco negro supermassivo é fornecida pelo movimento das estrelas próximas. Combinando o período de revolução destas estrelas e o tamanho de suas órbitas com a terceira lei de Kepler, é possível estimar a massa desse objeto que mantém essas estrelas orbitando em torno de si, chegando a um valor de $4.31 \times 10^6 M_{\text{Sol}}$. Logo, ao que tudo indica, a região de Sagitário A* é o local de um buraco negro supermassivo.

As estrelas S2 e S14 são as que possuem as órbitas mais fechadas da região de Sagitário A*. A estrela S2 recentemente completou uma volta em um período de 15 anos, passando pelo periélio em maio de 2018 a uma distância de 150 milhões de km a uma enorme velocidade de 8000 km/s. Na simulação abaixo podemos ver em detalhes o movimento dessas estrelas no centro de nossa galáxia.

B-roll: Artist's Impressions and Time-lapse Sequence with Real NACO Data



Vídeo 4 - Sequência de imagens reais e animações ilustrando o [movimento de estrelas](#) em torno do buraco negro no centro da Via Láctea.

Referências

- Normal Galaxies. Chandra X-ray Observatory, 2019.
Disponível em: https://chandra.harvard.edu/xray_sources/normal_galaxies.html.
Acesso em: 08, out 2020.
- Galáxias. Astronomia e Astrofísica, 2019.
Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/galax/index.htm>.
Acesso em: 10, out 2020.
- Galáxias. Wikipédia, 2020.
Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Gal%C3%A1xia>.
Acesso em: 10, out 2020.
- Via Láctea. Wikipédia, 2020.
Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Via_L%C3%A1ctea#Rota%C3%A7%C3%A3o.
Acesso em: 10, set 2021.
- PICAZZIO, Enos. O céu que nos envolve: Introdução à astronomia para educadores e iniciantes, 2011.
Disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/OCeuQueNosEnvolve.pdf>.
Acesso em 10, out 2020.

® Todos Direitos Reservados. Criado com [Bootstrap](#)



Características dos Buracos Negros

Os buracos negros e suas características físicas intrigantes!

Um buraco negro não é uma estrela, como visto anteriormente no texto sobre [Evolução Estelar](#), mas pode ser um remanescente de estrela, um dos possíveis estágios finais de uma estrela de grande massa, sendo então denominado “buraco negro estelar”. Conforme também já vimos no texto sobre [Galáxias](#), há evidências da existência de buracos negros com massa de milhões ou bilhões de massas solares localizados no centro de grandes galáxias, como a nossa, a Via Láctea, denominados “buracos negros supermassivos”. Buscando conceituar, de maneira resumida, o que é um buraco negro, podemos dizer que ele é um objeto compacto, superdenso, que produz um fortíssimo campo gravitacional e uma enorme deformação no espaço-tempo à sua volta, que não possui superfície, mas é delimitado por um horizonte de eventos, que é um ponto de não retorno, a partir do qual é possível a entrada, mas não a saída de luz e matéria.

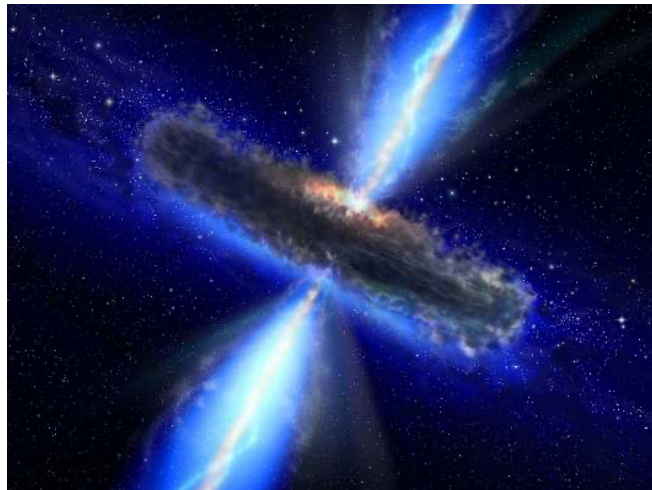


Fig.1 - [Impressão artística](#) das imediações de um buraco negro supermassivo com um núcleo ativo. Assim como em um tornado onde detritos são frequentemente encontrados girando em torno do vórtice, também em um buraco negro um disco de matéria marca as suas imediações.

Os buracos negros são uma parte importante do nosso ecossistema cósmico, mesmo sendo identificados na maioria das vezes como devoradores de estrelas e de intrépidos astronautas que ultrapassam seus limites, quanto mais aprendemos sobre eles, mais parece que devemos ficar felizes por estarem por “perto”. Por exemplo, os buracos negros supermassivos ajudam a manter a estrutura e a estabilidade das galáxias.

De fato, qualquer coisa que ultrapasse os limites de um buraco negro desaparece para sempre! Por isso não podemos vê-lo. Mas a verdade é que apenas uma parte da matéria próxima de um buraco negro é puxada para o seu interior, grande parte fica em seu entorno e só aos poucos vai entrando em seu interior, como a água quando forma um vórtice ou um redemoinho. A água nunca desce direto pelo ralo. O mesmo ocorre com o gás e a poeira que circunda um buraco negro. Se a matéria circundante não perder rotação, ela entrará em órbita em forma de disco ao redor do buraco negro, o chamado *disco de acreção*, a parte acinzentada da figura acima.

Mas o que acontece com a matéria que cai em um buraco negro? Essa pergunta pode ser melhor respondida no contexto da relatividade geral, mas podemos dizer que a matéria que cai ao *redor* do buraco negro nunca pode alcançar o próprio buraco negro, a menos que perca momento angular (rotação). Na verdade, parte da matéria que cai é expelida antes de alcançar o próprio buraco negro. Recentemente, ao observarem uma região localizada no centro da Via Láctea, denominada Sagitário A* - que é uma fonte intensa e compacta de ondas de rádio e na qual, fortes evidências indicam, existe um buraco negro supermassivo -, astrônomos perceberam a emissão de um brilho intenso, 75 vezes mais brilhante que o normal. Quando um buraco negro brilha tão intensamente assim, é o sinal de que algo pode ter chegado perto o suficiente para ser agarrado por seu forte campo gravitacional. Os buracos negros não apenas absorvem matéria, mas também, antes desta atingir o ponto de não retorno - o chamado “horizonte de eventos” -, emitem parte dela na forma de radiação. Essa matéria é expulsa pelos pólos em forma de jatos a velocidades enormes, próximas à da

luz.

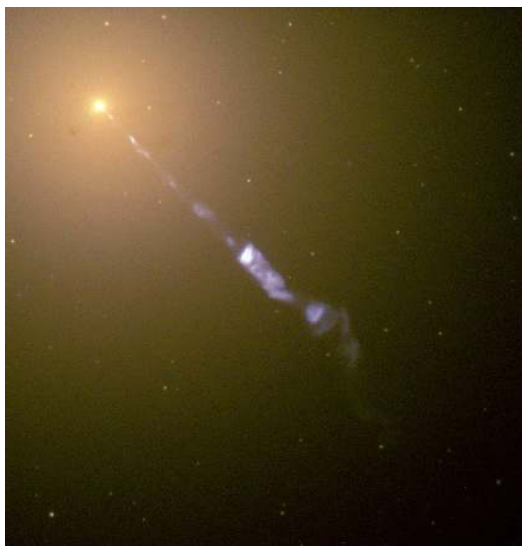


Fig.2 - [Jato de matéria](#) emitido do centro da galáxia M87, a uma velocidade próxima a da luz.

Essa ejeção de matéria pode provocar alguns efeitos adversos, principalmente no caso de buracos negros supermassivos, situados no centro de galáxias, que podem interromper o crescimento das galáxias em que se situam, pois a ejeção pode parar o fluxo de gás em direção ao centro da galáxia.

Na simulação abaixo, temos o exemplo de um buraco negro supermassivo. A simulação mostra um buraco negro rodeado por matéria luminosa. Essa matéria desaparece no buraco negro, que atua como um vórtice, mas durante a queda em espiral em direção ao buraco negro, devido ao seu imenso campo gravitacional, grande quantidade de energia potencial gravitacional é transformada em energia térmica, aumentando a temperatura desta matéria, tornando-a um plasma brilhante que emite muita energia, inclusive na forma de raios X.

Simulation of a Supermassive Black Hole



Vídeo 1 - [Simulação](#) de um buraco negro rodeado por matéria luminosa, que desaparece a medida que se aproxima do buraco negro.

Como encontrar um buraco negro?

As seguintes características podem determinar se um objeto cósmico pode ser ou não um buraco negro: Um sistema binário de estrelas onde somente uma das estrelas é visível, ou se um objeto atingir uma densidade muito grande a ponto de colapsar. No caso de sistemas binários, pode acontecer que uma das estrelas tenha um brilho muito fraco como uma anã branca e que sua companheira seja muito brilhante, ofuscando e escondendo a primeira. Logo, ser invisível não é suficiente, devemos ainda avaliar sua massa. É possível usar a terceira lei de Kepler e a órbita da estrela visível (no caso de um sistema binário ou múltiplos), para detectar a massa do objeto invisível candidato a buraco negro. Se a massa for maior que $3 M_{Sol}$ é muito provável que esse objeto seja um buraco negro. Como vimos no texto sobre [Galáxias](#), esse foi o método usado para determinar a massa do buraco negro supermassivo, Sagitário A*, no centro da Via Láctea, a partir das órbitas de estrelas ao seu redor.



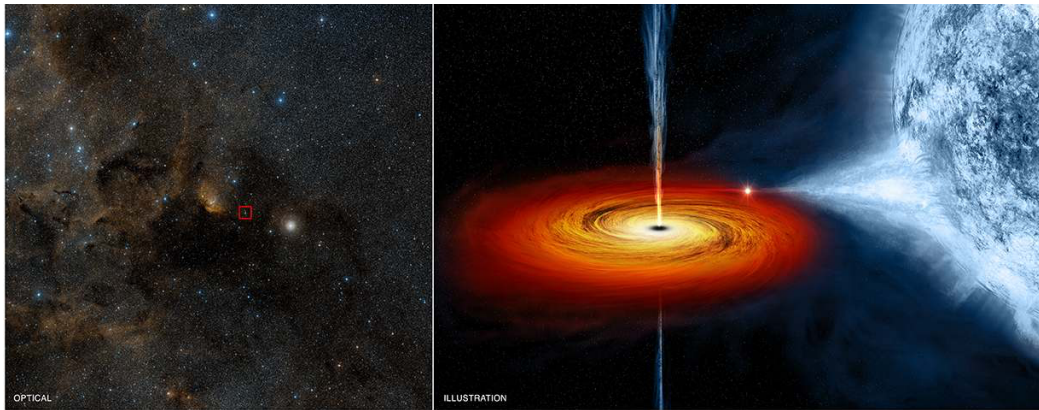


Fig.3 - Região do buraco negro de Cygnus X-1, localizado em uma das grandes regiões ativas de formação de estrela no disco da Via Láctea. Na imagem temos uma concepção artística desse buraco negro puxando matéria de uma estrela gigante azul que é sua companheira.

O primeiro objeto a ser identificado como um buraco negro foi um sistema binário de estrelas a cerca de 6.000 anos-luz, na constelação do Cisne, chamado Cygnus X-1 (o da figura 3 acima). Observações astronômicas, desde 1964, mostravam uma estrela azul supergigante orbitando um objeto compacto invisível com uma massa de cerca de 15 vezes a do Sol. Portanto, o companheiro invisível tinha muita massa para ser uma anã branca ou uma estrela de nêutrons. O buraco negro de Cygnus X-1 tem um raio de 44 km e está rodeado por um fino disco de matéria que se estende de forma concêntrica por quase 15 mil km.

Recentemente em abril de 2019 foi divulgada a imagem de um buraco negro na constelação de Virgem a 53 milhões de anos-luz da Terra, no centro de uma galáxia elíptica chamada de Messier 87 (M87), uma das mais massivas do Universo. A imagem foi obtida por meio de um consórcio chamado EHT (Event Horizon Telescope), formado por uma rede global de radiotelescópios, com oito telescópios nos quatro continentes, que transformaram o planeta Terra em um grande detector. Este consórcio conseguiu acumular dados suficientes durante dois anos para formar a imagem do buraco negro desta galáxia. É uma galáxia dominante em seu aglomerado de galáxias, se destacando através de um jato de matéria que se estende por mais de 5.000 anos-luz (Fig.2), emitindo intensa radiação, sinal de um buraco negro ativo.

A galáxia M87 possui mais que o dobro do diâmetro da Via Láctea, aproximadamente 240 mil anos-luz. É uma das galáxias mais massivas do Universo, com cerca de 200 vezes a massa da Via Láctea, porém ela está 2.000 vezes mais distante do que o centro da Via Láctea. Então, qual a razão para a galáxia M87 ter sido escolhida para a primeira imagem de um buraco negro? O motivo, apesar de simples, tem influência de uma série de fatores, mas basicamente é o tamanho do horizonte de eventos do buraco negro da galáxia M87, que é cerca de 20 bilhões de km, enquanto o de Sagitário A* é de 44 milhões de km. Isso influencia diretamente no tamanho angular da região central da galáxia, para quem as observa aqui da Terra. Quando comparados, o tamanho angular de Sagitário A* é 1.6 vezes menor que o do buraco negro da galáxia M87. Na simulação abaixo vemos detalhes da imagem produzida, e uma comparação do tamanho deste buraco negro em relação ao sistema solar.

Zoom In On Galaxy M87



Vídeo 2 - [Galáxia M 87](#) com imagens no visível e em raios-X.

Características físicas dos buracos negros

Já sabemos como que os buracos negros surgem, tanto os estelares quanto os supermassivos, agora vamos descobrir um pouco

Imagem superior do disco
Produzida devido ao efeito de 'lenteamento gravitacional' da parte superior do disco, atrás do buraco negro.

Anel de fótons
Formado por múltiplas imagens distorcidas do disco, ficando mais traco e fino a medida que se aproxima do buraco negro.

Sombra do buraco negro
Região com o dobro do horizonte de eventos, que é formada pela ação do buraco negro como lente gravitacional e da captura de raios de luz.

Brilho Doppler
Parte clara e brilhante do disco que se deve ao 'desvio para o azul' pois se movimenta na direção do observador.

Disco de Acreção
Formado de gás e poeira que está espiralando em direção ao buraco negro.

Imagem inferior do disco
Produzida devido ao efeito de 'lenteamento gravitacional' da parte de baixo atrás do buraco negro.

Começando pelo disco de acreção, ou de acréscimo, é uma parte do entorno do buraco negro que existe quando há matéria que foi capturada pela gravidade do buraco negro e está orbitando em torno dele. Se trata de um disco plano composto de gás e poeira, cuja visão pode ser distorcida por um efeito de lente gravitacional produzido pela forte gravidade do buraco negro, que, como uma lente, desvia a trajetória dos raios de luz, permitindo ver a parte do disco que está atrás do buraco negro (Fig. 4). O disco de acreção se encontra em movimento orbital, seguindo uma trajetória em espiral em torno do buraco negro, até ser absorvido por ele. O gás da parte interna do disco, devido à forte gravidade do buraco negro, o orbita com velocidades muito altas, convertendo energia potencial gravitacional em energia cinética e esta em energia térmica, devido ao atrito com outras partículas, aquecendo o disco interno a temperaturas que podem chegar a milhões de kelvins, nas quais emite grande quantidade de energia na forma de radiação eletromagnética, inclusive raios X, como é o caso de Cygnus X-1, que pode ser detectada por telescópios.

Ainda temos a esfera de fótons e/ou anel de fótons, é uma esfera de luz composta por múltiplas imagens distorcidas do disco. A luz que compõem essas imagens orbitou o buraco negro duas, três ou mais vezes antes de escapar para o observador.

E por fim a singularidade gravitacional, a região onde a curvatura do espaço-tempo é infinita, possuindo volume zero e contendo toda massa do buraco negro, e portanto uma densidade infinita. Ao atingir a singularidade, o objeto é esmagado pela densidade infinita e adicionado à massa do buraco negro. Uma vez que se cruza o horizonte de eventos tudo vai para a singularidade.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{R}$$

22/04/2022 18:55

$$v_e = \sqrt{\frac{2MG}{R}}$$

Para um buraco negro, a distância R a partir da qual nem a luz conseguiria escapar, que seria o seu raio de Schwarzschild, corresponderia à distância r_S na qual a velocidade de escape v_e seria a própria velocidade da luz c . Fazendo então $v_e = c$ e $R = r_S$ na equação anterior e isolando r_S , obtemos:

$$r_S = \frac{2GM}{c^2}$$

Esse é o raio limite, a partir do qual a luz consegue escapar de um buraco negro de Schwarzschild com velocidade c . Mesmo assim, quando a luz escapa de um buraco negro a partir de uma região próxima, mas antes do seu horizonte de eventos, ela sofre um desvio para o vermelho devido ao forte efeito da gravidade, ou seja, a luz visível que foge do buraco negro é avermelhada, depois que ela percorre uma trajetória curva nos limites do horizonte de eventos, apresenta uma frequência menor (na simulação abaixo, essa parte seria o anel de fótons).

Visualization: A Black Hole Accretion Disk



Vídeo 3 - O [vídeo simula](#) um observador distante, olhando acima do plano do disco de acreção - a parte avermelhada circundante. Em torno do buraco negro central, pode ser observada uma fina circunferência separada do disco de acreção, marcando a posição da esfera de fótons, dentro da qual fica o horizonte de eventos. A parte que fica mais brilhante a esquerda (parte mais avermelhada), se deve ao fato de estar mais próxima do observador, e circulando em sua direção. Conforme a simulação continua, é possível visualizar por cima do buraco negro e por baixo, passando pelo plano do disco no lado oposto e retornando ao ponto de vista original.

Referências

- PICAZZIO, Enos. O céu que nos envolve: Introdução à astronomia para educadores e iniciantes, 2011.
Disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/OCeuQueNosEnvolve.pdf>.
Acesso em 03, out 2020.
- Buracos Negros. Wikipédia, 2020.
Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Buraco_negro.
Acesso em: 10, ago 2020.
- Messier 87. Wikipédia, 2020.
Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Messier_87.
Acesso em: 10, ago 2020.
- Key Science Objectives. Event Horizon Telescope, 2020.
Disponível em: <https://eventhorizontelescope.org/science>.
Acesso em: 10, ago 2020.
- The truth and lies about black holes. Chandra X-ray Observatory, 2019.
Disponível em: https://chandra.harvard.edu/resources/flash/lies_about_blackholes.html.
Acesso em: 06, ago 2020.
- NETO, Augusto Damineli.; JABLONSKI, Francisco José. Nascimento, Vida e Morte das Estrelas (parte 03).
Revista Brasileira de Física, 1980, Vol. 2, Ed. 3. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol02a28.pdf>.

Universo observável e a Primeira imagem de um buraco negro

A escala do Universo e a formação da primeira imagem de um buraco negro.

Por muito tempo se pensava que o universo era o Sol, os planetas conhecidos e as estrelas visíveis, mas com os estudos da astronomia e o uso de instrumentos de observação, o Universo se revelou muito maior do que imaginávamos. A primeira imagem de um buraco negro foi um verdadeiro desafio *Astronômico*, com apenas uma telescópio seria impossível de captar luz de um objeto tão remoto e desafiador, a solução foi usar o próprio planeta Terra para conseguir obter a imagem de um objeto tão distante de nós.

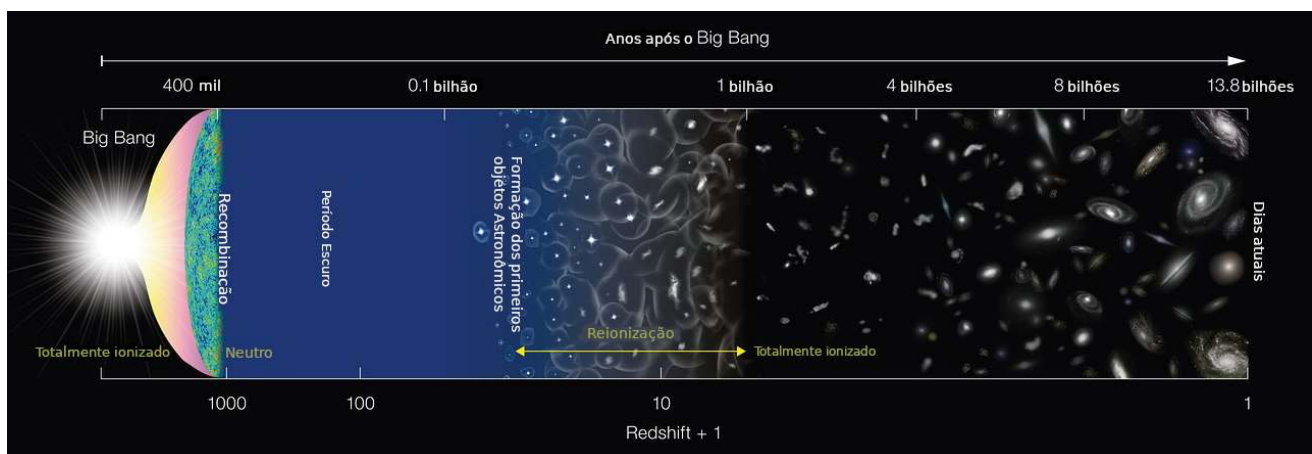


Fig.1 - [Diagrama da evolução do Universo](#) desde o Big Bang, há cerca de 13,8 bilhões de anos atrás. O Universo estava num estado neutro 400 mil anos após o Big Bang e assim se manteve até que a radiação emitida pela primeira geração de estrelas começou a ionizar o hidrogênio. Após várias centenas de milhões de anos, o gás do Universo encontrava-se completamente ionizado.

O tamanho do Universo ainda é assunto de pesquisa no meio cosmológico. Se o Universo for infinito faz mais sentido falarmos em Universo observável. E para expressar o seu tamanho neste caso, devemos fazer o produto da velocidade da luz pela idade do Universo, que corresponde a aproximadamente 13.8 bilhões de anos-luz. Ou seja, a luz que vemos hoje do objeto mais distante que conseguimos observar, foi emitida há quase 14 bilhões de anos no passado.

Fica claro então que para medir distâncias astronômicas não podemos simplesmente utilizar das grandezas e parâmetros que dispomos no dia-dia, ou seja na nossa escala. Algumas unidades próprias foram definidas para ser utilizada na escala cósmica. Por exemplo, o ano-luz, como já citado é a distância que a luz leva pra percorrer em um ano. Calculando quantos segundos há em um ano e multiplicando pela velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 m/s$), encontramos o valor do ano-luz em metros, que é de aproximadamente $9.5 \times 10^{15} m$.

Outra notação bastante utilizada é a unidade astronômicas (UA), é mais específica para medidas e comparações do sistema solar. É uma unidade de distância que leva em conta a distância média entre a Terra e o Sol, ou seja, aproximadamente 150 milhões de km. Por exemplo a distância média do Sol até Marte é de 1.5 UA, de Jupiter é cerca de 5 UA, enquanto o planeta mais distante Netuno fica a aproximadamente 30 UA.

Uma unidade de medida similar a do ano-luz é o *parsec* (pc), que leva em conta a paralaxe de um segundo de arco. Sendo a paralaxe a alteração da posição aparente de um objeto devido o movimento do observador. A medição da paralaxe leva em conta o movimento orbital da Terra, por exemplo, uma única estrela é observada em julho e janeiro, de modo que o cateto da base tenha um comprimento de 1 UA. Como as estrelas estão muito longe, os ângulos formados são muito pequenos. Da figura 2 a tangente do ângulo em p é aproximadamente o próprio p , e por isso a distância até a estrela próxima pode ser deduzida como $d = \frac{1UA}{p(rad)}$. Um parsec (1 pc) tem 206265 UA equivalente a 3.3 anos-luz, cerca de $3 \times 10^{16} m$.

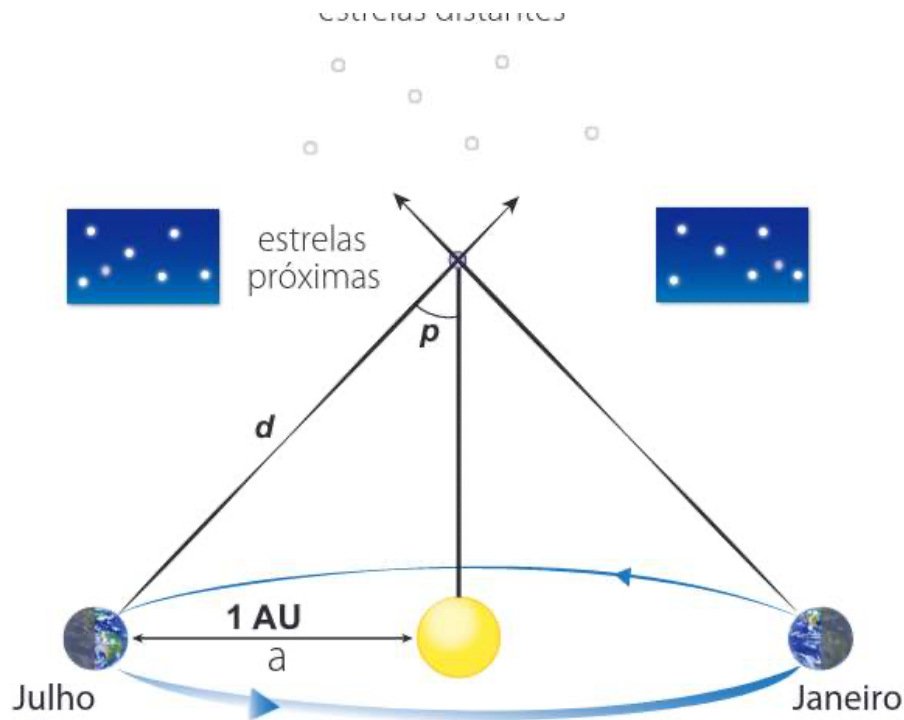


Fig.2 - Observações de uma mesma estrela feitas em janeiro e em julho, de forma que a linha de base tenha um comprimento de duas UA. Essa geometria é utilizada para se medir a paralaxe da estrela.

Um outro fato importante é a distribuição de matéria no universo, mesmo sendo isotrópico, ou seja, qualquer direção que se olhe possui a mesma aparência, a matéria no Universo não é distribuída aleatoriamente. A distribuição de matéria é definida pela distribuição de galáxias em grandes escalas, pois estas se organizam em grupos. No vídeo abaixo vemos uma simulação da escala e estrutura do Universo observável partindo da Terra até os grandes aglomerados de galáxias.

The Known Universe by AMNH



Vídeo 1 - Simulação do Universo conhecido, partindo da Terra até a formação do mapa do Universo observável.

O Universo observável compreende toda matéria que pode ser observada da Terra, ou do espaço pelos telescópios, possui uma forma esférica, podendo conter até 2 trilhões de galáxias, que por sua vez, pode abrigar até 100 trilhões de estrelas, muitas delas semelhante ao Sol. Só a nossa galáxia, a Via láctea, pode conter mais de 160 bilhões de planetas. Para compreendermos melhor o Universo precisamos ir cada vez mais longe no espaço, e o desafio está em construir ferramentas e instrumentos de observação cada vez melhores e precisos.

A primeira imagem de um buraco negro

Recentemente em abril de 2019 foi divulgada a imagem de um buraco negro na constelação de Virgem a 53 milhões de anos-luz da Terra de uma galáxia elíptica chamada de *Messier 87* (M87), uma das mais massivas do Universo. A imagem foi obtida através de um consórcio global de telescópios chamado EHT (Event Horizon Telescope). É uma rede global de rádios telescópios, que usa a Terra

formado por oito telescópios nos quatro continentes que acumularam dados suficientes durante dois anos para formar

Processing math: 100%

a imagem do buraco negro desta galáxia. É uma galáxia dominante em seu grupo de aglomerados, se destacando através de um jato de matéria que se estende por mais de 5000 anos-luz. Na simulação abaixo vemos os pontos onde os telescópios do EHT estão localizados e interconectados, formando um “telescópio” do tamanho da Terra.

The EHT, a Planet-Scale Array



Vídeo 2 - [Locais dos telescópios](#) do consórcio EHT.

Na imagem abaixo vemos os telescópios que trabalharam conjuntamente para formar a imagem do buraco negro da galáxia M87. Como dito, estes telescópios estavam espalhados pelo planeta, mas em lugares estratégicos, para captar a luz (radiação) do buraco negro de M87. Conforme vemos a imagem, os oito telescópios estão em seis localidades: o ALMA e o APEX estão no deserto de Atacama, no Chile; o IRAM na Espanha em Sierra Nevada; o JCMT e o SMA ficam no Havaí; o LMT fica no vulcão de Sierra Negra no México; o SMT, no Arizona EUA; e o SPT na Estação do Polo Sul, na Antártida.

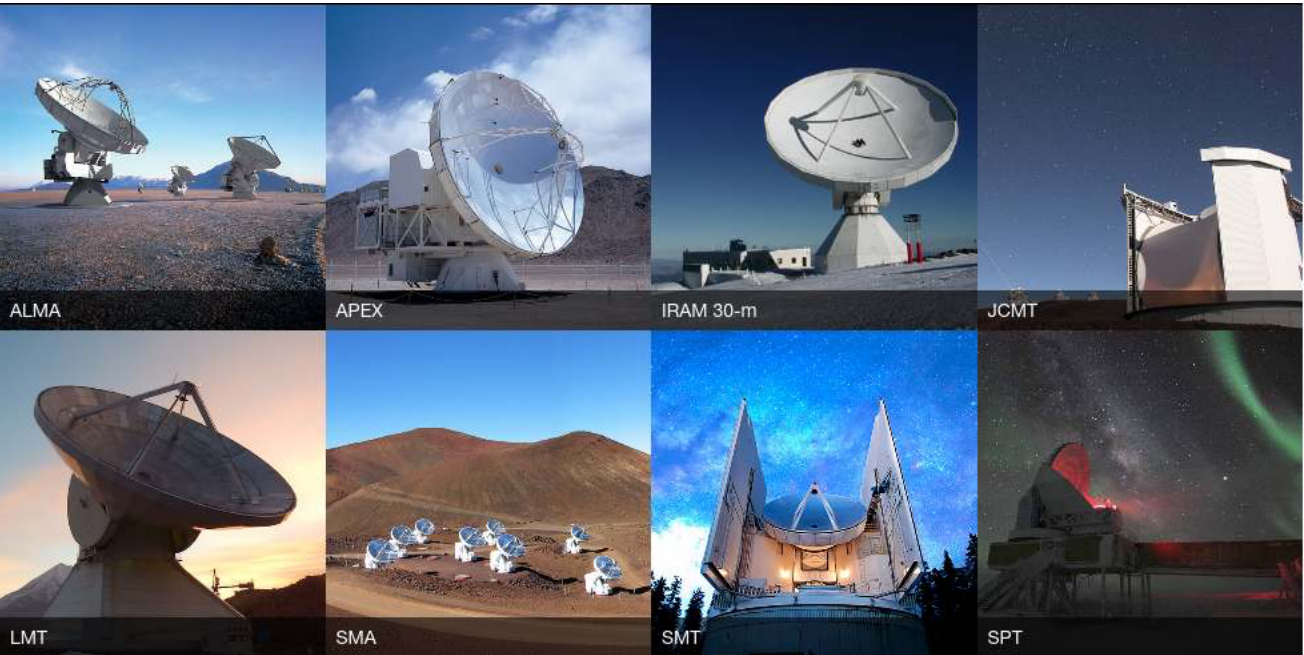
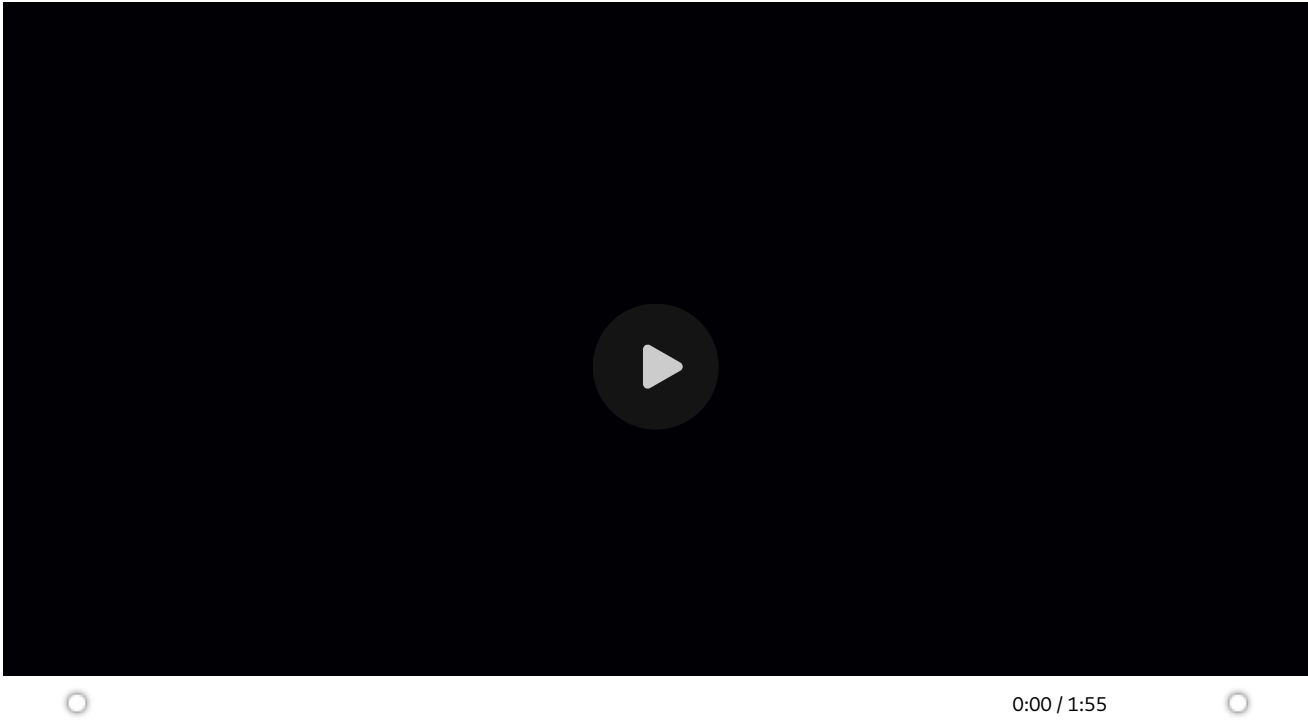


Fig.3 - [Observatórios](#) dos oito telescópios que compõe o consórcio EHT.

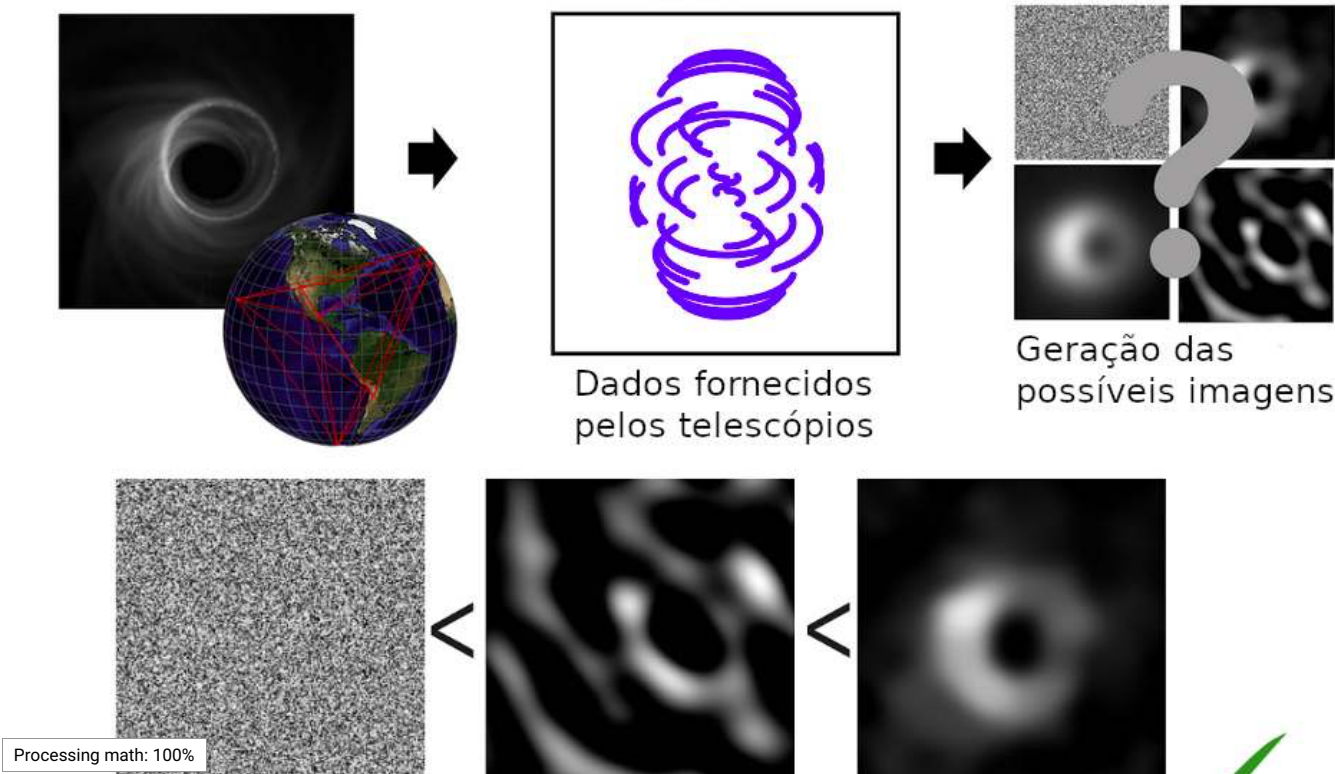
A necessidade dessa estrutura, se deve o fato de que o buraco negro da galáxia M87 fica 2000 vezes mais distante da Terra do que o centro da Via Láctea, que apesar disso, ou seja, do buraco negro do centro da nossa galáxia estar mais próximo, uma grande concentração de gás e poeira impede a luz de chegar até a Terra, prejudicando as observações de seu núcleo. Logo, o único problema em relação ao buraco negro da galáxia M87 seria a distância, e para isso precisaria construir um telescópio do tamanho do planeta, que foi possível através do consórcio EHT.



Vídeo 3 - A [Simulação](#) mostra as distâncias em escala a partir da Terra até o Sol (149 600 000 km), do Sol até o centro da Via Láctea (25 600 ano-luz) e do centro da Via láctea até a galáxia M87 (54,8 milhões de ano-luz).

Este conjunto de telescópios conectados entre si, revelou a primeira evidência visual direta de um buraco negro supermassivo. Cada telescópio coletou parte da luz (radiação) vinda do buraco negro dando indicação de parte de sua estrutura, é como um quebra-cabeça onde cada telescópio monta parte da imagem. Porém, como essa luz é coletada de alguns locais da Terra, não é possível formar a imagem completa juntando todos os dados coletados, ou seja, faltam peças neste quebra-cabeça. Para isso foi desenvolvido um algoritmo que preenche as lacunas que faltam para formar a imagem do buraco negro. A figura 4 mostra a geração das possíveis imagens a partir dos dados coletados fornecidos pelos telescópios.

Para a escolha da imagem é feito uma limpeza que elimina dados indesejados como as interferências de rádios-comunicação terrestre, relâmpagos, ruídos gerado pelos telescópios entre outros. A partir daí várias imagens são geradas e comparadas como mostra a figura 4. Selecionam-se as imagens mais coerentes com as medições feitas pelos telescópios, e o algoritmo matemático preenche as lacunas reconstruindo a imagem até obter a imagem mais razoável de acordo com os dados fornecidos.



Limpeza e seleção da imagem



Fig.4 - Formação da [primeira imagem](#) de um buraco negro a partir dos dados coletados pelos telescópios e a reconstrução da imagem pelo algoritmo matemático.

Em março de 2021, os astrônomos revelaram campos magnéticos na primeira imagem do buraco negro, medindo a polarização da radiação emitida, ou seja, mostrando a direção da onda eletromagnética na imagem do buraco negro. Essas medidas são fundamentais para explicar os jatos de matéria lançado pelo buraco negro para fora da galáxia M87, e também explicar a interação entre matéria em volta no disco e a que está sendo ejetada pelo buraco negro.

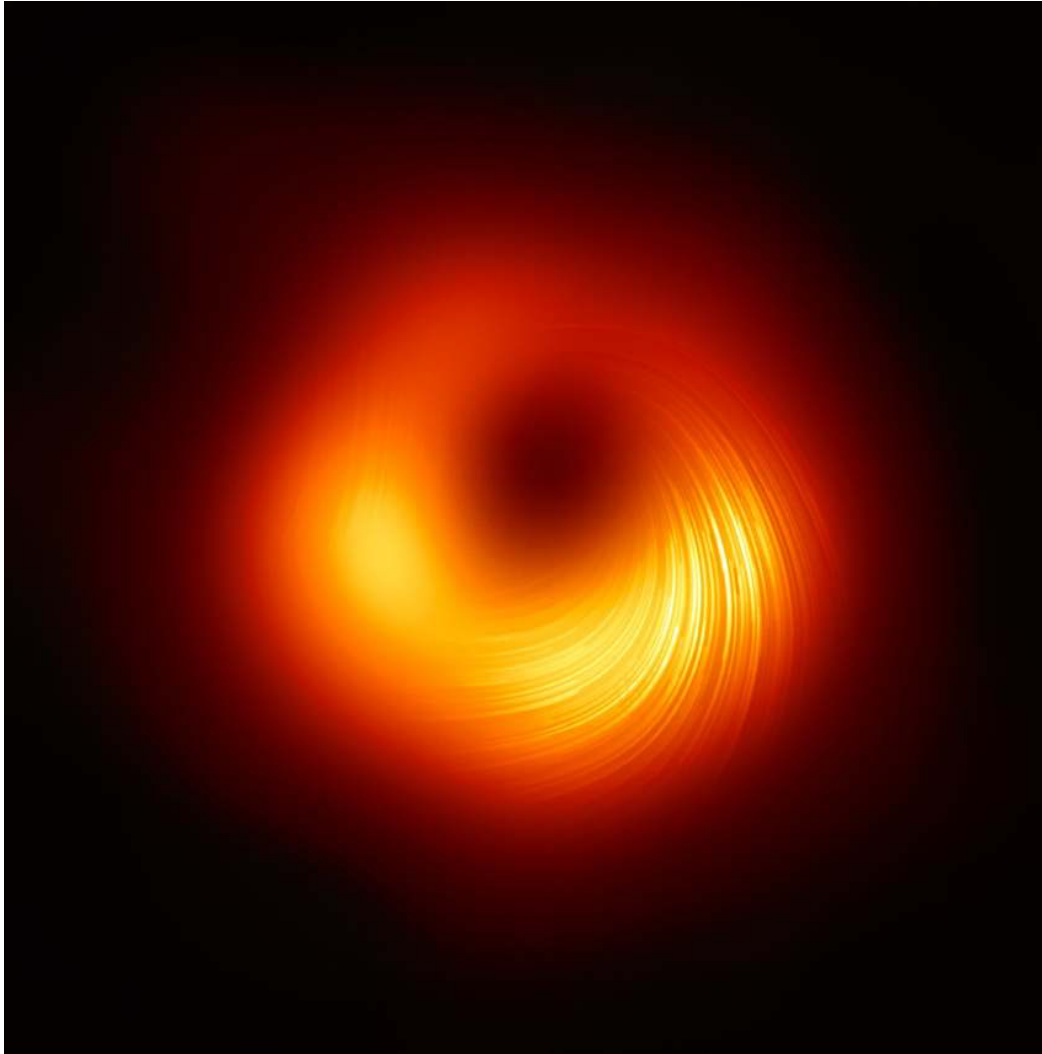


Fig.5 - A primeira imagem de um buraco negro em [luz polarizada](#) mostrando a interação entre a matéria do disco de acreção fluindo em volta da parte escura.

Referências

- PICAZZIO, Enos. O céu que nos envolve: Introdução à astronomia para educadores e iniciantes, 2011.
Disponível em: <http://www.astro.iag.usp.br/OCeuQueNosEnvolve.pdf>.
Acesso em 11, jan 2022.
- MATSUURA, Oscar T. Primeira imagem de um buraco negro, 2020.
Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/astrofisica/article/view/31781>.
Acesso em 11, jan 2022.
- Key Science Objectives. Event Horizon Telescope, 2020.
Disponível em: <https://eventhorizontelescope.org/science>.
Acesso em: 10, jan 2022.

ANEXO B – Exemplo de Apresentação das aulas

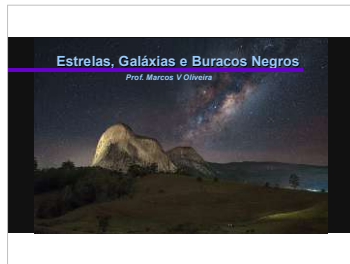


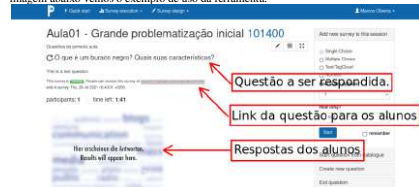
Imagem: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Pedra_Azul_Milky_Way.jpg>



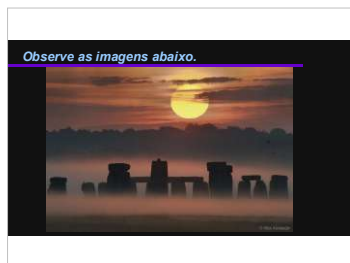
➤ Etapa/Momento - Grande problematização inicial

A primeira questão deve iniciar a problematização e promover debate/discussão, sobre a imagem – Aqui o professor deve induzir os alunos à resposta correta antes de seguir para as outras questões – Então os alunos individualmente devem escrever suas respostas no Pingo.

1. As questões seguintes desse momento devem ser feitas/coletadas pelo Pingo. Portanto, após apresentadas aos alunos para discussão em grupo, eles devem responder também individualmente no Pingo.



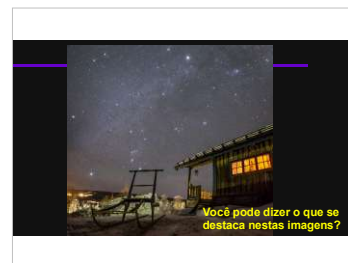
2



Aula o Sol e as estrelas – Grande organização do conhecimento –
Problematização inicial:

- Figura 1: <<https://apod.nasa.gov/apod/ap210620.html>>

Inicia a aula com essas imagens e alguns comentários sobre essas imagens e então seguir para as questões de problematização inicial no próximo slide.



Aula o Sol e as estrelas – Grande organização do conhecimento –
Problematização inicial:

- Figura 2: <<https://apod.nasa.gov/apod/ap190117.html>>

4

- Existe alguma semelhança entre o Sol e as estrelas? Se existir, qual(is) seria(m)?
- Que diferença(s) existe(m) entre o Sol e as estrelas?
- De onde vem a **energia** que faz o Sol brilhar?
- Será que um dia o seu **brilho** pode acabar?
- E as estrelas, de onde vem o seu brilho?

➤ Nesta parte da SD o Professor deve primeiro fazer a coleta das questões com o software Pingo (Pode ainda deixar os alunos conversarem um tempo antes da coleta) sem dar nenhuma resposta, apenas indagando.

➤ Coletada respostas, promover um breve debate (sem dizer se as respostas estão certas ou erradas, e seguir para o vídeo do próximo slide).

5

Como brilha o Sol?



Video <<https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=11168>>

1) O professor aqui deve fazer uma síntese sobre a simulação, falar o que está acontecendo com o Sol, quando isso aconteceu, mas sem falar ainda da relação entre o Sol e as outras estrelas (os alunos devem descobrir a relação correta entre o Sol e as estrelas através da tarefa de leitura!).

2) Em seguida, após a leitura do texto O Sol e as estrelas (<<https://sidereus-nuncius.github.io/blog/o-sol-nossa-estrela-modelo/>>), vem a coleta das palavras do texto que os alunos não conhecem ou não sabem explicar. Novamente esta coleta deve ser feita com o software Pingo, apresentando no quadro os destaques dos alunos para início da sistematização do professor.

6

O Sol e as estrelas?

A diferença que existe entre o Sol e as estrelas é a **distância**. "Todas compartilham das mesmas propriedades básicas... uma imensa liberação de energia, que as faz brilhar, devido a **reações nucleares de fusão de núcleos atômicos**"

A estrela **mais próxima** fica na constelação do centauro a 4,3 anos-luz ~ 4.0×10^{13} km.

➤ Slide a ser apresentado após tarefa de leitura e coleta dos destaques da leitura.

7

O Sol e as estrelas!

A estrela **mais próxima** fica na constelação do centauro a 4,3 anos-luz ~ 4.0×10^{13} km.

Pioneer ~ 40 mil km/h → mais de 100 mil anos para chegar!



➤ Continuação slide anterior.

Imagem: <<https://www.eso.org/public/brazil/images/eso1629b/>>.

8

Para compreendermos como o Sol e as estrelas geram energia e produzem luz a partir **reações nucleares**, devemos levar em conta as principais etapas:

- Formação
- Produção de energia
- Equilíbrio de forças
- Características evolutivas

➤ Continuação da sistematização do professor.

9

Nuvem molecular – Sol e demais estrelas

Grande concentração de gás e Matéria:

- Composta por mais de 110 moléculas atômicas resultante de uma supernova.
- Principalmente de H e He
- Se acumulam em grande quantidade (milhares de massas solares)
- Instabilidade gravitacional

Condensações densas e frias – **glóbulos moleculares**:

- Fragmentos esféricos com 1 ano-luz de extensão
- Surgimento de Forças – **EQUILÍBRIO HIDROSTÁTICO**

➤ Sistematização sobre equilíbrio de forças.

10

Região de concentração de gás e poeira.



Com cerca de **16 anos-luz de extensão** e uma massa de **300 massas solares**

Link vídeo <https://www.youtube.com/watch?v=PQpNb_yJVE&feature=emb_rel_end>

Nuvem molecular nebulosa cabeça de cavalo, localizado no cinturão de Órion (3 Marias).

➤ Neste vídeo é apresentado uma região de formação/nascimento de estrelas.

11

Nebulosa de Órion

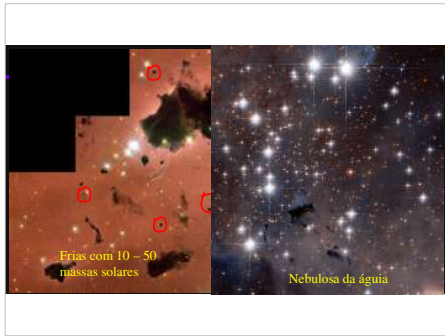
1500 anos-luz, com uma enorme concentração de gás e poeira que mostra como as estrelas nascem



➤ Imagem: <<https://www.eso.org/public/brazil/images/eso1625a/>>

➤ Vídeo Zoom Nebulosa de Órion: <<https://www.youtube.com/watch?v=IMO595LRh74&t=40s>>

12



➤ Nestas imagens é apresentado os glóbulos e as estrelas nascentes.

13

Surgimento de forças e início das reações

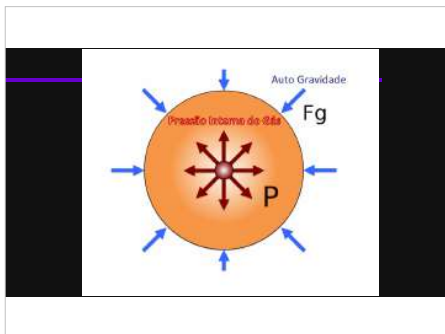
- * Glóbulos densos formados de H ganham **massa**
- * Surge uma força em direção ao centro
 - O glóbulos se contrai → **Energia potencial** → **Energia cinética** → **Energia térmica**
 - Colisão das moléculas de H → Aumento da **temperatura interna** => **Aumento da pressão interna**
 - Surge uma pressão que se opõe à contração da estrela pela autogravidade.

➤ Explicação de como a queda em direção ao centro faz aumentar a temperatura e a pressão no núcleo, freando o colapso gravitacional da estrela.

➤ Se a massa da estrela for maior ou igual a cerca de 10% da massa do Sol, a temperatura no interior da estrela chegará a 8 milhões de Kelvins, dando início a reações termonucleares, de fusão de hidrogênio em hélio, que irão manter uma alta temperatura e pressão no interior do núcleo da estrela, conseguindo estabelecer um estado de equilíbrio hidrostático.

➤ <https://pt.wikipedia.org/wiki/G%C3%B3lulo_de_Bok>

14



➤ A imagem ilustra o equilíbrio (hidrostático) que irá ocorrer entre a auto gravidade e as forças geradas pela alta pressão interna.

➤ <<http://www.if.ufrgs.br/~fatima/fis2010/Aula20-132.pdf>>

➤ <https://pt.wikipedia.org/wiki/Equil%C3%ADbrio_hidrost%C3%A1tico>

15

Duas coisas podem ocorrer

Dependendo da temperatura interna e da massa do glóbulos

1. Se o Peso for maior que a pressão interna
 - Reações **termonucleares** são ativadas
 - ~ **30 milhões de anos** → surge **Protoestrela**
 - Não consome todo o glóbulos → **sistemas planetários**
 - Estrelas acima de $10 M_{\text{solares}}$ ~ 160 000 anos → consome todo o glóbulos
2. Se a pressão interna vencer (**empuxo**)
 - O glóbulos se desfaz lançando matéria no espaço.

Video <https://youtu.be/U_jFrWm_ers> - Neste vídeo é apresentada uma protoestrela de características semelhantes ao do Sol.

16

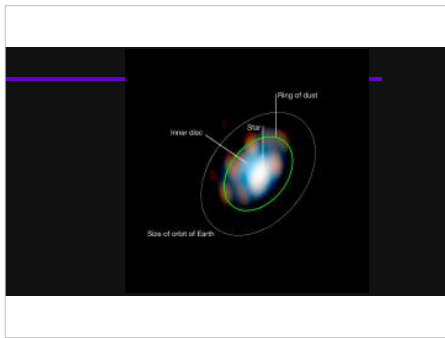
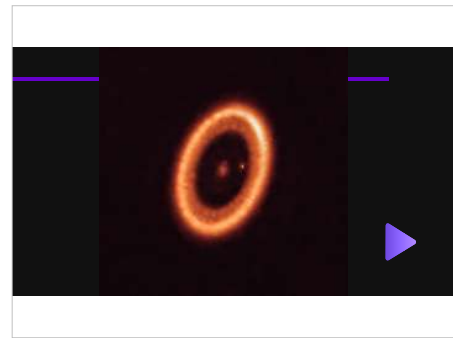


Imagem no visível de uma protoestrela e imagem artística de um disco protoplanetário:

<<https://www.eso.org/public/brazil/images/ann1058b/?lang>>

<<https://www.eso.org/public/brazil/images/eso1619b/?lang>>

17



> Imagem de um disco protoplanetário com a formação de um planeta e lua:

<

<https://www.almaobservatory.org/en/press-releases/astronomers-make-first-clear-detection-of-a-moon-forming-disc-around-an-exoplanet/>

>

> Vídeo simulação: <

<https://www.youtube.com/watch?v=ZmUCm1O1vuY&t=34s>

18

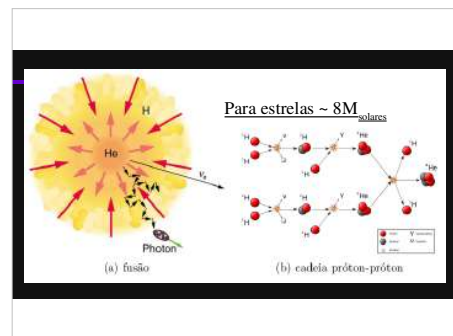
E as reações no núcleo?

Produção de energia

- * O H é o responsável → início do processo de fusão
- * Átomos de H (prótons) se fundem → liberação de **energia** e formação de um **elemento químico (He)**
- * A temperatura interna aumenta:
 - > 15 milhões de K para Sol
 - > 500 milhões de K para estrelas massivas
- * A estrela se contrai e estabiliza → **Sequência principal!**

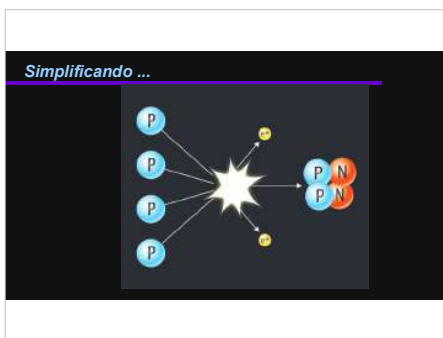
> Neste slide apresenta as reações que ocorrem no núcleo das estrelas jovens em formação.

19



> Diagrama da cadeia próton-próton

20



21



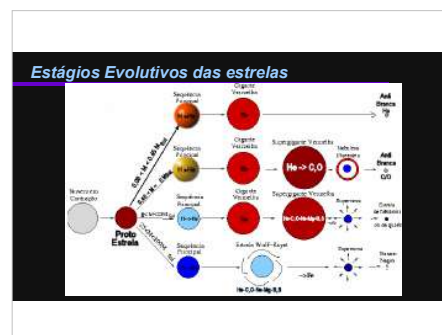
- Aqui será feito o estudo do diagrama H-R, destacando a vida adulta das estrelas e como elas se distribuem e são classificadas neste diagrama, de acordo com sua temperatura superficial (cor) e luminosidade (usando como unidade a luminosidade solar).
- A cor está relacionada com a temperatura
- A luminosidade corresponde a potência luminosa (energia luminosa por unidade de tempo) emitida pela estrela em todas as direções.
- Sabendo a luminosidade da estrela, comparada à do Sol (usada como unidade), e sua temperatura (cor), identificamos sua posição no diagrama e sua classificação (como estrela de sequência principal, gigante, supergigante ou anã branca).

22



- Este é o exemplo de como encontrar uma estrela no diagrama. O professor deve então fazer um exemplo e encontrar a posição da estrela no diagrama utilizando as informações de temperatura e luminosidade da Wikipédia.
- Após este exemplo, vem a etapa de *Primeira elaboração*, onde os alunos farão uma atividade de identificar estrelas no diagrama como apresenta no texto da sequência de ensino.
- Seguindo o texto da sequência de ensino, a próxima etapa é de *função da elaboração e compreensão conceitual*, onde será apresentado um infográfico dos estágios evolutivos das estrelas, seguido das questões que estão nesta etapa da sequência de ensino.

23



- Este infográfico deve ser apresentado para que os alunos respondam às questões da etapa de *função da elaboração*.

24

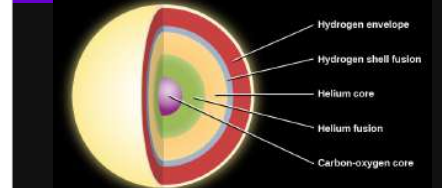
E se todo o H do Sol se esgotar?

- Fim do H do núcleo → Região das **gigantes vermelhas**
- Resta apenas He no núcleo → Contração e aumento da temperatura do núcleo
- Resta um pouco de H nas camadas externas que rapidamente se funde em He
- Se $T = 10^8 \text{ K}$ → He vira C em +- 100 anos
- Volta a crescer → **Região das supergigantes**
- A temperatura agora é **insuficiente (10^8 K)** para fundir C!

➤ Início da síntese do professor sobre evolução estelar e objetos compactos:

- As estrelas possuem uma grande reserva de H, mantendo as reações constantes por um longo tempo.
- Ao findar essa reserva, o núcleo, feito de hélio, se contrai e aumenta sua temperatura e as camadas mais externas se expandem, as estrelas saem da sequência principal em direção às gigantes vermelhas.
- O núcleo então é comprimido devido a gravidade, provocando uma rápida fusão de hidrogênio que sobrou nas camadas externas da estrela.
- Isso faz a estrela crescer e virar uma gigante vermelha - tudo isso em até 100 milhões de anos
- Se a temperatura for suficiente 10^8 K , o He se funde e forma o Carbono no núcleo.
- A temperatura e a pressão aumentam e a estrela se torna uma supergigante vermelha

25



➤ Camadas de elementos fundidos para estrelas semelhante ao Sol.

26

E depois ...

- O núcleo de C é fim da produção de energia → **estrelas iguais ao Sol**
- Sem liberação de energia por reações nucleares → Não há como manter a pressão para suportar o peso da estrela (**contração**)
 - Cerca de 1000 anos depois...
 - A densidade aumenta muito → instabilidade gravitacional (**colapso**)
 - Ejeção das camadas externas → Nebulosa planetária
 - Sobra apenas um núcleo denso de carbono → **Anã branca**

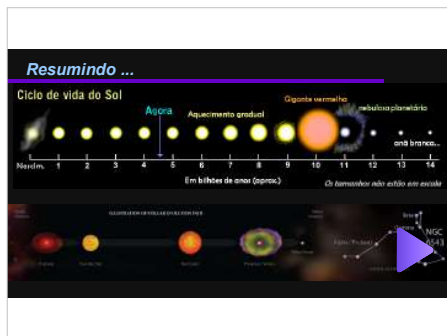
- Em estrelas semelhante ao Sol, o núcleo de carbono marca o fim da produção de energia no núcleo.
- Como não há mais fusão de elementos, não há liberação de energia e, portanto, a pressão não suporta o peso das camadas externas da estrela.
- A densidade aumenta muito interrompendo a contração (colapso)
- A estrela fica instável e começa a ejetar suas camadas externas rica em elementos leves que se torna uma nebulosa planetária.
- Resta apenas um núcleo denso e brilhante de carbono do tamanho da Terra que pode chegar a ter 1,4 vezes a massa do SOL.

27



➤ Sírius B – exemplo de uma Anã branca.

28



Nebulosa olho de gato <

https://chandra.harvard.edu/resources/handouts/constellations/posters/catseye_poster.pdf

>

Video <https://youtu.be/jnU_gSEBdrY>

- Uma nebulosa planetária formada por uma camada de gás e poeira após morte de estrelas tipo o Sol
- Apesar do nome planetária, não tem nada a ver com planetas – os primeiros astrônomos quando observavam esses objetos pensavam ser planetas. Porém, enriquece o meio interestelar com Ni e C elementos essenciais na formação de planetas e evolução da vida.
- Localizada a 3000 anos-luz na constelação da serpente.
- Os filamentos são sobras das camadas externas da estrela que foram ejetados.

29

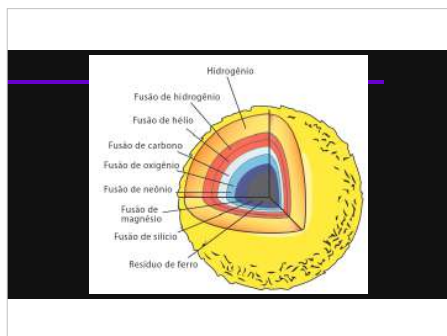
E para estrelas massivas > 8M_{solares}

Do H para o He para o C → Região das gigantes vermelhas

- > 8 Msolares → bastante calor para fundir Carbono
- Várias etapas de fusão → temperatura aumenta a cada reação
- Rápidos processos de fusão:
 - 20 M_{Júpiter} fusão H em 10⁷ anos, o He em 10⁸ anos, C em 10⁹ anos, Si 10 dias e **Fe em um dia!!**
- A fusão do Fe não libera mais energia, pois a energia potencial nuclear por nucleon é mínima neste elemento.
- Contração violenta → **SUPERNOVA** → morte da estrela

- Da mesma forma que as estrelas de baixa massa, transforma H em He em C
- Caminha no diagrama para a região das gigantes quando funde He.
- Do He para C caminha em direção das anãs passando pelas gigantes azuis ou não, vai depender da massa.
- Devido sua massa, gera calor suficiente para fundir elementos mais pesados que o C
- Passa então por várias etapas de fusão, intercalando períodos de instabilidade e estabilidade elevando cada vez mais a temperatura do núcleo
- Quando chega no ferro cessa o processo de liberação de energia por fusão. O Fe não libera mais energia ao ser fundido, pois a energia potencial nuclear por nucleon é mínima neste elemento. Ao ser fundido ele absorve energia.
- A pressão diminui e não consegue sustentar o peso da estrela, que se contrai violentamente em direção ao núcleo de ferro.
- O choque com o núcleo faz com que a estrela exploda e lance suas camadas externas, com elementos mais pesados, no espaço. Isto é uma supernova que marca a morte da estrela

30



- Estrutura em camadas dos elementos produzidos por estrelas supermassivas.

31

Durante a Supernova...

Início da vida com massa entre 8 a 25 M_{sol}

- Durante a compressão O peso da camada externa Aumenta a pressão no núcleo
- Diminui o espaço entre os átomos de Fe
- Prótons + elétrons → nêutron + neutrinos
- Sobra apenas nêutron no núcleo – uma estrutura cristalina que contém o colapso
- **Estrela de Nêutrons**

•Se sobrar ferro no núcleo após a explosão de supernova, pode acontecer algumas coisas interessantes.

•Se a estrela iniciou sua vida com massa entre 8 e 25 massas solares, ela se torna uma estrela de nêutrons após a explosão.

•A compressão inicial no núcleo de Fe faz com que os prótons colidam com os elétrons, sobrando apenas nêutron, uma estrutura cristalina que contém o colapso gravitacional.

32



- Link vídeo <<https://youtu.be/eecKKfuWdVs>>.
- Terzan5 <<https://chandra.harvard.edu/photo/2020/terzan5/>>.

33

Durante a Supernova...

De 25 a 100 Msol

- Dispersão total da matéria após a explosão de supernova
- Resta um núcleo superdenso de Fe
- A matéria dispersada pode ser capturada pelo caroço de Fe
- Ou o núcleo de Fe suga matéria de uma estrela próxima
- Nesse ponto o núcleo de Fe não suporta mais massa
- Mesmo assim a densidade aumenta muito → densidade infinita
- Forma um objeto cercado por matéria com uma região central escura → **Buraco Negro**

➤ Formação de buracos negros estelares.

34



Supernova Cas A

<https://chandra.harvard.edu/resources/handouts/constellations/posters/casa_poster.pdf>

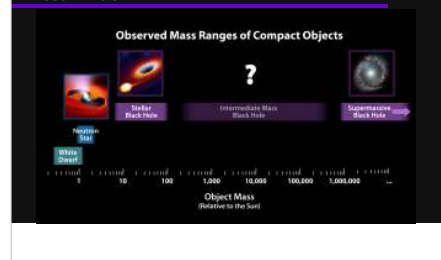
Video <<https://youtu.be/Y7-As67nhVk>>

Resumindo: A explosão de supernova ocorre pois as camadas superiores contendo 90% da massa colapsa repentinamente sobre o núcleo de ferro, liberando enorme quantidade de energia potencial gravitacional em muito pouco tempo, produzindo um brilho que pode ser equivalente ao de 200 bilhões de sóis.

- Cassiopeia A é uma jovem remanescente de Supernova na constelação de Cassiopeia ou constelação 'W' na Via láctea a 11000 anos-luz da Terra
- Apareceu no céu a 330 anos atrás, sendo visível a olho nu
- Nebulosa do Caranguejo
- <https://chandra.harvard.edu/resources/handouts/constellations/posters/crab_poster.pdf>
- Também é uma remanescente de supernova a 6000 anos-luz com um núcleo denso que já foi uma estrela massiva.
- Apareceu no céu em 1054 dC, sendo registrada por astrônomos chineses.

35

Resumindo...



➤ Este gráfico apresenta um resumo do objeto formado após o colapso da estrela, a depender de sua massa inicial

➤ No final ou durante a sistematização, o professor deve retomar o quadro de respostas dos alunos, das questões da etapa de função da elaboração, para que o aluno perceba que suas respostas corresponderam ou não ao conceito científico da questão.

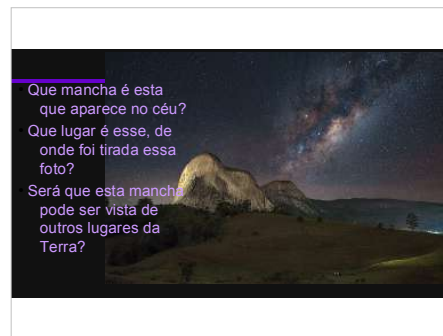
36



➤ Imagem: <<https://apod.nasa.gov/apod/ap201005.html>>

➤ As aulas que seguem, estão estruturadas de acordo com o fluxo da metodologia: Grande organização do conhecimento: Problematização inicial e organização do conhecimento → Etapas da SE, Aplicação do conhecimento

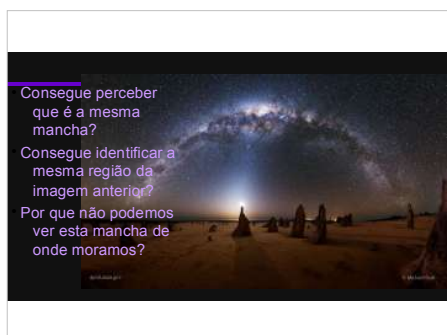
37



➤ Essas são as primeiras questões de problematização inicial, o professor deve promover o debate em sala a partir dessa imagem e dessas questões, sem apontar os conceitos astronômicos que ela representa.

➤ Essas questões são apenas para um debate inicial, não há a necessidade de coleta das respostas dos alunos.

38



➤ Imagem <<https://apod.nasa.gov/apod/ap201011.html>>

➤ Continuação das questões de problematização inicial, o professor deve promover o debate em sala a partir dessa imagem e dessas questões, sem apontar os conceitos astronômicos que ela representa.

➤ Essas questões são apenas para um debate inicial, não há a necessidade de coleta das respostas dos alunos.

➤ Cada questão aqui deve ser indagada pelo professor da seguinte forma:

1. Vocês conseguem perceber que é a mesma mancha, só que agora numa foto que pega um ângulo bem maior e mostra que ela cruza todo o céu?
2. Alguém consegue identificar, nesta imagem, a mesma região desta mancha que aparece na foto de Pedra Azul?
3. Por que é possível ver e fotografar a Via Láctea numa região rural, como a da Pedra Azul, ou de um deserto, como o do Atacama no Chile (no caso essa imagem é do deserto da Austrália), mas quem está, p. Ex., na Grande Vitória, não consegue vê-la no céu?

39

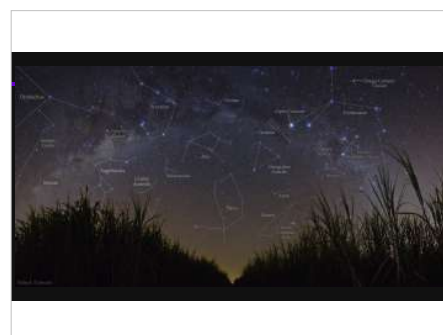


Imagem <<https://apod.nasa.gov/apod/ap090509.html>>

➤ Continuação das questões de problematização inicial, o professor deve promover o debate em sala a partir dessa imagem e dessas questões, sem apontar os conceitos astronômicos que ela representa.

➤ Essas questões são apenas para um debate inicial, não há a necessidade de coleta das respostas dos alunos.

➤ Para esta imagem apresentar as seguintes questões:

1. O que ela é? Como ela é chamada? Do que ela é formada? (Apontando para a mancha que aparece nesta imagem e nas anteriores).
2. Será que a visão que temos desta mancha, que cruza todo o céu, tem alguma coisa a ver com a posição da Terra e do Sol no Universo? Se tiver, qual é essa relação? Onde o Sol e a Terra estão localizados?
3. Há outras manchas como essa visíveis no céu a olho nu? E com telescópios? (Falar especificamente de cada imagem que foi apresentada).

➤ Próxima aula vem a tarefa de Leitura na etapa da SE de problematização. Conforme a SD os alunos devem usar o software *Pingo* para apontar as palavras do texto que não sabem significar.

40



Imagens: <<https://www.eso.org/public/images/eso0825a/>>

<<https://apod.nasa.gov/apod/ap100502.html>>

➤ Essas imagens é para o início da sistematização do professor sobre a morfologia das galáxias (Primeira elaboração).

41



Imagens: <

https://pt.wikipedia.org/wiki/Classifica%C3%A7%C3%A3o_de_Hubble#/media/Ficheiro:Hubble_sequence_photo.png

>

➤ Essas imagens é para o início da sistematização do professor sobre a morfologia das galáxias (Primeira elaboração).

42



Imagens:

<

https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy_morphological_classification#/media/File:HubbleTuningFork.jpg

>

<<https://www.eso.org/public/images/potw1746b/>

<https://www.eso.org/public/images/potw1746b/>>

➤ Essas imagens é para o início da sistematização do professor sobre a morfologia das galáxias (Primeira elaboração).

43

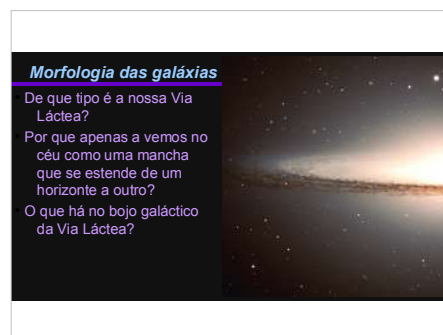


Imagem: <<https://www.eso.org/public/images/eso0007b/>>

➤ Essas questão serão apresentadas após a aula de morfologia das galáxias.

➤ As respostas dos alunos devem ser feitas no *Pingo*.

➤ As respostas aqui serão utilizadas na próxima etapa da SE – função da elaboração.

44

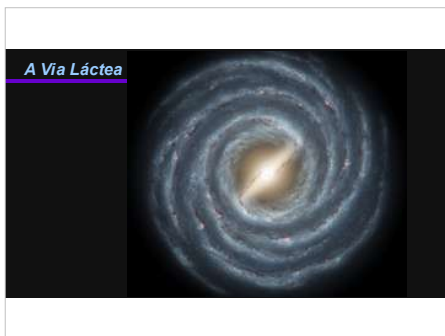


Ilustração de como seria nossa galáxia vista de fora:
<https://apod.nasa.gov/apod/ap050825.html>

45



Ilustração lateral de nossa galáxia <<https://apod.nasa.gov/apod/ap000130.html>>
 ➤ Os detalhes da morfologia da Via Láctea pode ser feito com o vídeo Guide to our Galaxy <<https://www.esa.int/eseach?q=sun+orbit+on+milky+way&start=11>>

46



Ilustração da Via Láctea mostrando a localização do Sol:
<https://apod.nasa.gov/apod/ap080606.html>
 ➤ Para melhor visualização, apresentar essa imagem separada, dando zoom na localização do Sol, que fica na parte interna do braço de Órion.

47



Ilustração do movimento orbital do Sol:
 <
https://pt.wikipedia.org/wiki/Via_L%C3%A1ctea#/media/Ficheiro:Movimento_do_Sol_na_gal%C3%A1xia.JPG
 >
 ➤ Abordar como é esse movimento, velocidade, período orbital, voltas completas.

48



Ilustração: <<https://astronomy.com/magazine/ask-astro/2020/07/in-which-direction-does-the-sun-move-through-the-milky-way>>

49

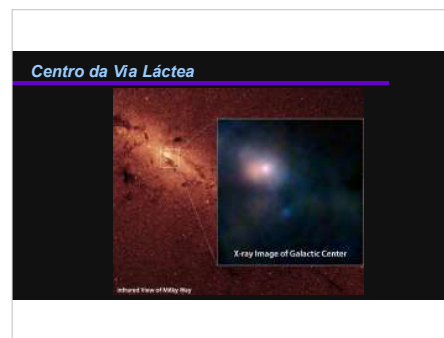


Imagem do núcleo da Via Láctea: <<https://apod.nasa.gov/apod/ap121102.html>>

- Finalizar a etapa de Função da elaboração, falando do buraco negro do centro da Via Láctea, fazendo a sistematização com os vídeos/simulação abaixo:
 - <<https://www.youtube.com/watch?v=DRCD-zx5QFA&v=7s>>
 - <<https://www.youtube.com/watch?v=wuyj7-XE8RE>>
- Apresentar outras imagens de buracos negros de outras galáxias como mostrada na SD.

50



Imagem: <<https://apod.nasa.gov/apod/ap190411.html>>

- Apresentar o vídeo <https://www.youtube.com/watch?v=9DILtg_9dcU> que mostra a galáxia M87 e o buraco negro da imagem acima.
- Coletar as respostas do aluno, das questões de problematização inicial com o Pingo.
- Então seguir para etapa da SE de problematização, para a tarefa de leitura seguindo a SD.

51



Ilustração da estrutura de um buraco negro:

- <
 - <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-visualization-shows-a-black-hole-s-warped-world>
- A partir dessa imagem iniciar a sistematização sobre a física dos buracos negros, falando de sua forma e estrutura.

52

Como identificar um buraco negro?

Um objeto cósmico compacto é um buraco negro quando:
Sistema binário de estrelas
Mas pode ser também
uma anã branca.



Imagem Sirius A e B – <<https://apod.nasa.gov/apod/ap001006.html>>

- Continuando a sistematização sobre buracos negros, abordar ainda as características que um objeto cósmico compacto deve ter para ser um buraco negro.
- Nesta imagem abordar que apesar de um sistema binário de estrelas ter um candidato a buraco negro, pode ser que a estrela maior esteja orbitando uma anã branca.

53

Como identificar um buraco negro?



Ilustração de uma estrela de nêutrons:

<<https://apod.nasa.gov/apod/ap180317.html>>

Ilustração comparando estrelas de nêutrons e buracos negros

<<https://apod.nasa.gov/apod/ap010119.html>>

- Uma das diferenças entre uma estrela de nêutrons e um buraco negro é a emissão de pulsos eletromagnéticos periódicos.

54

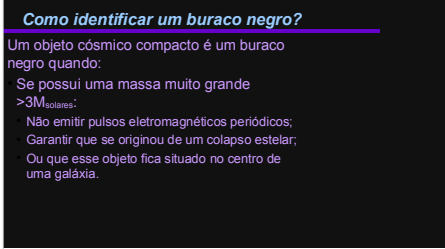
Como identificar um buraco negro?

Um objeto cósmico compacto é um buraco negro quando:

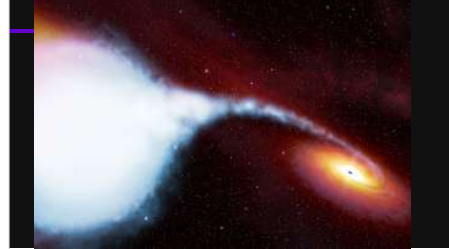
Se possui uma massa muito grande

>3M_{solares}:

Não emitir pulsos eletromagnéticos periódicos;
Garantir que se originou de um colapso estelar;
Ou que esse objeto fica situado no centro de uma galáxia.



55



Primeiro candidato a buraco negro, sistema binário de Cygnus X-1:

<<https://apod.nasa.gov/apod/ap080811.html>>

56

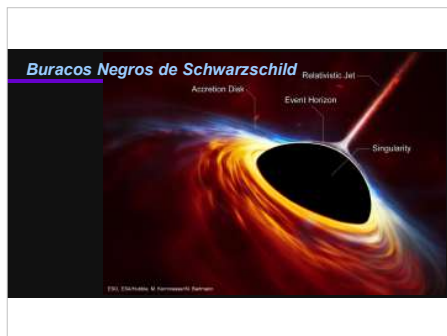


Ilustração com as principais partes de um buraco negro:

<<https://esahubble.org/images/heic1622b/>>

- A partir dessa ilustração, ainda na etapa da SD de primeira elaboração, abordar dos conceitos relativísticos associados aos buracos negros de Schwarzschild.
- Com essa imagem descrever cada parte apresentado, falando o que é e o que acontece.

57



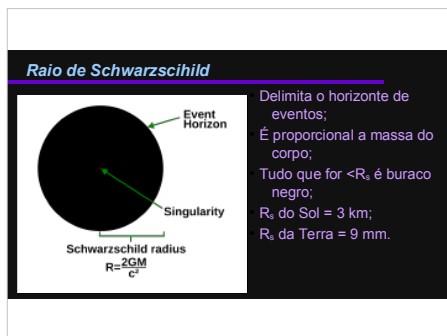
Imagens:

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Karl_Schwarzschild>

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Relatividade_geral>

- Início da abordagem sobre as propriedades físicas dos buracos negros;
- Abordar o contexto da Relatividade Geral;
- A proposta de Schwarzschild e sua história;

58

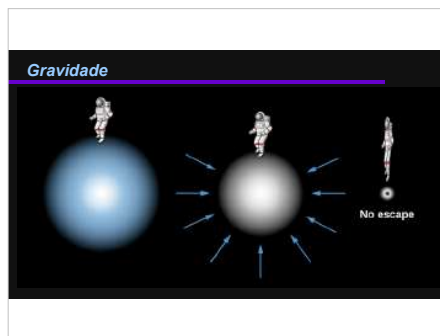


<https://pt.wikipedia.org/wiki/Raio_de_Schwarzschild>

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Buraco_negro>

- Abordar aqui o raio e o horizonte de eventos, fazendo comparações para um observador remoto e um observador local;
- Descrever/Calcular o raio de Schwarzschild para o Sol e para a Terra.

59



<[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy__Cosmology/Book%3A_Astronomy_\(OpenStax\)/24%3A_Black_Holes_and_Curved_Spacetime/24.05%3A_Black_Holes](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy__Cosmology/Book%3A_Astronomy_(OpenStax)/24%3A_Black_Holes_and_Curved_Spacetime/24.05%3A_Black_Holes)>

- Imagem descreve um exemplo para o Sol se tornando um buraco negro;
- Destacar que se o Sol fosse comprimido em um buraco negro o que ocorre com sua gravidade e com objetos em sua superfície.

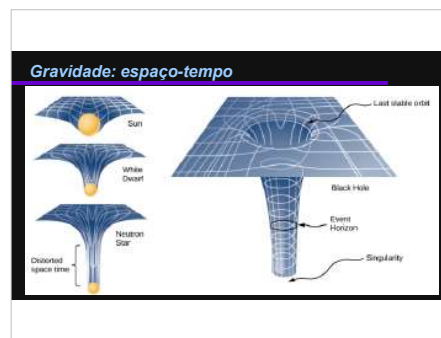
60



<
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/Book%3A_University_Physics_I_-_Mechanics_Sound_Oscillations_and_Waves_\(OpenStax\)/13%3A_Gravitation/13.08%3A_Einstein's_Theory_of_Gravity](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Book%3A_University_Physics_I_-_Mechanics_Sound_Oscillations_and_Waves_(OpenStax)/13%3A_Gravitation/13.08%3A_Einstein's_Theory_of_Gravity)
 >

➤ Espaço-tempo distorcido por uma massa gigante, tal como previsão teórica da relatividade.

61



<
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/Book%3A_University_Physics_I_-_Mechanics_Sound_Oscillations_and_Waves_\(OpenStax\)/13%3A_Gravitation/13.08%3A_Einstein's_Theory_of_Gravity](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Book%3A_University_Physics_I_-_Mechanics_Sound_Oscillations_and_Waves_(OpenStax)/13%3A_Gravitation/13.08%3A_Einstein's_Theory_of_Gravity)
 >

➤ Espaço-tempo distorcido por uma massa gigante, tal como previsão teórica da relatividade.

62

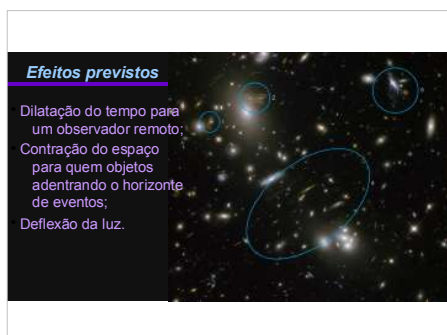


Imagem: <<https://apod.nasa.gov/apod/ap130308.html>>
 <https://pt.wikipedia.org/wiki/Lente_gravitacional>

➤ Finalizar descrevendo os efeitos físicos de dilatação do tempo e contração do espaço;
 ➤ Como prova desses fenômenos físicos, exemplificar e explicar o fenômeno de lentes gravitacionais.

63

APÊNDICE B – Instrumento de Validação

Instrumento de Validação

Mestrando: Marcos V Oliveira
Orientador: Prof. Sérgio Mascarello Bisch
Coorientador: Prof. Flávio Gimenes Alvarenga

Seção 1 de 6

Validação da Sequência de Ensino - Evolução estelar, galáxias e buracos negros: Uma proposta didática para o ensino médio referenciada nos Três Momentos Pedagógicos e na Significação Conceitual.

Este instrumento de validação compõe parte da análise e pesquisa de uma proposta de sequência de ensino sobre conceitos astronômicos e astrofísicos para estudantes do Ensino Médio. As questões a seguir buscam respostas qualitativas com comentários referentes ao produto elaborado para aplicação da sequência de ensino.

E-mail *

E-mail válido

Este formulário está coletando e-mails. [Alterar configurações](#)

Nome

Texto de resposta curta

Nível de atuação de ensino *

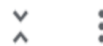
☐ Fundamental

☐ Médio

☐ Graduação

☐ Outros...

Relevância do tema abordado



Esse tópico tem como função analisar a importância e o interesse pela abordagem de conceitos astronômicos e astrofísicos, como os abordados na proposta, no Ensino Médio. Para isso as questões de análise são as seguintes:

1. Sabendo que os conhecimentos astronômicos e astrofísicos sobre evolução estelar, galáxias ^{*} e buracos negros são conhecimentos atuais, que vêm tendo um grande avanço, ampliando nossa visão do Universo, embora sejam distantes do senso comum e, por sua natureza, possam envolver certas dificuldades para sua efetiva compreensão, ainda assim são conhecimentos adequados e pertinentes para serem abordados no ensino de Física no Ensino Médio.

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

2. Os planos de ensino do professor das disciplinas de Ciências e Física na Educação Básica ^{*} devem indicar as aprendizagens essenciais e a base de conhecimentos relevantes para os alunos desse nível de ensino, portanto, eles devem buscar incluir tópicos de Astrofísica como os abordados nesta proposta.

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

3. A abordagem de tópicos de Astronomia e Astrofísica, como os indicados nessa proposta, é * uma excelente oportunidade para que o professor de Física do Ensino Médio mostre aos seus alunos a aplicação de conceitos de Física na explicação e descrição de importantes fenômenos naturais e sua grande relevância para a compreensão do universo em que vivemos.

☐ Discordo

☐ Concordo parcialmente

☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

4. Descreva aqui, caso ache necessário, alguma crítica aos critérios utilizados nas questões anteriores para avaliar a relevância do tema abordado, ou indique outras questões ou critérios pertinentes que você julgue que auxiliariam a investigar esta relevância.

Texto de resposta longa

Organização e estrutura das sequências de aulas

O objetivo deste tópico é analisar se a proposta didática é estruturalmente viável, se a organização dos elementos da sequência está clara e se o número de aulas é adequado e justificável

1. Levando em conta que a proposta de ensino apresentada é mais do que um planejamento de aulas, mas um produto para ser acessado e reproduzido por terceiros, a estrutura e organização desta proposta é clara e possui uma sequência coerente, podendo ser aplicada por professores interessados com seus próprios alunos. *

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

2. Considerando a carga horária disponível para o ensino de física na educação básica, o número de aulas indicado na proposta é adequado para o ensino de tópicos de astrofísicos. *

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

3. Considerando um contexto mais concreto e específico, onde se leva em conta interesses e *
as condições gerais do sistema de ensino (escola, acessos, alunos, demandas, entre outros), a
aplicação da proposta por professores interessados é viável.

☐

Discordo

☐

Concordo parcialmente

☐

Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

4. Descreva aqui, caso ache necessário, alguma crítica aos critérios utilizados nas questões
anteriores sobre a organização e estrutura da sequência de aulas, ou indique outras questões ou
critérios pertinentes que você julgue que auxiliaria nos objetivos deste tópico.

Texto de resposta longa

Metodologia e a participação ativa no processo de ensino aprendizagem



Deseja-se saber com esse item se a dinâmica metodológica apresentada é coerente com o tema e se as ferramentas e os processos de ensino levam em conta a participação dos discentes:

1. O referencial teórico apresentado para embasar a proposta de sequência de ensino e a dinâmica metodológica apresentada para a sistematização em sala de aula estão bem articulados e adaptados para a abordagem dos temas propostos. *

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

2. Os problemas e as questões levantadas (no caso das problematizações iniciais e as problematizações propostas em cada aula proposta) são relevantes e coerentes com o nível de ensino a ser aplicado, no caso ensino médio. *

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

3. O uso de ferramentas digitais (software de coleta de respostas, tarefa de leitura online, questionário, vídeos e simulações) e online para ensino e resposta das questões pelos alunos durante as aulas, auxilia numa participação maior das turmas. *

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

4. Descreva aqui, caso ache necessário, alguma crítica aos critérios utilizados nas questões anteriores sobre a relação entre a metodologia e a participação ativa dos alunos, ou indique outras questões ou critérios pertinentes que você julgue importante para avaliar essa participação dos alunos.

Texto de resposta longa

Os objetivos e a forma de avaliação



Com relação aos procedimentos elaborados e a coerência com os objetivos da proposta apresentada:

1. O que é apresentado na proposta é coerente com seus objetivos de ensino? *

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

2. As atividades para aprendizagens dos conceitos e as ferramentas pedagógicas (problematizações, dinâmicas, recursos digitais, textos e materiais didáticos) usadas para tal compreensão destes conceitos, estão bem especificadas e instruídas quanto ao uso. *

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

3. As avaliações elaboradas estão de acordo com a proposta da sequência de ensino, sendo que a aplicação do conhecimento juntamente com as primeiras etapas da situação de estudo, levam em conta o processo de aprendizagem dos alunos, articulado ao processo de construção do conhecimento destes. *

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

4. Descreva aqui, caso ache necessário, alguma crítica aos critérios utilizados nas questões anteriores sobre os objetivos e as avaliações, ou indique outras questões ou critérios pertinentes que você julgue que auxiliaria na relação entre os objetivos e a avaliação.

Texto de resposta longa

Problematização



Neste item, se busca avaliar se um dos pontos principais da estratégia de ensino utilizada, baseada nos Três Momentos Pedagógicos, que é o momento da problematização inicial, se acha bem formulado e construído no início e ao longo de cada uma das etapas da proposta. A problematização deve ser capaz de desafiar os estudantes, gerar interesse e evidenciar a necessidade de aprendizagem de novos conceitos e conteúdos para a compreensão do problema apresentado, com um envolvimento e participação ativa dos estudantes.

1. A forma com que os problemas iniciais são formulados e construídos estão coerentes com os objetivos de ensino, conceitos e conteúdos que devem ser trabalhados em cada etapa. *

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

2. Os problemas iniciais e as questões problematizadoras visam obter uma primeira resposta imediata dos discentes, ou seja, suas concepções espontâneas. Essa forma de trabalhar, expressando e explicitando as concepções iniciais dos estudantes, facilitará a superação destas concepções e a aprendizagem dos conceitos e conhecimentos científicos relacionados ao tema abordado. *

- ☐ Discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

Texto de resposta longa

3. As questões para avaliação (questionários avaliativos, indicados no momento da aplicação do conhecimento), se relacionam bem com os problemas iniciais e ainda promovem a busca por uma solução mais completa e relacionada com os conhecimentos científicos apresentados. *

☐ Discordo

☐ Concordo parcialmente

☐ Concordo totalmente

Comentários sobre a questão anterior.

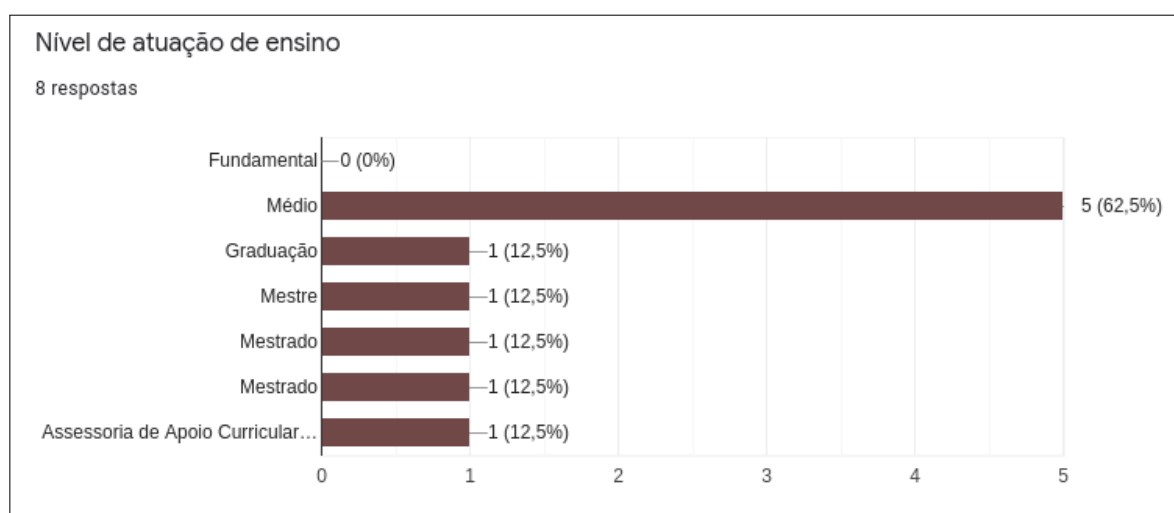
Texto de resposta longa

4. Descreva aqui, caso ache necessário, alguma crítica aos critérios utilizados nas questões anteriores sobre as problematizações apresentadas, ou indique outras questões ou critérios pertinentes que você julgue capaz de mostrar melhor a relação entre os problemas e os conteúdos de aula.

Texto de resposta longa

APÊNDICE C – Respostas ao Instrumento de Validação

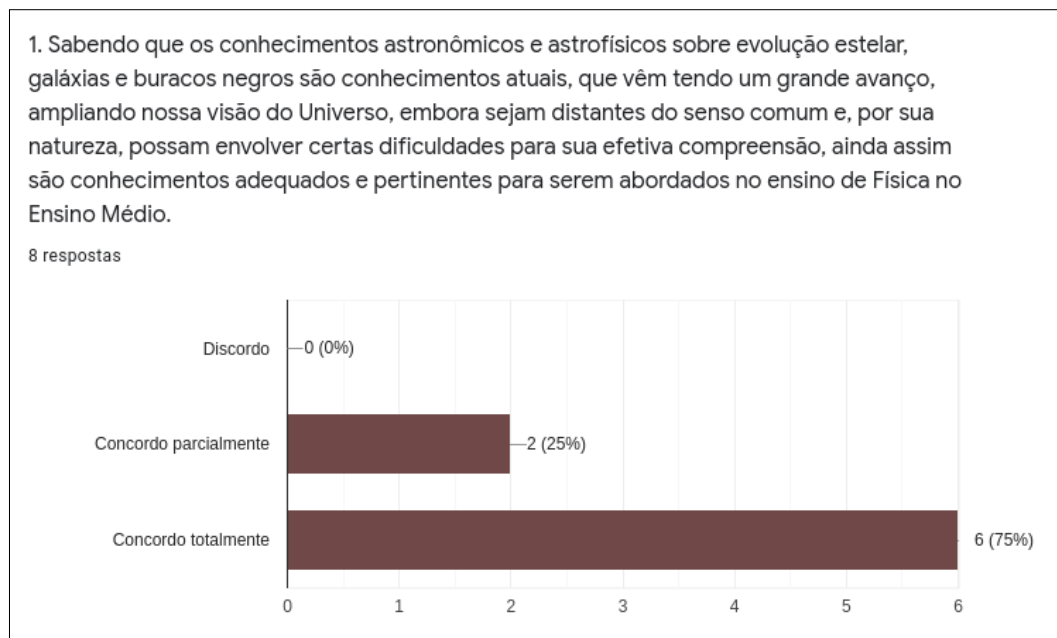
Figura 38 – Nível de atuação dos professores validadores. Três dos professores atuam em mais de uma modalidade de ensino. Um dos professores é assessor de apoio curricular e educação ambiental da secretaria de educação - SEDU/ES.



Fonte: Via Google Forms.

C.1 Relevância do tema abordado

Figura 39 – Primeira questão sobre a relevância do tema abordado.



(a) Resposta objetiva.

Comentários sobre a questão anterior.

5 respostas

A quantidade de conhecimentos astronômicos e astrofísicos é enorme e o ensino médio é um período de tempo muito limitado. Dessa forma, é preciso ficar bem claro quais são os pontos principais a serem expostos e cobrados dos alunos. Também é fundamental estabelecer pontos de ancoragem entre as concepções prévias (não necessariamente as espontâneas) e as novas informações. Acredito, por exemplo, que expor/cobrar fusão nuclear de prótons, formando outros elementos, é um caminho lógico, com ancoragens bem possíveis de se promover, tanto na Física, quanto na Química. Já o aprofundamento em conceitos como "teorias modernas sobre buraco negro", "detalhes sobre a diferença entre tipos de estrela ou de galáxias", "citação das equações de Einstein e modelo de espaço-tempo", entre outros, pode ser uma enxurrada de conceitos desconexos chegando à mesa do aluno, sem que ele possa ligá-los, assimilá-los ou resolver problemas com eles.

Uma das armas que um professor deve usar para despertar o interesse do estudante em sala de aula é a exploração da curiosidade muito peculiar em jovens na idade escolar. Só isto já justifica o produto em validação. Nas minhas aulas de Astronomia o tema "Buraco Negro" é o que mais vem despertando o interesse do aluno. Este interesse crescente, leva a debates que conseguem envolver até aqueles que não se sentem atraídos por temas ligados às ciências.

É muito importante que os avanços da Astronomia e da Física atuais sejam ensinados no ensino médio, através de adequações, para formar cidadãos com cultura científica.

(b) Comentários gerais da resposta objetiva.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 40 – Continuação dos comentários da primeira questão sobre a relevância do tema abordado.

São conhecimentos atuais e interdisciplinar <na sala de aula>. O seu tratamento deve englobar, na minha opinião, com outras disciplinas <Filosofia, Sociologia, Química, Biologia, Artes, Matemática, entre outras.

Isso é tão amplamente reconhecido que a BNCC e o Currículo do Espírito Santo determinam que este assunto deve ser ensinado em TODAS as escolas de ensino fundamental (anos finais) e ensino médio. Esses assuntos geralmente estão relacionados ao desenvolvimento de Competências que, além de realizar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, prepara o estudante para fundamentar e defender decisões éticas e responsáveis.

Veja as habilidades do nosso currículo do Novo Ensino Médio, 2ª série (vai valer em 2023), relacionadas à essa temática:

EM13CNT201FIS/ES - Analisar e discutir modelos, teorias e leis propostos em diferentes épocas e culturas para comparar distintas explicações sobre o surgimento da Terra e do Universo, bem como a sua evolução, dando ênfase à Física Moderna e Contemporânea.

EM13CNT204 - Elaborar explicações, previsões e cálculos a respeito dos movimentos de objetos na Terra, no Sistema Solar e no Universo com base na análise das interações gravitacionais, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais (como softwares de simulação e de realidade virtual, entre outros).

EM13CNT204FISb/ES - Elaborar explicações, previsões a respeito dos movimentos dos corpos celestes com base na análise das leis físicas, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais (como softwares de simulação e de realidade virtual, entre outros).

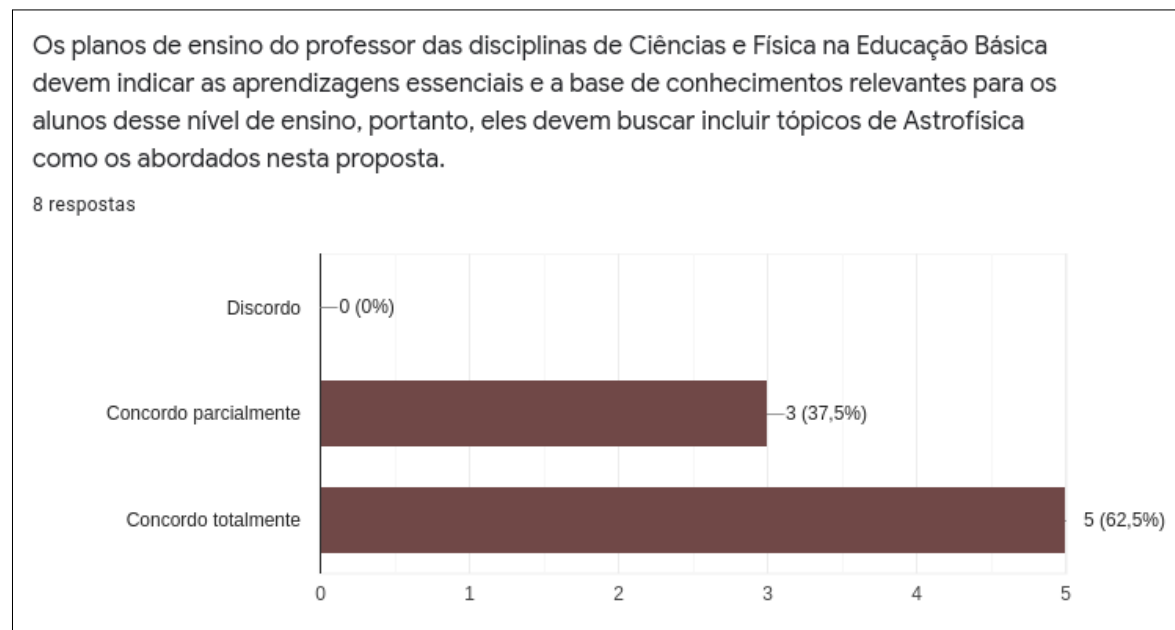
>> EM13CNT209 - Analisar a evolução estelar associando-a aos modelos de origem e distribuição dos elementos químicos no Universo, compreendendo suas relações com as condições necessárias ao surgimento de sistemas solares e planetários, suas estruturas e composições e as possibilidades de existência de vida, utilizando representações e simulações, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais (como softwares de simulação e de realidade virtual, entre outros).

EM13CNT209FIS/ES - Utilizar leis físicas para prever e interpretar movimentos e analisar procedimentos em situações de interação física entre corpos celestes e outros objetos além de compreender suas relações com as condições necessárias ao surgimento de sistemas solares e planetários, suas estruturas e composições e as possibilidades de existência de vida, utilizando representações e simulações, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais (como softwares de simulações e de realidade virtual, entre outros).

EM13CNT301FISc/ES - Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar as leis físicas, representar e interpretar modelos explicativos da Física Moderna e Contemporânea bem como dados e/ou resultados experimentais para construir conclusões no enfrentamento das pseudociências e pseudo informações científicas.

EM13CNT302 - Comunicar, para públicos variados, em diversos contextos, resultados de análises, pesquisas e/ou experimentos, elaborando e/ou interpretando textos, gráficos, tabelas, símbolos, códigos, sistemas de classificação e equações, por meio de diferentes linguagens, mídias tecnologias digitais de informações e comunicação (TDIC), de modo a participar e/ou promover debates em torno de temas científicos e/ou tecnológicos de relevância sociocultural e ambiental.

EM13CNT304FIS/ES - Analisar e debater situações controversas sobre a aplicação de conhecimentos da área de Ciências da Natureza, com base em argumentos consistentes, legais, éticos e responsáveis, distinguindo diferentes pontos de vista.

Figura 41 – Segunda questão sobre a relevância do tema abordado.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 42 – Comentários da segunda questão sobre a relevância do tema abordado.

Comentários sobre a questão anterior.

5 respostas

Concordo em especial no ensino fundamental, onde os conceitos não são tão aprofundados e não requerem concepções prévias mais complexas. Acredito que devem ser enfatizadas situações que possam ser observadas sem grande aparato instrumental, como a localização da Terra e dos astros visíveis (a olho nu ou com lunetas mais simples), rotação da Terra e dos astros, geolocalização, iluminação, etc. No ensino médio, embora eu seja um grande entusiasta da Física moderna, avançada e com excelência no trabalho com os cálculos, acredito que a visão do professor e dos elaboradores de planos de ensino sobre a aprendizagem deve ser mais ampla, envolvendo aspectos cognitivos, sociais, de profissionalização, etc., então eu diria que os planos "podem" sim procurar incluir tópicos de Astrofísica para reconciliar e consolidar conceitos e equações anteriormente aprendidas pelos alunos, mas ao afirmar que "devem" buscar incluir tais tópicos, possivelmente isso implicaria substituir outros tópicos de Física igualmente importantes por eles.

Muitos conceitos da Física podem ser ensinados de forma contextualizada dentro da Astronomia e Astrofísica.

Em nossa rede de ensino temos momentos bem definidos para trabalhar temáticas de astronomia e astrofísica. Nesses momentos o professor DEVE abordar estes assuntos.

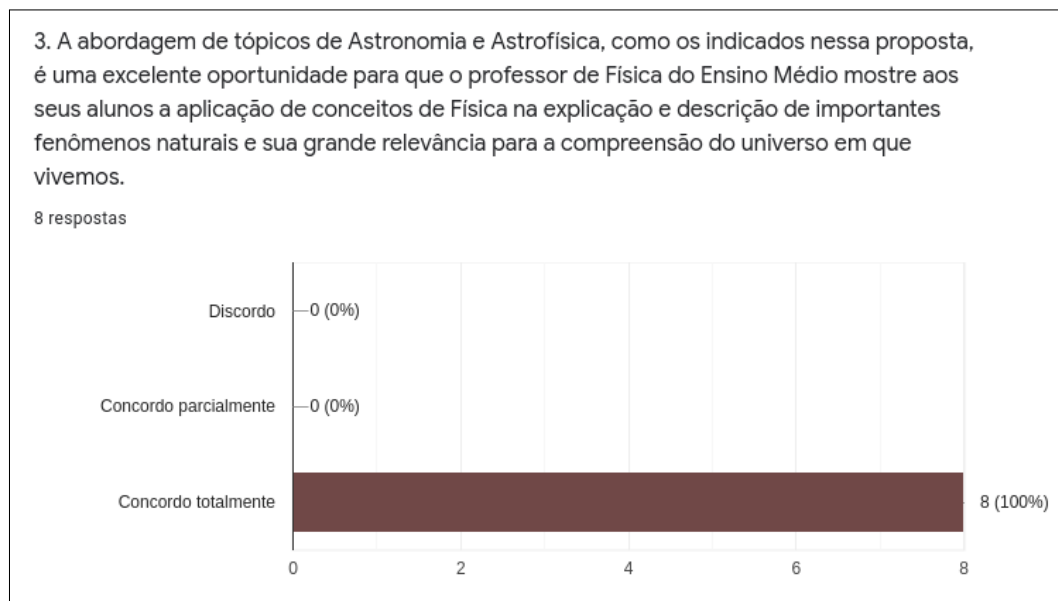
Nos demais assuntos, o plano de aula é muito individual. Dizer que ele DEVE incluir essa temática em é muito invasivo. O professor deve ter autonomia neste sentido.

Caso ele queira usar tópicos de astronomia e astrofísica, considero um tema com grande potencial de atrair o estudante e despertar o interesse para a disciplina. Inclusive, isso é discutido no trabalho da pesquisadora Geysa Frinhani: O uso da Astronomia como eixo temático motivador para introdução ao estudo de Cinemática no ensino médio.

Inclusive, a partir de 2022, entra em vigor em toda a rede estadual capixaba de ensino o "Novo Ensino Médio". Esta proposta traz uma importante mudança na grade curricular tornando obrigatória o ensino de temas que antes não eram privilegiados. Um destes temas é a Astronomia. Os livros didáticos que foram elaborados para uso já no próximo ano na área "Ciências da Natureza", trazem um conjunto de capítulos abordando Expansão do Universo, formação das galáxias, vida e morte das estrelas entre outros dando aos alunos a opção de escolher disciplinas, dentre várias denominadas "eletivas", já visando uma futura carreira profissional. Aqueles que se sentirem atraídos pela área científica poderão estudar não apenas Astronomia mas também se aprofundar em outras áreas da Matemática, da Química, da Biologia e da Física.

Não só em Ciências e Física, mas as áreas de conhecimento (da Natureza e Matemática, Humanas e de Linguagem) devem constar. Há uma bagagem histórica, social, econômica, linguística, cultural, artística entre outros que tais conhecimentos <de Astronomia e Astrofísica> devem ser apresentados/debatidos para além do fato de entender evolução estelar, galáxias e buracos negros.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 43 – Terceira questão sobre a relevância do tema abordado.**(a)** Resposta objetiva.

Comentários sobre a questão anterior.

4 respostas

Os conhecimentos sobre o universo suas dimensões de espaço e tempo não são triviais, então sim, tal abordagem é uma excelente oportunidade de aplicar de forma diferenciada, por exemplo, conceitos de velocidade, luz, calor, temperaturas, etc. fora dos valores cotidianos.

Gostaria de citar o meu exemplo como professor. Sempre tive grande dificuldade de atrair os meus alunos para o ensino da Trigonometria e da geometria. Durante o meu Mestrado desenvolvi junto com o meu orientador Dr Sérgio Bisch, uma sequência didática que buscava aplicar a trigonometria e a geometria na determinação das distâncias em Astronomia. O aprendizado do estudante em geometria e trigonometria tornou-se mais eficaz a partir do momento que ele começou a aplicar estas ferramentas matemáticas nas técnicas para determinação de distâncias, como por exemplo, o método da triangulação e paralaxe. Astronomia e Astrofísica são temas fascinantes que, quando bem aplicados, abrem a mente do estudante para o aprendizado em outras áreas de ensino como a própria Matemática, a Química e a Biologia.

É importante que o aluno perceba a utilidade da Física clássica e moderna no entendimento do Universo. Conhecer o Universo geralmente contribui para uma visão mais sustentável.

Sim, escrutinando o método científico.

(b) Comentários gerais da resposta objetiva.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 44 – Comentários gerais sobre o tópico da relevância do tema abordado.

4. Descreva aqui, caso ache necessário, alguma crítica aos critérios utilizados nas questões anteriores para avaliar a relevância do tema abordado, ou indique outras questões ou critérios pertinentes que você julgue que auxiliariam a investigar esta relevância.

4 respostas

Talvez possa separar as questões em citar aspectos positivos, negativos e neutros, para que o avaliador se organize melhor nas opiniões e sugestões.

Seria interessante citar a importância do uso das mais diversas tecnologias educacionais que tornam o ensino de ciências mais eficaz e agradável como por exemplo o software "Stellarium".

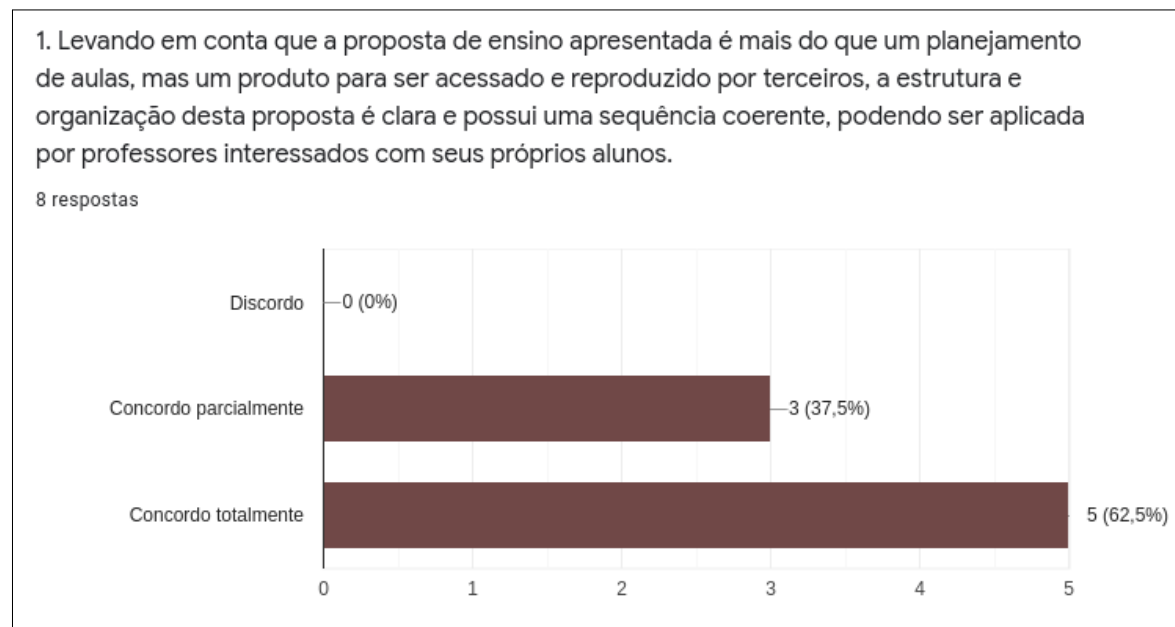
Seria importante colocar a Astrofísica como uma forma de estudar a própria Física de uma forma muito mais atraente. Através da Astrofísica pode-se ensinar Física e Astronomia, principalmente a Física moderna e contemporânea.

Sugestão: "Primeira imagem de um buraco negro" seria interessante, uma cronologia da evolução da teoria do Buraco Negro. Por que esta foto?; em "O Sol, as Estrelas e a Evolução Estelar" em algum momento, a discussão de como a humanidade <ciências> modificou a sua visão <entendimento> perante ao Sol, as Estrelas e a Evolução Estelar; em "As galáxias e a Via Láctea" apresentar <inicialmente, talvez> visões <interpretações> de povos não europeus a respeito da Via Láctea.

Fonte: Via Google Forms.

C.2 Organização e estrutura das sequências de aulas

Figura 45 – Primeira questão sobre organização e estrutura das aulas.



Fonte: Via Google Forms.

Figura 46 – Comentários da primeira questão sobre organização e estrutura das aulas.

Comentários sobre a questão anterior.

6 respostas

Concordo que a estrutura esteja clara, pois o texto está bem escrito e organizado, porém, falando pessoalmente, eu encontraria sérias dificuldades para seguir o plano apresentado, provavelmente por estar acostumado com uma abordagem Ausubeliana, sendo um estilo bem diferente de organização do trabalho. Imagino que alguns "saltos" conceituais foram longos demais para a realidade dos alunos de ensino médio no Brasil hoje, sendo que a ancoragem e a assimilação possivelmente ficariam comprometidas, levando a concepções menos significativas ou menos consolidadas. Também senti uma dificuldade grande em imaginar uma forma de propor e corrigir atividades avaliativas, ou mesmo de criar objetivos claros para a elaboração dos critérios avaliativos e orientar os alunos quanto a tais critérios.

A proposta dos três momentos pedagógicos está bem clara no desenvolvimento do produto. Destaco o cuidado que o mestrando teve no item "problematização". Este item é na minha opinião, o mais importante na busca do aprendizado, pois a sua formatação será fundamental no sucesso da aplicação das duas etapas seguintes. A criatividade e o conhecimento do assunto por parte do professor são essenciais para a construção desta etapa. Dentre as perguntas formuladas destaco aquela que na minha opinião mais desperta a curiosidade do aluno: "como surgem os buracos negros?".

Embora o tempo de aula seja de, basicamente, cinquenta minutos. Na prática escolar, gasta-se um tempo considerável para troca de sala e preparação dos materiais para aula. Isto poderia ser considerado na elaboração deste(s) plano(s) de aula.

Contudo o nível de profundidade vai depender do conhecimento do professor aplicador e do desempenho da turma. Talvez haverá dificuldades no aprofundamento pois os temas são complexos.

Sugestão: um breve comentário das ferramentas pedagógicas apresentadas: Pingo; Kahoot entre outros. O que são tais ferramentas?

Parabéns pelo trabalho! ele foi muito bem pensado.

Acho que poderia ter um auxílio melhor para o professor na utilização do aplicativo Pingo, visto que não encontrei vídeos em português explicando como utilizar esta plataforma.

Algumas vezes achei alguns objetivos meio subjetivos, por exemplo: Apresentar, discutir e interpretar leis e conceitos físicos. Se for intencional, para deixar uma ampla de possibilidades de conceitos a serem discutidos, perfeito. Porém, se for algum conceito específico e pré-definido, seria interessante deixar isso claro nos objetivos.

Ainda nos objetivos, percebi que, às vezes, eles estão se referindo ao professor, e em outros momentos, aos alunos. Por exemplo, no tópico 5- O Sol, as Estrelas e a Evolução Estelar :

- Explicar os processos físicos que ocorrem no Sol e nas estrelas, sua produção de energia, brilho e transferência de calor. (PROFESSOR?)
- Elaborar hipóteses, construir questões. (PARA OS ALUNOS)
- Apresentar, discutir e interpretar leis e conceitos físicos. (NÃO IDENTIFIQUEI)
- Estimular e avaliar a participação ativa dos estudantes. (PARA OS PROFESSORES)

Talvez, padronizar isso deixe o produto mais claro.

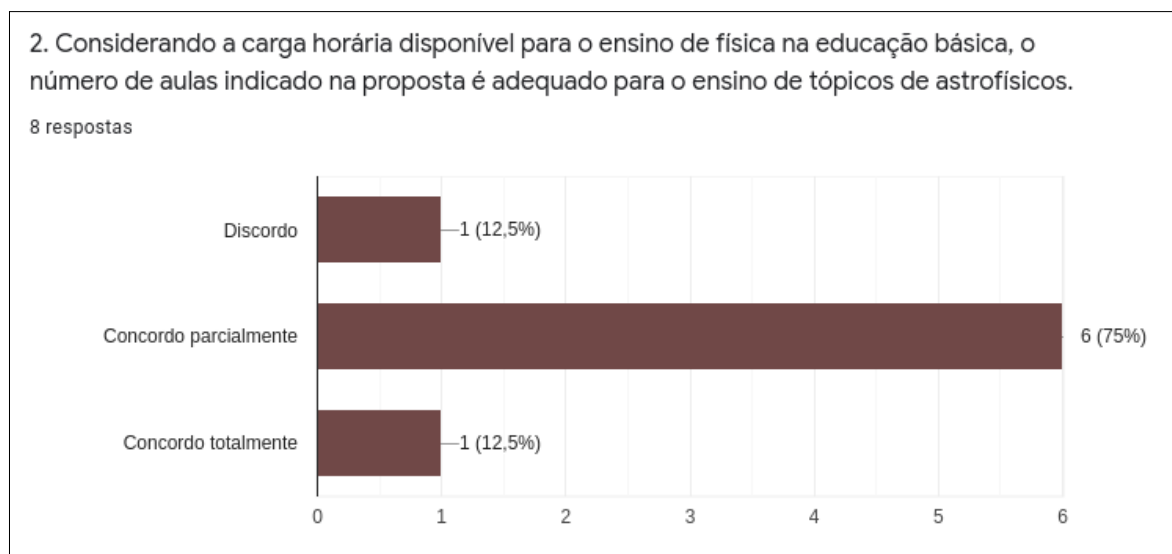
OBS:

>> Se EXPLICAR for direcionado aos professores, sugiro trocar o verbo. EXPLICAR é um verbo que torna professor o protagonista do processo de ensino-aprendizagem e esta não é a intenção. Sugestão: Mediar a compreensão dos processos físicos que ocorrem no Sol e nas estrelas... (na descrição que você faz nos Procedimentos Metodológicos dá a entender que é isso que é feito: uma mediação para que o aluno se aproprie daqueles conhecimentos).

Busquei algumas referências e não encontrei.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 47 – Segunda questão sobre organização e estrutura das aulas.



Fonte: Via Google Forms.

Figura 48 – Comentários da segunda questão sobre organização e estrutura das aulas.

Comentários sobre a questão anterior.

6 respostas

Discordo, mas não pela proposta e sim pela realidade da educação no país. Certamente seria um problema pelo fato de que a carga horária de Física no ensino médio brasileiro é pouca e vem sendo reduzida a cada mudança nas diretrizes advindas das secretarias ou do Ministério. Na escola estadual, onde atuo, o curso levaria praticamente um trimestre inteiro para ser realizado, utilizando toda a carga horária disponível para a disciplina de Física. Atualmente o ensino médio da escola conta com o total de 6 trimestres para Física (sendo duas aulas por semana, apenas para 2ª e 3ª séries).

Acredito que as etapas 3 e 4 necessitarão de mais aulas. Utilizará várias partes da Física que deverão ser melhor trabalhadas, tais como, Lei da gravitação Universal, órbitas planetárias, leis de Kepler, Energia potencial gravitacional e conservação de energia, velocidade de escape, matéria escura e relatividade geral. Será muito difícil trabalhar isso nas 5 aulas dessas etapas 2 e 3. Acredito que precisará de 5 aulas em cada etapa como na etapa 2.

Achei muitas aulas para a quantidade de tópicos que precisamos abordar ao longo do ensino médio. Mas, como já disse antes, a partir de 2023 teremos, na 2ª série, uma momento dedicado à esses assuntos. O professor pode, então se organizar para utilizar essas 15 aulas sem prejudicar o restante dos objetos de conhecimento.

Outra proposta é buscar uma parceria com professores de outras disciplinas e fazer um trabalho interdisciplinar, por exemplo, com o professor de QUÍMICA... que pode trabalhar a síntese dos elementos, tabela periódica, ligações químicas...

Infelizmente o tempo que temos para ministrarmos um curso de Física (duas aulas por semana) é muito curto para que seja possível a abordagem de todo o conteúdo. O acréscimo de temas de Astronomia nos obriga a abrir mão do ensino de outros temas não menos importantes. Na proposta do "Novo ensino médio" a escola vai oferecer disciplinas eletivas dedicadas exclusivamente ao aprofundamento de temas que na atual conjuntura não podem ser ensinados devido ao tempo escasso. A escola na qual trabalho já está fazendo uma experiência com disciplinas eletivas com duas aulas por semana além das duas aulas de Física oferecidas pelo currículo. Eu criei uma disciplina eletiva chamada "Astronomia" na qual, além de aplicar o meu produto de mestrado ensino "História da Astronomia". Creio que duas aulas por semana são suficientes para ensinar todos os temas ligados a Astronomia inclusive o produto tema desta validação.

A proposta é bastante interessante, mas devido a dinâmica das escolas públicas, recomendo fazer um recorte com um número menor de aulas.

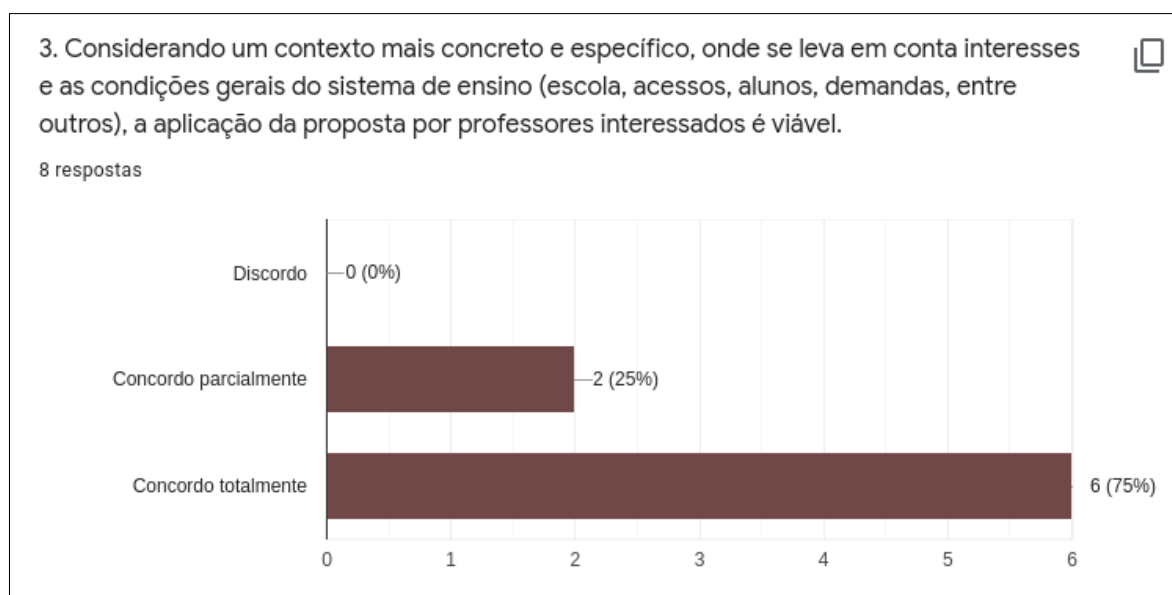
No site da SEDU tem as organizações curriculares e o número de aulas:
[https://sedu.es.gov.br/Media/sedu/pdf%20e%20Arquivos/PORTARIA%20N%20150-R%20-%20Organizações%20Curriculares%202021%20\(1\).pdf](https://sedu.es.gov.br/Media/sedu/pdf%20e%20Arquivos/PORTARIA%20N%20150-R%20-%20Organizações%20Curriculares%202021%20(1).pdf)

Recomendo uma leitura atenta na página 19. Repare que o aluno terá no máximo 80 aulas ao longo do ano letivo da disciplina de Física.

Sugestão: deixar evidenciado no texto que o quantitativo de aulas é uma sugestão do autor.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 49 – Terceira questão sobre organização e estrutura das aulas.



(a) Resposta objetiva.

Comentários sobre a questão anterior.

4 respostas

Escolas públicas, em sua maioria, ainda não possuem estrutura e equipamentos suficientes para a aplicação da proposta, como projetores, internet e computadores em sala. Muitas escolas particulares também não, então isso seria um ponto seriamente dificultador na viabilidade. Ainda assim, a proposta parece altamente atraente para sua aplicação, por mesclar elementos lúdicos com aprendizagem (tanto para professor, quanto para alunos). Isso pode ocorrer caso o professor não se sinta coagido a seguir estritamente o programa de ensino da sua rede, o que é outro dificultador.

Sim, mas como falei podem haver dificuldades devido à diversidade e complexidade dos tópicos utilizados, por exemplo: fissão nuclear, relatividade geral, matéria escura, evolução estelar,... Desta forma a aplicação pode ficar um pouco "superficial" dependendo das condições onde será aplicado., mas isso não desvaloriza o projeto.

Pelos motivos expressos na pergunta anterior.

Com o Novo Ensino Médio, as escolas regulares passam a disponibilizar aos estudantes a disciplina eletiva <nas escolas de tempo integral já ocorrem> e tal material é formidável para sua aplicação.

(b) Comentários gerais da resposta objetiva.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 50 – Comentários gerais sobre organização e estrutura das sequências de aulas.

4. Descreva aqui, caso ache necessário, alguma crítica aos critérios utilizados nas questões anteriores sobre a organização e estrutura da sequência de aulas, ou indique outras questões ou critérios pertinentes que você julgue que auxiliaria nos objetivos deste tópico.

3 respostas

Seria interessante separar as opiniões sobre viabilidade que estão relacionadas diretamente ao projeto daquelas que estão relacionadas à estrutura das escolas e outros órgãos, pois pode ficar a impressão de que a possível inviabilidade é por má qualidade do projeto, enquanto seria por motivos fora do alcance do autor.

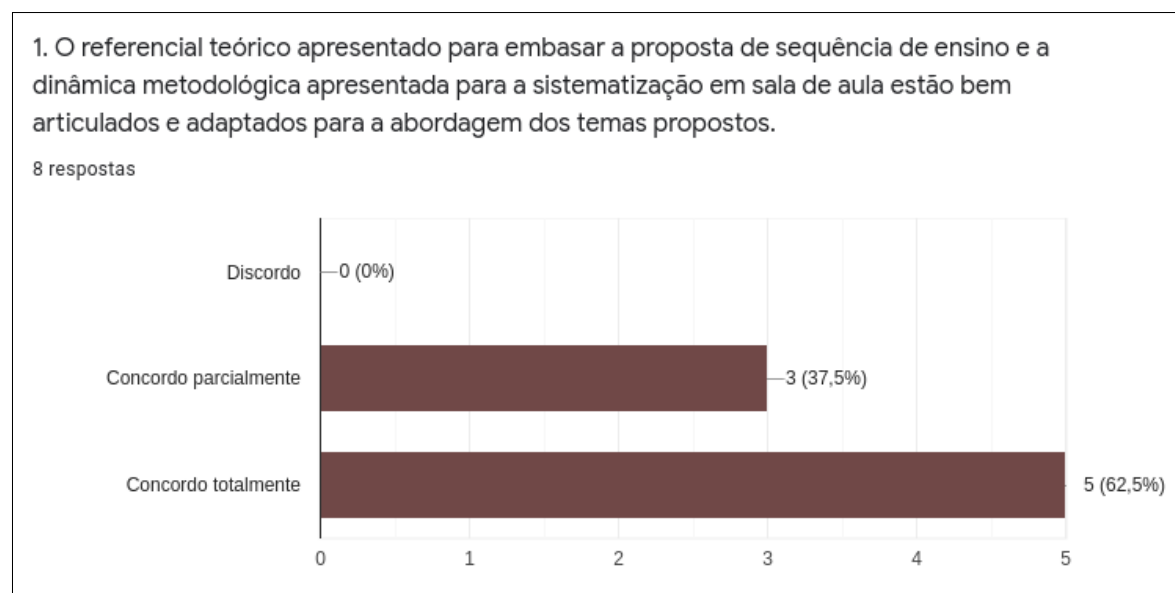
Entendi a necessidade de falar dos tipos de buracos negros estelares e supermassivos, mas acho que poderia deixar de fora buracos negros primordiais. Também poderia concentrar esforços no entendimento da evolução estelar e dos buracos negros em si e não falar de galáxias, que apesar de importantes deixarão o produto longo.

Como sugestão, caso o mestrando ache importante, seria interessante abordar o trabalho do professor Stephen Hawking que, com certeza, foi o Físico que mais estudou buracos negros na Física moderna deixando um legado muito valioso principalmente no que diz respeito à Entropia do Buraco Negro.

Fonte: Via Google Forms.

C.3 Metodologia e a participação ativa no processo de ensino aprendizagem

Figura 51 – Primeira questão sobre a metodologia e a participação ativa no processo de ensino aprendizagem.



Fonte: Via Google Forms.

Figura 52 – Comentários da primeira questão objetiva sobre a metodologia e a participação ativa no processo de ensino aprendizagem.

Comentários sobre a questão anterior.

5 respostas

Acredito que a proposta possa estar suficientemente clara para professores que aprofundaram os seus estudos nas duas teorias de aprendizagem que foram adotadas, mas, como é o meu caso, para professores que se baseiam em outras teorias (ou mesmo que se formaram numa licenciatura simples ainda têm contato insuficiente com tais teorias), o texto poderia explicar um pouco melhor e dar pelo menos um exemplo de cada conceito chave, pois isso ampliaria muito o acesso ao público de professores não especialistas. Um ponto que me chamou a atenção é que eu não saberia o que fazer com as respostas dos alunos nos questionários do item 10. Isso não ficou claro para mim. Seria apenas um feedback com as respostas corretas para eles no aplicativo? Se sim, eu não utilizaria as respostas deles para reorganizar o conteúdo teórico depois? Quando eu me pergunto sobre o quê exatamente eu devo aconselhar ao meu aluno, também tive dificuldade. Por exemplo: o professor poderia orientar: "Alunos memorize 'isto'. Anotem 'aquilo' como sendo um conceito importante, e não se esqueçam 'daquilo', ok, turma?". Quais seriam os pontos "isto", "aquilo" e "daquilo"? Não está claro para mim. Certamente os alunos perguntarão, dentre todo o conhecimento apresentado, quais pontos eles devem memorizar ou refletir mais sobre e saber na hora de realizar uma atividade ou uma prova.

Sim, pois o tema permite problematizações, principalmente através das fotos e simulações apresentadas.

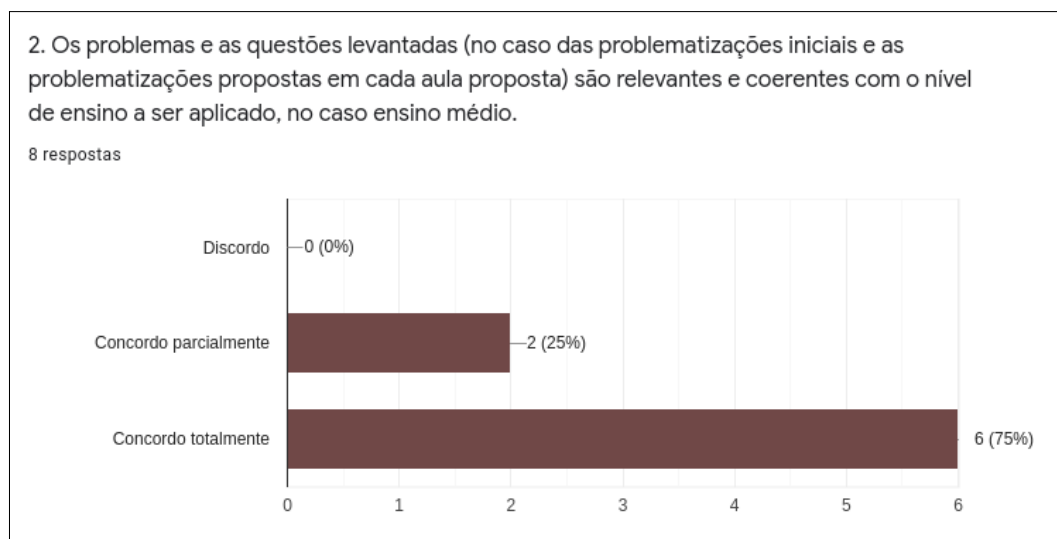
Acho que você fez uma excelente articulação entre os referenciais teóricos escolhidos. Tentei acessar alguns trabalhos citados e não conseguir. Talvez seja interessante você revisar os links antes da publicação.

Na minha opinião a técnica dos três momentos pedagógicos é a ideal para o ensino de temas de Astronomia porque é a partir da curiosidade do aluno que vamos construindo o conhecimento. A primeira etapa das 3MPs privilegia bastante este aspecto.

Sugestão: pensando nas possibilidades midiáticas, talvez o autor, poderia disponibilizar podcast para exemplificar ainda melhor o material.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 53 – Segunda questão sobre a metodologia e a participação no processo de ensino aprendizagem.



(a) Resposta objetiva.

Comentários sobre a questão anterior.

3 respostas

Algumas questões me fizeram ter dificuldade em ligar a conhecimentos prévios esperados nos alunos de ensino médio. Por exemplo, saber quais os tipos de galáxia é uma informação que eu poderia utilizar para processo de reconciliação ou consolidação de qual parte da Física do ensino médio? Se não se puder ligar a outros conceitos, ficaria um conhecimento um tanto quanto desconexo, indo ao encontro de uma aprendizagem mecânica, não? Sendo pragmático, se tentarmos ligar cada conceito da proposta a Mecânica, Eletrostática, Eletrodinâmica, Ondulatória, Óptica e Termologia, que já fazem parte do ensino médio brasileiro atual e servem como base para os nossos planos de ensino, como, quando e onde fazer essa ligação e com qual objetivo? A questão 10.2 f), por exemplo, seria consolidação da gravitação de Newton? Ou das Leis de Kepler? Mas essas leis valem a 30% da velocidade da luz? Podemos utilizar conceitos da teoria da relatividade geral em uma sala de ensino médio sem dar maiores explicações hoje em dia? A questão 10.3.i) parece levar a uma discussão bem desconexa do nível do ensino médio atual, abordando conhecimentos que se tratam em poucas aulas, como é o caso da proposta, há grande risco de criação de concepções alternativas, ao invés de significativas. Dei esses dois exemplos, mas tive a mesma sensação em várias questões, tanto nas problematizações iniciais, quanto na atividade final.

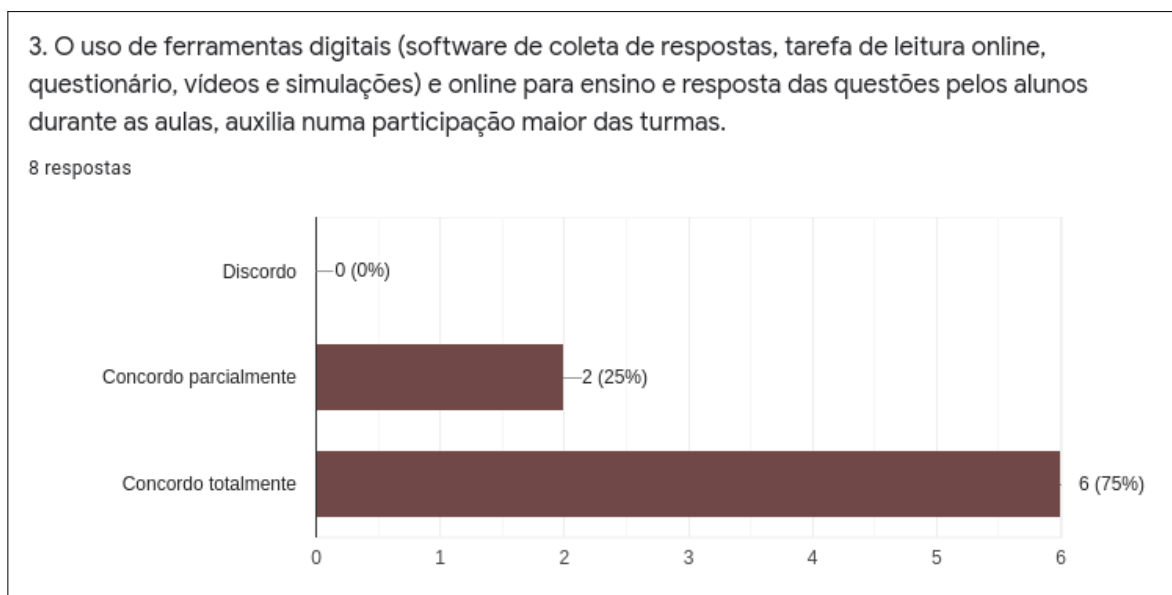
Como já comentei, o mestrando foi muito criativo na formatação desta etapa e percebi que ele abordou os aspectos essenciais a um bom aprendizado por parte do estudante.

Poderia ainda vincular os avanços científicos nessa área aos avanços tecnológicos necessários para as pesquisas, através de satélites e detectores, que foram enormes. Isso rebateria a crítica que esse tipo de pesquisa não tem uso na prática.

(b) Comentários gerais da resposta objetiva.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 54 – Terceira questão sobre a metodologia e a participação no processo de ensino aprendizagem.



(a) Resposta objetiva.

Comentários sobre a questão anterior.

5 respostas

Certamente auxilia, embora não seja possível a utilização de tais ferramentas em grande parte do sistema educacional brasileiro hoje, infelizmente.

O produto está em sintonia com as tecnologias atuais de ensino.

Excelentes ferramentas.

Neste aspecto a proposta é bastante eficiente. Inclusive tomei conhecimento de tecnologias que eu desconhecia até então como Pingo, Kahoot e Mentimeter.

Sugestão: talvez o autor, poderia disponibilizar vídeos <de curta duração> no YouTube, exemplificando a utilização de tais softwares.

(b) Comentários gerais da resposta objetiva.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 55 – Comentários gerais sobre metodologia e a participação no processo de ensino aprendizagem.

4. Descreva aqui, caso ache necessário, alguma crítica aos critérios utilizados nas questões anteriores sobre a relação entre a metodologia e a participação ativa dos alunos, ou indique outras questões ou critérios pertinentes que você julgue importante para avaliar essa participação dos alunos.

3 respostas

Novamente a aplicabilidade e a relevância esbarram em contextos alheios à metodologia, o que poderia ser abordado em questões separadas.

Sou um pouco cético quanto às tarefas de leitura fora da classe. Fiz alguns trabalhos neste sentido e não obtive bons resultados. Geralmente os alunos voltam para a próxima aula sem cumprir com a tarefa de leitura (meu caso). Se você tiver experiências diferentes quanto a esta prática, compartilhe sua experiência comigo.

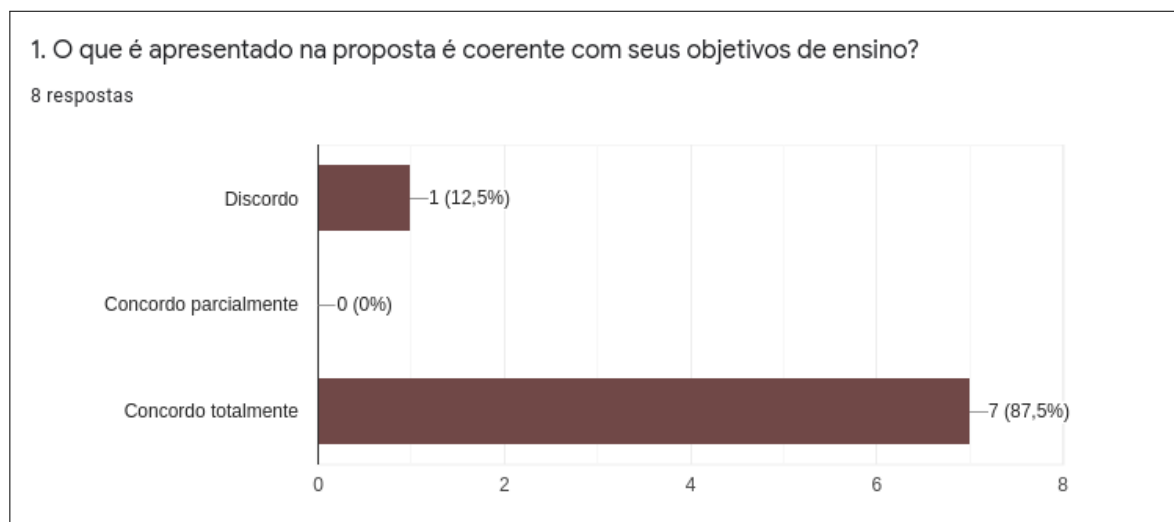
No início do seu mestrado comecei a trabalhar com uma metodologia chamada "Just-in-Time Teaching". Nela, o estudante precisa fazer uma leitura antes do início da aulas... mas eles não faziam... logo, inutilizava todo o resto da metodologia.

A teoria das cordas fez, a partir da década de 90, importantes descobertas a respeito da fisiologia dos buracos negros. Indico " Universo Elegante" de Brian Greene, Companhia das Letras para aprofundamento por parte do mestrando caso o mesmo ache relevante.

Fonte: Via Google Forms.

C.4 Os objetivos e a forma de avaliação

Figura 56 – Primeira questão sobre objetivos e forma de avaliação.



(a) Resposta objetiva.

Comentários sobre a questão anterior.

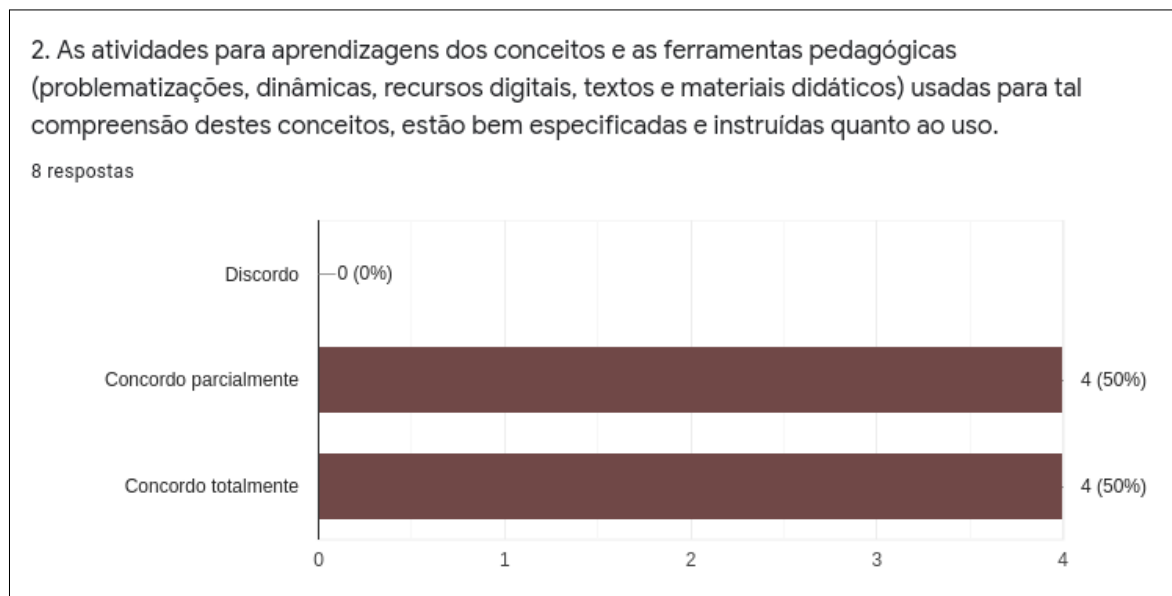
2 respostas

Discordo, pois minha metodologia é diferente, baseada em busca de conhecimentos prévios bem específicos (subsunçores), que podem ser ligados a novas informações, também muito específicas. Com a metodologia apresentada, os alunos se tornam mais livres para levantar hipóteses, e o professor permite o levantamento de uma infinidade de concepções por parte dos alunos, para só depois guiá-los. Também tenho objetivos de aplicar o que se aprendeu em diferentes situações como forma de consolidação, o que não parece ser um objetivo fundamental na metodologia da sequência de ensino apresentada.

Um exemplo desta coerência é a análise da foto da primeira imagem de um buraco negro obtida. Um debate a partir desta foto com certeza será muito esclarecedora para o desenvolvimento do tema.

(b) Comentários gerais da resposta objetiva.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 57 – Segunda questão sobre objetivos e forma de avaliação.**(a)** Resposta objetiva.

Comentários sobre a questão anterior.

5 respostas

As problematizações e dinâmicas não ficaram muito claras para mim, como já comentei em outras questões. Já recursos digitais, textos e materiais didáticos estão bem claros.

Faltou dizer mais claramente como será feita a organização do conhecimento. Se será feita através dos slides, se será mais expositiva e como será feito para o aluno participar?

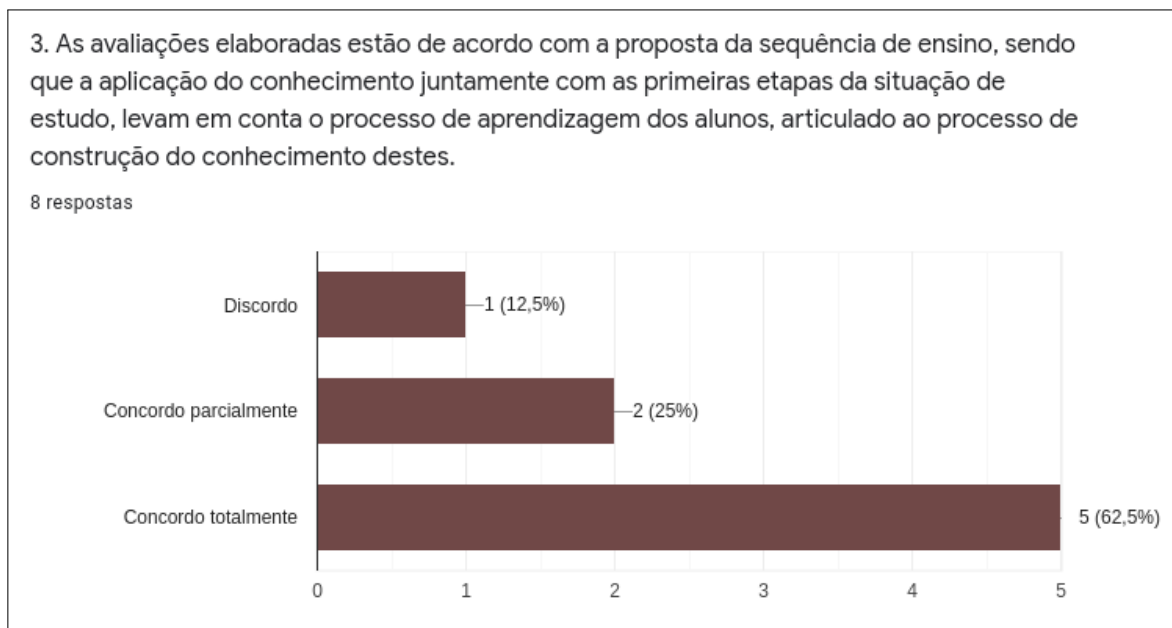
Gostaria de mais informações e exemplos quanto ao uso PINGO

Destaco aqui os recursos digitais que com certeza aproximarão mais o aluno do tema já que a informática está perfeitamente enquadrada no cotidiano destes estudantes.

Sugestão: talvez, um podcast para exemplificar e auxiliar o texto.

(b) Comentários gerais da resposta objetiva.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 58 – Terceira questão sobre objetivos e forma de avaliação.

(a) Resposta objetiva.

Comentários sobre a questão anterior.

4 respostas

Avaliar a participação ativa dos alunos, como proposto, parece ter uma relevância enorme no trabalho. Já quanto ao questionário 10, sigo em dúvida sobre quais são os objetivos e quais as respostas esperadas dos alunos (as respostas apresentadas são palavras do professor, provavelmente muito diferentes do que os alunos escreveriam), bem como qual pontuação atribuir a diferentes tipos de respostas (seria atribuída alguma pontuação?).

Considero que as avaliações estão de acordo com a proposta. É difícil avaliar a eficiência delas só lendo o trabalho, porém, parece bem consistente com as etapas iniciais da situação de estudo.

Questiono apenas se:

- 1- A parte que envolve contas, o aluno irá conseguir preencher no formulário online?
- 2- Um professor com muitas turmas e muitos alunos vai conseguir analisar as respostas discursivas de todos os estudantes?

talvez algumas questões bem elaboradas, porém objetivas, ajudaria o professor a ter um retorno quase que imediato das principais dificuldade e lacunas que permaneceram sobre esse assunto.

Achei muito interessante o questionário proposto no final do produto. Ele é muito abrangente e essencial principalmente para o professor que for aplicar este produto em suas aulas.

O conteúdo das questões estão de acordo como que foi apresentado, mas a forma <questionário de perguntas> considero muito tradicional. Não aplicaria tal questionário aos meus estudantes. O autor traz ferramentas tecnológicas <pedagógicas> para apresentar o material, mas no avaliar permaneceu no tradicional. Sugestão: considerar o atitudinal do estudante no processo; propor que os estudantes utilizem mídias sociais para divulgar a Astronomia, Astrofísica, Buracos Negros e entre outros; considerar um festival de audiovisual sobre o tema destinado à comunidade escolar...entre outras atividades!

(b) Comentários gerais da resposta objetiva.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 59 – Comentários gerais dos objetivos e forma de avaliação.

4. Descreva aqui, caso ache necessário, alguma crítica aos critérios utilizados nas questões anteriores sobre os objetivos e as avaliações, ou indique outras questões ou critérios pertinentes que você julgue que auxiliaria na relação entre os objetivos e a avaliação.

2 respostas

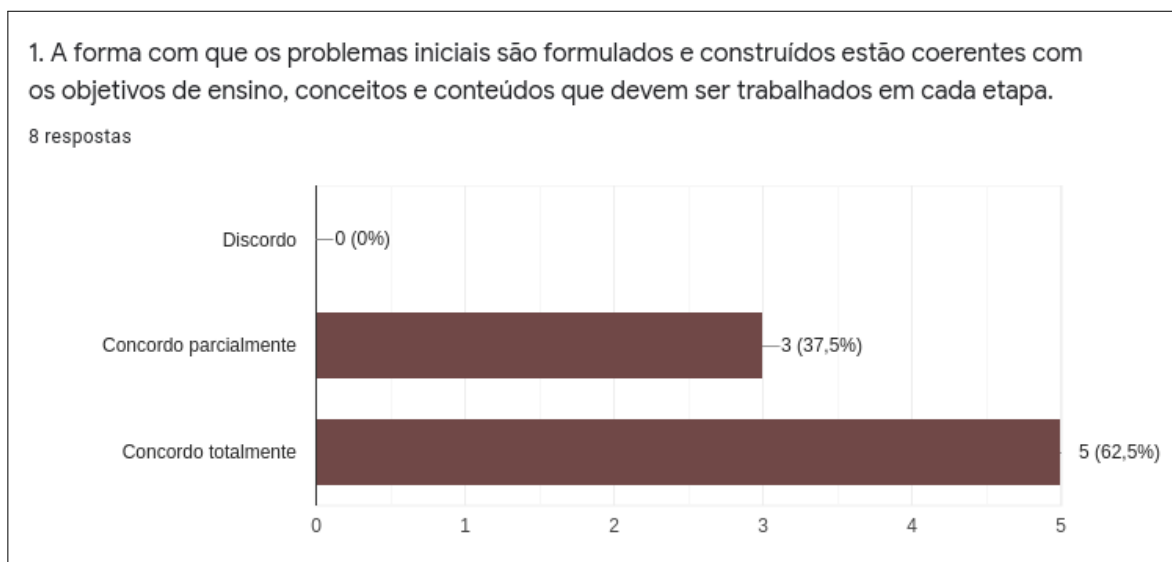
Poderia questionar sobre a aplicabilidade das avaliações propostas em diferentes contextos escolares.

Seria interessante o uso de questões de múltiplas escolhas mescladas com questões discursivas principalmente em questões cujas respostas dependem de uma maior memorização. Isto tornaria a correção das avaliações menos árdua para o aplicador do produto.

Fonte: Via Google Forms.

C.5 Problematização

Figura 60 – Primeira questão sobre problematização.



(a) Resposta objetiva.

Comentários sobre a questão anterior.

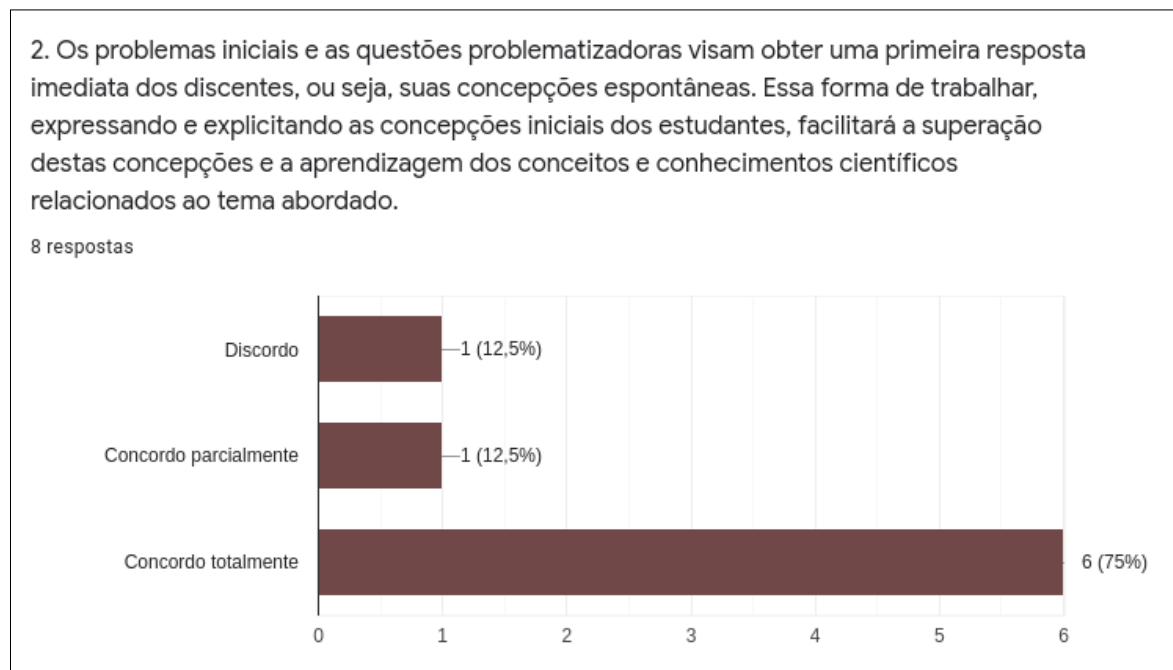
2 respostas

Fiquei com a impressão de serem perguntas muito vagas, ou mesmo muito amplas, abrindo possibilidade de os alunos saírem muito do escopo do objetivo de aprendizagem, sendo difícil e trabalhoso para o professor guiá-los novamente para o objetivo da aula. Exemplo: iniciar a aula com a pergunta "Que mancha é esta que aparece no céu?" abriria possibilidade para respostas excessivamente diversas, possivelmente dispersando a turma por alguns minutos. Não tenho conhecimento aprofundado sobre a metodologia, posso estar cometendo algum equívoco ao propor algo que interfira nas concepções espontâneas, mas imagino ser possível iniciar a investigação já com uma ideia mais específica de qual assunto será abordado, dizendo que a foto é da Via Láctea e fazendo perguntas sobre como, quando e onde você poderia ver aquele tipo de imagem (ou não poder ver, caso de cidade muito iluminada, ou noites nubladas), ou o porquê do nome.

O mestrando, como já comentado, foi muito feliz nesta elaboração. Os vários textos propostos estão condizentes com o conteúdo desenvolvido no produto.

(b) Comentários gerais da resposta objetiva.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 61 – Segunda questão sobre problematização.**(a)** Resposta objetiva.

Comentários sobre a questão anterior.

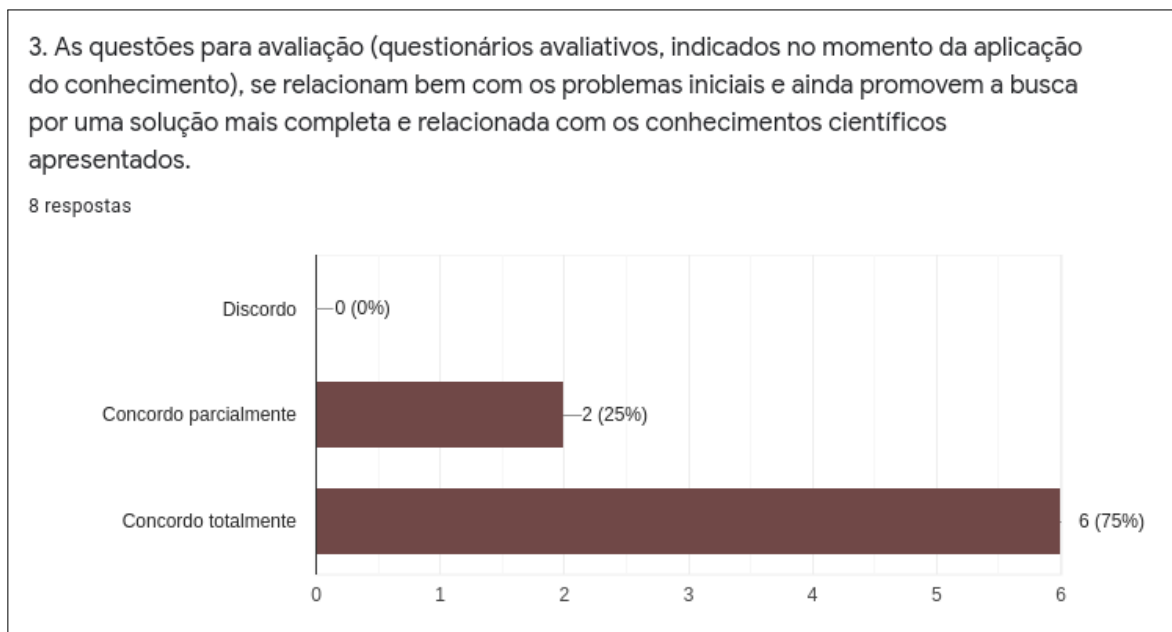
2 respostas

Como eu disse, a metodologia que eu sigo é bem clara sobre as concepções prévias, que não deveriam ser tão espontâneas ou diversas, mas devem ser ativadas preferencialmente aquelas que podem ser ligadas (subsunções) à nova informação (material potencialmente significativo). Aparentemente a metodologia proposta terá que lidar com as concepções alternativas, para quebrá-las durante o processo, enquanto a metodologia com a qual eu trabalho foca em criar as concepções já sem incorreções, evitando o trabalho de quebrá-las ou confrontá-las diretamente.

O mestrando utilizou muito bem algumas técnicas de problematização: em algumas situações com perguntas diretas, em outras com o uso de imagens e finalmente, provocação através de textos previamente escolhidos e condizentes com o assunto.

(b) Comentários gerais da resposta objetiva.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 62 – Terceira questão sobre problematização.**(a)** Resposta objetiva.

Comentários sobre a questão anterior.

3 respostas

As questões se relacionam bem com os problemas iniciais. Algumas perguntas, no entanto, como a 10.1.g), 10.1.h) (que deve ser reescrita) e 10.3.a) não parecem guiar o aluno a uma resolução simples de ser avaliada ou de se esclarecer qual o critério para a correção dela. A maioria das questões não me levaram a buscar uma solução mais completa, por parecerem suficientes para encerrar a discussão, enquanto a 10.3.f) me levou a buscar soluções com complexidade muito acima do nível do ensino médio, então para mim, professor, funcionou, mas questiono o efeito dela para os alunos. Já a questão 10.2.f) cumpre ambos os objetivos em nível suficientemente adequado, desde que não se aprofunde tanto a discussão sobre relatividade geral.

Como já comentado, os questionários abrangem todo o conteúdo abordado no produto e a leitura prévia das respostas será um grande auxílio aos professores que no futuro, aplicarem este produto em suas aulas.

A "forma" que tais questões estão sendo apresentadas são muito tradicionais.

(b) Comentários gerais da resposta objetiva.

Fonte: Via Google Forms.

Figura 63 – Comentários gerais do tópico de problematização.

4. Descreva aqui, caso ache necessário, alguma crítica aos critérios utilizados nas questões anteriores sobre as problematizações apresentadas, ou indique outras questões ou critérios pertinentes que você julgue capaz de mostrar melhor a relação entre os problemas e os conteúdos de aula.

3 respostas

Apesar das críticas, em grande parte por diferenças nas metodologias minha e do autor, o questionário fez perguntas bem relevantes. O que não pôde ser criticado é porque parece estar em nível de excelência, o que certamente é a maior parte do trabalho proposto e aqui validado. Tenho certeza de que o trabalho será de enorme contribuição para atuais e futuros professores!

Sugiro analisar as Competências e habilidades do Currículo de Física do Ensino Médio do Espírito Santo e ver se elas estão sendo desenvolvidas. Com o novo Ensino Médio, não basta mais que o estudante se aproprie de um determinado conteúdo. Agora, zelamos para que o estudante utilize esse aprendizado para tomar decisões conscientes, participar e/ou promover debates em torno de temas científicos e/ou tecnológicos de relevância sociocultural e ambiental, influir positivamente em processos produtivos e mundo do trabalho... e assim por diante.

Insisto em dizer, por experiência própria, que a leitura das respostas aos questionários por parte do professor é bastante cansativa principalmente pela dificuldade que o estudante do ensino médio tem para se expressar no nosso vernáculo. Tive a experiência de, na aplicação de meu produto, de ler muitas respostas evasivas e sem sentido que dificultaram a verificação se o estudante entendeu bem aquele tópico. O uso de questões com alternativas vai simplificar muito a tarefa de verificação se houve ou não aprendizado.

Fonte: Via Google Forms.

ANEXO A – Termo de consentimento



Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Ciências Exatas

**Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional**

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Este documento informa de sua participação voluntária de um processo de validação a priori de uma sequência de ensino sobre “Evolução estelar, galáxia e buracos negros: Uma proposta didática para o ensino médio referenciada nos três momentos pedagógicos e na significação conceitual”. Ainda, esclarece que sua participação é livre e opcional, assim solicitamos sua autorização para utilização e análise dos dados validados por sua pessoa no instrumento de validação. Todas as informações que forem analisadas e compartilhadas serão sigilosas, assim como nomes e informações que identifique sua participação. Ressaltamos ainda, este trabalho não possui fins lucrativos e/ou gratificação financeira.

Em caso de dúvidas, entrar em contato com mestrando Marcos V Oliveira (mrsvoliveira@gmail.com), orientador da proposta Prof. Dr. Sérgio Mascarello Bisch (sergiobisch@gmail.com) e/ou com o coorientador Prof. Dr. Flávio Gimenes Alvarenga (flavio.alvarenga@ufes.br).

O instrumento de validação a priori, será feita através de um formulário (Google forms), onde cada questão está disposta em blocos, buscando uma resposta objetiva e discursiva, com comentários sobre cada questão ou mesmo de um tópico. Coletado os dados pelo instrumento, será feita a análise de cada questão, onde posteriormente o validador pode ser consultado para um maior esclarecimento caso necessário.

CONSENTIMENTO DA PARTICIPAÇÃO DA PESSOA COMO SUJEITO DA PESQUISA

Eu, _____, declaro que fui informado e esclarecido sobre o presente documento, entendendo todos os termos acima expostos, e que voluntariamente aceito participar desta pesquisa. Estou ciente dos procedimentos nela envolvidos, assim como os possíveis riscos e benefícios, caso existam, decorrentes de minha participação. Foi-me garantido que posso interromper minha participação e retirar meu consentimento a qualquer momento, sem que isto leve a qualquer penalidade.

Local e data _____, ____ de _____ de 20 21.

Assinatura do participante