



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

**Catálogo Estelar: Proposta de Gamificação para a Introdução de
Conceitos da Evolução Estelar no Ensino Fundamental**

Matheus Cavalcante Fonseca

Carlos Augusto Domingues Zarro

Vladimir Jearim Peña Suarez

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Matheus Cavalcante Fonseca, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro

Janeiro de 2025

Sumário

1. Apresentação	1
2. Fundamento da Evolução Estelar	2
2.4.1 Nascimento de Estrelas	2
2.4.2 Classificação de Estrelas	3
2.4.3 Evolução dos diferentes tipos de Estrelas e Fusão Nuclear	7
2.4.4 Objetos Compactos	14
3. Plano de Aula para a aplicação do jogo Catálogo Estelar	18
4. Manual do Jogo Catálogo Estelar	23
5. Questionário da Segunda Aplicação	32
6. Download das peças do jogo	42
7. Referências	44

1. Apresentação

Caro professor, este material instrucional foi desenvolvido como parte da dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, com o objetivo de oferecer uma nova ferramenta pedagógica para o ensino de evolução estelar. Com base na gamificação e na aprendizagem baseada em jogos, o jogo Catálogo Estelar foi projetado para tornar a experiência de aprendizado mais dinâmica e envolvente, estimulando a curiosidade e o pensamento crítico dos alunos.

Este material inclui um capítulo voltado para a definição de conceitos de evolução estelar essenciais para um professor que pretenda utilizar este produto, o plano de aula e o manual do jogo, além um modelo de questionário voltado para a avaliação do aprendizado dos alunos e um capítulo com o link para download das peças do jogo, incluindo modelos 3D e cartas ilustrativas e as devidas instruções para sua reprodução. O plano de aula detalha as etapas de aplicação do jogo em sala, destacando as estratégias pedagógicas que visam maximizar a compreensão dos conceitos abordados. O manual fornece todas as instruções necessárias para a condução da atividade, garantindo que o professor possa adaptar a dinâmica ao perfil de sua turma.

Este material foi pensado como uma base inicial, aberta a adaptações e aprimoramentos conforme as necessidades de cada contexto escolar. Acreditamos que o uso do Catálogo Estelar em sala de aula possa inspirar novas práticas pedagógicas e fortalecer o ensino de Ciências, tornando-o mais atrativo e conectado à realidade dos estudantes.

2. Fundamento da Evolução Estelar

Para a utilização eficaz do material didático proposto, é fundamental que o docente tenha uma compreensão sólida dos conceitos-chave que serão explorados ao longo da atividade, ainda que o nível de detalhamento em sala de aula não atinja a mesma profundidade desses temas. A complexidade desses processos exige uma base conceitual que permita ao professor mediar o conteúdo de maneira acessível aos alunos, adequando as explicações ao seu nível de compreensão.

Nesta seção, serão apresentados de forma mais detalhada os mecanismos e etapas envolvidos na evolução estelar, abrangendo os diferentes tipos de estrelas e suas respectivas trajetórias de vida. Com isso, o docente estará mais bem preparado para abordar tanto as interações entre os diferentes tipos de estrelas quanto os impactos dessas interações no universo, oferecendo uma visão mais completa dos fenômenos estelares e suas consequências cosmológicas.

2.1 Nascimento de Estrelas

Toda estrela se origina a partir de nuvens de moléculas, geralmente localizadas em grandes nuvens interestelares dentro das galáxias, compostas majoritariamente de gás hidrogênio e monóxido de carbono, com massas de até 30000 massas solares ($M_{\odot}$) e diâmetros de aproximadamente 10 parsecs¹ (KARTTUNEN, 2017), como também em nebulosas planetárias e remanescentes de supernovas. A ação da força gravitacional sobre essas nuvens faz com que as moléculas comecem a se aglomerar, atraindo-se mutuamente e formando núcleos cuja gravidade aumenta à medida que acumulam massa. A energia potencial gravitacional da poeira estelar circundante é convertida em energia térmica e cinética à medida que o material se comprime, resultando em um aumento progressivo da temperatura no interior desses núcleos. Nesse estágio, temos a formação de uma protoestrela, cuja composição é predominantemente de moléculas de hidrogênio (MORISON, 2008).

¹ Unidade de comprimento que equivale a distância do Sol a um objeto que possua ângulo de paralaxe igual a um segundo de arco, ou seja, aproximadamente 3,26 anos-luz.

Essa protoestrela continuará a ganhar massa de sua nuvem molecular de origem, o que eleva ainda mais sua temperatura interna, embora a um ritmo mais lento. Isso ocorre porque, à medida que a concentração de hidrogênio nuclear aumenta, o gás começa a ser ionizado, formando plasma, processo que consome parte da energia térmica gerada. À medida que a protoestrela acumula massa suficiente e grande parte de seu material se transforma em plasma, a pressão no núcleo aumenta a níveis críticos. Essa pressão é suficiente para que comecem a ocorrer reações de fusão nuclear, liberando uma quantidade significativa de energia no processo. O tempo de duração desse processo depende da massa inicial da protoestrela, podendo variar entre aproximadamente 20 mil anos para estrelas com $30 M_{\odot}$ e 500 milhões de anos para estrelas com $0,1 M_{\odot}$ (KARTTUNEN, 2017). Com o início da fusão nuclear de hidrogênio, a estrela atinge o equilíbrio hidrostático. Nesse ponto, a estrela entra na fase conhecida como fase da Sequência Principal, mencionada posteriormente.

2.2 Classificação de Estrelas

Após uma estrela alcançar a fase da Sequência Principal, suas características são determinadas por sua massa, que é o principal parâmetro físico responsável por definir sua evolução, temperatura, luminosidade e duração de vida. Observa-se que os valores de temperatura e luminosidade também aumentam de acordo com a massa da estrela observada. Nesse estágio, as estrelas podem apresentar diversidade quanto aos parâmetros mencionados. Para compreender essas diferenças e medir suas propriedades a partir observacionalmente, é necessário abordar alguns conceitos fundamentais da Física.

Estrelas podem ser aproximadas como corpos negros, que são objetos ideais que absorvem e emitem radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, com as taxas de emissão e absorção de energia sendo iguais quando há equilíbrio térmico. De acordo com a Lei de Wien, existe uma relação entre a temperatura de uma fonte radiativa que pode ser modelada como corpo negro, e o valor de comprimento de onda mais representativo da distribuição da energia radiativa da fonte para o qual a

emissão é máxima. Tal comprimento de onda corresponde à cor da estrela. Estrelas mais quentes, por exemplo, emitem radiação mais intensa em comprimentos de onda menores, assumindo cores azuladas, enquanto estrelas mais frias irradiam mais energia em comprimentos de onda maiores, resultando em cores avermelhadas.

Entretanto, o espectro emitido por uma estrela não é totalmente contínuo, pois os átomos que a compõem absorvem radiação em comprimentos de onda específicos, criando linhas escuras características no espectro, chamadas linhas de absorção. A intensidade e a localização dessas linhas dependem da composição química e das condições físicas da estrela. Por meio da análise espectral, realizada com instrumentos como o espectrômetro, é possível determinar estas informações sobre a estrela. Para esta dissertação, utilizaremos a classificação estelar de Yerkes, ou Morgan-Keenan (MK). Esta classificação relaciona o tipo de uma estrela a duas de suas grandezas: temperatura de sua superfície e luminosidade (KARTTUNEN, 2017).

A temperatura de uma estrela é relevante pois ela pode ser obtida a partir da cor de uma estrela devido ao efeito da radiação de corpo negro. Assim, entendemos que as estrelas mais azuladas são as mais quentes, com temperaturas acima de 20000 K, enquanto as estrelas mais avermelhadas são mais frias, com temperaturas por volta de 3000 K. Com base nisso podemos introduzir uma classificação inicial crescente com a temperatura: M para estrelas vermelhas (aproximadamente 3000 K), K para estrelas laranja-amareladas (aproximadamente 4000 K), G para estrelas amarelas (como o Sol, aproximadamente 5500 K), F para estrelas branca-amareladas (aproximadamente 7000 K), A para estrelas brancas (aproximadamente 9000 K), B para estrelas branca-azuladas (aproximadamente 15000 K) e O para estrelas azuis (já mencionado, acima de 20000 K) (KARTTUNEN, 2017). É importante notar que também existem classificações de temperaturas para outros tipos de estrelas, como T para anãs marrons² e W para estrelas Wolf-Rayet³.

² Anãs marrons são objetos com massa similar a estrelas de tipo M, mas incapazes de realizar fusão nuclear.

³ Estrelas Wolf-Rayet são estrelas massivas em estágio avançado de evolução, caracterizadas por ventos estelares intensos e perda significativa de massa.

A luminosidade de uma estrela, por sua vez, é uma grandeza física que representa a quantidade total de energia emitida por unidade de tempo em todas as direções. Para compreender como a luminosidade é mensurada observacionalmente, é necessário introduzir o conceito de magnitude. Magnitude é uma medida logarítmica relativa que descreve o brilho, ou fluxo de energia por tempo e área, de um objeto celeste, e pode ser dividida em magnitude aparente, que corresponde ao brilho observado, e magnitude absoluta, que corresponde ao brilho que o objeto teria se estivesse a uma distância padrão de 10 parsecs, em repouso relativo ao observador. O cálculo da luminosidade pode ser realizado com base no brilho aparente de uma estrela e na sua distância da Terra (FRAZZOLI, 2012). Entretanto, utilizando a Lei de Stefan-Boltzmann também é possível obter a relação:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Onde R é o raio da estrela, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura superficial da estrela. Essa relação demonstra que estrelas com temperaturas mais elevadas emitem mais energia por unidade de área do que estrelas mais frias. No entanto, é possível identificar estrelas com a mesma temperatura, mas luminosidades significativamente diferentes. Isso ocorre porque a luminosidade também depende do raio da estrela, trazendo a necessidade de também classificar as estrelas dentro de cada tipo em relação a sua luminosidade.

A partir destas informações podemos introduzir o Diagrama de Hertzsprung-Russel (HR). Este é uma ferramenta utilizada para compreender as propriedades e a evolução das estrelas. Este diagrama pode ser representado em diferentes formas, dependendo dos objetivos específicos de sua aplicação. Uma das versões do diagrama relaciona a cor das estrelas à sua magnitude, como ilustrado na Figura 1, e é utilizado para o estudo de aglomerados estelares. Aqui, cor é um valor associado à sua temperatura, onde valores menores representam estrelas azuladas, e consequentemente mais quentes. Esse tipo específico de representação é denominado diagrama cor-magnitude (CMD), sendo uma ferramenta essencial para a análise da composição e evolução de populações estelares (KARTTUNEN, 2017).

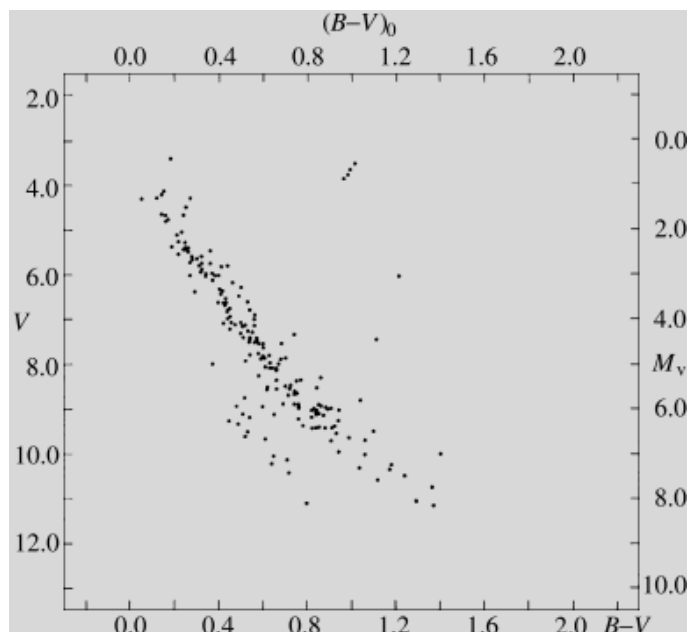


Figura 1. Diagrama cor-magnitude do aglomerado de Híades. Fonte: disponível em (KARTTUNEN, 2017)

Contudo, a forma do diagrama HR mais relevante para este trabalho correlaciona a temperatura superficial das estrelas, disposta no eixo horizontal, com sua luminosidade, representada no eixo vertical. Essa versão permite a identificação e a análise da distribuição dos diferentes tipos de estrelas no universo, revelando possíveis padrões. Como mostrado na Figura 2, observa-se a existência de uma faixa onde a maioria das estrelas se posiciona, conhecida como Sequência Principal. Essa faixa representa a fase inicial da evolução estelar, conforme mencionado anteriormente, a fase da Sequência Principal.

O Diagrama HR também permite acompanhar a evolução de diferentes tipos de estrelas ao longo do tempo, analisando suas posições em estágios distintos de vida. Assim, observa-se que é possível identificar como elas deixam a Sequência Principal à medida que suas propriedades sofrem alterações durante o processo evolutivo, e que estrelas de diferentes classificações, e consequentemente diferentes massas, passam por processos evolutivos distintos.

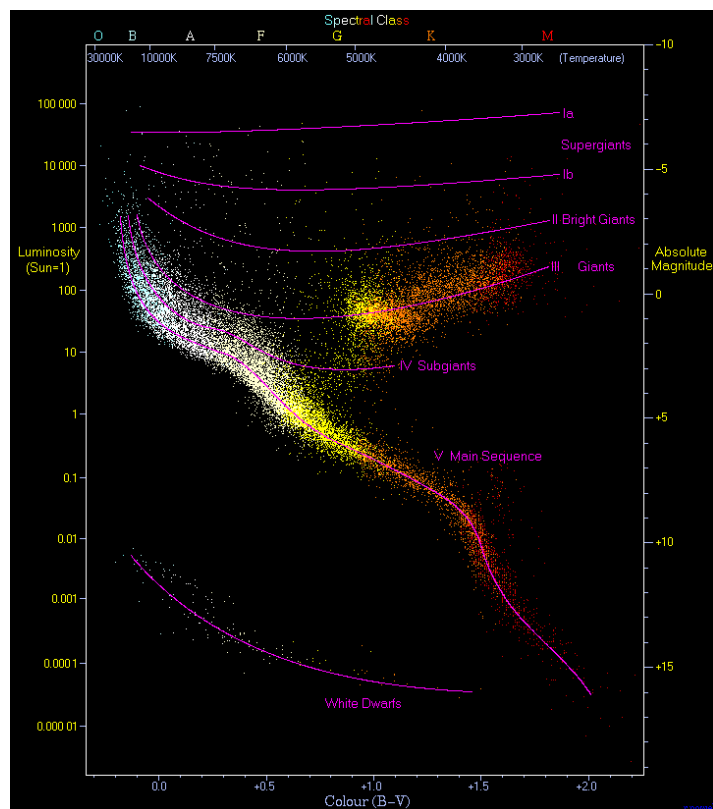


Figura 2. Diagrama Hertzsprung Russel. Fonte: disponível em <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HRDiagram.png#>

Assim, ao observar que a luminosidade de uma estrela irá mudar de acordo com a sua etapa evolutiva, é possível separá-la em 5 classes de luminosidade: V para estrelas da sequência principal, IV para subgigantes, III para gigantes normais, II para gigantes luminosas e I para supergigantes luminosas. Essas diferenças de luminosidade surgem pelo fato de que mesmo que estrelas da sequência principal, que representam a fase inicial de sua evolução, tenham aproximadamente a mesma massa que gigantes, que se encontram em estágios posteriores, o volume maior de estrelas gigantes faz com que a força gravitacional na superfície dessas estrelas seja menor.

2.3 Evolução dos diferentes tipos de Estrelas e Fusão Nuclear

A partir do momento em que uma estrela se encontra na fase da sequência principal, área do Diagrama HR já mencionada onde se encontram a maioria das estrelas, ela possui condições de pressão e temperatura altas o suficiente para que ocorra um fenômeno conhecido como fusão nuclear, onde dois ou mais núcleos atômicos se fundem em um único átomo mais pesado. A

diferença de massa dos átomos antes da fusão e do átomo resultante é convertida em energia e partículas subatômicas, determinada pela equivalência massa-energia (EINSTEIN, 1905):

$$E = m \cdot c^2$$

É devido ao equilíbrio entre a força gerada por essas reações de fusão e a força gravitacional de uma estrela que ela se mantém estável. Ou seja, qualquer mudança em como uma estrela gera energia através da fusão poderá mudar sua estrutura. Como inicialmente as estrelas são formadas principalmente por hidrogênio, as reações de fusão nuclear realizadas por estrelas na fase da sequência principal se baseiam em fundir hidrogênio em seu núcleo, visto que esta é a região de maior pressão e temperatura. Esse processo resulta na formação de hélio. Como durante esta fase a estrela se encontra em equilíbrio estável, esta é a etapa de vida mais longa de uma estrela (KARTTUNEN, 2017).

Entretanto, a forma com que as estrelas fundem hidrogênio para produzir hélio muda de acordo com a massa das estrelas, que pode mudar drasticamente ao observar diferentes classificações espectrais. Para estrelas como o Sol, a transformação de H em He acontece através das reações chamadas de ciclo próton-próton. Na Figura 3 vemos a forma mais comum desta cadeia. Como neutrinos são partículas que interagem muito fracamente com a matéria, aqueles gerados pela cadeia próton-próton conseguem escapar facilmente da estrela, enquanto os fótons são lentamente carregados por convecção em suas camadas externas. Esse é um processo extremamente lento, podendo levar por volta de 10^{10} anos em média (MORISON, 2008) para ocorrer.

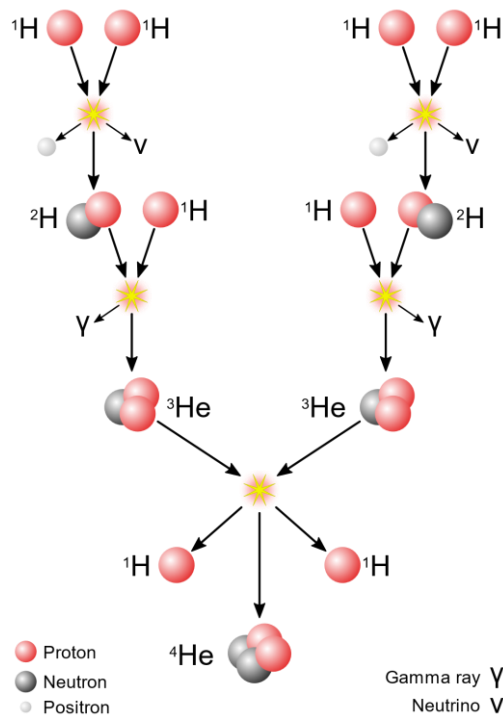


Figura 3: Cadeia Próton-Próton. Fonte: disponível em <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=51118538>

Para as estrelas com massas acima de $1,5 M_{\odot}$, a pressão e temperatura são altas o suficiente para ocorrer uma cadeia de fusões diferente, mais acelerada, do que a cadeia próton-próton que ocorre nas estrelas menores da sequência principal, chamada de ciclo CNO. Nessa reação se tem a presença de outros núcleos como carbono, nitrogênio e oxigênio, que não enriquecem a composição do núcleo estelar, sendo apenas catalisadores, emitindo hélio, conforme ilustra a Figura 4.

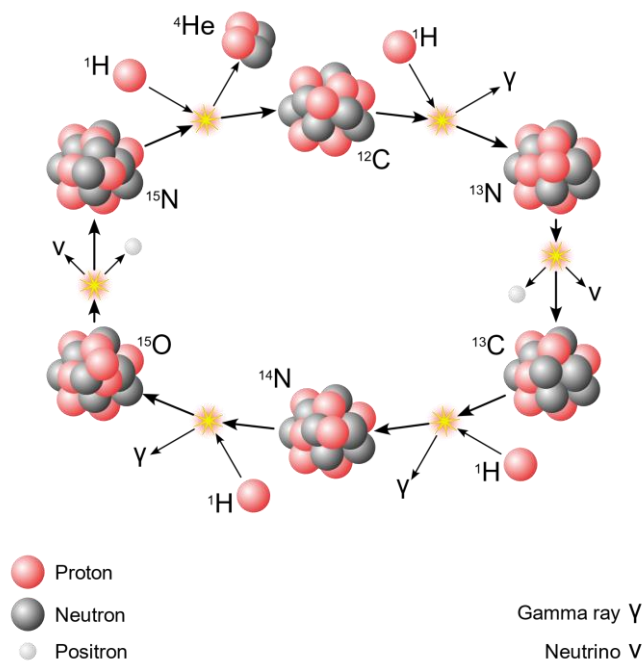


Figura 4: Ciclo CNO. Fonte: disponível em <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=691758>

Como as estrelas maiores possuem mais massa, e consequentemente mais hidrogênio, seria natural imaginarmos que a relação entre a massa das estrelas e seu tempo de vida seria diretamente proporcional, visto que estrelas com mais massa teriam mais “combustível” para fundir. Entretanto, a taxa de reação do ciclo CNO aumenta proporcionalmente à temperatura da estrela, então quanto mais quente e mais massiva ela for, mais rápido passará por sua fase na sequência principal. Por exemplo, estrelas de tipo espectral O, as maiores da sequência principal, passam por volta de 4,9 milhões de anos nesta fase, estrelas G como o Sol passam aproximadamente 10 bilhões de anos, enquanto para estrelas M, as menores da sequência principal, essa etapa pode durar trilhões de anos (CARROLL; OSTLIE, 2017).

Quando uma estrela não possui mais hidrogênio nuclear, a composição do núcleo é majoritariamente hélio. As fusões de hidrogênio poderão acontecer em uma camada externa ao núcleo, que por sua vez seguirá transferindo cada vez mais hélio ao núcleo, mas a produção de energia dependerá dos processos de fusão de hélio, aumentando o tamanho da estrela. A fase gigante de uma estrela é a etapa em que ela já possui uma pressão tão alta em seu núcleo, devido ao acúmulo de hélio, que a principal emissão de energia da estrela passa

a ser da fusão de hélio, produzindo carbono, numa reação conhecida como processo triplo alfa, ilustrada na Figura 5.

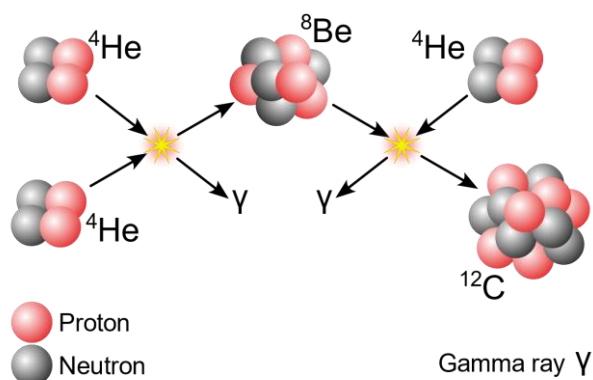


Figura 5: Processo Triplo Alfa. Fonte: disponível em <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=697609>

Para estrelas de tipos espectrais mais frios, como estrelas M, chamamos essas estrelas de Gigantes Vermelhas, enquanto para estrelas de tipos espectrais mais quentes, chamamos de Supergigantes Vermelhas. Durante esta etapa, as estrelas tendem a aumentar sua luminosidade enquanto diminuem de temperatura. Adicionalmente, o tempo de duração desta fase é muito menor do que a duração da fase da Sequência Principal. Por exemplo, uma estrela como o Sol duraria aproximadamente 1 bilhão de anos como uma Gigante Vermelha (KARTTUNEN, 2017).

Quando o hélio nuclear se esgota, a composição do núcleo será de carbono, com camadas externas de hélio, e as estrelas sofrem ainda mais mudanças, que também irão depender de suas massas, novamente devido à alta pressão e temperatura no núcleo de estrelas massivas. Em estrelas de massas de até $8 M_{\odot}$ ocorre um processo parecido com o início da fase gigante, onde haverá fusão de hélio apenas nas camadas externas das estrelas, adicionando cada vez mais carbono para o núcleo. Esse processo também pode ocorrer com estrelas de massa inferior a $8 M_{\odot}$, caso possuam alta metalicidade⁴. Entretanto, como estrelas nessa fase já fundiam hidrogênio nas camadas externas desde o início de sua fase gigante, o estado de uma estrela que possui duas camadas fundindo elementos diferentes é altamente instável, gerando

⁴ Metalicidade é a proporção de elementos além de hidrogênio e hélio em uma estrela.

pulsos térmicos que aumentam seu tamanho e temperatura, mas geram uma gradual perda de massa da estrela, formando nebulosas planetárias, conforme ilustrado na Figura 6. Então o núcleo resultante dessas estrelas se torna um objeto conhecido como anã branca, objeto mencionado posteriormente, que não realiza mais fusão nuclear.



Figura 6: A nebulosa planetária NGC 3132, com uma anã branca em seu centro.

Fonte: disponível em [Southern Ring Nebula \(NIRCam Image\) | Webb](#)

Já em estrelas mais massivas a pressão no núcleo se tornará alta o suficiente para que surjam processos de fusão nuclear de elementos ainda mais pesados, cada um gerando uma nova camada na estrela enquanto o núcleo funde o próximo elemento, iniciando pela fusão de carbono, que pode ter oxigênio como um de seus produtos. Após o carbono, a estrela poderá fundir oxigênio, podendo produzir silício. Adicionalmente, o início dessas reações de fusão pode causar uma grande instabilidade em uma estrela, prematuramente gerando uma supernova, uma explosão intensa que emite uma grande quantidade de energia na forma de neutrinos, além de desencadear a fusão de diversos elementos mais pesados. A Figura 7 ilustra como cada novo processo de fusão cria uma camada na estrela.

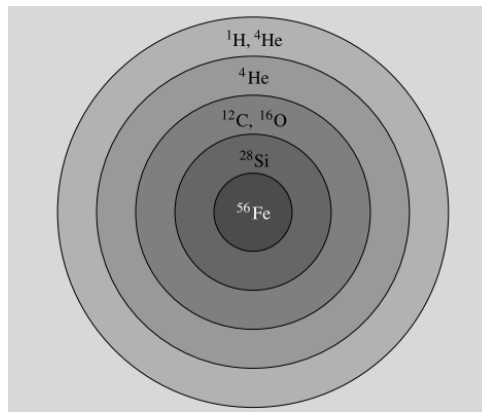


Figura 7: Estrutura de uma estrela massiva prestes a entrar em colapso. Fonte: disponível em (KARTTUNEN, 2017)

Caso a estrela se mantenha estável durante esse processo, ela poderá passar pelo processo de fusão de silício, que resulta em ferro. Entretanto, a produção de ferro é a primeira desse ciclo em que há um déficit de energia entre a utilizada e emitida, como é possível observar na Figura 8. Dessa maneira, a força gerada pela pressão das fusões desaparece, permitindo que a gravidade da própria estrela a colapse rapidamente, resultando uma supernova, uma grande explosão que pode ter luminosidades comparáveis a de uma galáxia inteira (KARTTUNEN, 2017).

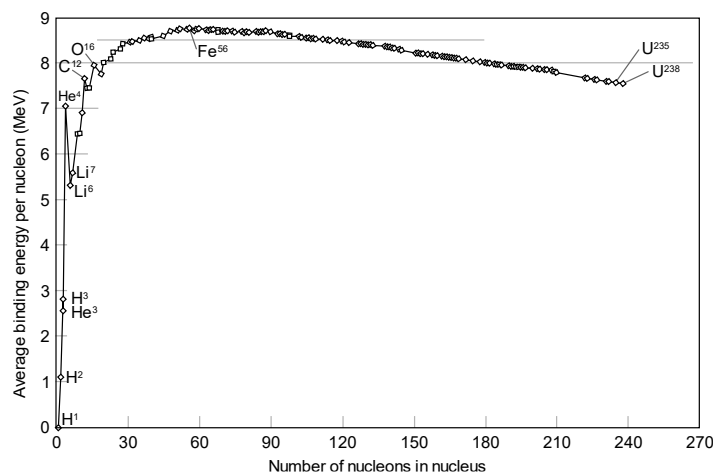


Figura 8: Curva da energia de ligação de núcleos atômicos. Fonte: disponível em <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1540082>

Da mesma maneira que no processo que gera anãs brancas, o núcleo resultante dessas estrelas sofre uma pressão tão intensa que ele também se colapsa. Esse processo pode gerar duas possibilidades de objetos compactos:

Estrelas de Nêutrons, no caso de a estrela possuir uma massa menor que $2,4 M_{\odot}$ antes de colapsar, e Buracos Negros para estrelas ainda mais massivas.

2.4 Objetos Compactos

Conforme apresentado anteriormente, quando estrelas de baixa massa alcançam o estágio final de suas vidas, elas passam por um processo de colapso gravitacional, resultando na formação de objetos densos e compactos conhecidos como anãs brancas. Essas estrelas são compostas predominantemente por matéria degenerada de elétrons, um estado em que a pressão de degenerescência impede que a gravidade continue comprimindo a matéria. Esse fenômeno está fundamentado no Princípio de Exclusão de Pauli, que estabelece que dois elétrons não podem ocupar simultaneamente o mesmo estado quântico em um mesmo sistema. Essa pressão de degenerescência atua como uma força de resistência ao colapso gravitacional, mesmo em condições de gravidade extrema.

Essa característica faz com que anãs brancas sejam muito densas, comprimindo massas comparáveis à do Sol em volumes semelhantes ao de planetas terrestres, como a Terra. Para termos de comparação, a densidade média de uma anã branca é 1 milhão de vezes maior que a densidade média do Sol. Diferentemente das estrelas em fases anteriores, as anãs brancas não realizam mais fusão nuclear. O brilho que emitem provém exclusivamente da radiação térmica residual, que gradualmente diminui ao longo de bilhões de anos, tornando-as objetos de luminosidade muito baixa em comparação com suas elevadas temperaturas. Essa relação é claramente observada no Diagrama HR, na Figura 9, onde as anãs brancas ocupam uma região distinta no canto inferior esquerdo.

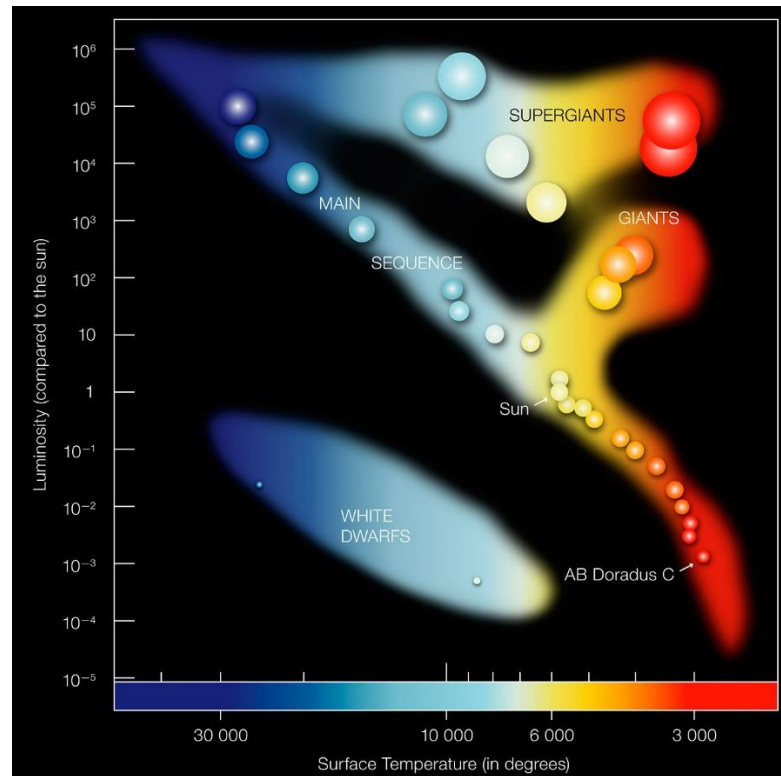


Figura 9. Diagrama de HR ilustrando as áreas que cada fase estelar ocupa. Fonte: disponível em: <https://www.eso.org/public/portugal/images/eso0728c/?lang>

No caso de estrelas mais massivas, o colapso gravitacional segue um caminho muito mais intenso, devido à maior quantidade de massa envolvida no processo. Quando essas estrelas esgotam seu combustível nuclear, o colapso repentino de seu núcleo provoca uma supernova conhecida como supernova de colapso de núcleo. Durante esse evento, as pressões extremas no núcleo da estrela desencadeiam reações subatômicas intensas, nas quais os prótons e os elétrons se combinam para formar nêutrons, liberando grandes quantidades de neutrinos no processo. Essa transformação resulta em um estado de matéria degenerada dominado por nêutrons, formando uma estrela de nêutrons, conforme ilustra a Figura 10. Como esse processo pode não ocorrer por completo durante o colapso da estrela, ainda pode haver outros átomos nas camadas externas de uma estrela de nêutrons.

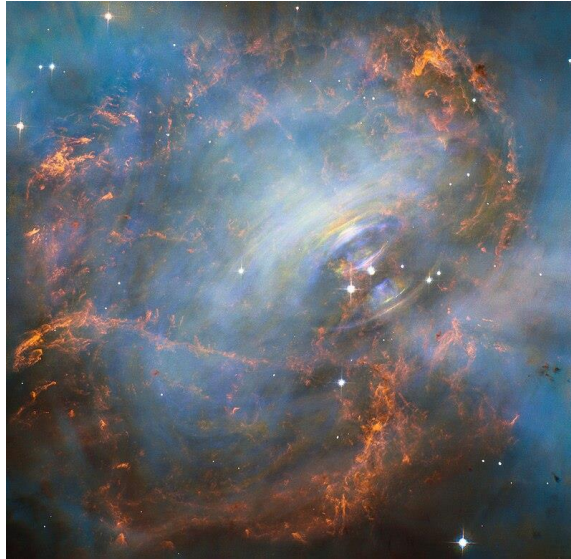


Figura 10. Estrela de nêutrons no centro da Nebulosa do Caranguejo. Fonte: disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moving_heart_of_the_Crab_Nebula.jpg

Essas estrelas são extremamente densas e compactas, com massas de até $2,25 M_{\odot}$ (FAN et al. 2024) em raios de algumas dezenas de quilômetros, resultando em densidades ainda mais extremas que em anãs brancas, de aproximadamente 10^{17} kg/m^3 . Além disso, as estrelas de nêutrons possuem campos gravitacionais e magnéticos intensos, e algumas podem se manifestar como pulsares, emitindo radiação eletromagnética em feixes cíclicos com períodos que podem variar entre microssegundos até alguns minutos (KARTTUNEN, 2017).

Entretanto, no caso das estrelas mais massivas ainda, o colapso gravitacional pode ultrapassar todos os limites de pressão de degenerescência, formando buracos negros. Esses objetos compactos são regiões do espaço-tempo em que a gravidade é tão intensa que nem mesmo a luz consegue escapar, delimitados por uma superfície teórica chamada horizonte de eventos. Buracos negros são classificados em diferentes categorias, de acordo com sua massa: os buracos negros estelares, com massas entre 3 até $15 M_{\odot}$, resultantes do colapso de estrelas massivas; buracos negros intermediários, com massas que variam entre 10^2 e $10^3 M_{\odot}$; e os buracos negros supermassivos, com massas que podem variar entre 10^5 até mesmo $10^9 M_{\odot}$, localizados no centro de galáxias e possivelmente formados pela fusão de buracos negros menores ao longo de bilhões de anos (CARROLL, 2017). Por exemplo, o buraco negro

supermassivo no centro da Via Láctea, SgrA*, registrado na Figura 11, possui uma massa de aproximadamente $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$, valor que Ruiz (2008) e Queiroz (2023) demonstraram ser possível de ser calculado por um estudante de Ensino Médio utilizando a Terceira Lei de Kepler e dados das órbitas de outras estrelas no centro da galáxia.

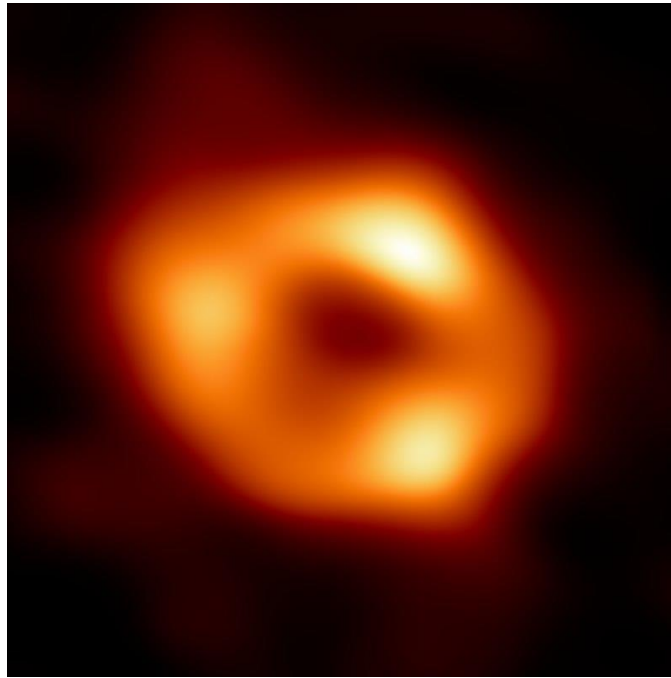


Figura 11. A primeira imagem do Buraco Negro Sgr A*. Fonte: disponível em (THE EVENT HORIZON TELESCOPE COLLABORATION, 2022)

3. Plano de Aula para a aplicação do jogo Catálogo Estelar

Plano de Aula

APLICANDO O CATÁLOGO ESTELAR

Matheus Cavalcante Fonseca

Vladimir Jearim Peña Suarez

Carlos Augusto Domingues Zarro

Série/Etapa: 9º ano do Ensino Fundamental

Duração: 3 tempos de 50 minutos, preferencialmente seguidos

Recursos Didáticos:

- Jogo "Catálogo Estelar" (manual, tabuleiro, cartas e fichas)
- Dispositivos móveis (celulares ou tablets) para acesso ao questionário digital

Conteúdo:

- Tema Central: Evolução Estelar
- Subtemas:
 - Formação de estrelas
 - Fusão nuclear e geração de elementos pesados
 - Classificação estelar por temperatura, cor, massa e luminosidade
 - Diagrama de Hertzsprung-Russell
 - Formação de objetos compactos: anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros
 - Ciclo de vida das estrelas de diferentes massas

Objetivos Gerais:

- Promover a compreensão dos conceitos fundamentais relacionados à evolução estelar, como a fusão nuclear, classificação estelar e formação de objetos compactos.
- Estimular a participação ativa dos alunos por meio de estratégias lúdicas e interativas, utilizando elementos de gamificação.

Objetivos Específicos:

- Relacionar as etapas do ciclo de vida das estrelas às suas propriedades físicas, como massa, luminosidade e temperatura.
- Interpretar graficamente o Diagrama de Hertzsprung-Russell (HR) no contexto do jogo.
- Identificar os processos de fusão nuclear e sua relação com a geração de elementos químicos mais pesados.
- Compreender as diferenças evolutivas entre estrelas de baixa e alta massa e os objetos compactos gerados ao final de suas vidas.
- Avaliar a atividade por meio da análise das percepções e aprendizados dos alunos.

Metodologia:

Este plano de aula tem como base a aplicação do jogo didático "Catálogo Estelar", que integra elementos de gamificação com estratégias pedagógicas ativas. O papel do professor será o de mediador, promovendo discussões e orientando os grupos ao longo das etapas do jogo. A estrutura do jogo foi planejada para que cada fase apresente desafios específicos a serem superados, acompanhados de recompensas que incentivam a progressão dos alunos. As etapas do jogo são organizadas da seguinte forma:

Fase 1: Introdução

Duração: 20 minutos

Inicialmente, o professor apresenta o jogo aos alunos e os separa entre grupos para o jogo, e explica que ele tomará o papel do **supervisor**. É importante notar aqui que o ato de aplicar este jogo em sala de aula é bem diferente de

apenas jogá-lo casualmente, pois ele precisará agir tanto como docente da turma quanto como o supervisor do jogo, imergindo os alunos naquela temática. Aqui, o jogo é usado como um complemento para o entendimento dos conceitos astronômicos.

Após separar os grupos, o professor inicia um questionamento sobre a natureza de uma estrela, incentivando os alunos a falarem sobre todas as informações que eles sabem sobre estrelas, seu funcionamento e suas evoluções. Assim, ao iniciar o jogo e distribuir as Cartas de Estrelas, o professor pode iniciar uma discussão básica sobre o que é uma estrela, mostrando aos alunos que elas podem existir com diferentes tamanhos e cores a partir das Cartas.

É nesta etapa que o professor, como supervisor, traz a temática do jogo, apresentando os grupos de jogadores como astrônomos que buscam observar todos os ciclos de vida das estrelas, e diz que as Cartas que os grupos obtiveram foram as estrelas que eles “observaram” inicialmente nesse papel. Como esta fase funciona como um “tutorial” para a maioria dos conceitos do jogo, ela não possui um desafio específico a superar.

Fase 2: Catalogando as Estrelas

Duração: 20 minutos

- **Objetivo da Fase:** Introduzir a formação de estrelas e o Diagrama HR como ferramenta para classificar estrelas.

Para iniciar esta etapa, o professor introduz aos alunos as informações presentes no tabuleiro, o Diagrama HR. Assim, é possível debater com os alunos a fim de que eles percebam que as informações nas Cartas de Estrelas podem ser associadas a certas posições no gráfico do tabuleiro do jogo. Desta maneira, os alunos podem começar a associar os tipos de estrelas a certas posições no tabuleiro. Após isso, esses conceitos são transformados em mecânica de jogo ao introduzir a ação **Catalogar**.

O desafio para os alunos nessa fase é conseguir **Catalogar** corretamente uma estrela no diagrama. Quando todos os grupos tiverem sucesso nessa fase o professor introduz o conceito de que uma estrela inicialmente é formada

principalmente por Hidrogênio, ao recompensar o grupo que catalogar corretamente com as Fichas de Hidrogênio.

Fase 3: O Conceito de Fusão Nuclear

Duração: 20 minutos

- **Objetivo da Fase:** Apresentar o conceito de fusão nuclear e sua importância na evolução das estrelas.

Nesta fase, o desafio é compreender o conceito de fusão nuclear e utilizá-lo corretamente na ação **Evoluir**. Com a introdução das Fichas, os alunos podem ter se perguntado da relação entre elas e a lista de “Fusões” em suas Cartas de Estrelas. A partir deste ponto, o professor pode trazer o questionamento sobre como uma estrela brilha, se ela possui algum “combustível” e qual seria.

Depois de um debate com os alunos, o professor introduz o conceito de fusão estelar, associando o real com a mecânica presente no jogo através da ação de **Evoluir**, também apontando para o fato de que as Cartas de Estrelas maiores possuem trocas diferentes, que representam os diferentes tempos de vida dessas estrelas. Como recompensa, os alunos conseguem evoluir as estrelas e obter fichas de elementos mais pesados.

A partir deste ponto, as mecânicas principais do jogo já foram introduzidas, então o professor agirá como **supervisor** enquanto os alunos jogam.

Fase 4: Evoluindo as Estrelas

Duração: 50 minutos

- **Objetivo da Fase:** Explorar as diferenças entre a evolução de estrelas de diferentes massas.

Para esta fase, o desafio é observar como diferentes tipos de estrelas evoluem e se tornam gigantes. Em algum ponto do jogo, um dos grupos usará a ação **Evoluir** em uma estrela e ela mudará para sua fase gigante. É a partir daqui que o professor explica aos alunos que após um certo tempo as estrelas param de realizar fusões com hidrogênio, saindo da Sequência Principal e se tornando gigantes.

É possível então indicar aos alunos a possibilidade de que, ao final de todas as fusões, nem todas as estrelas terão o mesmo destino. Isso pode incentivar os alunos a testarem diferentes tipos de estrelas no jogo.

Fase 5: Objetos Compactos e Elementos Pesados

Duração: 20 minutos

- **Objetivo:** Compreender os processos de formação de objetos compactos (anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros) e suas diferenças.

Quando um dos grupos conseguir terminar todas as fusões disponíveis em uma estrela, ela se transformará em um objeto compacto, podendo ser uma Anã Branca, uma Estrela de Nêutrons ou um Buraco Negro. A partir deste ponto, assim que um grupo obter alguma dessas peças, o professor pode explicar um pouco mais sobre o processo de formação e o que torna cada um desses objetos único na Física e no jogo, explicando as mecânicas relacionadas a cada um.

Também é necessário que o professor explique sobre a existência de elementos mais pesados com a presença de supernovas e das Fichas de Ferro no jogo, trazendo a perspectiva de que toda a matéria formada por átomos mais pesados foi gerada nesses eventos.

Fase 6: Finalizando

Duração: 15 minutos

O jogo termina quando um dos grupos conseguir acumular 6 pontos, independente de qual combinação de objetos compactos eles conseguiram observar. Para fins avaliativos, quando o jogo acabar, o professor pode distribuir o link para um questionário sobre a atividade para os alunos, na forma de um QR Code inserido no final do Manual de Regras do jogo.

4. Manual do Jogo Catálogo Estelar



CATÁLOGO ESTELAR

Neste jogo competitivo, os jogadores são astrônomos que catalogam o céu em busca de observar a transformação de uma Estrela em um Buraco Negro. É necessário que o jogo possua no mínimo **3 grupos** (cada um com pelo menos 1 jogador) e um **supervisor**, como por exemplo, um professor.

Peças do jogo:

- Tabuleiro do Diagrama de Hertzsprung-Russell
- Cartas de Estrelas
- Peças de Estrelas
- Fichas de elementos variados
- Um dado de 4 lados (d4), um dado tradicional (d6), um dado de 8 lados (d8), um dado de 10 lados (d10) e um dado de 12 lados (d12)

Como Jogar:

No início do jogo, cada grupo recebe 4 Cartas de Estrelas aleatórias. Tematicamente, essas são as estrelas que cada grupo de astrônomos “observou”. Agora eles precisam aprender a catalogar.

Após essa etapa, se iniciam os turnos do jogo. Em todo turno os jogadores devem utilizar as duas ações do jogo, sempre nesta ordem: **Evoluir** e então **Catalogar**. No primeiro turno ainda não há nenhuma Estrela *catalogada* para poder **Evoluir**, então inicialmente todos devem apenas **Catalogar**.

Ação: Catalogar

Ao utilizar a ação **Catalogar**, o grupo tem uma chance para acertar onde uma de suas Cartas de Estrela se encaixaria no Tabuleiro do Diagrama HR, baseado nas informações de *Luminosidade* e *Temperatura*. Para isso, o grupo deve pegar uma Peça de Estrela do mesmo tipo da Carta escolhida e posicioná-la no Tabuleiro. Após isso, o supervisor confirma se o grupo catalogou a estrela corretamente conferindo no Manual de Estrelas.

- Caso o grupo **erre** a posição, o supervisor pode indicar quantas casas faltaram para a estimativa ser correta.
- Caso o grupo **acerte** a posição, receberão uma quantidade de Fichas de Hidrogênio de acordo com a tabela abaixo. Adicionalmente, precisam posicionar a sua Carta de Estrela ao lado do Tabuleiro para todos verem. Agora aquela Estrela está *catalogada*, ou seja, todos os outros grupos podem usar a ação de **Evoluir** nela.

É importante notar que como o tabuleiro não indica a Temperatura de todas as casas, há uma margem de erro de uma casa ao redor da posição correta na qual o grupo pode ser considerado correto pelo supervisor.

<i>Tipo</i>	M	K	G	F	A	B	O
<i>Recompensa</i>	D6/2	D4	D6	D8	2D4	D10	D12

Observação: Para Estrelas M, jogue um D6 e divida o número pela metade (arredondando para cima). Para Estrelas A, jogue um D4 duas vezes, e some os resultados.

Como o Tabuleiro possui espaços limitados, Estrelas que tenham propriedades parecidas podem ter a mesma posição no Tabuleiro. Um grupo pode posicionar uma nova Estrela por cima de uma *Estrela catalogada*. **Quando três Estrelas são catalogadas em uma mesma casa, todos os jogadores recebem 2 Fichas de Hidrogênio.**

Apenas quando todas as Cartas de Estrelas de um grupo forem *catalogadas*, o grupo receberá mais 4 Cartas de Estrelas aleatórias.

Ação: Evoluir

Esta ação pode ser utilizada em qualquer *Estrela catalogada*, isto é, uma Estrela que foi posicionada corretamente no Tabuleiro do Diagrama HR com a ação **Catalogar**, mesmo que tenha sido catalogada por outro grupo. Ao utilizar a ação **Evoluir**, o grupo entrega uma quantidade de Fichas de Elementos para que uma Estrela possa fazer uma fusão, devolvendo Fichas de Elementos mais pesados ao grupo e ficando mais próxima de evoluir para seu próximo estágio.

Cada tipo de Estrela possui uma certa quantidade de fusões diferentes. Uma Estrela tipo M, por exemplo, possui 6 fusões de $2\text{H} \rightarrow \text{He}$ (troca duas Fichas de Hidrogênio por uma de Hélio) e 6 fusões de $3\text{He} \rightarrow \text{C}$. Já uma Estrela tipo O, possui apenas uma fusão como essas, mas consegue fazer fusões de elementos que as Estrelas de tipos menores não possuem.



Isto se dá devido ao fato de que estrelas menores possuem um tempo de vida na Sequência Principal muito mais longo do que de estrelas maiores.

Imagem 1: Exemplo de uma Carta de Estrela tipo O, da estrela Sher 22.

Ao escolher uma Estrela para **Evoluir**, um grupo pode utilizar no máximo **seis fichas de elementos** de um mesmo tipo em um único turno, desde que seja em uma mesma Estrela.



Por exemplo, ao **Evoluir** uma Estrela catalogada tipo M, eles poderiam fundir 6 Fichas de Hidrogênio de uma única vez, fazendo três fusões e recebendo 3 Fichas de Hélio. Dessa maneira, ainda seria necessário realizar mais 3 fusões $2H \rightarrow He$ nessa Estrela. Porém, caso o grupo já tivesse algumas Fichas de Hélio, eles não poderiam fazer fusões de $2H \rightarrow He$ e $3He \rightarrow C$ em um único turno.

Imagem 2: Exemplo de uma Carta de Estrela tipo M, da estrela Proxima Centauri.

A quantidade de fusões realizadas por uma Estrela catalogada deve ser contada posicionando as Fichas de Elementos em cima da Carta, até que ela termine as fusões daquele tipo. Após isso as Fichas devem ser devolvidas ao supervisor. É recomendado que ainda assim seja posicionada uma das Fichas daquela troca, de cabeça para baixo, para indicar quantos tipos de fusões já foram esgotados.

✧ ***Avançando as fases de uma Estrela: fase gigante e os objetos compactos***

Quando uma Estrela realiza sua última fusão $2H \rightarrow He$, ela avança para uma fase gigante, saindo da Sequência Principal. O grupo que realizar essa última fusão de Hidrogênio recebe uma Ficha de Hidrogênio extra. Adicionalmente, se isso ocorrer com uma Estrela **maior que tipo K**, ela também irá mudar sua posição no Tabuleiro. A cada novo tipo de fusão finalizado a Estrela mudará a sua posição no tabuleiro, aumentando sua luminosidade e diminuindo sua temperatura. Estrelas F, G e A andam uma casa para cada evolução, enquanto estrelas B e O andam duas casas para cada evolução. Note que se deve tomar cuidado ao mover as peças, pois é possível perder a noção de qual peça de Estrela se relaciona com qual carta.

Ao terminar todas as fusões em uma Carta de Estrela, ela entra em sua etapa final da evolução, se tornando um objeto compacto. O grupo que realizou a última fusão recebe a peça, valendo uma quantidade de pontos:

- **Estrelas tipo M e K:** tornam-se Anãs Brancas (1 ponto).

- **Estrelas tipo G e F:** tornam-se Anãs Brancas (1 ponto) e geram uma Nebulosa Planetária.
- **Estrelas tipo A e B:** tornam-se Estrelas de Nêutrons (2 pontos) e geram uma Supernova.
- **Estrelas tipo O:** tornam-se Buracos Negros (3 pontos) e geram uma Supernova.

Eventos de Objetos Compactos

- ❖ **Nebulosas Planetárias:** O supervisor deve rolar um dado d4 e distribuir uma quantidade de Fichas de Hidrogênio igual ao valor obtido para todos os grupos. Adicionalmente, todos os grupos (menos o que gerou a supernova) recebem uma **Ficha de Carbono**.
- ❖ **Supernovas:** O supervisor deve rolar um dado d6 e distribuir uma quantidade de Fichas de Hidrogênio igual a metade do valor obtido (arredondado para cima) para todos os grupos. Adicionalmente, todos os grupos (menos o que gerou a supernova) recebem uma **Ficha de Ferro**.

Ferro: a Ficha Coringa

Para as maiores Estrelas, a etapa final envolve uma fusão $2 \text{ Si} \rightarrow \text{Fe}$. Ou seja, **não há** nenhuma fusão em que o grupo precise entregar Fichas de Ferro. Por esse motivo, a Ficha de Ferro é utilizada como uma Ficha Coringa, podendo substituir qualquer outra Ficha ao usar a ação **Evoluir**.

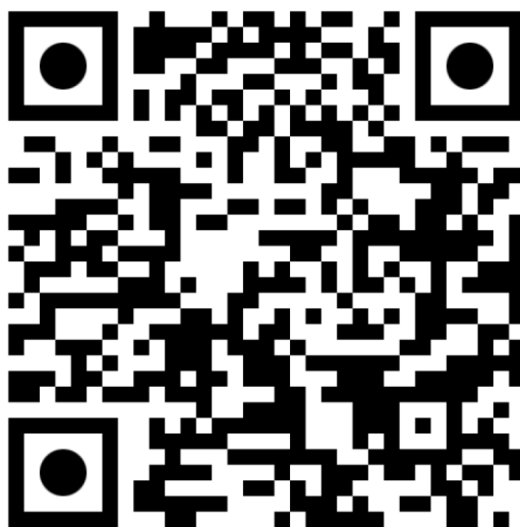
Quando uma estrela se colapsa em uma supernova, elementos pesados são gerados e espalhados pelo espaço, então quando novas estrelas surgem naquela região, elas já

possuem uma metalicidade mais alta, diferente de outras estrelas que começam sendo compostas basicamente por Hidrogênio. Esta mecânica de jogo representa este fenômeno.

Finalizando o Jogo

Cada vez que um grupo conseguir Evoluir uma estrela ao ponto de ela se tornar um objeto compacto, ele recebe pontos de acordo com o objeto compacto gerado. Anãs brancas valem 1 ponto, Estrelas de Nêutrons valem 2 pontos, Buracos Negros valem 3 pontos.

O primeiro grupo que alcançar um total de 6 pontos é declarado vencedor.



QR Code para o questionário da Aplicação.

Este é o manual de regras do Jogo “Catálogo Estelar”, incluído como produto da dissertação de mestrado “Catálogo Estelar: Proposta de Gamificação para a Introdução de Conceitos da Evolução Estelar no Ensino Fundamental” do Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Autores:

Matheus Cavalcante Fonseca

Vladimir Jearim Peña Suarez

Carlos Augusto Domingues Zarro



Instituto de
Física
UFRJ

5. Questionário da Segunda Aplicação

25/11/2024, 22:23

Questionário: Catálogo Estelar

Questionário: Catálogo Estelar

Questionário avaliativo sobre o produto educacional "Catálogo Estelar" e sua aplicação em sala de aula.

* Indica uma pergunta obrigatória

1. Nome: *

2. Turma: *

3. O quão satisfeito você ficou com a aula sobre evolução estelar baseada no jogo "Catálogo Estelar"? *

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5

Mui ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Muito satisfeito

4. Você acha que o jogo "Catálogo Estelar" lhe ajudou na compreensão da vida das estrelas? Por que? *

5. O que você mais gostou no jogo? *

6. O que você achou mais desafiador no jogo? *

Sobre Estrelas

7. Por que podemos dizer que estrelas são diferentes de planetas? Marque as opções verdadeiras. *

Marque todas que se aplicam.

- ☐ Estrelas realizam fusão nuclear.
- ☐ Estrelas pegam fogo.
- ☐ Planetas são muito menores que estrelas.
- ☐ Planetas são muito maiores que estrelas.
- ☐ Estrelas são feitas de plasma.
- ☐ Não sei.

8. Explique com as suas palavras o que é fusão nuclear. *

9. Dos seguintes elementos químicos, qual é fundamental para o início da evolução de uma estrela? *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Hidrogênio
- ☐ Hélio
- ☐ Carbono
- ☐ Oxigênio
- ☐ Silício
- ☐ Não sei.

10. No jogo, as estrelas evoluem ao longo do tempo. Quais são as etapas de evolução de uma estrela de tipo G, como o Sol? *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Inicia na fase da Sequência Principal, depois uma Gigante Vermelha, e no fim uma Anã Branca.
- ☐ Inicia na fase da Sequência Principal, depois uma Estrela de Nêutrons, e no fim um Buraco Negro.
- ☐ Inicia como uma Anã Branca, depois uma Padrão Amarela, e então uma Gigante Vermelha.
- ☐ Inicia como Gigante Amarela, depois uma Gigante Vermelha, e então uma Supergigante Vermelha
- ☐ Inicia como um Buraco Negro, que então acumula matéria até se tornar uma Estrela Padrão.
- ☐ Não sei.

11. Qual é a relação entre o tamanho (massa) de uma estrela e seu tempo de vida? *

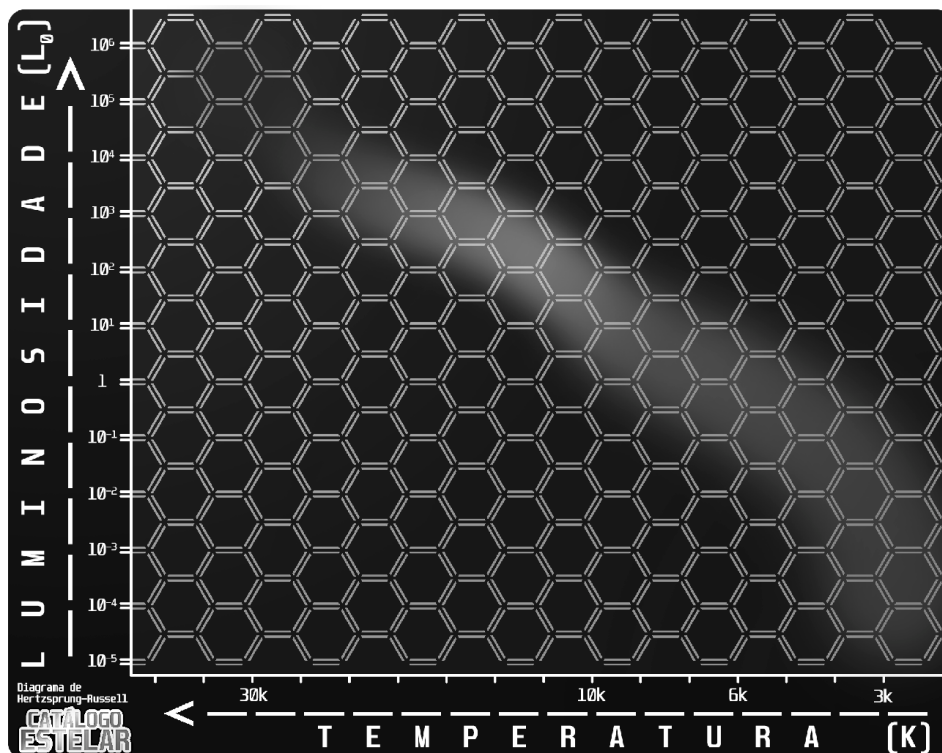
Marcar apenas uma oval.

- ☐ Quanto maior a estrela, maior é seu tempo de vida, pois tem mais hidrogênio para fundir.
- ☐ Quanto maior a estrela, menor é seu tempo de vida, pois funde hidrogênio mais rápido.
- ☐ Como uma estrela realiza fusão em seu núcleo, não há relação entre o tempo de vida e o tamanho.
- ☐ Não sei.

Sobre o Diagrama HR

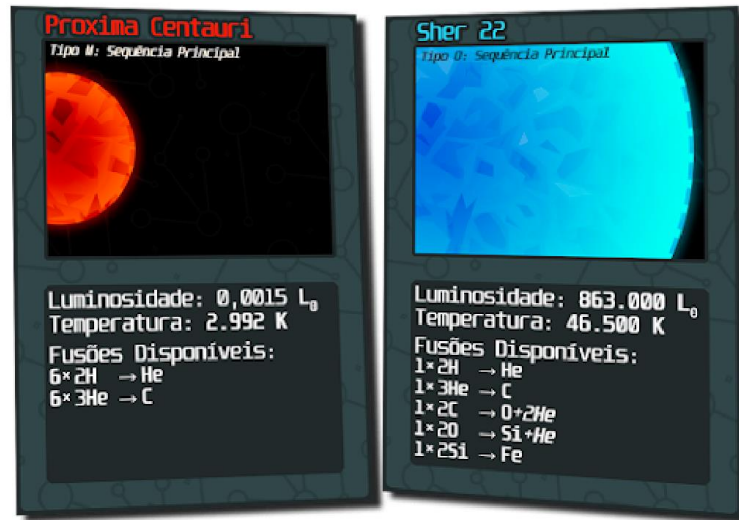
Perguntas específicas sobre a classificação das estrelas.

Imagem: Diagrama HR e a Sequência Principal

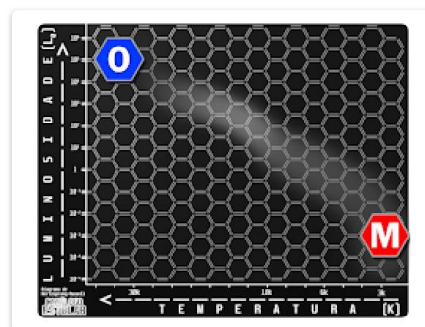


12. O tabuleiro do jogo tem a forma de um *Diagrama de Hertzsprung-Russel*. Para que serve esse diagrama e como os jogadores o utilizaram? *

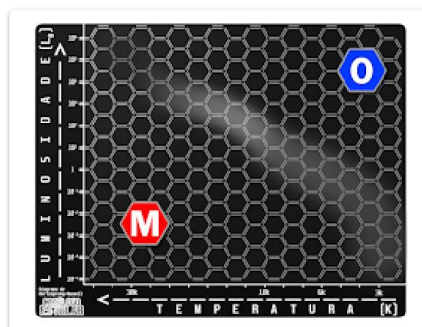
13. Durante o jogo, vimos que as estrelas têm tamanhos diferentes. Nas imagens a seguir, vemos diversas tentativas de classificar as estrelas Proxima Centauri e Sher 22 no Diagrama HR. Qual das opções está correta?



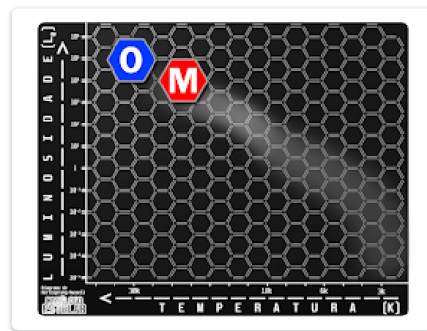
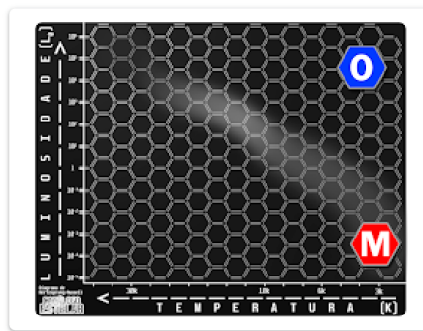
Marque todas que se aplicam.



☐ A:



☐ B:


☐ C:

☐ D:

☐ E: Não sei.

14. Qual é a luminosidade do Sol? Em $L_{\odot}$ *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ 1
☐ 5
☐ 10
☐ 10^2
☐ 10^3
☐ Não sei.

Saindo da Sequência Principal

15. O que acontece com uma estrela quando ela termina de fundir o hidrogênio em seu núcleo? Lembre-se do que acontecia no jogo. *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Entra na fase gigante, onde irá fundir elementos mais pesados, brilhando mais e ficando mais fria.
- ☐ Entra na fase anã, onde ela não realiza mais fusão, brilhando menos e ficando mais quente.
- ☐ Entra na fase gigante, onde irá quebrar o hélio criado para gerar mais hidrogênio.
- ☐ Entra na fase supernova, onde irá explodir liberando muita energia ao seu redor.
- ☐ Não sei.

16. Qual é a ordem dos elementos principais que as estrelas fundem enquanto estão na fase Gigante? *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Hélio, Carbono, Oxigênio, Silício e então Ferro.
- ☐ Hélio, Oxigênio, Nitrogênio e então Argônio.
- ☐ Oxigênio, Hélio, Carbono, Ferro e então Silício.
- ☐ Não sei.

17. Qual é a diferença entre a fase gigante de uma estrela de pouca massa e de uma estrela de grande massa? *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Estrelas de pouca massa só conseguem realizar fusão nuclear até o Carbono, enquanto que estrelas de grande massa podem realizar até o Ferro.
- ☐ Estrelas de pouca massa conseguem realizar fusão nuclear até o Ferro, enquanto que estrelas de grande massa fundem somente até o Carbono.
- ☐ Estrelas de grande massa fazem as mesmas fusões nucleares que estrelas de pouca massa, mas em um tempo muito menor.
- ☐ Estrelas de grande massa fazem as mesmas fusões nucleares que estrelas de pouca massa, mas em um tempo muito maior.
- ☐ Não sei.

Fim de uma Estrela e Objetos Compactos

18. Qual é o tipo de estrela que gera Nebulosas Planetárias ao colapsar? *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Estrelas médias (F e G) ou menores (K e M)
- ☐ Apenas estrelas pequenas (K e M)
- ☐ Apenas estrelas grandes (A e B)
- ☐ Estrelas médias (F e G) ou grandes (A e B)
- ☐ Não sei.

19. Por que as Supernovas são importantes para o ciclo de vida das estrelas? Marque as opções corretas. *

Marque todas que se aplicam.

- ☐ Pois são as fontes de elementos mais pesados, como o ferro.
- ☐ Pois espalham elementos pelo Universo, que podem ser usados para criar novas estrelas.
- ☐ Pois podem acontecer em qualquer fase de uma estrela instável.
- ☐ Pois elas criam os meteoros e estrelas cadentes.
- ☐ Não sei.

20. Quais dos seguintes objetos astronômicos são considerados objetos compactos? (Resultante da morte de uma estrela) *

Marque todas que se aplicam.

- ☐ Buracos Negros
- ☐ Estrelas de Nêutrons
- ☐ Anãs Brancas
- ☐ Buracos de Minhoca
- ☐ Galáxias
- ☐ Planetas

21. Qualquer estrela pode virar um buraco negro em algum momento? *

Marcar apenas uma oval.

- ☐ Sim.
- ☐ Não.
- ☐ Não sei.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

6. Download das peças do jogo

Este capítulo apresenta informações detalhadas sobre o acesso aos recursos necessários para a aplicação prática do jogo Catálogo Estelar. A disponibilização desses materiais em formato digital visa facilitar sua reprodução e adaptação pelos professores.

É possível realizar o download das peças do jogo clicando [aqui](https://bit.ly/4j1T16u). (<https://bit.ly/4j1T16u>). Os recursos disponíveis incluem:

1. **Modelos 3D das Peças de Estrelas e Fichas de Elementos:** arquivos no formato *.stl*, a fim de serem criados utilizando uma impressora 3D.
2. **Cartas de Estrelas:** arquivos no formato *.png*.
3. **Tabuleiro do Diagrama HR:** arquivo no formato *.png*.

É recomendado que o tabuleiro seja impresso em uma gráfica, com um material adequado para sua manipulação.

Para a produção das peças em uma impressora 3D, o autor utilizou o programa PrusaSlicer para a conversão dos arquivos de *.stl* para *.GCODE*, o tipo de arquivo lido por impressoras 3D. Entretanto, como cada impressora pode ter diferentes configurações, incluímos apenas as peças em *.stl*, para que o arquivo possa ser adaptado a cada modelo de impressora.

Durante a impressão em si foi utilizado plástico PLA, de diferentes cores. Foram produzidas 10 peças de cada tipo de Peça de Estrela (M até O), 16 Peças de Anãs Brancas, 10 Peças de Estrelas de Nêutrons e 6 Peças de Buracos Negros. Para as fichas de elementos, é recomendado produzir uma quantidade maior do que foi utilizado na aplicação, pois algumas fichas acabaram. Foram produzidas 64 fichas de Hidrogênio (recomendado: 100), 48 fichas de Hélio (recomendado: 60), 32 fichas de Carbono (recomendado: 40), 24 fichas de Oxigênio (recomendado: 30), 24 fichas de Silício e 16 fichas de Ferro.

Um detalhe importante sobre a impressão das peças é que muitas delas foram feitas com duas cores, efeito que pode ser reproduzido ao pausar a impressão em determinada etapa e trocando a cor do filamento utilizado.

As cartas também foram impressas em uma gráfica, no tamanho 54 mm x 76 mm. Entretanto, o recomendado para a impressão é em tamanho padrão de cartas de Poker, em 63 mm x 88 mm.

7. Referências

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018.

MORISON, I. **Introduction to astronomy and cosmology**. Chichester, U.K.: Wiley, 2008.

KARTTUNEN, Hannu et al. *Fundamental Astronomy*. 6. ed. Helsinki: Springer, 2017.

FRAZZOLI, Jean Carlo Feital. **Astrofísica de estrelas compactas como atividade suplementar para o Ensino Médio**. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

EINSTEIN, A. A inércia de um corpo depende da sua quantidade de energia? **Annalen der Physik**, v. 323, n. 13, p. 639–641, 1905.

CARROLL, Bradley W.; OSTLIE, Dale A. **An Introduction to Modern Astrophysics**. 2. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2017. cap. 16, 17.

FAN, Yi-Zhong; HAN, Ming-Zhe; JIANG, Jin-Liang; SHAO, Dong-Sheng; TANG, Shao-Peng. Maximum gravitational mass: math xmlns. **Physical Review D**, [S.L.], v. 109, n. 4, p. 1-17, 29 fev. 2024. Mensal. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevd.109.043052>.

RUIZ, Michael J. A Black Hole in our Galactic Center. *The Physics Teacher*, 2008

QUEIROZ, Leonardo dos Santos Marques de. **Uma proposta de atividade sobre buracos negros**: Calculando a massa de Sagittarius A* através da terceira lei de Kepler. 2023. 30 f. Monografia (Licenciatura em Física) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2023.

The Event Horizon Telescope Collaboration. et al. First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 930, n. 2, p. L12, 1 maio 2022.