**universidade do vale do Itajaí**

Escola do mar, Ciência e Tecnologia

curso de Ciência da Computação

Simulando estrelas de quark através do modelo de sacola do mit

Por

Marcelo Leonardo de Souza

Itajaí (SC), junho de 2018

Universidade do Vale do Itajaí

Escola do mar, Ciência e Tecnologia

curso de Ciência da Computação

SIMULANDO Estrelas de quark através do modelo de sacola do mit

Área de Ciência da Computação

Por

Marcelo Leonardo de Souza Itajaí (SC),

Relatório apresentado à Banca Examinadora do Trabalho Técnico-científico de Conclusão de Curso do curso de Ciência da Computação para análise e aprovação.

Orientador: Marcelo Gomes de Paoli, Dr.

Itajaí (SC), junho de 2018

Agradeço a minha família, amigos, professores, orientador, todos aqueles que me ajudaram direta e indiretamente a concluir este trabalho, todos aqueles que tiveram paciência comigo em momentos de tensão e de empenho e que me ajudaram a conseguir o que já consegui até hoje na vida.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me fortalecido a ponto de superar as dificuldades, também por toda saúde que me deu e por permitir alcançar esta etapa tão importante da minha vida.

A Universidade do Vale do Itajaí, e toda a sua direção, eu deixo uma palavra de agradecimento por todo ambiente inspirador e pela oportunidade de concluir este curso.

Ao professor Dr. Marcelo Gomes de Paoli eu agradeço a orientação incansável, o empenho e a confiança que ajudaram a tornar possível este sonho tão especial.

À minha família e amigos que nunca desistiram de mim e sempre me ofereceram amor eu deixo uma palavra e uma promessa de gratidão eterna.

Aos Colegas de trabalho que me auxiliaram e me apoiaram, neste momento especial da minha vida.

Agradeço a QUAY Sistemas e Portais e as pessoas que a comandam por todo o apoio que me deram na reta final deste trabalho.

A todas as pessoas que de alguma forma fizeram parte do meu percurso eu agradeço com todo meu coração.

“Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho”.

(Dalai Lama)

Resumo

SOUZA, Marcelo Leonardo de. Simulando estrelas de quark através do modelo de sacola do MIT, 2018. 40 f. Trabalho Técnico-científico de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) Escola do Mar, Ciência e Tecnologia, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, Ano.

Em um mundo onde novos artigos são publicados todos os dias, nas mais diferentes áreas, é necessário que, apesar da produção massiva, os assuntos sejam inteligíveis para todo o público e não apenas para uma minoria que estuda profundamente o assunto. Com este pensamento em mente será desenvolvido um *software* cujo objetivo é facilitar o entendimento das estrelas de *quarks*, cuja descrição utiliza a pesada linguagem cientifica da física nuclear e da astrofísica. O software se utilizará de conceitos de Ciência da Computação para facilitar a visualização e entendimento dos dados resultantes da simulação ao mesmo tempo em que será de utilidade para estudantes de física por utilizar o modelo de sacola do MIT, que é de grande importância na área.

Palavras chaves: Estrelas de Quarks, Modelo de Sacola do MIT, Cadáveres Estelares.

Abstract

In a world where new articles are published every day in the most diverse areas, it is necessary that, despite mass production, the issues are intelligible to the public and not just to a minority that studies the subject in depth. With this thought in mind we will develop a software whose goal is to facilitate the understanding of quarks stars, whose description uses the heavy scientific language of nuclear and astro physics. The software will use Computer Science concepts to facilitate the visualization and understanding of the resulting simulation data while it will be of use to physics students by using the MIT bag model, which is of great importance in the field.

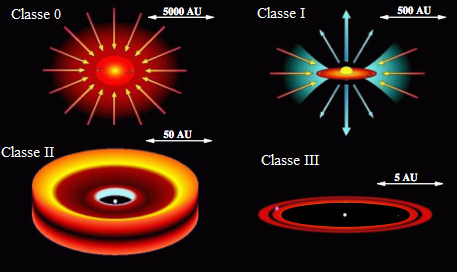
Keywords: Stars of quarks, MIT bag model, Stellar corpses.

Lista de ILUSTRAÇÕes

[Figura 1. Nebulosa de Órion. 23](#_Toc528008491)

[Figura 2. Super Nova. 24](#_Toc528008492)

[Figura 3. Evolução proto-estrela. 25](#_Toc528008493)

[ 25](#_Toc528008494)

[Figura 4. Características das estrelas. 26](#_Toc528008495)

[Figura 5. Aglomerado estelar. 28](#_Toc528008496)

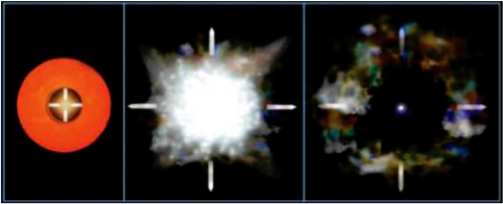
[Figura 6. Processo termonuclear de uma estrela. 29](#_Toc528008497)

[Figura 7. Ciclo de vida estelar 31](#_Toc528008498)

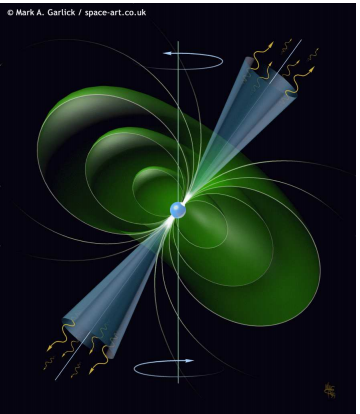
[ 31](#_Toc528008499)

[Figura 8. Evolução estelar estrelas de quark. 32](#_Toc528008500)

[Figura 9. Nascimento de uma estrela de nêutron. 33](#_Toc528008501)

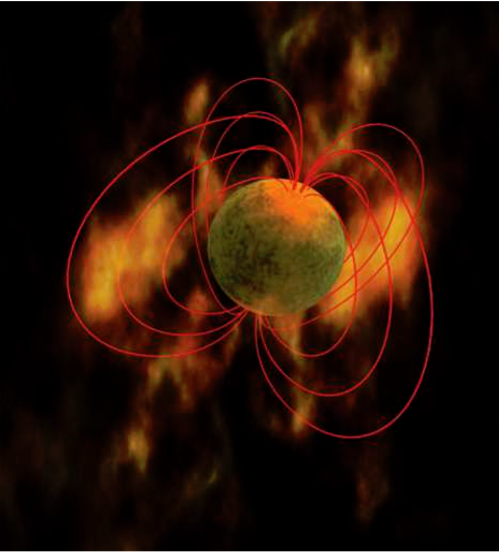
[ 33](#_Toc528008502)

[Figura 10. Pulsar 34](#_Toc528008503)

[ 34](#_Toc528008504)

[Figura 11. Distribuição de período de rotação de pulsares. 35](#_Toc528008505)

[Figura 12. Ilustração de um magnetar. 36](#_Toc528008506)

[ 36](#_Toc528008507)

[Figura 13. Méson Pi 37](#_Toc528008508)

[Figura 14. Representação do nêutron e do próton. 38](#_Toc528008509)

[Figura 15. Soluções para TOV. 42](#_Toc528008510)

[Figura 16. Resultado obtido por TORRES (2011) para equação de estado considerando a massa do quark *s* 150MeV. 44](#_Toc528008511)

[Figura 17. Resultado obtido por TORRES (2011) para massa x raio com a massa do quark *s* de 100MeV. 45](#_Toc528008512)

[Figura 18. Resultado obtido por PAIS (2008) para fracção dos quarks *u,d* e *s* em função da densidade. 46](#_Toc528008513)

[Figura 19. Resultado obtido por PAIS (2008) para pressão x densidade de energia. 47](#_Toc528008514)

[Figura 20. Resultado obtido por PAOLI (2010) Equação de estado para estrelas quarkionicas com e sem matéria estranha utilizando o modelo *NJL*. 49](#_Toc528008515)

[Figura 21. Resultado obtido por PAOLI (2010) massa x raio para estrelas quark iônicas com e sem matéria estranha utilizando o modelo *NJL*. 49](#_Toc528008516)

Lista de Tabelas

[Tabela 1 - Tabela informativa sobre os léptons. 22](#_Toc528008517)

[Tabela 2 - Tipos de estrelas 27](#_Toc528008518)

[Tabela 3 - Relação dos primeiros quarks e antiquarks. 37](#_Toc528008519)

[Tabela 4 - Mésons formados por quarks (*u,d ou s)* e antiquarks (.) 38](#_Toc528008520)

[Tabela 5 - Composição dos bárions a partir da combinação de três quarks *u, d* e *s.* 38](#_Toc528008521)

Lista de Abreviaturas e Siglas

TTC Trabalho Técnico-científico de Conclusão de Curso

UNIVALI Universidade do Vale do Itajaí

AU Astronomical Unit - Unidade Astronômica

MIT Massachusetts Institute of Tecnology

MeV Milhôes de elétrons-volts

Lista de Símbolos

*b* Quark bottom.

*B* Constante de sacola do modelo do MIT.

*c* Quark charme.

*d* Quark down.

Antiquark down.

Energia da partícula .

Densidade de energia.

*G* Constante da gravitação universal.

*k* Momento.

Momento de fermi.

*M* Massa gravitacional.

Densidade do número bariônico.

*p* Pressão.

*s* Quark strange.

Antiquark strange.

*t* Quark top.

*u* Quark up.

Antiquark up.

Degeneresencia do quark .

Sumário

[1 Introdução 16](#_Toc528008522)

[1.1 Problematização 17](#_Toc528008523)

[1.1.1 Formulação do problema 17](#_Toc528008524)

[1.1.2 Solução proposta 17](#_Toc528008525)

[1.2 Objetivos 17](#_Toc528008526)

[1.2.1 Objetivo Geral 17](#_Toc528008527)

[1.2.2 Objetivos específicos 17](#_Toc528008528)

[1.3 Metodologia 18](#_Toc528008529)

[1.4 Estrutura do trabalho 18](#_Toc528008530)

[2 Fundamentação teórica 19](#_Toc528008531)

[2.1 Conceito de partícula elementar 19](#_Toc528008532)

[2.1.1 Descoberta do Elétron 19](#_Toc528008533)

[2.1.2 Descoberta do Fóton 19](#_Toc528008534)

[2.1.3 Descoberta do Próton 20](#_Toc528008535)

[2.1.4 Neutrino do Elétron 20](#_Toc528008536)

[2.1.5 Descoberta do nêutron 21](#_Toc528008537)

[2.1.6 Zoológico de Partículas 21](#_Toc528008538)

[2.1.7 Léptons 22](#_Toc528008539)

[2.2 Evolução estelar 22](#_Toc528008540)

[2.2.1 Origem das estrelas 23](#_Toc528008541)

[2.2.2 Diagrama de HR 25](#_Toc528008542)

[2.2.2.1 Aglomerados Estelares 27](#_Toc528008543)

[2.2.3 Sequência principal 28](#_Toc528008544)

[2.2.4 Final do ciclo de uma estrela 30](#_Toc528008545)

[2.3 Estrelas de quark 32](#_Toc528008546)

[2.4 Historia das Estrelas de Nêutrons 33](#_Toc528008547)

[2.4.1 Pulsares 34](#_Toc528008548)

[2.4.2 Magnetares 35](#_Toc528008549)

[2.5 Modelo de quarkS 36](#_Toc528008550)

[2.5.1 Modelo de Gell-mann-Ne’eman 37](#_Toc528008551)

[2.5.2 Mésons 37](#_Toc528008552)

[2.5.3 Bárions 38](#_Toc528008553)

[Os bárions são compostos a partir de três quarks, tomando-se todas as possíveis combinações entre os quarks. Existem também bárions que são compostos apenas por antiquarks como podemos ver na Tabela 4 logo abaixo. 38](#_Toc528008554)

[2.5.4 Quarks e Suas Cores 39](#_Toc528008555)

[2.6 Equilíbrio Químico 40](#_Toc528008556)

[2.7 Modelo De sacola do MIT 40](#_Toc528008557)

[2.7.1 Equação de Estado 40](#_Toc528008558)

[2.7.2 Equações de TOV 41](#_Toc528008559)

[2.8 métodos Numéricos 42](#_Toc528008560)

[2.8.1 Integração numérica 42](#_Toc528008561)

[2.8.2 Interpolação numérica 42](#_Toc528008562)

[2.8.3 Equação diferencial 43](#_Toc528008563)

[2.9 trabalhos similares 43](#_Toc528008564)

[2.9.1 Equação de estado para matéria de quarks e propriedades estelares 43](#_Toc528008565)

[2.9.2 Estrelas de quarks num campo magnético forte 45](#_Toc528008566)

[2.9.3 Efeitos da existência da fase mista em estrelas de nêutrons híbridas 48](#_Toc528008567)

[2.9.4 Conclusão sobre os trabalhos apresentados 50](#_Toc528008568)

[3 DESENVOLVIMENTO 50](#_Toc528008569)

[3.1 ANÁLISE DO Simulador DESENVOLVIDO 50](#_Toc528008570)

[3.1.1 Conceito Geral 50](#_Toc528008571)

[3.1.2 Público Alvo 51](#_Toc528008572)

[3.2 Definição de entrada e saida do simulador 51](#_Toc528008573)

[3.2.1 Entradas 51](#_Toc528008574)

[3.2.2 Saídas; 51](#_Toc528008575)

[3.3 Funcionamento do software 51](#_Toc528008576)

[3.4 processo de validação do software 52](#_Toc528008577)

[3.5 Especificações do software 52](#_Toc528008578)

[3.5.1 Requisitos Funcionais 52](#_Toc528008579)

[3.6 IMPLEMENTAÇÃO 53](#_Toc528008580)

[3.6.1 Codificação 53](#_Toc528008581)

[3.6.1.1 Equação de estado 54](#_Toc528008582)

[3.7 RESULTADOS 57](#_Toc528008583)

[4 Conclusão 57](#_Toc528008584)

1. Introdução

“Todas as coisas são feitas de átomos”.

Richard Feynman em seu *Lectures on Physics* diz que caso todo o conhecimento cientifico do mundo fosse perdido em um cataclismo e apenas uma frase pudesse ser passada para a próxima geração essa seria a frase com a maior quantidade de informação na menor quantidade de palavras (FEYNMAN,2008). Hoje sabemos que os átomos, por sua vez, são compostos de *quarks*.

Os *quarks* são partículas extremamente peculiares. Devido a um fenômeno conhecido como *confinamento* eles nunca podem ser observados isoladamente. Eles podem ser encontrados apenas em trios, formando os bárions (prótons, nêutrons, deltas, etc.), ou em duos formando os mésons (pi, rho, etc.). Porém em situações extremas de densidade e pressão é possível que aconteça um *desconfinamento* e os *quarks* se comportem como partículas livres. Tal fenômeno é previsto pela cromodinâmica quântica, a parte da mecânica quântica responsável por descrever a interação entre os hádrons. Hádrons são as partículas compostas por quarks, no caso, bárions e mésons (GRIFFITHS,2008).

Essa situação extrema pode acontecer dentro de uma estrela de quarks. Quando uma estrela chega ao fim de sua existência, dependendo de sua massa, ela pode se tornar um buraco negro, uma estrela de nêutrons ou uma anã branca. As estrelas de nêutrons são cadáveres estelares que possuem densidade e pressão altíssimas em seu interior. Elas receberam este nome porque acreditava-se, a princípio, que elas eram compostas exclusivamente por nêutrons. Hoje se sabe que elas podem conter prótons e outros hádrons, mais especificamente é possível que sua densidade seja tão alta que ela não seja composta por hádrons e sim por quarks livres e completamente desconfinados (FILHO, 2014; SARAIVA, 2014).

O objetivo deste trabalho é unir todos estes conceitos de física de forma acessível para leigos e curiosos de todas as áreas. Além de utilizar o modelo de sacola do MIT, que já é bem conhecido e cujos resultados são utilizados amplamente em física nuclear, para construir um software que também seja útil para o público especializado (PAOLI, 2010; JACOBSEN, 2007).

No modelo de sacola do MIT os quarks são tratados como partículas livres, no sentido restrito do termo, enquanto estiverem no interior da sacola. Sendo os quarks partículas de spin ½ e visto que a sua velocidade no interior dos hádrons é relativística, é adequado descrevê-los usando espinores de Dirac. No modelo de sacola do MIT, o mecanismo de confinamento consiste no fato de que o campo dos quarks só existe na região esférica que é chamada de sacola. Não existe nada fora da sacola, nem mesmo flutuações quânticas dos campos dos quarks (PILOTTO,2003).

* 1. Problematização
     1. Formulação do problema

Descrever o interior, ou até mesmo analisar a possibilidade de existência, de uma estrela de quarks é algo tanto interessante quanto difícil. Por um lado, o entendimento do problema requer conceitos físicos com os quais a maior parte do público nunca se deparou. Por outro, a solução requer perícia na implementação de métodos computacionais e devido ao volume de dados e análises é possível que resultados e conceitos se percam no processo.

Com isso é de grande importância que tanto a física quanto a computação andem lado a lado, pois nos dias atuais a computação vem se tornando de grande auxilio para as outras áreas de conhecimento seja ela a física ou qualquer outra área.

* + 1. Solução proposta

A solução proposta para este problema é: desenvolver um software em python que utilizando métodos numéricos robustos resolve o problema físico envolvido e apresenta os resultados de forma a facilitar a análise do processo.

* 1. Objetivos
     1. Objetivo Geral

Desenvolver um software em python capaz de simular o interior de uma estrela de quarks utilizando o *Modelo de sacola do MIT* como base para seus cálculos. O software deve ser capaz de apresentar seus resultados de forma clara e útil tanto para o público entusiasta quanto especializado na área de astrofísica.

* + 1. Objetivos específicos
* Implementar os métodos de cálculo numérico necessários para resolver as equações.
* Utilizar os métodos numéricos para resolver as equações com as restrições físicas apropriadas de modo a descrever o interior de uma estrela de quarks.
* Modelar as saídas do programa na forma de gráficos e tabelas claras e de fácil compreensão.
* Comparar os resultados obtidos com os já presentes na literatura e com alguns valores reais esperados.
  1. Metodologia

Foram realizadas pesquisas bibliográficas em livros, dissertações e artigos na área de física que abordavam os estudos das estrelas, mas especificamente na área de estrelas de nêutrons e quarks. Estes auxiliaram no entendimento do problema, obtenção de conhecimento sobre os conceitos abordados e trouxeram uma maior compreensão sobre os estudos de estrelas de quark.

O levantamento bibliográfico realizado foi importante para encontrar trabalhos similares que serão utilizados como base para validar o software que será desenvolvido, estes trabalhos serão utilizados como base para as saídas esperadas pelo software e também serão utilizados para validar a precisão do software.

Após as pesquisas realizados levando em conta os trabalhos similares encontrados na literatura foi feita a especificação do software a ser desenvolvido por este trabalho, apresentando seus requisitos, funcionalidades além dos diagramas e dos protótipos de tela.

* 1. Estrutura do trabalho

Este documento está estruturado em quatro capítulos. O capítulo 1, introdução, apresentou uma visão geral do trabalho, incluído problema abordado, objetivos e metodologia. No capítulo 2, Fundamentação Teórica, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre: conceito de partícula elementar, evolução estelar, estrelas de quarks, modelo de sacola do MIT. O capítulo 3, Desenvolvimento, apresenta a ferramenta foi desenvolvida de forma detalhada, apresentado as especificações do software projetado, os requisitos, como foi feita sua implementação e os resultados obtidos. Concluindo, no Capítulo 4, são apresentadas as conclusões obtidas com este trabalho.

1. Fundamentação teórica
   1. Conceito de partícula elementar

O conceito de partícula elementar foi introduzido pela primeira vez na Grécia antiga, pelo filosofo Leucipo, porém quem descreveu o modelo em detalhes foi seu discípulo Demócrito. Leucipo propôs que toda a matéria era formada por partículas indivisíveis, que mais tarde foram chamadas de átomos por Demócrito. Diferente dos outros filósofos da época que acreditavam que a matéria elementar que regia a vida era o fogo, a terra, o ar e a água, o átomo como matéria primordial não era algo que podia ser tocado, ou visto, e nem possuía propriedades como gosto, cor ou cheiro, com o passar dos séculos o conceito de átomo foi sofrendo transformações (CARUSO, 1996; LOPES, 2009).

Durante o século XIX, por meio de diversas experiências, os físicos e químicos obtiveram êxito na determinação da razão das massas de diferentes elementos químicos, medindo, por exemplo, a proporção em que dois gases se misturam. Com essas informações obtidas foi possível descobrir que o diâmetro de um átomo não poderia ser maior do que cm.

Os métodos experimentais da época testavam o modelo de estrutura da matéria utilizando-se do modelo atomista vigente na época. O átomo até então era a partícula elementar pois nada se conhecia sobre sua natureza interna, por isso era dito “indivisível” (ABDALLA, 2004).

* + 1. Descoberta do Elétron

O primeiro trabalho que utilizou o nome elétron para descrever a menor quantidade carga elétrica surgiu no final do Século XIX. O trabalho, publicado por George Johnestone Stoney, obteve um valor para a carga do elétron cerca de 20 vezes menor do que é atualmente aceito. Stoney também propôs a existência de uma carga positiva com o mesmo valor que a carga negativa. Em 1897 o físico Joseph John Thomson, em uma experiência com raios catódicos, conseguiu separar os elétrons de um átomo e com isso “descobriu” o elétron, a primeira partícula elementar a ter as características identificadas (ABDALLA, 2004).

* + 1. Descoberta do Fóton

Em 1888 os físicos começaram a observa que certos tipos de metais iluminados por radiação, emitiam partículas carregadas negativamente, esse fenômeno ficou conhecido como efeito fotoelétrico. No ano de 1905 Einstein explicou o efeito propondo a luz como formada por partículas elementares, as quais hoje são chamadas de fótons. Segundo a teoria de Einsten quando os fótons que incide numa placa de metal tem energia suficiente, elas fazem com que os elétrons do metal sejam ejetados, isso acontece por que os elétrons adquirem energia cinética proveniente dos fótons. No ano 1923, dezoito anos após a proposta feita por Einstein, o fóton foi confirmado na experiência do efeito Compton (ABDALLA, 2004).

* + 1. Descoberta do Próton

Em 1886, Eugen Goldstein estudava os raios catódicos e acabou introduzindo uma variante na experiência, Goldstein decidiu perfurar o cátodo da ampola de Crookes e verificou que, como resultado das perfurações, aparecia um feixe de raios de luz que ele chamou de raios canais, que iam na direção oposta ao feixe de raios catódicos, apresentando assim um caráter elétrico positivo. As observações obtidas por Eugen ficaram esquecidas por mais de doze anos, até que foram publicadas de novo em uma revista de maior repercussão e o físico Wilhelm Wien decidiu retornar os experimentos. O físico percebeu que era necessário utilizar um campo eletroestático mais intenso do que o utilizado anos atrás por Goldstein, com isso ele conclui que os raios canais eram propriamente constituídos de hidrogênio ionizado

Em junho de 1919, Enerst Rutherford publicou os resultados sobre a primeira desintegração artificial, em um artigo sobre colisões de partículas contra átomos leves, no trabalho foi apresentado que as partículas incidem sobre o nitrogênio, produzem núcleos de hidrogênio (prótons), e desta forma foi descoberta sem querer o próton (ABDALLA, 2004).

* + 1. Neutrino do Elétron

O neutrino foi a terceira partícula elementar a ser estudada (isso pois prótons não são partículas elementares), teve sua proposta formulada em 1930, quando foi proposto ainda não possuía a extensão “do elétron”, era apenas chamado de neutrino. O físico Wolfgang Pauli, propôs a existência de uma partícula leve, neutra e fracamente interagente com a matéria, para tentar explicar a aparente falha da conservação de energia nas medidas do chamado decaimento. Os neutrinos naquela época, não eram vistos nem detectados e com isso muitos físicos chegaram a duvidar da conservação de energia. Porém Pauli preferiu imaginar que esse desbalanceamento de energia acontecia porque no processo havia a emissão de uma nova partícula neutra, que possuía pouca massa. No início Pauli chamou a nova partícula de nêutron, porém acabou não abandonando o nome. Mais tarde o termo acabou sendo utilizado por James Chadwick. Alguns anos depois Pauli aceitou a sugestão de seu padrinho e adotou o nome de neutrino para a nova partícula (ABDALLA, 2004).

* + 1. Descoberta do nêutron

Nos dias de atuais sabemos que cargas de mesmo sinal se repelem pela força eletroestática, pensando nisso se um núcleo fosse constituído apenas de prótons ele não seria estável, devido a força repulsiva entre os prótons (que possuem carga positiva). Com base na afirmação anterior, buscava-se a existência de uma partícula neutra que existisse no núcleo. Na década de 1920, alguns físicos, sugeriram a existência de uma partícula neutra que era formada por um próton e um elétron, cuja sua massa seria próxima a do próton. A partícula foi batizada de nêutron, porém a ideia acabou não vingando, pois as teorias da época traziam várias contraprovas, fazendo com que os físicos abandonassem a teoria. Muitos físicos tentaram e vários experimentos foram propostos com o objetivo de encontra a partícula neutra, porém isso só foi possível quando Chadwick abandonou as lei da conservação fundamentais da física (ABDALLA, 2004).

* + 1. Zoológico de Partículas

Na década de 1950 o uso de aceleradores de partículas estava em seu auge e com isso uma grande quantidade de partículas começaram a ser descobertas, a quantidade era tão espantosa que os físicos apelidaram de zoológico de partículas. Era necessário formular uma classificação, capaz de ordenar tantas partículas, algo parecido com o que foi feito com os elementos químicos em 1872. Para conseguir classificar as novas partículas foi preciso utilizar duas variáveis para se ter sucesso:

* O spin, que pode ser inteiro (bósons) ou semi-inteiros (férmions).
* A forma como as partículas sentem a interação forte.

As partículas que sentem as forças nucleares são chamadas de hádrons. Existem dois tipos de hádrons, os mésons e os bárions. As partículas que não sentem as forças nucleares, como o elétron, são chamadas de léptons.

A quantidade de partículas “elementares” nesta época era espantosa e os físicos começaram a perceber que não era possível que tantas partículas fossem de fato elementares. Apenas depois de alguns anos foi descoberto o quark, que será abordado mais profundamente no Capitulo 3 (ABDALLA, 2004).

* + 1. Léptons

O termo lépton é uma classificação dada a partículas que não sente a força forte ou forças nucleares, as partículas que pertencem a esse grupo são consideradas partículas elementares assim como os quarks, entre estas partículas se encontram o elétron, o múon e o tau (ABDALLA, 2004).

Os léptons possuem spin ½ e cada lépton possuim seu antilépton que possuem mesma massa e spin, porém tem cargas opostas. Diferente dos quarks os léptons são encontrados sozinhos (ABDALLA, 2004).

1. Tabela informativa sobre os léptons.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Nome** | **Símbolo** | **Carga (e)** | **Energia de Repouso (MeV)** |
| Elétron |  | -1 | 0,511 |
| Neutrino Elétron |  | 0 | < 5,1 x |
| Múon |  | -1 | 105,7 |
| Neutrino Múon |  | 0 | < 0,27 |
| Tau |  | -1 | 1777 |
| Neutrino Tau |  | 0 | < 31 |

Fonte: adaptado de AVANCINI (2009).

* 1. Evolução estelar

Estrelas são esferas auto gravitantes de gás ionizado, cuja fonte de energia é a transmutação de elementos através de reações nucleares, isso é, a fusão nuclear do hidrogênio em hélio e posteriormente o hélio em elementos mais pesados (FILHO, 2014). Assim como nós seres humanos as estrelas possuem um ciclo de vida, elas nascem, permanecem estáveis por um período e morrem. As estrelas possuem um nascimento muito semelhante entre si, porém sua morte depende de fatores como: composição química e massa. Ao morrer uma estrela pode tomar alguns caminhos que irão depender de sua massa inicial, os caminhos podem ser o surgimento de uma estrela anã branca, de uma estrela de nêutrons ou de um buraco negro (MARRANGHELLO, 2014).

* + 1. Origem das estrelas

As estrelas mais jovens se encontram sempre próximas a outras estrelas com idade semelhante e rodeadas por gás. Essas nuvens de gás que envolvem as estrelas mais jovem são constituídas de hidrogênio, o que sugere que as nuvens de gás estão ligadas a origem das estrelas. O nascimento das estrelas é de difícil observação, não devido apenas a sua duração que pode ser de alguns milhões de anos, como também pelo fato de ser difícil de observar dentro da nuvem de gás que as rodeia. Somente em fevereiro de 2000, os astrónomos conseguiram, a partir de um telescópio de infravermelho, observar uma imagem do interior de uma nuvem de gás (ALVES, 2005).

1. Nebulosa de Órion.

|  |
| --- |
| https://abrilexame.files.wordpress.com/2016/09/size_960_16_9_hubble-1.jpg?quality=70&strip=info&w=920 |

Fonte: <https://exame.abril.com.br/ciencia/15-fotos-incriveis-tiradas-pelo-telescopio-hubble-em-25-anos/>.

Na figura 1 podemos observar a nebulosa de Órion, que é uma das áreas de formação estelar mais próximas da terra, encontrando-se a 1.300 anos-luz[[1]](#footnote-1).

Foi o inglês James Jean no início do século XX, que determinou o valor da massa para que uma ligeira perturbação possa dar origem a uma contração mais brusca e com isso possibilitar o surgimento de uma estrela. Os astrônomos desconhecem qual ou quais são os fenômenos capazes de produzir tais perturbações que seriam necessárias para iniciar a contração, porém segundo ALVES, 2005 os mais plausíveis seriam:

* A influência de uma supernova – as supernovas são explosões, que podem ocorrer quando uma estrela muito massiva chega ao fim de sua existência. Elas liberam grande quantidade de energia e matéria que viajam a grandes velocidades, percorrendo enormes distancias e produzindo uma onda de choque capaz de introduzir alterações locais na densidade de uma nuvem. Na Figura 2 podemos ver os resquícios de uma supernova, a foto foi tirada pelo telescópio Hubble.

1. Super Nova.

|  |
| --- |
| https://abrilexame.files.wordpress.com/2016/09/size_960_16_9_hubble-4.jpg?quality=70&strip=info&w=920 |

Fonte:<https://exame.abril.com.br/ciencia/15-fotos-incriveis-tiradas-pelo-telescopio-hubble-em-25-anos/>.

* Influência das estrelas – estrelas mais quentes, com temperaturas superficiais superiores a 15000 K[[2]](#footnote-2), quando agrupadas em conjunto produzem grandes quantidades de luz ultravioleta e um forte vento estelar, capaz de produzir as perturbações necessárias para o colapso.
* Colisões com grandes nuvens de gás e galáxias – a aproximação, ou colisão, com outras nuvens ou galáxias criam ondas de choque, que se propagam ao longo das nuvens e que, por sua vez, são capazes de alterar localmente a densidade.

Após a perturbação, as moléculas da nuvem começam a colidir e formam glóbulos de gás hidrogênio, que acabam colapsando com seu próprio peso, cada glóbulo dará origem a uma nova estrela.

A medida em que o glóbulo colapsa se forma um disco em rotação com uma protoestrela no centro. Protoestrela é o período pós nascimento em que o núcleo está absorvendo a matéria que está nas proximidades e com isso torna-se mais denso e quente. Quando a temperatura do núcleo fica alta o suficiente para iniciar fusões termonucleares a protoestrela passa a ser chamada de estrela e dá início a fase de sua vida na sequência principal (ALVES, 2005; FILHO, 2014).

1. Evolução proto-estrela.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: <https://ismlandmarks.wordpress.com/protostars/>

Na figura 3 da esquerda superior para a direita inferior podemos ver o ciclo de uma protoestrela (AU é uma unidade de distância e é igual à distância média entre a Terra e o Sol), a Classe 0 é o momento inicial de vida da protoestrela após dar início a contração do glóbulo gerado pela perturbação na nuvem. Na Classe I podemos ver a existência de um disco em volta da protoestrela, este disco é formado por uma grande quantidade de matéria. Na Classe II pode-se notar que a protoestrela começa a se estabilizar e na Classe III finalmente o ciclo de vida da protoestrela começa a chegar ao fim e com isso ela se torna uma estrela jovem.

* + 1. Diagrama de HR

O diagrama de Hertzprung Russel, conhecido como o diagrama de HR, foi descoberto pelo dinamarquês Ejnar Hertzprung em 1911 e pelo americano Henry Norris Russel no ano de 1913. Hertzprung descobriu que estrelas de mesma cor podiam ser divididas em luminosas, que ele chamou de gigantes, e de baixa luminosidade, que receberam o nome de anãs. Russel utilizou o trabalho desenvolvido por Hertzprung e o estendeu para que abrangesse também a classificação das estrelas por temperatura assim se tornando Diagrama de Hertzprung Russel (FILHO,2014).

A figura 4 representa um diagrama HR para um conjunto de estrelas que se encontram próximas ao sol. Neste diagrama os astrônomos adotam a convenção de que a temperatura cresce para a esquerda, e a luminosidade para cima. Podemos notar que no diagrama de HR as estrelas não se distribuem igualmente e sim encontram concentradas em algumas regiões. A maior parte está alinhada ao longo de uma curva diagonal que vai do extremo superior esquerdo, onde se encontram as estrelas mais quentes e muito luminosas, até o canto inferior direito, onde se encontram as estrelas mais frias e que possuem pouca luminosidade. Esta faixa recebe o nome de sequência principal, o fator que determina onde uma estrela se localiza na sequência principal é a sua massa, estrelas com uma massa muito grande são mais quentes e mais luminosas. Em algum momento de suas vidas todas as estrelas passam pela sequência principal (ALVES, 2005; FILHO, 2014).

1. Características das estrelas.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de FILHO (2014).

O eixo vertical da figura 4 corresponde a taxa de luminosidade que a estrela emite em relação ao sol. No eixo horizontal tem-se a temperatura superficial que da estrela, quanto mais azul maior é sua temperatura e quanto mais vermelha menor sua temperatura.

1. Tipos de estrelas

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tipo de estrelas | Temperatura de superfície (K) | Cor |
| O | 20.000 - 35.000 | Azul |
| B | - 15.000 | Azul-branco |
| A | - 9.000 | Branco |
| F | - 7.000 | Amarelo-branco |
| G | - 5.500 | Amarelo |
| K | - 4000 | Laranja |
| M | - 3000 | Vermelho |

Fonte: adaptado de ALVES (2005).

A Tabela 1 foi iniciada por Henry Draper em 1872 e continuada pelo observatório de Harvard (ALVES, 2005). A classificação espectral se dá pela temperatura da estrela e dependendo dela a estrela possui uma classificação de cor diferente. Essa cor não corresponde a cor real da estrela, ela apenas indica em que ponto do espectro de cores ocorre o máximo de emissão. Fora da atmosfera terrestre todas as estrelas são brancas, pois sempre emitem em todo espectro de cores.

U ma estrela não passa sua vida toda na sequência principal, como já foi abordado neste capítulo. Elas possuem um ciclo de vida que depende de sua massa inicial, porém com o passar do tempo vão perdendo massa e acabam passando por vários locais do diagrama. Segundo FILHO, 2014, é importante notar que o fato de uma estrela estar “na” ou “fora da” sequência principal não se refere à sua posição no espaço, mas apenas à posição do ponto no diagrama HR que representa sua luminosidade e temperatura, estima-se que em torno de 80% das estrelas nas vizinhanças do Sol são estrelas da sequencial principal. Aproximadamente 19% são anãs brancas e menos do que 1% são gigantes, supergigantes ou anãs marrons.

* + - 1. Aglomerados Estelares

Aglomerados estelares são um conjunto de estrelas formadas pela mesma nuvem de gás e, portanto, possuem a mesma idade, a mesma composição química e estão a aproximadamente a mesma distância da terra. Existem aglomerados com dezenas a centenas de estrelas, como as plêiades, que são mais conhecidas como As Sete Irmãs, pois é possível ver sete estrelas a olho nu. Elas possuem aproximadamente 20 milhões de anos e se encontra a 410 ano-luz da terra. Existem cerca de 160 aglomerados estelares na nossa Galáxia, com centenas de milhares de estrelas, um bom exemplo seria Ômega Centauri, que se encontra a 17.000 anos-luz da terra na constelação de Centauro e está localizada a 170 anos-luz.

Para uma amostra de estrelas que estão limitadas por brilho ou por distância, a sequência principal não é uma linha fina, mas sim uma linha larga, especialmente na extremidade fria, a largura da sequência principal não se dá devido a erros nas medidas de distância entre as estrelas, mas sim devido a variação na composição química das estrelas de mesma massa. Já para aglomerados de estrelas que nasceram da mesma nuvem de gás, e por isso possuem a mesma idade e tem a mesma composição química, a sequência principal no diagrama HR é uma linha fina (FILHO, 2014). Na figura 5 podemos ver o aglomerado de plêiades, onde os pontos mais claros são as sete irmãs.

1. Aglomerado estelar.

|  |
| --- |
| nebulosa Pleiades ou M45 |

Fonte: <http://www.astronoo.com/pt/aglomerado-estelar.html>

* + 1. Sequência principal

Hans Albrecht Bethe, no final da década de 60, desvendou a produção de energia nas estrelas e recebeu o prémio nobel pelo feito. Hans descobriu que quando o gás de hidrogênio, que se encontra no centro da esfera, alcança densidades muito elevadas acaba iniciando um processo que ficou conhecido como fusão termonuclear. O processo transforma o Hidrogênio que se encontra no centro em Hélio, este processo libera uma grande quantidade de energia que é capaz de parar o colapso do gás e assim equilibrar a força gravitacional, estabilizando a estrela. O processo continuar até que todo o hidrogênio que se encontra no centro da estrela seja transformado em hélio (MARRANGHELLO, 2014).

O restante do hidrogênio que não foi utilizado na fusão encontra-se agora em torno do núcleo da estrela que agora é formado por hélio – o hélio é mais pesado que o hidrogênio e com isso acaba se acumulando no centro da estrela enquanto o hidrogênio fica em uma camada superior. O processo de fusão se repete novamente agora transformando o Hélio que se encontra no centro em elementos mais pesados, como carbono, nitrogênio, até alcançar o elemento ferro (MARRANGHELLO, 2014).

Na figura 6 da esquerda superior para a direita inferior é possível ver a transformações que a estrela passa, inicia-se com a fusão do Hidrogênio para Hélio, depois é a vez do Hélio ser convertido em Carbono, Nitrogênio e Oxigênio e por fim os elementos mais pesados como o ferro são formados no centro da estrela. Este processo não dura infinitamente conforme vão ocorrendo as fusões termonucleares e elementos mais pesados vão se formando nas camadas mais internas da estrela, mais energia é necessária para unir os núcleos e assim gerar uma nova fusão, este processo ocorre até o ferro. A partir do ferro a estrela deixa de gerar energia e começa a consumir. Isso acontece pois a fusão de ferro em elementos mais pesados é um processo endotérmico ou seja absorver energia ao invés de gerar (FILHO, 2014; MARRANGHELLO, 2014).

1. Processo termonuclear de uma estrela.

|  |
| --- |
| C:\Users\Marcelo\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\H.PNG |

* + 1. Final do ciclo de uma estrela

O final do ciclo de uma estrela se dá a partir do momento em que elementos pesados como o ferro começam a ser formados no interior da estrela, pois estes necessitam de uma quantidade muito maior de energia para que aconteça uma nova fusão. Como citado anteriormente a fusão de elementos pesados é um processo endotérmico o que significa que ao invés de produzir mais combustível a estrela passa a consumir.

A partir do momento em que a estrela não gera mais seu próprio combustível, a matéria que se encontram nas camadas mais externas começam a cair em direção ao núcleo, porém as fusões continuam acontecendo, gerando os elementos mais pesados da tabela periódica, até que a estrela não possua mais energia. É importante frisar que apenas estrelas com massa superior a 8 massas solares são capazes de gerar elementos pesados como o ferro (JACOBSEN, 2007; FILHO,2014; MARRANGHELLO, 2014).

Quando finalmente toda a matéria estelar cai em direção ao núcleo, inicia-se um dos mais belos eventos da natureza, conhecido como a explosão de uma supernova, uma onda de choque que se forma a alguns quilômetros da superfície do núcleo.

Existem inúmeras teorias para explicar os vários fenômenos que acontecem durante o evento, entretanto o resultado final é certo, a matéria que se encontra nas camadas externas ao cair sobre o centro da estrela é expelida em uma violenta explosão e se espalha pelo universo. Que anteriormente era formado por nuvens de gás hidrogênio e agora possui também frações de Hélio, Carbono, Nitrogênio, Oxigênio, Silício e entre outros elementos, que viajam em uma grande velocidade pelo Universo.

N o momento em que a estrela morre podem ocorrer três situações com os seus restos. Na primeira o caroço de ferro no interior da estrela permanece praticamente intacto após a explosão, sofrendo um impulso de grande velocidade, que pode chegar a 1000 km/s. O caroço acaba sofrendo uma transformação devido à grande quantidade de energia liberada durante o processo, fazendo com que o núcleo que antes era formado por ferro seja dissolvido em prótons, elétrons e nêutrons. É importante citar que quanto maior é a sua massa inicial da estrela menor é o seu tempo de vida. Isto ocorre pois quanto mais massa a estrela possui maior é a compressão da mesma, fazendo com que ela atinja mais rapidamente as densidades críticas necessárias para a fusão de elementos mais pesados (JACOBSEN, 2007; MARRANGHELLO, 2014).

A segunda situação possível se dá caso a estrela possua massa menor que 8 massas solares. Estas estrelas acabam interrompendo seu processo de fusão antes de alcançar o elemento ferro e com isso acabam terminando seu ciclo expelindo a parte superficial sem necessariamente explodir em uma supernova. O caroço que sobra possui uma massa próxima a do nosso sol, porém possuindo um raio de apenas alguns milhares de quilômetros, estas estrelas são conhecidas como anãs brancas. Este tipo de estrela possui o tamanho aproximadamente igual ao da terra, o que faz com que ela seja considerada pequena por isso o nome. Como sua massa está comprimida e sua densidade é muito grande seu brilho é totalmente diferente das estrelas que ainda estão em fase de fusão (JACOBSEN, 2007; MARRANGHELLO, 2014).

Por fim estrelas que possuem massa 20 vezes maior que a massa do sol evoluem em uma velocidade muito grande, atingindo rapidamente as etapas finais de seu ciclo. Lembrando que quanto maior massa da estrela mais energia ela gera e com isso se torna bem provável que estas estrelas consigam gerar elementos mais pesados que o ferro, algo que não acontece em estrelas menores. Porém, devido à gigantesca atração gravitacional, o produto final da evolução estelar se torna o famoso buraco negro, de onde nada escapa, nem mesmo a luz. Os buracos negros possuem entre 5 e 100 massas solares e podem atingir cerca de 1000 massas solares (FILHO, 2014; MARRANGHELLO, 2014).

1. Ciclo de vida estelar

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de <https://hypescience.com/ciclo-vida-estrela-ciclo-vida-estelar/>

A Figura 7 é uma representação de cada uma das situações citas a cima, mostrando por todas as etapas que uma estrela passa em seu ciclo até a transformação em uma anã branca, estrela de nêutrons ou um buraco negro.

Existem estudos que apontam a existência de uma variação para a estrela de nêutron, conhecida como estrelas de quarks, onde a estrela é composta totalmente, ou em partes, por quarks livres (PAIS, 2008). Existem diversos modelos que descrevem como uma estrela de nêutrons pode ser formada por quarks. Neste trabalho iremos focas em um modelo especifico, denominado de modelo de sacola do MIT.

* 1. Estrelas de quark

Acredita-se que as estrelas de nêutrons possuam uma variação, conhecida como estrelas de quarks. Em altas densidade os quarks podem ser desconfinados dos hádrons, fazendo com que a estrela seja composta puramente por quarks livres (PAIS, 2008; TORRES, 2011).

Para forma uma estrela de quarks é necessário que a estrela possua massa maior que 8 massas solares e menor que 25 massas solares. Na Figura 8 podemos ver que o caminho necessário que a protoestrela deve percorrer é a Tipo-II, passando pela fase de gigante vermelha e, após isso, super gigante vermelha. Para pôr fim, ao formar Fe no seu núcleo, explodir em supernova e dar origem a uma estrela de quarks (JACOBSEN, 2007).

1. Evolução estelar estrelas de quark.

|  |
| --- |
| C:\Users\Marcelo\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\Capturar.png |

Fonte: adaptado de TORRES (2011).

* 1. Historia das Estrelas de Nêutrons

O estudo das estrelas de nêutrons só se tornou possível após o desenvolvimento da *Teoria da Relatividade Geral* de Albert Einstein. Não era possível estuda-las utilizando a *Teoria da Gravitação Clássica* que foi desenvolvido por Newton, pois a força gravitacional das estrelas é tão forte que distorce a estrutura do espaço que se encontra à sua volta, fazendo com que fosse necessário adicionar as correções que foram estudas por Einstein para calcular qualquer uma de suas propriedades (MARANGHELLO, 2014).

Outro fato importante que contribuiu para os estudos das estrelas de nêutrons foi a descoberta do nêutron feita por Chadwick no início da década de 30. Após a descoberta começaram a surgir as primeiras ideias de que estrelas de nêutrons poderiam vir a ser o produto final de uma evolução estelar. A proposta elaborada por Walter Baade e Fritz Zwicky, alguns anos após a descoberta do nêutron, considerava que a energia adquirida pelo caroço durante a explosão de uma supernova seria o suficiente para deixar uma estrela de nêutrons como produto final.

A Figura 9 é uma representação dos últimos passos de uma estrela que, após chegar ao estágio de Gigante Vermelha, explode como uma supernova e deixa uma estrela de nêutrons como produto final.

1. Nascimento de uma estrela de nêutron.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de MARANGHELLO (2014).

No ano de 1939 J.R Oppenheimer, G. M. Volkoff e R. C. Tolman encontraram uma solução para as equações de Einstein que se adequava aos estudos das estrelas de nêutron. Estas equações descrevem a estrutura de uma estrela esférica na qual a pressão exercida pela gravitação é contrabalançada pela pressão dos nêutrons que formam a estrutura interna da estrela (MARANGHELLO, 2014).

Existem outros trabalhos que utilizam as equações de Einstein para obter resultados mais realísticos nos quais a inclusão de características importantes é acrescentada, como a rotação da estrela e a presença de um campo magnético.

* + 1. Pulsares

Apenas no ano de 1967 a teoria sobre as estrelas de nêutrons foi confirmada, ao ser detectada o primeiro pulsar. Pulsar é o nome dado à uma estrela de nêutrons que se encontra em movimento de rotação. O nome está ligado ao fato de que a estrela emite um feixe de luz bem direcionado e por estar em rotação lembra um farol que indica o caminho aos navegantes, sua luz chega a Terra apenas como pulsos isolados, daí o nome pulsar (MARANGHELLO, 2014).

O astrofísico Anthony Hewish desenvolveu um radiotelescópio para estudar quasares, após um mês de operação, uma de suas alunas Jocelyn Bell, noticiou a detecção de uma fonte de pulsos periódicos e no ano de 1974 recebeu o prêmio Nobel por tal feito. Hoje a quantidade de pulsares já detectados ultrapassa o número de 1500 (MARANGHELLO, 2014).

1. Pulsar

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de FRANZON (2012).

A Figura 10 ilustra o comportamento de uma estrela do tipo pulsar. Na figura existe um cone de radiação (em azul) que sai da estrela, por estar rotacionando apenas pulsos chegam até a terra, como se fosse um farol. Os toroides concêntricos (em verde) representam o campo eletromagnético da estrela.

Os pulsares possuem períodos de rotação extremamente altos e isso se deve à conservação do momento angular durante a sua formação. É comum separar esses objetos em dois grupos, pulsares de milissegundos e pulsares canônicos, que se distinguem pela intensidade do campo magnético, idade e período de revolução (FRANZON, 2012).

1. Distribuição de período de rotação de pulsares.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de FRANZON (2012).

A Figura 11 representa o número de pulsares como função do período de rotação, podemos notar que a maior parte deles tem período de aproximadamente 1s (os canônicos) e a minoria tem período ~ 1ms (os de milissegundos).

* + 1. Magnetares

As estrelas de nêutrons possuem campos magnéticos muito fortes, muito maiores que os encontrados na Terra (tanto naturais quanto produzidos em laboratório), porém existe uma teoria sobre a existência de uma classe de estrelas de nêutrons que são capazes de gerar campos magnéticos ainda mais forte e que liberam uma grande quantidade de radiação eletromagnética por conta disso. Esta classe é chamada de *magnetar* e seu estudo alcança todos os limites da relatividade e da mecânica quântica (MARANGHELLO, 2014; PAIS, 2008). Dentro da física existe a teoria de que um magnetar é uma estrela de quarks, pois supostamente os campos magnéticos muitos fortes facilitariam a dissolução dos nêutrons e prótons em quarks (MARANGHELLO, 2014). A Figura 12 é uma ilustração que representa como deve ser um magnetar as linhas vermelhas são linhas de campos eletromagnéticos.

1. Ilustração de um magnetar.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de MARANGHELLO (2014).

* 1. Modelo de quarkS

Proposto em 1964 por Murray Gell-Man e George Zweing, o modelo propõe que os hádrons são constituídos por combinações de duas ou três partículas realmente elementares, os quarks. De acordo com o modelo os quarks carregam cargas elétricas fracionárias e possuem números interno rotulados por sabores. No modelo original proposto por Gell-Man e Zweing existiam três sabores que eram, conhecidos como *up, down e strange* que também são conhecidas por suas iniciais *u, d, s.* Para cada quark existente há uma antipartícula com a mesma massa, spin mas com carga elétrica oposta, os antiquarks. Os antiquarks são representados acrescentando uma barra ao símbolo do quark correspondente, como exemplo podemos citar o quark *d* onde seu antiquark é representado por (AVANCINI, 2009; JACOBSEN, 2007; TORRES, 2011; OSTERMANN). A Tabela 2 fornece algumas propriedades dos quarks, note que os quarks possuem carga elétrica fracionada (frações da carga do elétron), o que não é usual, já que uma carga elétrica fracionária nunca foi detectada experimentalmente em “estado livre” (AVANCINI, 2009; OSTERMANN).

1. Relação dos primeiros quarks e antiquarks.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Nome | Simbolo | Carga | Estranheza |
| Up | *U* | +2/3 | 0 |
| Down | *D* | -1/3 | 0 |
| Strange | *S* | -1/3 | -1 |
| anti-up |  | -2/3 | 0 |
| anti-down |  | +1/3 | 0 |
| anti-strange |  | +1/3 | +1 |

Fonte: adaptado de OSTERMANN.

Ainda no ano de 1964 foi proposto um quarto sabor que recebeu o símbolo *c* para indicar uma nova propriedade denominada *charme*. No ano de 1977 dois novos sabores de quarks foram propostos *t* e *b* respectivamente *top* e *bottom* (AVANCINI, 2009; JACOBSEN, 2007; OSTERMANN; TORRES,2011).

* + 1. Modelo de Gell-mann-Ne’eman

O modelo de Gell-mann-Ne’eman é o precursor da teoria de quarks. A classificação das partículas elementares (hádrons) baseia-se na ideia de identificar famílias de partículas através da realização de uma conexão entre seus vários membros. O modelo teve um enorme sucesso, pois além de classificar todas as partículas conhecidas, ainda foi capaz de prever novas partículas que posteriormente acabaram sendo observadas experimentalmente (AVANCINI, 2009).

* + 1. Mésons

Os mésons são constituídos pela combinação de um quark e um antiquark. Desde a década de 60, quando o modelo de quark foi proposto pela primeira vez, muitos mésons foram descobertos e todos eles são compostos por um quark e um antiquark. Não se existem relatos de mésons que não se encaixem neste modelo (OSTERMANN).

1. Méson Pi

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de AVANCINI, 2009.

A Figura 13 é uma representação da união de um quark e um antiquark para a geração do méson pi.

1. Mésons formados por quarks (*u,d ou s)* e antiquarks (.)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Mésons | Símbolos | Quark | Antiquark |
| Pi Zero |  | *u,d* |  |
| Pi Menos |  | *d* |  |
| Pi Mais |  | *u* |  |

Fonte: adaptado de OSTERMANN.

A Tabela 4 traz como exemplo três mésons formados pela combinação de quarks e antiquarks.

* + 1. Bárions

Os bárions são compostos a partir de três quarks, tomando-se todas as possíveis combinações entre os quarks. Existem também bárions que são compostos apenas por antiquarks como podemos ver na Tabela 4 logo abaixo.

1. Composição dos bárions a partir da combinação de três quarks *u, d* e *s.*

|  |  |
| --- | --- |
| Bárions | Composição |
| Próton |  |
| Antiproton |  |
| Nêutron |  |
| Antinêutron |  |
| Lambda |  |
| Antilambda |  |

Fonte: adaptado de OSTERMANN.

1. Representação do nêutron e do próton.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de AVANCINI, 2009.

A Figura 14 ilustra os quarks necessários para a formação de um nêutron e de um próton.

* + 1. Quarks e Suas Cores

Como mencionado antes os quarks possuem spin 1/2 e com isso obedecem ao chamado Princípio de Exclusão de Pauli, segundo ele duas partículas iguais não devem ocupar o mesmo estado quântico, no caso dos quarks não podem ocupa o mesmo estado se possuírem os mesmos sabores. Isso ocorre também nos átomos, onde dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado de energia e spin. Porém existem casos de bárions formados pela combinação de quarks do mesmo sabor que acabam por violar o princípio de Pauli, como que é formado pela combinação *uuu* e também o caso que é formado por *sss* (AVANCINI, 2009; OSTERMANN)*.*

Na tentativa de resolver este problema, o físico Greenberg sugeriu que os quarks possuem uma nova propriedade chamada de cor, obviamente a cor do quark não possui relação alguma com o sentido visual a que estamos habituados. Essa propriedade é chamada de cor apenas por necessidade e em geral é referenciada como carga de cor. As cores são: vermelho (VM), verde (VD) e azul (AZ). Estas cargas são chamadas coletivamente de cargas coloridas, já os antiquarks possuem cargas coloridas negativas sendo antivermelho, ativerde e antiazul**.**

Os quarks e hádrons experimentam a força forte enquanto os elétrons e os neutrinos não. Após ser proposto a carga-cor para os quarks, que é uma propriedade não apresentada por neutrinos e elétrons, surgiu a ideia de que a cor pode ser a fonte da força que atua entre os quarks. Uma conclusão imediata foi possível ao fazer a analogia das cores com as cargas elétricas: cores iguais se repelem. Assim dois quarks azuis se repelem enquanto que um quark azul e um quark antiazul se atraem, isto ocorre similarmente com as outras cores (AVANCINI, 2009; OSTERMANN)*.*

A atração entre duas cores diferente ocorre com uma intensidade menor que a atração entre cores opostas de um quark e um antiquark, assim um quark azul e um quark verde podem se atrair, porém a atração será menor que entre um quark azul e um antiazul. Os bárions são formados por um agrupamento entre os três quarks de cores diferentes (AVANCINI, 2009; OSTERMANN).

* 1. Equilíbrio Químico

Durante a evolução de uma estrela de quarks muitas reações químicas diferentes ocorrem. Porém a carga elétrica e o número bariônico são conservados em uma escala longa de tempo se comparado com o tempo de vida da estrela, no seu núcleo a energia de fermie excede a massa dos híperions (híperions são bárions e são chamados de decupleto bariônico) e com isso estas partículas podem ser produzidas em processo de *interação forte* com a conservação da estranheza dos quarks. Neste processo a estrela pode alcançar o equilíbrio químico, um estado degenerado onde reações adicionais não são mais possíveis, o equilíbrio químico é matematicamente expresso pela igualdade dos potenciais químicos (PAOLI, 2010; JACOBSEN, 2007).

* 1. Modelo De sacola do MIT

O modelo de sacola do MIT foi desenvolvido no instituto de Tecnologia de Massachussets na década de 70. O modelo foi proposto para contabilizar as massas hadrónicas em termos dos seus constituintes – os quarks. Em linhas gerais o modelo de sacola do MIT descreve o confinamento e movimento livre dos quarks em um volume do espaço capaz de conter campos hadrônicos, como se fosse uma sacola, assim mantendo os quarks em uma única região (PAIS, 2008; TORRES, 2011).

O modelo contém dois aspectos fundamentais: liberdade assintótica e confinamento, esses dois aspectos são incorporados ao modelo da seguinte maneira

* Dentro da sacola as interações não são consideradas.
* Fora da sacola quarks são proibidos de existir como partículas livres. Isto é possível dando-se ao vácuo uma densidade de energia constante B que mantém os quarks confinados em pequenas regiões do espaço.

O modelo tem sido utilizado para descrever a matéria de quarks não apenas dentro dos hádrons, como também em qualquer volume fechado finito, este é o motivo por que o modelo é utilizado nas estrelas de nêutrons (GRYNBERG, 1995).

* + 1. Equação de Estado

Para descrever a estrela iremos precisar utilizar as equações de estado para o modelo de sacola do MIT, vamos utilizar uma versão dela considerando a temperatura igual a zero (o que simplifica a equação e facilita resolve-las analiticamente). Apesar de objetos compactos terem temperaturas elevadas da ordem da temperatura do núcleo do sol a energia das particulas e muito maior que a energia termica do meio (TORRES, 2011). Levando isto em conta utilizaremos as seguintes equações:

Onde *p* é a pressão, é a densidade de energia, é a densidade do número bariônico, é degeneresencia dos quarks, *k* é o momento, é o momento de fermi,  é a energia do quark , *B* é a constante de sacola e o somatório em é feito sobre todos os quarks.

* + 1. Equações de TOV

Para descrever as propriedades das estrelas de nêutrons e de quarks é utilizado a equação da relatividade geral conhecida como equações de Tolman-Oppenheimer-Volkoff, estas equações são a forma reduzida das equações de Einstein para o interior de uma estrela esférica, estática e relativista e são dadas por:

e

onde *p*é a pressão, *M*é a massa gravitacional, é a densidade de energia e *G*é a constante da gravitação universal. As equações de TOV podem ser integradas desde a origem, com a condição inicial até um valor arbitrário para a densidade central de energia , até a pressão ir a zero para um raio *R*. Como a pressão nula define a superfície da estrela, *R* define o raio gravitacional da estrela.

Para uma dada Equação de estado, só existe uma solução com para cada densidade de energia central, . Cada equação de estado define uma única família de estrelas sendo que cada estrela parametrizada pela pressão central ou densidade central. A figura abaixo mostra como é feita a leitura das curvas resultantes da equação de TOV. São curvas parametrizadas pela densidade de energia (PAIS, 2008; TORRES, 2011).

1. Soluções para TOV.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de TORRES (2011).

* 1. métodos Numéricos
     1. Integração numérica

A integração numérica consiste em aproximar uma função de difícil integração (ou até mesmo impossível de se resolver analiticamente) por polinômios. Essa substituição é realizada em pequenos intervalos, quanto maior o número de intervalos (e, portanto, quanto menores eles são) mais preciso será o resultado. Finalmente a integração é realizadas para estes polinômios, que tem fácil solução (RUGGIERO, 1996).

O método que será utilizado neste trabalho é o da quadratura gaussiana, que aproxima a função por um polinômio ortogonal e é considerado o método mais preciso para realizar integração numérica (RUGGIERO, 1996).

* + 1. Interpolação numérica

A interpolação é uma técnica básica do cálculo numérico, utilizada quando as funções são conhecidas apenas em um conjunto finito e discreto de pontos no intervalo. Para o presente trabalho iremos utilizar o método de interpolação conhecido como *Spline.* O método utiliza de poucos grupos de pontos, obtendo-se polinômio de grau menor, e impõe condições para que a função de aproximação seja continua e tenha derivadas continuas até uma certa ordem. Existem algumas variações para o *método de interpolação Spline*, a utilizada neste projeto será a cúbica, que utiliza uma função polinomial por partes onde cada parte é um polinômio de grau 3 (RUGGIERO, 1996).

* + 1. Equação diferencial

A solução de uma equação diferencial de forma analítica tem como resultado uma família de funções que dependem de constantes que devem ser determinadas pelas condições iniciais do problema. Quando isso é realizado numericamente a solução é um conjunto de pontos (que representam a função) que também dependem das condições iniciais (RUGGIERO, 1996).

O método utilizado para a solução das equações diferenciais neste trabalho é o método de Runge-Kutta. Existem diversas ordens de aproximação para o método de Runge-Kutta, em geral, quanto maior a ordem mais preciso o resultado. Para este trabalho pretende-se utilizar uma aproximação de quarta ordem (RUGGIERO, 1996).

O método de Runge-Kutta de 4 ordem é determinado pelas seguintes equações:

Onde e são os próximos pontos a serem encontrados, h é o intervalo de pulo para x e f é a representação da equação diferencial.

* 1. trabalhos similares

Foram selecionados três trabalhos similares que abordam o assunto das estrelas de quarks, os três trabalhos escolhidos são dissertações de mestrados e utilizam-se de modelos para calcular a existência de estrelas de nêutrons e de quarks.

* + 1. Equação de estado para matéria de quarks e propriedades estelares

O trabalho apresentado nesta subseção é uma dissertação de mestrado na área de física escrito por James Rudnei Torres, TORRES (2011) propôs um estudo sobre a matéria nuclear em altas densidade considerando apenas a fase desconfinada dos quarks com a temperatura zero, para fazer isto foi necessário a construção das equações de estado (EoS) levando em conta a possibilidade da existência de quarks no interior de estrelas pulsares.

Para a obtenção das EoS o autor utilizou-se de dois modelos, o primeiro é o modelo já tradicional e que foi utilizado neste trabalho Modelo de Sacola do MIT e o segundo é uma proposta ao modelo de sacolas, que é chamado de modelo de quarks com massa dependente da densidade (QMDD).

As equações de estados resultantes dos modelos se tornam as entradas para a resolução numérica das equações de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV). As soluções resultantes da TOV descrevem as principais propriedades estelares como raio máximo, massa máxima e densidade central. Os resultados obtidos por TORRES (2011) para o modelo do MIT podem ser vistos nas Figuras 16,17.

1. Resultado obtido por TORRES (2011) para equação de estado considerando a massa do quark *s* 150MeV.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de TORRES (2011).

A Figura 16 é uma representação dos resultados obtidos por TORRES (2011) com a sua equação de estado para o *Modelo de Sacola do MIT*, onde é considerado que os quark *u* e *d* possuem massa zero e o quark *s* possui massa de 150MeV.

1. Resultado obtido por TORRES (2011) para massa x raio com a massa do quark *s* de 100MeV.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de TORRES (2011).

A Figura 17, é uma representação gráfica dos resultados de TORRES (2011) para a relação massa raio considerando os quarks *u* e *d* com massa zero e a massa do quark *s* de 100 MeV onde o eixo y representa a massa gravitacional (massa solar) e o eixo x representa o raio em km.

* + 1. Estrelas de quarks num campo magnético forte

O trabalho apresentado nesta subseção é uma dissertação de mestrado na área de física escrito por Helena Sofia de Castro Felga Ramos Pais, PAIS (2008) propôs o estudo do efeito de campos magnéticos fortes, para isso o autor utilizou-se das EoS do *modelo de sacola do MIT.*

Após a resolução das equações de estado, os resultados obtidos por PAIS (2008) para a EoS são integradas com as equações de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) e resultam em gráficos da massa gravítica em função do raio. Pais obteve os seguintes gráficos resultantes:

1. Resultado obtido por PAIS (2008) para fracção dos quarks *u,d* e *s* em função da densidade.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de PAIS (2008)

A figura 18, é uma representação dos resultados obtidos por PAIS (2008), onde o eixo y representa a fração dos quarks e o eixo x representa a densidade.

1. Resultado obtido por PAIS (2008) para pressão x densidade de energia.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de PAIS (2008).

A figura 19, que se encontra acima é o resultado obtido por PAIS (2008) onde o eixo y é a pressão e o eixo x a densidade de energia para diversos valores da constante de sacola.

|  |
| --- |
| Resultado obtido por PAIS (2008) para massa x raio. |

Fonte: adaptado de PAIS (2008).

A Figura 20, é uma representação gráfica dos resultados de PAIS (2008), onde o eixo y representa a massa gravitacional (massa solar) e o eixo x representa o raio em km.

* + 1. Efeitos da existência da fase mista em estrelas de nêutrons híbridas

O trabalho apresentado nesta subseção é uma dissertação de mestrado na área de física escrito por Marcelo Gomes de Paoli, neste trabalho PAOLI (2010) propôs o estudo sobre a existência de uma fase mista para estrelas de nêutrons.

O autor propos os seus estudos utilizando-se de duas condições a primeira de Gibbs onde é considerada a existência de uma fase mista para densidade intermediarias onde a estrela é composta por hádrons e quarks, a segunda condição é a de Maxwell e a estrela não possui uma fase mista.

Para o desenvolvimento deste trabalho o autor utilizou-se do modelo *Nambu-Jona-Lasinio* (NJL) para a construção das equações de estado, após a resolução da equação os resultados foram integrados a TOV e resultaram nas propriedades de uma estrela. Os resultado obtidos por PAOLI (2010) podem ser visto a seguir:

1. Resultado obtido por PAOLI (2010) Equação de estado para estrelas quarkionicas com e sem matéria estranha utilizando o modelo *NJL*.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de PAOLI (2010).

A Figura 22, é uma reprodução dos resultados de PAOLI (2010) para a equação de estado onde o eixo y representa a pressão e o eixo x representa a densidade de energia.

1. Resultado obtido por PAOLI (2010) massa x raio para estrelas quark iônicas com e sem matéria estranha utilizando o modelo *NJL*.

|  |
| --- |
|  |

Fonte: adaptado de PAOLI (2010).

A Figura 23, é uma reprodução dos resultados de PAOLI (2010) onde o eixo y representa a massa gravitacional (massa solar) e o eixo x representa o raio em km.

* + 1. Conclusão sobre os trabalhos apresentados

Nesta seção foi possível ver quais trabalhos fomentaram a construção deste trabalho, é importante frisar que apenas alguns resultados obtidos pelos autores foram apresentados, apenas aqueles que tem maior relevância para este trabalho.

Este trabalho reproduziu os mesmos gráficos obtidos por TORRES (2011) e PAIS (2008) pois ambos se utilizam do *modelo de sacola do MIT* que também foi utilizado neste trabalho. Já o trabalho de PAOLI (2010) é utilizado como base de comparação já que o mesmo simula a existência de estrelas de quarks, porém utilizando outro modelo.

1. DESENVOLVIMENTO
   1. ANÁLISE DO Simulador DESENVOLVIDO
      1. Conceito Geral

O conceito geral do simulador que foi desenvolvido é auxiliar estudantes da área de astrofísica ou entusiasta na área a resolver o *Modelo de Sacola do MIT*, que como já abordado anteriormente é um método muito conhecido e aplicado na área de astrofísica. Para resolver o modelo foram utilizados métodos numéricos em conjunto com as equações apresentadas no capítulo anterior. Os métodos matemáticos utilizados são: a *Regra de quadratura Gaussiana,* o *Método de Interpolação Spline Cúbica* e o *Método de Runge-Kutta.*

* + 1. Público Alvo

O público alvo deste simulador são alunos de graduação e mestrado na área de física ou entusiastas com um bom conhecimento na parte de estrelas e astrofísica.

* 1. Definição de entrada e saida do simulador
     1. Entradas

O software tem como entrada um arquivo de configuração onde nele o usuário poderá informar:

* Massa dos quarks e dos léptons: usuário deverá informa o valor que cada quark e lépton possui na simulação, o arquivo já vem com os valores padrões apresentados na literatura.
* Constante de sacola: o usuário deverá informar o valor para a constante da sacola, este valor deve ser entre 100 e 200 (O intervalo definido para o simulador tem como base, os valores mínimos e máximos utilizados na literatura).
* Nome da estrela: o usuário poderá informar o nome de sua estrela.
  + 1. Saídas;

O simulador tem como saída os seguintes gráficos:

* Gráfico da Equação de Estado para o *Modelo de Sacola do MIT*,utilizando as entradas fornecidas pelo usuário, que será chamado de gráfico da pressão x densidade de energia.
* Gráfico da Solução da Equação de TOV utilizando a equação de estado para o *Modelo de Sacola do MIT*, que será chamado de gráfico massa x raio.
  1. Funcionamento do software

O funcionamento do software se dá a partir das entradas informadas pelo usuário no arquivo de configuração, estes dados são utilizados para gerar a equação de estado, que contempla as equações de densidade energia, pressão e densidade do número de partículas.

O software se utiliza de integração numérica, fazendo com que o parâmetro livre utilizado no *equilíbrio químico,* o valor utilizado estáentre 0 e 500 (valor obtido após vários testes) e com isso obtém-se um conjunto de dados que é utilizado para gerar o gráfico de pressão x densidade de energia também conhecido como gráfico da equação de estado.

Os valores obtidos na equação de estado são utilizados em conjunto com o método matemático spline cúbico para interpolar, na interpolação são utilizados os valores obtidos de pressão e energia. Os resultados obtidos são utilizados para resolver a equação diferencial da TOV, a solução da TOV é um conjunto de dados que é utilizado para fazer o gráfico massa x raio.

* 1. processo de validação do software

A validação do software se deu a partir dos trabalhos que foram apresentados na seção 2.8, que se utilizavam do modelo do MIT sem modificação, foram utilizados os valores das estrelas apresentados no trabalho de TORRES (2011) como principal validação do software.

* 1. Especificações do software
     1. Requisitos Funcionais

RF01. O sistema deve permitir ao usuário parametrizar as informações da estrela

RF02. O sistema resolvera o *Modelo de sacola* a partir das entradas informadas pelo usuário.

RF03. O sistema apresentara como saída o gráfico massa x raio.

RF04. O sistema apresentara como saída o gráfico pressão x densidade de energia.

* + 1. Requisitos Funcionais

RNF01. O simulador foi desenvolvido na linguagem de programação *Python* em sua versão 3.6.4*.*

RNF02. O usuário deve possuir a biblioteca *Scipy* 1.1.0 instalada em sua máquina.

RNF03. O usuário deve possuir o *Python* instalado em sua máquina na versão 3.6.4.

RNF04. O usuário deve possuir a biblioteca *matplot* 3.0.0 instalado em sua máquina.

* 1. Iplementação

O sistema foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação P*ython*  em sua versão 3.6.4 (a linguagem *Python* também está disponível na versão 2.7.6) a escolha pela linguagem de programação se deu pelo fato de a mesma possuir uma sintaxe simples e de fácil entendimento, além de ser uma linguagem multiplataforma, ter seu código aberto e possuir uma grande comunidade, o que facilita no desenvolvimento e na obtenção de ajuda em caso de problemas.

Em conjunto com a linguagem foram utilizadas duas bibliotecas, a primeira chamada *scipy* é uma biblioteca desenvolvida em *Python* que auxilia na resolução de problemas matemáticos como integração numérica, interpolação, resolução de equações diferenciais entre outros. A versão utilizada foi a 1.1.0 sendo a mais recente até o momento da publicação deste trabalho, além disso a escolha por esta biblioteca se deu pelo fato de a mesma possuir uma ótima documentação e uma grande comunidade.

Também foi utilizado a biblioteca para a criação de gráficos chamada de *matplot*, está biblioteca tem como intuito auxiliar na construção de gráficos. A versão utilizada foi a versão 3.0.0 que até a publicação deste trabalho era a versão mais recente desenvolvida.

No quadro abaixo podemos ver uma visão sistemática do software desenvolvido:

* + 1. Codificação

A codificação do sistema foi feita em partes como explicado na seção 3.3 o usuário utiliza-se do arquivo de configuração para configurar o comportamento da estrela e em seguida o sistema irá resolver a equação de estado, os resultados obtidos nesta equação são utilizados para gerar o gráfico da equação de estado e também para resolver a equação de TOV e os resultados obtidos nela geram o gráfico de massa x raio.

Para facilitar o entendimento do fluxo principal do sistema foi criado o pseudocódigo que está disponível logo a baixo:

1. Pseudocódigo do sistema

|  |
| --- |
| ######################################################  # Funcionamento do Sistema #  ######################################################  INICIA ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO  RESULTADOS <- CALCULA EQUAÇÃO DE ESTADO  GERAR GRÁFICO DA EQUAÇÃO DE ESTADO  RESULTADOS TOV <- CALCULAR TOV  GERAR GRÁFICO DE MASSA VERSOS RAIO |

No Quadro 1, temos a visão de como o sistema foi construído, primeiro é necessário inicializar as configurações que foram informadas pelo usuário que são massa dos quarks e dos léptons, valor para a constante de sacola, nome da estrela. Após a inicialização é feita a chamada da função que calcula a equação de estado e os valores resultantes dela são guardados.

O próximo passo se dar utilizando os resultados obtidos para a criação do gráfico da equação de estado, após gerado o gráfico os resultados são utilizados para calcular a TOV e por fim gerar o gráfico de massa versos raio.

* + - 1. Equação de estado

Como mostrado no Quadro 1, após inicializar as configurações, o sistema chama a função que calcula a equação de estado, dentro desta função serão resolvidas as formulas apresentadas na seção 2.7 e elas são a equação para pressão e a equação para densidade de energia no quadro a seguir é possível ver o pseudocódigo da função de cálculo da equação de estado.

1. Pseudocódigo da função calcular equação de estado

|  |
| --- |
| ######################################################  # Função Calcular Equação de Estado #  ######################################################  RESULTADO DAS PRESSÕES <- CALCULAR PRESSÃO VARIANDO KF  GERAR ARQUIVO TXT DE SAIDA PARA AS PRESSÕES  RESULTADO DAS ENERGIAS <- CALCULAR DENSIDADE DE ENERGIA VARIANDO KF  GERAR ARQUIVO TXT DE SAIDA PARA AS ENERGIAS  FUNÇÃO PLOTAR GRÁFICO <- RESULTADO DAS PRESSÕES E RESULTADO DAS ENERGIAS  PLOTAR GRÁFICO |

No Quadro 2, é possível ver como funciona a função que calcula a equação de estado, primeiro é chamado a função que calcula a pressão, os resultados obtidos são guardados em uma variável e um arquivo de saída em formato txt é gerado (este arquivo é utilizado mais tarde como entrada para a equação da TOV).

Em seguida a função que calcula a densidade de energia é chamada e seus resultados também são guardados e um arquivo é gerado, os resultados obtidos são utilizados em uma função da biblioteca *matplot* que gera o gráfico da equação de estado e por fim o gráfico é mostrado ao usuário.

Para construir a equação de estado foi necessário criar uma rotina que equilibrasse os quarks e os léptons fazendo com que a estrela estivesse em seu estado de equilibrio, para isso foi necessário igualar os quarks *u*, *d* e *s* e o elétron, onde o quark *u* é a variável livre que foi citada na seção 3.3. para a construção desta rotina foi necessário a utilização de uma função existente na biblioteca *scipy*, a função utilizada foi a *optimize.root*, ela recebe uma quantidade de funções e tentar zera-las e tem como retorno a diferença necessária para zerar cada função.

O *root* tem como entrada uma função onde as equações que serão zeradas se encontram, além de os valores iniciais de cada variável no caso do sistema eles seriam o *u*, *d, s* e o eletrôn, onde o *u* é uma variável livre e tem seu valor enviado de outra função que será mostrada logo a seguir, o *d* é 2 vezes o valor de *u*, o *s* inicia em zero e o eletrôn é o valor de *u* dividido por 2.

O quadro abaixo é um pseudocódigo que representa a rotina que calcula cada pressão variando o valor do *u*:

1. Pseudocódigo da função calcular pressão variando o valor de *u*

|  |
| --- |
| ######################################################  # Função Calcular Pressão variando o valor de u #  ######################################################  PARA KF DE 0 ATÉ 500 de 22 em 22 FAÇA  RESULTADO DO KF <- CALCULAR EQUILIBRIO QUIMICO  RESULTADO <- CALCULAR PRESSÃO  RETORNA VETOR DE PRESSÕES |

No Quadro 3, é possível ver a representação da função que calcula as pressões variando os valores de *u,* para isso é necessário fazer um laço que vá de 0 até 500 (valor definido após vários testes) com pulo de 22 em 22, o valor de kf é utilizado como parâmetro livre na função de equilíbrio químico, os valores que retornam são utilizados na função que calcula cada pressão, junto com o vetor de kf também são passados outros parâmetros entre eles estão o número de quarks que no sistema é sempre 3, o número de léptons que também é fixa em 2, o vetor com os kfs, vetor com as massas dos léptons e dos quarks e a constante de sacola, o valor retornado é guardado em um vetor que depois é retornado a função apresentada no Quadro 2.

O Quadro 4, apresenta a função que calcula cada pressão, esta função está representada pelo seguinte pseudocódigo:

1. Pseudocódigo da função calcular pressão

|  |
| --- |
| ######################################################  # Função Calcular Pressão #  ######################################################  RESULTADO QUARK <- 0  RESULTADO LÉPTON <- 0  PARA I DE 0 ATÉ NUMERO DE QUARKS FAÇA  RESULTADO <- CALCULAR INTEGRAL UTILIZANDO MÉTODO DE GAUS  RESULTADO QUARK <- RESULTADO QUARK + RESULTADO  RESULTADO <- 0  PARA J DE 0 ATÉ NUMERO DE LÉPTONS FAÇA  RESULTADO <- CALCULAR INTEGRAL UTILIZANDO MÉTODO DE GAUS  RESULTADO LÉPTON <- RESULTADO LÉPTON + RESULTADO  RETORNA RESULTADO QUARK + RESULTADO LÉPTON – SACOLA |

No Quadro 4, podemos ver como funciona o cálculo da pressão, primeiro é feito um laço que vai do 0 até o número de quarks que no caso do sistema é 3, este laço é utilizado para pegar o valor da massa do quark que se encontra no vetor de massas, o valor da massa é colocado na função que calcula a integral, esta função é uma função disponibilizada pela biblioteca *scipy* onde é necessária passa a integral que deve ser resolvida e os valores de quanto até quanto a integral deve ser feita.

O resultado é guardado em uma variável que é somada com os resultados obtidos nos outros quarks, o mesmo processo acontece para os léptons porém o numéro de léptons é 2 e não 3 como os quarks. Após feita a soma dos resultados obtidos a função retorna o valor da pressão para a função apresentado no Quadro 3.

No quadro abaixo é possível ver o pseudocódigo da função calcular densidade energia variando o valor de *u*:

1. Pseudocódigo da função calcular densidade de energia variando o valor de *u*

|  |
| --- |
| ################################################################  # Função Calcular densidade de energia variando o valor de u #  ################################################################  PARA KF DE 0 ATÉ 500 de 22 em 22 FAÇA  RESULTADO DO KF <- CALCULAR EQUILIBRIO QUIMICO  RESULTADO <- CALCULAR DE ENERGIA  RETORNA VETOR DE ENERGIAS |

Assim como no Quadro 3, a função calcular densidade também utiliza-se de um laço de repetição para variar o valor de *u* e gerar um vetor de kf, que é passado por parâmetro para a função que calcula a densidade de energia.

1. Pseudocódigo da função calcular energia

|  |
| --- |
| ######################################################  # Função Calcular Energia #  ######################################################  RESULTADO QUARK <- 0  RESULTADO LÉPTON <- 0  PARA I DE 0 ATÉ NUMERO DE QUARKS FAÇA  RESULTADO <- CALCULAR INTEGRAL UTILIZANDO MÉTODO DE GAUS  RESULTADO QUARK <- RESULTADO QUARK + RESULTADO  RESULTADO <- 0  PARA J DE 0 ATÉ NUMERO DE LÉPTONS FAÇA  RESULTADO <- CALCULAR INTEGRAL UTILIZANDO MÉTODO DE GAUS  RESULTADO LÉPTON <- RESULTADO LÉPTON + RESULTADO  RETORNA RESULTADO QUARK + RESULTADO LÉPTON + SACOLA |

Parecido com o que ocorre no Quadro 4, a função calcular energia também possui um laço de repetição indo de 0 até a quantidade de quarks e léptons, os valores também são guardados em variáveis e somados com o resultado dos outros quarks e dos léptons, após o cálculo a função retorna para a função apresentada no Quadro 5.

* + - 1. Equação de TOV

Após o termino do cálculo da equação de estado e da geração do gráfico da equação de estado, o sistema assim como mostrado no Quadro 1, inicia o cálculo da TOV como podemos ver no Quadro 7.

1. Pseudocódigo da equação de TOV

|  |
| --- |
| ######################################################  # Função Equação de TOV #  ######################################################  ENERGIA <- LER ARQUIVO TXT COM ENERGIAS  PRESSÃO <- LER ARQUIVO TXT COM AS PRESSÕES  FUNÇÃO DE INTERPOLAÇÃO <- ENERGIA E PRESSÃO  INTERPOLAÇÃO <- FUNÇÃO DE INTERPOLAÇÃO  FUNÇÃO RUNGE-KUTTA <- INTERPOLAÇÃO  RESULTADO <- FUNÇÃO RUNGE-KUTTA  FUNÇÃO PLOTAR GRAFICO <- RESULTADOS  PLOTAR GRÁFICO |

No quadro apresentado acima podemos ver o interior da função que calcula a equação da TOV, primeiro os arquivos de energia e pressão gerados na equação de estado são lidos e guardados em vetores que depois são utilizados na função de interpolação que foi disponibilizada pela biblioteca *scipy* e tem como entrada pressão e a massa.

Os resultados obtidos na função de interpolação são utilizados na função de Runge-Kutta, que também é uma função disponibilizada pelo *scipy*. O Runge-kutta recebe como parâmetro uma função onde se encontra a equação de TOV que foi apresentada na seção 2.7.2, após resolver a equação de TOV a função retorna os valores da massa e do raio que são guardados em uma variável e por fim são plotados em um gráfico.

* 1. RESULTADOS

Após a implementação do software, tornou-se necessária a execução de uma bateria de testes para que fosse possível encontrar a melhor configuração possível para que o software obtivesse os melhores resultados. Com estes testes foi possível descobrir a distância necessária que o laço de repetição precisaria percorrer para gerar os melhores resultados para a pressão e densidade de energia, estes valores foram o laço iniciando de 0 indo até 500, aumentando seu valor de 22 em 22. Para chegar a este valor foram necessários vários testes e a escolha por estes valores se deu pelo fato de na comparação com os outros este ter dado os melhores resultados.

Os testes aplicados no sistema levavam em consideranção estrelas feitas de três quark, *u, d* e *s* e dois léptons, elétron e múon

1. Conclusão

**Referências**

ABDALLA, Maria Cristina Batoni, **O discreto charme das partículas elementares.** São Paulo. Editora UNESP, 2004. 344 p.

ALVES, Rául M. S. T. **I – Evolução estelar II – A matéria escura, os WIMPS e a Heliossimologia.** Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2005.

AVANCINI, S. S.; MARINELLI, J. R.. **Tópicos de Física Nuclear e Partículas Elementares**. 2009. Florianópolis – Universidade Federal de Santa Catarina, Consórcio RediSul.

CARUSO, F., OGURI, V., **A Eterna Busca do Indivisível: Do Átomo Filosófico aos quarks e leptons**, Rio de Janeiro, 1996.

FRANZON, Bruno Cezar de Souza. **Gluons em Estrelas de Nêutrons.** São Paulo, 2012.

FEYNMAN, Richard. **Lições de Física de Feynman**. Bookman, 2008.

FILHO, Kepler de Souza Oliveira; SARAIVA, Maria de Fatima Oliveira. **Astronomia e Astrofísica**. Porto Alegre: [s.n.], 2014. 784 p.

GRIFFITHS, David. **Introduction to Elementary Particles**. 2nd Edition. WILEY-VHC, 2008.

GRYNBERG, Suely Epsztein. **Fenomenologia Estelar em Modelos de Quarks.** Minas Gerais, 1995.

JACOBSEN, Rafael Bán. **Plasma de Quarks e Glúons no interior de Estrelas de Nêutros.** Porto alegre, 2007.

LOPES, Cesar Valmor Machado. **Modelos atômicos no início do século XX: da física clássica à introdução da teoria quântica**. São Paulo, 2009.

MARRANGHELLO, Guilherme Frederico; **Estrelas de Nêutron**. 1ed. Itajaí: Casa Aberta, 2014.

ORTIZ, Roberto; **Perda de massa em estrelas**. Escola de Artes, Ciências e Humanidades da USP.

OSTERMANN, F. **Partículas Elementares e Interações Fundamentais**. Textos de Apoio aos Professores de Física, Nº 12. 2001. Porto Alegre: Instituto de Física - UFRGS. Disponível em: < https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/n12\_ostermann.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2018.

PAIS, Helena Sofia de Castro Felga Rámos. **Estrelas de quarks num campo magnético forte**. Universidade de Coimbra, 2008.

PAOLI, Marcelo Gomes de. **Efeitos da existência da fase mista em estrelas de Nêutrons híbridas**. Florianópolis, 2010.

PILOTTO, Fernando Gonçalves. **Modelo de sacola Quiral com Superfície Difusa.** Porto alegre, 2003.

RUGGIERO, M. A.; LOPES, V. L. da R. **Cálculo Numérico – Aspectos teóricos e computacionais.** 2d. Pearson Makron Books, 1996.

TORRES, James Rudnei. **Equação de estado para matéria de quarks e propriedades estelares.** Florianópolis, 2011.

1. Ano-luz é uma unidade que corresponde à distância percorrida pela luz, no vácuo, durante um ano, à velocidade de 300 mil km/s. Corresponde a exatamente 9.460.730.472.580,8 km. [↑](#footnote-ref-1)
2. K (Kelvin) é o nome dado para a unidade básica da temperatura de acordo com o Sistema Internacional de Unidades. A temperatura de 1 Kelvin corresponde a -272,15 ºC (celsius). Na escala Kelvin, por exemplo, 273,15 Kelvin equivale a 0º graus Celsius. [↑](#footnote-ref-2)