

Pós-Graduação em **Astronomia**
MESTRADO PROFISSIONAL
UEFS



COMPREENDENDO A EVOLUÇÃO ESTELAR A PARTIR DE CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA



CLEDSTON MARIO DE SANTANA LIMA

COMPREENDENDO A EVOLUÇÃO ESTELAR A PARTIR DE CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA

CLEDSTON MARIO DE SANTANA LIMA



Pós-Graduação em **Astronomia**
MESTRADO PROFISSIONAL
UEFS



Este livro é um produto educacional oriundo de dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Astronomia da Universidade Estadual de Feira de Santana, cujo título é **Inserção de Tópicos de Física Moderna no Ensino Médio Usando a Astronomia como Mediadora do Processo de Ensino-Aprendizagem**, sob orientação do Prof. Dr. Carlos Alberto de Lima Ribeiro.

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteadó - UEFS

L697 Lima, Cledston Mario de Santana
Compreendendo a evolução estelar a partir de conceitos de física moderna / Cledston Mario de Santana Lima. – 2018.
95 p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto de Lima Ribeiro.
Produto educacional de dissertação apresentado ao curso de Mestrado Profissional em Astronomia da Universidade Estadual de Feira de Santana.

1. Física moderna. 2. Evolução estelar. 3. Astronomia. I. Ribeiro, Carlos Alberto de Lima, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana.
III. Título.

CDU: 53:524

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 1: OS PRIMEIROS PASSOS DO SER HUMANO.....	4
1.1 – A CONTRIBUIÇÃO DOS GREGOS.....	6
1.2 – O SOL E AS ESTRELAS SÃO A MESMA COISA.....	8
CAPÍTULO 2: ENTÃO, COMO O SOL PRODUZ ENERGIA?.....	12
CAPÍTULO 3: ÁTOMOS, RADIOATIVIDADE E FÍSICA NUCLEAR: O CAMINHO PARA O ENTENDIMENTO DO MECANISMO ENERGÉTICO NAS ESTRELAS....	16
3.1 – DO ÁTOMO GREGO À PROPOSTA DE BOHR.....	17
3.2 – E A FÍSICA NUCLEAR, COMO FICA?.....	25
3.3 – ESTAMOS EXPOSTOS O TEMPO TODO ÀS RADIAÇÕES.....	36
3.4 – FISSÃO NUCLEAR: A QUEBRA DO NÚCLEO LIBERA ENERGIA.....	37
3.5 – A FUSÃO NUCLEAR: MUITO MAIS ENERGIA.....	40
CAPÍTULO 4: SERÁ QUE JÁ TEMOS ALGO A DIZER SOBRE A FONTE DE ENERGIA NAS ESTRELAS?.....	42
CAPÍTULO 5: UM POUCO SOBRE EVOLUÇÃO ESTELAR: UMA ESTRELA NASCE, CRESCE E MORRE.....	49
5.1 – O ELEMENTO MAIS ABUNDANTE DO UNIVERSO.....	50

5.2 – NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL.....	52
5.3 – NULCEOSSÍNTESE ESTELAR.....	53
5.4 – A ESTRELA ENTROU EM DESEQUILÍBRIO: E AGORA?.....	56
CAPÍTULO 6: UM POUCO SOBRE EVOLUÇÃO ESTELAR: UMA ESTRELA NASCE, CRESCE E MORRE.....	62
6.1 – A LUZ.....	62
6.2 – E A ASTRONOMIA?.....	65
6.3 – RADIAÇÃO TÉRMICA.....	68
6.4 – A SOLUÇÃO DADA POR PLANCK.....	70
6.5 – CLASSIFICAÇÃO ESTELAR.....	72
6.6 – INSTRUMENTOS DE OBSERVAÇÃO.....	77
6.7 – COMO O EFEITO FOTOELÉTRICO INFLUENCIOU AS OBSERVAÇÕES ASTRONÔMICAS?.....	81
CAPÍTULO 7: COMO FICAMOS?.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

Para Jane, Luiz e Isabela.

INTRODUÇÃO

Há décadas que a Física Moderna se estabeleceu como área científica, promovendo uma mudança profunda no pensamento humano ao proporcionar avanços importantes em diversas áreas, desde a própria física, passando pela química e biologia, engenharias e até mesmo filosofia. Parte significativa da tecnologia atual só foi possível mediante aplicações diretas ou indiretas da Mecânica Quântica, por exemplo. Nesse sentido, levando em consideração esse aspecto, é de fundamental importância entender o mundo que nos cerca.

Sem nenhuma restrição à sua capacidade interna de revolução, uma das áreas que recebe suas contribuições é a Astronomia, que vem obtendo descobertas importantes na medida em que alia as mais poderosas técnicas de observação às mais poderosas teorias sobre o comportamento de partículas subatômicas, por exemplo. Seguindo esse raciocínio, as perguntas feitas na Astronomia foram acompanhando, de certa forma, a evolução dessas ideias, como foi o caso da composição das estrelas e a forma como as mesmas produzem energia. Precisou-se do estabelecimento da Física Atômica e Nuclear para se chegar a uma resposta satisfatória. Pensando filosoficamente, o mundo do muito pequeno ajudou a entender o mundo do muito grande.

Grande parte dessas descobertas foram possíveis mediante o desenvolvimento da Espectroscopia que, através da análise da luz emitida por uma estrela, pode-se deduzir quais elementos químicos a compõem, bem como que material se interpõe entre o objeto em questão e a Terra. Também é possível determinar a temperatura superficial de uma estrela com base na sua cor, partindo de modelos baseados nos estudos da Radiação de Corpo Negro, por exemplo, considerado o problema que deu início à Física Moderna.

O que dizer, então, sobre as técnicas de observação astronômica? Do olho humano usado de modo bastante eficiente há séculos atrás em um céu favorecido pela baixa luminosidade da superfície, passando pela revolução da fotografia, que substituiu o processo de desenho das imagens à mão (Galileu que o diga), levando à culminância hoje com o uso dos CCD, que permitem a obtenção de imagens de objetos distantes.

Considerações como as feitas acima demonstram a estreita relação entre a Astronomia e a Física Moderna, bem como a importância desses temas na Educação Básica, particularmente no Ensino Médio. Aos estudantes que saem dessa fase do ensino deve ser permitido acesso a um conhecimento estabelecido há décadas e que, em certa medida, vem provocando mudanças de comportamento na sociedade. Extensas pesquisas têm sido feitas no sentido de se introduzir tópicos de Física Moderna no Ensino Médio, convergindo para uma necessidade premente de mudança na prática profissional.

O presente livro é resultado direto dessa mudança. Durante a vida acadêmica e profissional do autor, foram aplicadas diversas propostas de discussão desses temas na sala de aula e diante do Mestrado Profissional em Astronomia da Universidade Estadual de Feira de Santana, houve a convergência dessas ideias na aplicação de um projeto exclusivo com esse objetivo. A dissertação apresentada ao programa tem o título *“Inserção de Tópicos de Física Moderna no Ensino Médio Usando a Astronomia como Meio Facilitador do Processo de Ensino-Aprendizagem”*, onde há a descrição das pesquisas e atividades realizadas.

A partir das notas de aulas, foi elaborado este livro, reunindo informações sobre a Evolução Estelar, com ênfase na colaboração das primeiras ideias sobre a Física Moderna, como descrito acima. Dúvidas e questionamentos feitos pelos estudantes durante as aulas foram incorporadas ao texto. O material não pretende ser formal ou esgotar os temas, pois se trata de um paradidático com conteúdo de nível diferente da etapa educacional em questão.

Um desses questionamentos foi sobre o papel das mulheres nas descobertas que estavam sendo apresentadas. Na Física Nuclear, em particular, foi discutida a presença de Lise Meitner e Madame Curie, rendendo boas discussões em sala de aula. O fato de que um grupo de mulheres foi importante no estudo do espectro das estrelas foi abordado, levando em conta a situação de que seus nomes permaneceram durante muito tempo ocultos dos materiais sobre o tema.

Ligado ao fato acima relatado, diante do erro conceitual sobre o Sol não ser uma estrela, os estudantes questionaram quando o mesmo passou a ser visto como tal, com todas as suas características. À época das discussões, o assunto não foi abordado de maneira adequada, mas, ao ser incorporado à versão final do material, procurou-se dar ênfase ao fato de que o estudo dos espectros das estrelas e

comparação com os obtidos do Sol, ter levado à conclusão que todos sabem hoje: O Sol é uma estrela.

O livro é destinado a pessoas que gostam dos temas tratados, especialmente a estudantes e professores. O conteúdo é tratado de maneira histórica e conceitual, adaptando a linguagem formal de outras obras de nível superior para se adequar ao entendimento dos que possam se interessar. Tudo isso procurando trazer informações científicas com precisão suficiente para garantir uma boa compreensão do tema.

1- OS PRIMEIROS PASSOS DO SER HUMANO

Quem nunca se perguntou, em algum momento da vida, o que são as estrelas, esses pontos brilhantes no céu noturno que dizem estar distantes de nós? O termo “dizem” deve ser grifado, pois quem tem acesso a essas informações são os cientistas, astrônomos competentes que dizem certas coisas que a maioria das pessoas não entende ou simplesmente não se interessa. Embora seja verdade o fato de que a maioria não se importa, é verdade também que o conhecimento desses fatos é extremamente importante para a compreensão da vida na Terra e por que não do seu futuro? Assuntos como fontes de energia alternativa, bem como a formação dos elementos químicos são extremamente atuais e é importante se conhecer os detalhes de como tudo isso é possível nesse universo vasto e ainda desconhecido. Pelo que os especialistas sabem hoje sobre as estrelas, a forma como produzem energia e como evoluem, pode vir a permitir o avanço de técnicas importantes para a obtenção de energia na Terra, já que grande parte das fontes atuais ou são esgotáveis ou produzem lixo perigoso.

Quando crescemos, também nos dizem que o Sol, o nosso Sol, é uma estrela assim como todas as outras. Mas daí surge uma outra pergunta: Por que o Sol transforma a noite em dia e o mesmo não acontece com as outras estrelas? Por que o Sol se apresenta tão grande para nós quando comparado com outras estrelas? Crescemos mais e nos perguntamos: Como o Sol e as outras estrelas produzem energia? Hoje, qualquer um pode acessar a grande rede e encontrar a resposta com apenas um clique. Mas, de certa forma, isso não tem muita graça, se o que se quer é o aprendizado de fato.

Em uma breve olhada na história de diversas civilizações mundiais, encontra-se a fase prolífica dos mitos, sejam eles de criação ou não. Muitos deles encontram ecos uns nos outros, talvez demonstrando uma certa linearidade na forma como o cérebro humano foi se desenvolvendo. E lendas envolvendo o Sol são muitas. É fácil imaginar as civilizações antigas admirando um fogo no céu, iluminando todo o ambiente, produzindo calor e reinando acima de suas cabeças como um rei. As lendas devem ter se propagado de forma absurdamente rápida. O objetivo aqui não é mostrar ou discutir esses mitos, mas alguma coisa deve ser falada sobre isso.

Na cultura egípcia, por exemplo, havia Rá, o deus-Sol, líder dos deuses daquele povo. Posteriormente, foi mesclado com outro deus, Amon, tornando-se a

nova figura mitológica Amon-Rá. Já os astecas, cultuavam o Sol sob a imagem do deus Tonatiuh, que tinha que travar uma luta eterna com a escuridão para poder renascer todos os dias. Para a mitologia nórdica, a deusa Sol era perseguida por um lobo (isso explicava o movimento diurno do astro) e quando havia um eclipse, era porque o lobo estava muito perto de seu intento. Lembrando um pouco dos índios brasileiros, há um mito em particular no qual o Sol é um moço que, ao se recusar a executar a tarefa de carregar lenha, é obrigado a beber uma tinta quente e vermelha. De tanto beber, vai ficando vermelho e cada vez mais quente, até que sobe pelos céus e passa a iluminar e aquecer todo o mundo. Mitos como esses se espalham pelo mundo, alguns ligados a sentimentos humanos, outros para explicar os fenômenos observados no dia a dia.

Figura 1- À esquerda, pedra encontrada representando aspectos da cultura asteca com Tonatiuh ao centro (*National Museum of Anthropology, Mexico City*); à direita, uma representação do deus Rá (<https://www.todamateria.com.br/ra-deus-do-sol/>).



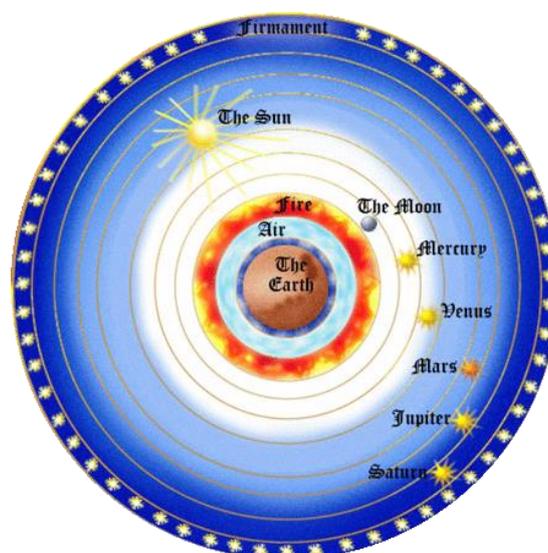
A própria palavra *Helio* deriva do grego *Helios*, que representava uma divindade. Sua imagem era associada a uma figura cuja cabeça era adornada por raios de luz, em um carro flamejante puxado por cavalos em alta velocidade. Assim, Helios vigiava o mundo trazendo luz à vida do povo grego.

1.1- A CONTRIBUIÇÃO DOS GREGOS

Com o passar dos tempos, as investigações filosóficas foram tomando o lugar das conjecturas mitológicas e outras preocupações foram se sobrepondo. A astronomia começou a detalhar as posições dos astros no céu na medida em que as observações foram se tornando cada vez mais acuradas. O que não fez com que a filosofia, baseada em observações, mas extremamente especulativa, pudesse dar sua contribuição para o problema.

De modo geral, o Sol ainda era o astro reinante no céu e ocupava lugar de destaque no mesmo, ou seja, pensando numa estrutura de universo observável, embora a Terra fosse colocada no centro de tudo. Isso é o que se convencionou chamar de *geocentrismo*, e, embora já há muito tempo derrubado, o fato é que tudo acontece como se fosse assim mesmo! Nesse sentido, o Sol era uma espécie de bola de fogo, enquanto éramos envolvidos por esferas contendo a Lua e os demais planetas, uma para cada um desses astros. O que é curioso, é que em alguns esquemas, havia um outro tipo de fogo, esse divino, com posições variando de filósofo para filósofo. A última esfera, a chamada *esfera das estrelas fixas*, era pensada como um envoltório contendo buracos nos quais podíamos ver a luzes produzidas por um fogo intenso na parte de trás. Essas eram as estrelas e parecia uma explicação razoável, pelo menos para uma criança de hoje.

Figura 2- O universo do geocentrismo.



Fonte: <http://www.astro.iag.usp.br/~ronaldo/intrcosm/Historia/hist10.html>

Levando em consideração o fato de que observar o céu e interpretar os fenômenos para entender os próximos requer certo grau de inteligência, podemos considerar que a Astronomia nasceu há muito tempo. Mas, entendendo a filosofia como sendo uma estrutura de pensamento coeso, uma primeira tentativa de se desvencilhar dos mitos, admite-se sua importância para a Astronomia como ciência de fato. Os filósofos não se preocupavam em observar somente, mas em traçar esquemas cada vez mais sofisticados para a compreensão do *Cosmos*.

Assim, o tempo dos astrônomos era dedicado basicamente à Mecânica Celeste (embora o termo não existisse na época), hoje uma área da Astronomia que estuda o movimento dos objetos celestes. Modelos como o *geocêntrico* e o *heliocêntrico* surgiram nessa esteira, bem como suas teorias-base.

O mundo viu perplexo o universo geocêntrico de Ptolomeu e outros ruir diante de Copérnico e Galileu e o surgimento da Mecânica de Newton alavancar de um modo nunca antes visto na história humana a Astronomia, desvendando segredos antes ocultos pela falta de ferramentas adequadas de investigação, como telescópios, a matemática e um método poderoso de investigação. O método científico tentava retirar qualquer vestígio de opiniões e influência divina das questões científicas. Essas mudanças somente são, de certa forma, comparadas, às mudanças causadas pela introdução da Física Moderna, objetivo pretendido com o presente material.

Embora perguntas antigas fossem sendo respondidas e novas sendo elaboradas e investigadas, alguns problemas ainda persistiam. Do que são formadas as estrelas e como o Sol produz calor? Preocupações como essas não estavam nas prioridades de investigação dos astrônomos, que se interessavam mais pelo movimento planetário, como dito antes.

Um dos motivos para esse desinteresse talvez tenha sido o fato de as estrelas serem aparentemente fixas, não se podia notar nenhuma mudança em suas posições no tempo de vida dos mortais. O próprio Sol, até Galileu observar suas manchas, parecia e parece imutável sem a instrumentação correta. Outra coisa associada a isso pode estar relacionada ao brilho fraco das estrelas observáveis, mesmo aquelas vistas em noites de céu limpo, o que não era difícil naqueles tempos sem iluminação na superfície da Terra e poluição. Os telescópios e lunetas eram apontados para as mesmas e pareciam não modificar sua aparência, mesmo com o aumento provocado pelo aparelho. Diga-se de passagem, que mesmo hoje em dia e com o mais sofisticado instrumento, se um desavisado fã de Astronomia olhar para uma estrela e

esperar ver uma esfera flamejante, pode se decepcionar. A conclusão talvez fosse que eram muito distantes para serem investigadas.

1.2- O SOL E AS ESTRELAS SÃO A MESMA COISA

Toda pessoa que se propõe a traçar um panorama sobre uma determinada situação executa uma tarefa ingrata. E como todo trabalho científico sério deve-se partir de uma pergunta. Como o trabalho aqui exposto não pretende ser original, várias fontes foram consultadas e serão devidamente citadas na sua parte final. A pergunta a ser respondida aqui é a seguinte: Quando o Sol passou a ser visto como uma estrela, assim como as outras? O caráter dessa pergunta é estritamente histórico, pois foi mostrado anteriormente que as ideias mais aceitas em diversas épocas davam conta de que o Sol e as estrelas eram objetos de natureza diferentes. Porém, em meio a ideias que se parecem umas com as outras, sempre se infiltram outras diferentes que são colocadas de lado pelo grupo vencedor.

Ao que tudo indica, foi Anaxágoras por volta de 450 a. C. o primeiro a propor que Sol e estrelas são a mesma coisa. Para ele, o Sol e as estrelas eram bolas de fogo no céu e o fato de as estrelas parecerem bem menor poderia ser explicado por suas distâncias. Foi seguido por Aristarco de Samos pouco mais de dois séculos depois. Este propôs um método para medir o tamanho do Sol, bem como sua distância até nosso planeta e concluiu que era muito maior que a Terra, elaborando o modelo heliocêntrico no qual o Sol estava no centro de tudo. Essas ideias iam de encontro às ideias vigentes em suas respectivas épocas, carecendo de provas, o que fez com que fossem esquecidas.



Aristarco de Samos

Chamado de o “Copérnico antigo”, viveu na primeira metade do século III a.C., seu pensamento é uma das raras tentativas de romper com a doutrina do geocentrismo na Antiguidade. Para ele, o Sol estava no centro do sistema, tendo a Terra e demais astros girando ao seu redor. Também concebeu um cosmos infinito, na medida em que a esfera das estrelas fixas se encontrava a uma enorme distância do centro, o Sol. Suas ideias foram eclipsadas por vários estudiosos, como Hiparco de Nicéia.

É do conhecimento de todos que depois que Aristóteles e Ptolomeu propuseram os seus sistemas de mundo, cada um em uma época e com poucas variações, foram esses que permaneceram os sistemas adotados para a compreensão do cosmos durante quase dois séculos.

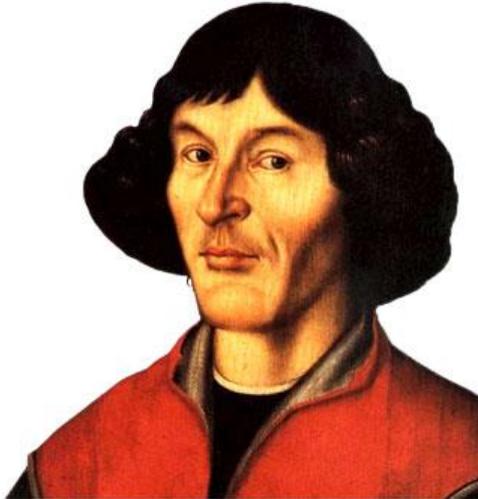


Claudio Ptolomeu

Viveu no século II d.C.. Vários escritos chegaram até nós, sendo o mais importante o *Almagesto*, uma síntese matemática do modelo geocêntrico, onde sistematizou o pensamento de Aristóteles sobre a estrutura do universo. Em síntese, suas conclusões foram: o movimento no céu é circular, com o centro coincidindo com a Terra; esta, por sua vez, é redonda; a imobilidade da Terra no centro, com o céu girando. Seu pensamento durou até o século XV.

As ideias subversivas antigas começaram a ser resgatadas aos poucos e uma figura emblemática foi a responsável por trazê-las de volta: Giordano Bruno. Sob a égide do modelo heliocêntrico resgatado por Copérnico, sua proposta foi imaginar a Terra como um planeta assim como os outros, não fazendo sentido dividir o universo como no geocentrismo. Concluiu que o Sol é uma estrela, que o universo é infinito e que existem muitos mundos. Em um certo sentido, quando olhamos para o céu noturno repleto de estrelas, podemos estar contemplando outros mundos com seus

respectivos astros. Esse é um pensamento bastante moderno, mas não agradou ao pensamento vigente. Giordano Bruno foi condenado e em 1600 foi morto na fogueira por suas ideias (tinha apenas 52 anos de idade).

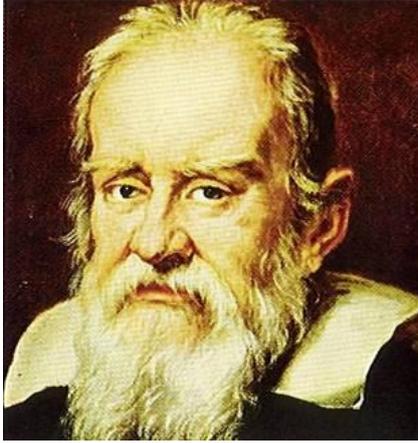


Nicolau Copérnico

Nasceu em 1473, na Polônia. Sua obra mais célebre é o *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (*A Revolução dos Orbes Celestes*), onde, retomando as ideias de Aristarco de Samos, propõe um modelo para um sistema heliocêntrico, com uma estrutura rigorosa e diversas proposições que destoavam do pensamento vigente. Em suma, suas ideias foram: o universo é esférico; a Terra é esférica; o movimento nos céus é circular, uniforme e perpétuo; a Terra gira em torno de um centro e em torno de si mesma; as dimensões no universo são enormes se comparadas com a Terra. O livro contendo suas proposições só foi publicado no ano de sua morte, 1543. Uma batalha pela sua

aceitação se iniciou, mas sem a ajuda de seu autor demorou algum tempo até que fosse considerada uma obra essencial na Astronomia e no pensamento como um todo.

Em 1609 Galileu Galilei apontou o telescópio para o céu e começou a desmoronar o edifício aristotélico-ptolomaico ao observar diversos fenômenos, como crateras e montanhas na Lua, a descoberta de que a mesma não possui luz própria, refletindo os raios solares, bem como os satélites de Júpiter. Além disso, o número de estrelas observáveis aumentou consideravelmente, observando pequenos pontos distribuídos no céu, o que o fez concluir que talvez estivessem muito distantes. Com a ideia de que os movimentos locais eram os mesmos que os fora da Terra, Galileu entendeu que o Sol também era uma estrela e que se apresenta grande porque está bem perto do nosso planeta. Observa-se, no entanto, que não havia provas de fato para essa conclusão, embora ele tenha chegado mais perto da mesma. Justifica-se, portanto, a não aceitação de imediato dessas ideias, mesmo entre os estudiosos da época.



Galileu Galilei

Nasceu em 1564, em Pisa, Itália. Considerado o cientista que ruiu o edifício aristotélico, suas obras são marcos na revolução científica, seja pela precisão com que defendia suas ideias, seja pela clareza e estilo diferenciado para a época, tendo escrito suas obras em italiano e não em latim, como era comum. Defendeu arduamente a teoria copernicana. Condenado duas vezes pelo Santo Ofício, Galileu morreu em 1642 em prisão domiciliar. Usou o telescópio para observar o céu e nisso encontrou provas de que o pensamento de Aristóteles estava equivocado e que o universo era copernicano. Além disso, estabeleceu as bases para a ciência do movimento que, anos depois,

viria a ter em Isaac Newton seu principal desenvolvedor.

Levando em consideração este aspecto, quando de fato os cientistas começaram a considerar a possibilidade de o Sol ser uma estrela? Que o Sol não é um planeta parecia um consenso, principalmente em relação às leis de Kepler e principalmente, pela grande teoria de Isaac Newton para a gravidade, que conseguiam explicar fenômenos com o astro fixo firmemente no centro do sistema. Mas, ao que tudo indica foi quando Christiam Huygens (1629-1695) determinou a distância até a estrela Sirius e concluindo que talvez ela fosse tão brilhante quanto o Sol. A sua distância até nós é que a tornava aparentemente fraca.



Isaac Newton

Nasceu em 1642, na Inglaterra e desde muito cedo se interessou pelas ciências naturais e matemática. De temperamento difícil, mas dono de um intelecto privilegiado, debruçou-se sobre vários problemas, como a Teoria das Cores (na qual defendeu a natureza corpuscular da luz, em contraste com a teoria ondulatória). Sua maior obra, no entanto, versa sobre as leis do movimento e a teoria da gravidade. Resgata ideias de Galileu sobre o movimento, numa sistematização em que demonstra matematicamente suas consequências. Propõe

a Teoria da Gravitação Universal, ordenando o universo do ponto de vista heliocêntrico, talvez acabando de uma vez por todas com a disputa entre uma Terra estática e no centro e uma Terra caminhante no sistema. É considerado o pai da Mecânica Celeste, tendo sua teoria se mostrado capaz de, nas décadas seguintes, resistir a um sem número de testes e promover um grande avanço na Astronomia e em outras áreas.

Os próximos passos seguiram o caminho do desenvolvimento científico, com a síntese e proposta de Isaac Newton para a Teoria da Gravidade, o aprimoramento de métodos para determinação das distâncias dos astros e mais precisamente quando uma área fundada pelo mesmo Newton começou a florescer: a Espectroscopia. Em resumo, descobriram que a luz emitida pelo nosso Sol tem a mesma natureza da luz emitida por outras estrelas. Pronto! O Sol também é uma estrela. Esse assunto será abordado mais adiante.

2- ENTÃO, COMO O SOL PRODUZ ENERGIA?

Esta questão agora parece pertinente, levando em conta a escolha feita aqui em não se ater muito à cronologia dos fatos, embora seja importante manter alguma coerência. No dia a dia, os seres humanos lidam com a geração de energia de diversas formas: usa-se energia elétrica para tarefas diárias, coloca-se gasolina nos veículos para o deslocamento semanal, fogão a gás para o cozimento dos alimentos e, em última instância, os alimentos são usados para a manutenção da vida de um modo geral. E em todas essas tarefas, é preciso repor a energia para manter tudo funcionando: as hidrelétricas usam a energia potencial gravitacional de quedas d'água para mover turbinas, compra-se gasolina em postos, troca-se o botijão de gás quando o mesmo acaba e depois de eliminar a energia ingerida nos alimentos, é preciso de mais para a continuidade das tarefas.

Pensava-se, de modo geral, que o Sol possuía um depósito infinito de combustível capaz de sustentar para sempre sua emissão de energia. Com o desenvolvimento da Termodinâmica (área da Física que estuda o calor e suas transformações) e especificamente a Lei de Conservação da Energia, o problema da geração de energia no Sol precisava de uma resposta rápida e satisfatória. **Qual mecanismo repõe a energia irradiada pelo Sol?**

A questão do combustível queimado pelo Sol começou a ser seriamente considerada quando o estudo do calor passou a ser alvo de investigações científicas, lá pelo idos da Revolução Industrial inglesa, nos séculos XVIII e XIX. O advento de novos métodos na manufatura de produtos deu-se muito por conta da aquisição de máquinas que podiam aumentar a produção, tornando-a mais eficiente. Eficientes também deveriam ser essas novas máquinas, movidas a vapor, impulsionando

pesquisas para o entendimento do funcionamento das mesmas no intuito do seu aprimoramento efetivo. Os estudos da Termodinâmica contribuíram para isso, onde nomes como Thomas Newcomen e James Prescott Joule tornaram-se conhecidos. O combustível mais conhecido na época e o mais eficiente era o carvão, extraído das minas espalhadas pela Europa para colocar trens e máquinas diversas em trabalho intenso. Nesse sentido, era natural pensar que um astro como o Sol, iluminando e aquecendo a Terra, usasse o mesmo combustível para isso.

A pergunta que ficava era: Poderia o carvão ser o combustível que mantinha o Sol brilhando? Se assim fosse, quanto tempo levaria para queimar todo o seu conteúdo?

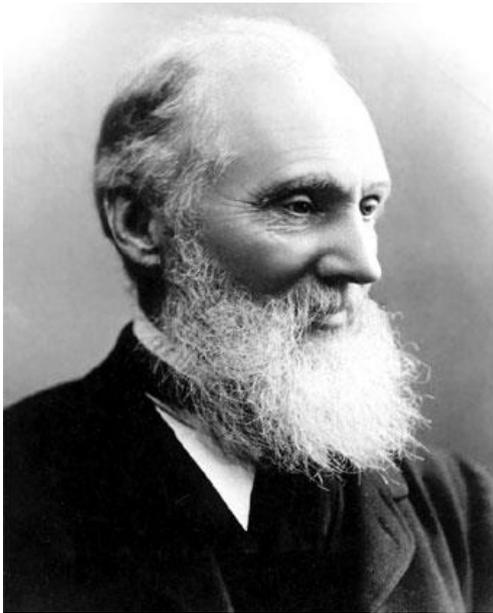
A pergunta era simples e o seu cálculo também. Só precisava do calor de combustão do carvão. Além disso, deveria levar em consideração que o Sol fosse composto exclusivamente do combustível em questão e, através de uma regra de três simples, obter o tempo necessário para o astro consumir tudo. Cálculos foram feitos levando em consideração o carvão, querosene e até mesmo hidrogênio e os valores obtidos variavam entre 1000 e 10000 anos. Embora estudos feitos a partir da Bíblia mostrassem que a Terra não poderia ter mais de 10000 anos, esse era o tempo admitido para a história escrita, o que causava problemas.

Abre-se o precedente para outro tipo de discussão: o tempo que o Sol leva para queimar seu combustível deve ser pelo menos igual à idade da Terra. A busca pelo combustível correto para a geração de energia passava por saber com precisão a idade do nosso planeta. Cientistas, como o Lord Kelvin, por exemplo, se ativeram em ambos os problemas.

Ao que tudo indica, esses cálculos baseados em textos sagrados tiveram certa primazia até o Iluminismo, época em que começaram as primeiras tentativas científicas para alcançar a resposta ao problema. Alguns modelos eram baseados na Lei de Resfriamento dos Corpos de Isaac Newton, no qual estudava-se o tempo que uma esfera de certo material levava para se resfriar a partir de uma dada temperatura. Adepto desse esquema, em 1779, o Conde de Buffon extrapolou esse estudo para uma esfera do tamanho da Terra e obteve o resultado aproximado de 75 mil anos.

Quando as investigações começaram a se aterem em registros fósseis, nos séculos XVIII e XIX, as ideias antigas sobre a idade do planeta foram gradativamente sendo esquecidas. Cientistas renomados como Lamarck defendiam que os registros da flora e fauna revelavam que o tempo necessário para a ocorrência do que era

encontrado deveria ser bem mais longo do que o admitido. O que fica evidente é que a cada nova descoberta, as estimativas sobre a idade da Terra aumentavam, desagradando alguns cientistas proeminentes, entre eles William Thomson, conhecido como Lord Kelvin. Para uma abordagem mais completa sobre o tema, recomenda-se o artigo “*Reverendo o debate sobre a idade da Terra*”, escrito por A.C. Tort e F. Nogarol.



William Thomson

Nasceu em 1824, na Irlanda do Norte, falecendo em 1907. Recebeu o título de Lord Kelvin aos 68 anos de idade por completar a implantação de um cabo de telégrafo entre a Europa e a América do Norte. Deu importantes contribuições para o estudo do calor, como no estabelecimento da Segunda Lei da Termodinâmica, na qual não se pode converter toda a energia de um sistema em trabalho. Investigou as propriedades dos gases, concluindo que a energia cinética das moléculas se anularia à aproximadamente - 273 °C, admitindo, assim, a menor temperatura permitida. Passou a ser conhecida como o zero absoluto. A partir disso, propôs uma nova escala de temperatura relacionada somente a propriedades físicas, denominada de Escala Kelvin.

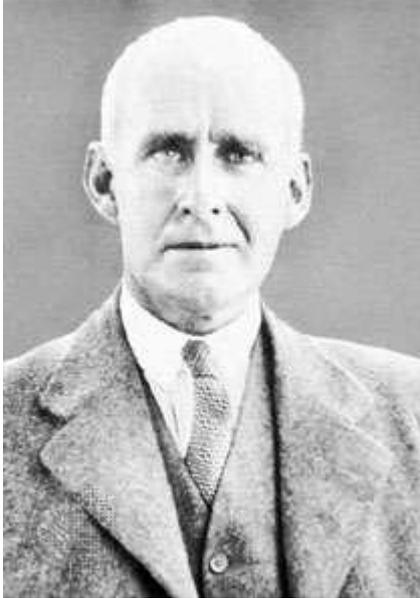
Kelvin voltou sua atenção para o cálculo da idade do Sol, propondo um modelo baseado na ideia de Ludwig von Helmholtz de que o calor do Sol se origina de contração gravitacional, levando em consideração aspectos da Termodinâmica desenvolvida na época. Refinando o modelo, Kelvin chegou a um resultado entre 20 e 100 milhões de anos. Para a Terra, Kelvin usou parâmetros semelhantes e obteve resultados que variavam de 100 a 200 milhões de anos. Para um leigo, esses valores parecem muito distantes entre si, mas deve-se entender que os dados disponíveis até àquele momento eram escassos.

O relevante é que, para os evolucionistas e geólogos mais experientes, haviam evidências contundentes de que a Terra era bem mais velha do que se supunha. Um ex-aluno de Kelvin foi um dos primeiros a questionar a sua autoridade, admitindo que não havia erro nos seus cálculos, mas que o modelo utilizado por ele estava

equivocado. Tudo dependia, mais uma vez, de obter a idade da Terra, sendo que o valor deveria entrar em consonância com os dados obtidos, que iam se tornando cada vez mais precisos.

O problema perduraria até os primeiros anos do século XX, quando a radioatividade começou a abrir os horizontes para uma compreensão mais profunda da natureza. Modelos como o de Kelvin não levava em consideração um calor adicional vindo da emissão de radiação de materiais no interior do planeta. Nesse sentido, a Radioatividade foi demonstrando que a Terra tinha a idade na casa dos bilhões de anos, o que forçou os cientistas a abandonarem velhos modelos para a energia no Sol e nas demais estrelas (nessa época, a Espectroscopia já havia revelado que o Sol era de fato uma estrela, o mesmo passando a ser uma rica fonte de estudo para a compreensão desses astros). A Física Nuclear será tratada no próximo capítulo e a Espectroscopia em seguida, como resposta à pergunta: Como os astrônomos sabem tanta coisa sobre as estrelas?

O fato é que, por volta de 1920, o astrônomo inglês Arthur A. Eddington, ao estudar estrelas variáveis conhecidas como Cefeidas, deduziu que a contração gravitacional, por si só, não poderia ser a responsável pela fonte de energia das estrelas. Qual foi, então, sua hipótese? Provavelmente, alguma fonte de energia no interior do átomo. Porém, suas ideias eram por demais especulativas para uma boa recepção por parte da comunidade científica. Vejamos rapidamente a seguir que base teórica respaldou o entendimento desse problema.



Arthur S. Eddington

Nascido em 1882 na Inglaterra, deu importantes contribuições para a Astrofísica. Ficou famoso por organizar expedições em 1919 para comprovar previsões da Teoria Geral da Relatividade de Albert Einstein durante um eclipse total do Sol. Estudou o interior das estrelas, estabelecendo uma relação entre a massa e a luminosidade das mesmas, sendo um dos primeiros a sugerir a possível fonte de energia das mesmas. Morreu em novembro de 1944.

3- ÁTOMOS, RADIOATIVIDADE E FÍSICA NUCLEAR: O CAMINHO PARA O ENTENDIMENTO DO MECANISMO ENERGÉTICO NAS ESTRELAS

O momento crucial do problema da geração de energia no Sol e nas demais estrelas havia chegado. Por volta de 1920, Arthur Eddington chegava perto da sua solução, mas a pretensão dessa narrativa de apresentar o conteúdo com o mínimo de coerência ficaria comprometida se os próximos fatos não fossem apresentados, mesmo que represente uma volta no tempo, especificamente ao final do século XIX.

Como já dito, as descobertas da radioatividade e do núcleo atômico foram essenciais. Esse caminho começou a ser traçado com a descoberta dos raios-X por Roentgen, quando trabalhava com raios catódicos em seu laboratório. Depois de estudos de Becquerel e outros, o casal Pierre e Marie Curie intensificaram o trabalho com essa radiação e mais tarde a chamou de radioatividade, verificando esse mesmo fenômeno em outros elementos.

No caso da Física Nuclear há um marco, que pode ser datado a partir do momento que Ernest Rutherford propôs a existência do núcleo através do experimento de bombardeamento de uma folha de ouro com partículas alfa, em 1911.

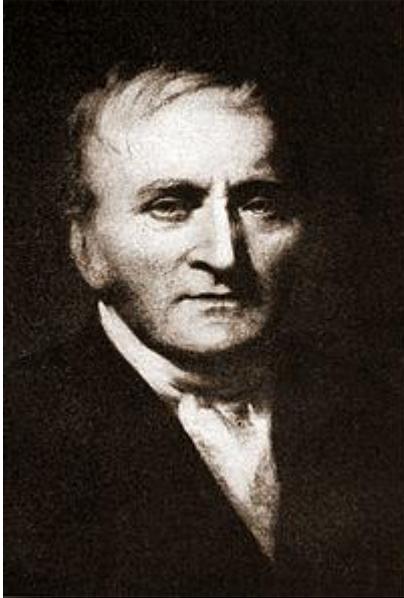
As primeiras décadas do século XX deram início a uma profusão de teorias que provocaram uma verdadeira revolução na ciência e no pensamento humano.

3.1- DO ÁTOMO GREGO À PROPOSTA DE BOHR

A ideia de um constituinte básico para a matéria nasceu na Grécia Antiga, com Demócrito e Leucipo (cerca de 400 a.C.), quando imaginaram que se um pedaço de qualquer material fosse quebrado em várias partes, chegaria à pequenas unidades chamadas átomos (átomo = indivisível). Mais uma vez uma ideia revolucionária eclipsada pela autoridade de estudiosos que davam corpo teórico ao que hoje se chama de senso comum.

Fazendo oposição a essa premissa, a constituição das coisas passava pelos quatro elementos, terra, fogo, água e ar e tudo poderia ser explicado mais ou menos como uma variante dos mesmos. Assim, com a assinatura de peso de filósofos como Aristóteles, a ideia dos quatro elementos básicos da matéria durou até o século XIX, principalmente pensando nos trabalhos dos alquimistas, considerados precursores das técnicas químicas modernas. Claro que no percurso, as ideias atomísticas foram sendo revisitadas por um ou outro pesquisador, mas sem ganhar força, continuava prevalecendo sua concorrente.

Mais ou menos em 1808, John Dalton resgatou o conceito de átomo ao explorar a natureza das reações químicas, conseguindo explicar a combinação da massa das reações e as proporções para a composição das substâncias conhecidas. Por exemplo, o dióxido de carbono sendo composto por uma parte de carbono e duas de oxigênio. Essa nova abordagem ganhou alguns defensores, como Ludwig Boltzmann e Amedeo Avogadro, este último propondo que as moléculas são constituídas por átomos.



John Dalton

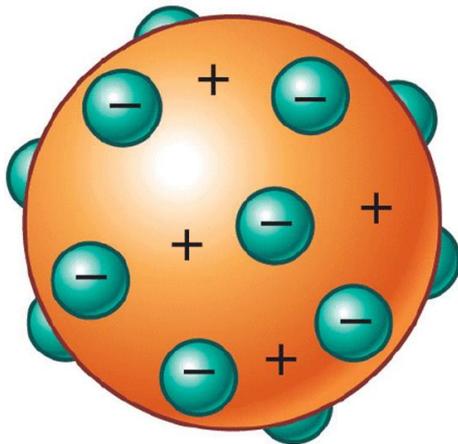
Nasceu na Inglaterra em 1766, tendo contribuído nas áreas de química, física e meteorologia. Com o auxílio do seu modelo atômico da matéria, descreveu leis para as reações químicas usadas nos dias atuais. Morreu em 1844.

O átomo de Dalton era puro no que diz respeito à sua constituição, rígidos e sem estrutura interna, embora fossem mais palpáveis do que o átomo grego. A estrutura atômica viria a ser revelada com duas grandes descobertas: a Radioatividade e os elétrons.

Em 1897, J.J. Thomson anunciou a descoberta do elétron, tendo medido a relação carga-massa dessas partículas. Estudava a constituição dos raios catódicos, descobrindo que os mesmos eram compostos por partículas negativas, pois se desviavam para o lado positivo de uma placa carregada. Havia evidências de que os elétrons faziam parte do átomo, o que contribuía para o abandono da ideia de átomo indivisível. Era preciso, nesse sentido, reformular a proposta atômica de Dalton e propor um novo modelo que desse conta desses fatos.

O próprio Thomson desenvolveu um modelo para o átomo, no qual o mesmo tinha uma arquitetura esférica, sendo uma massa positiva, incrustada pelos elétrons recém descobertos de carga negativa. Essa pasta positiva era necessária para garantir a estabilidade da matéria.

Figura 3.



MODELO ATÔMICO DE THOMSOM

Fonte: https://www.sobiologia.com.br/conteudos/Oitava_quimica/atomo3.php

Como os elétrons são negativos, devido à força repulsiva coulombiana, os mesmos estariam distribuídos de maneira uniforme e estimativas indicavam que o raio atômico era da ordem de dez bilionésimos do metro. Seu modelo, batizado de “pudim de passas”, permitia a emissão de espectros de radiação já bastante conhecidos desde o início do século XIX, porém, sem concordância total com os dados. A Espectroscopia será relatada mais adiante, mas desde já, o seu papel mostra-se relevante no estudo da estrutura atômica e na investigação da Evolução Estelar.

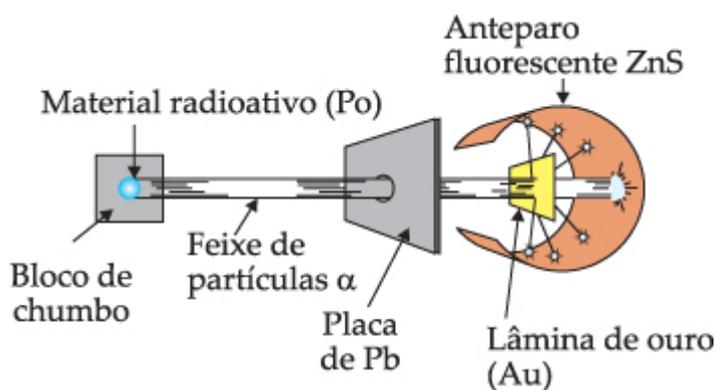


Ernest Rutherford

Neozelandês, nasceu em 1871, graduando-se em Matemática e Física. Executou diversos trabalhos com radiações, tendo descoberto os raios alfa e beta. Depois de coordenar o famoso experimento com o qual bombardeou uma folha de ouro com partículas alfa, propôs um novo modelo atômico, postulando a existência de um núcleo positivo, prevendo ainda a existência de partículas sem carga no seu interior, chamadas de nêutrons. Faleceu em 1937.

Diante disso, o modelo avançou muito no quesito investigação da natureza atômica até ser testado experimentalmente. Coube a Ernest Rutherford, em 1911, começar uma nova era. Trabalhava com elementos radioativos, tendo descoberto os raios alfa e beta em 1899, sendo agraciado com o Prêmio Nobel em 1908. Trabalhando com Hans Geiger e Ernest Marsden, foi realizado um experimento no qual partículas alfa (núcleos de hélio) eram emitidos de uma fonte radioativa e atingiam uma fina placa de ouro.

Figura 4- Esquema do experimento de Rutherford.

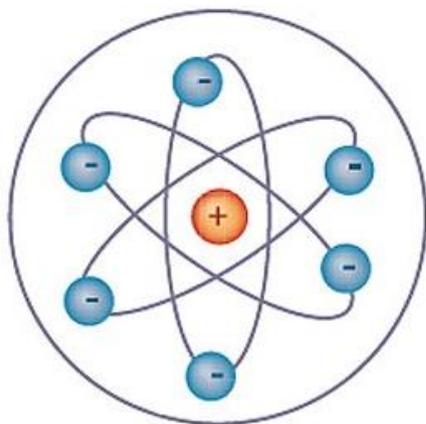


As partículas alfa foram colimadas por uma abertura numa placa de chumbo e atravessaram uma fina lâmina de ouro, atingindo um anteparo que cintilava a cada colisão.

Usando o modelo de Thomsom, previa-se que as partículas iriam ser defletidas de diversos ângulos pela repulsão coulombiana (a partícula alfa tem carga positiva), embora os desvios não seriam grandes, devido ao raio atômico de dez bilionésimos do metro. Essas partículas foram observadas ao colidirem em uma tela com o auxílio de um microscópio. As deflexões foram medidas e ângulos maiores do que noventa graus foram detectados em maior quantidade do que o esperado, incluindo ângulos da ordem de cento e oitenta graus. O próprio Rutherford se mostrou espantado com o resultado, o obrigando, em 1911, a propor um novo modelo para o átomo.

Baseando-se nos resultados, principalmente na questão de que algumas partículas sofriam deflexão de ângulos muito grandes, Rutherford desenvolveu um modelo atômico composto por uma região ínfima com carga positiva, chamada núcleo, rodeada por elétrons em movimento circular.

Figura 5.

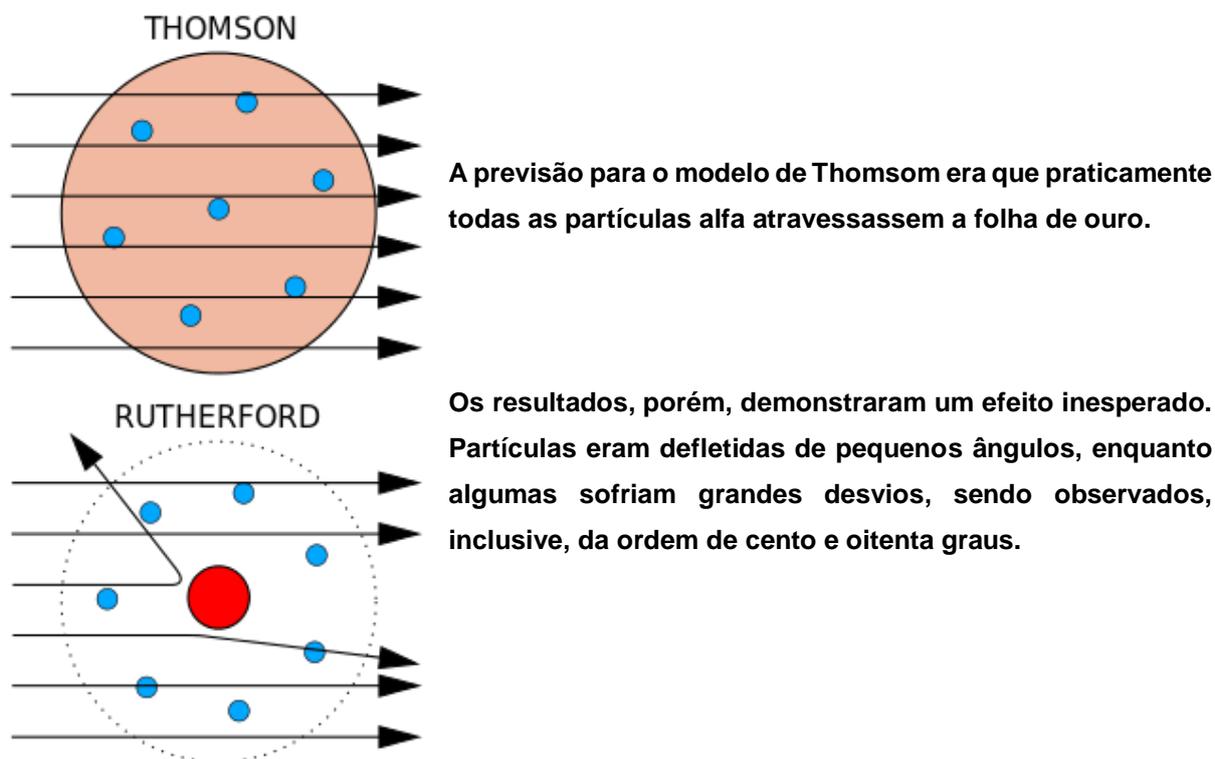


MODELO ATÔMICO NUCLEAR DE RUTHERFORD

Fonte: <http://espetacularquimica.blogspot.com/2013/02/modelo-atomico-de-rutherford.html>

Para justificar os dados, a massa do átomo deveria estar concentrada quase toda no núcleo, e, como os elétrons são extremamente leves, o mesmo tem muito espaço vazio. Isso explicava o fato de a maioria esmagadora das partículas alfa atravessarem a folha de ouro com pequenas deflexões. As poucas partículas que ricocheteavam em grandes ângulos encontravam a região pequena do núcleo, com uma concentração alta de cargas positivas (hoje conhecidas como prótons). Mas somente a presença das cargas positivas causava certo problema a existência do átomo. Os prótons deveriam se repelir mutuamente com o aumento do número atômico. Para contornar esse problema, Rutherford introduziu teoricamente outra partícula, sem carga, assim evitando o colapso do átomo. Essa partícula é o nêutron, que somente foi detectado em 1932 por James Chadwick.

Figura 6- Previsões dos dois modelos.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Geiger-Marsden

Vale ressaltar nesse ponto que duas propostas de modelos parecidos com o de Rutherford foram feitas nos primeiros anos do século XX, uma por Jean Perrin e outra pelo japonês H. Nagaoka. Os mesmos não foram adiante por falta de evidências.

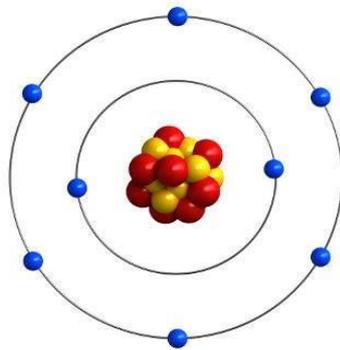
Falaremos a seguir das falhas do modelo de Rutherford, que evoca o modelo do sistema solar e depois das correções feitas por Niels Bohr. Como o objetivo não é falar especificamente sobre modelos atômicos e sim introduzir a Física Nuclear, detalhes dos mesmos serão omitidos, a menos que sejam necessários para o entendimento do tema.

Para Rutherford, diante de suas descobertas, os elétrons participavam das reações químicas, dos fenômenos ligados à eletricidade etc., enquanto os núcleos dos fenômenos radioativos. Nascia, nesse sentido, a Física Nuclear. Porém, o grande problema desse modelo estava justamente no fato de os elétrons girarem ao redor do núcleo, como um mini sistema planetário. A Teoria Eletromagnética admite que portadores de carga quando acelerados emitem radiação, portanto, perdendo

energia. Como os elétrons possuem carga negativa e estão em movimento circular, portanto, constantemente acelerados, a emissão de energia faria com que os elétrons caíssem no núcleo, comprometendo a estabilidade atômica. O que fazer?

Historicamente, a essa altura, a Teoria Quântica já dava seus primeiros passos, com a abordagem feita por Planck da Radiação de Corpo Negro e a proposta de Einstein para o Efeito Fotoelétrico. A natureza parecia ter uma estrutura diferente da que considerava a Física Clássica. Diante do problema da estabilidade atômica, Niels Bohr postulou que os elétrons giravam em torno do núcleo em órbitas específicas, sendo que, enquanto permanecessem nas mesmas, não emitiriam energia. Bohr quantizou o átomo, na medida em que os elétrons só podem estar em suas respectivas órbitas. São as chamadas camadas eletrônicas ou níveis de energia.

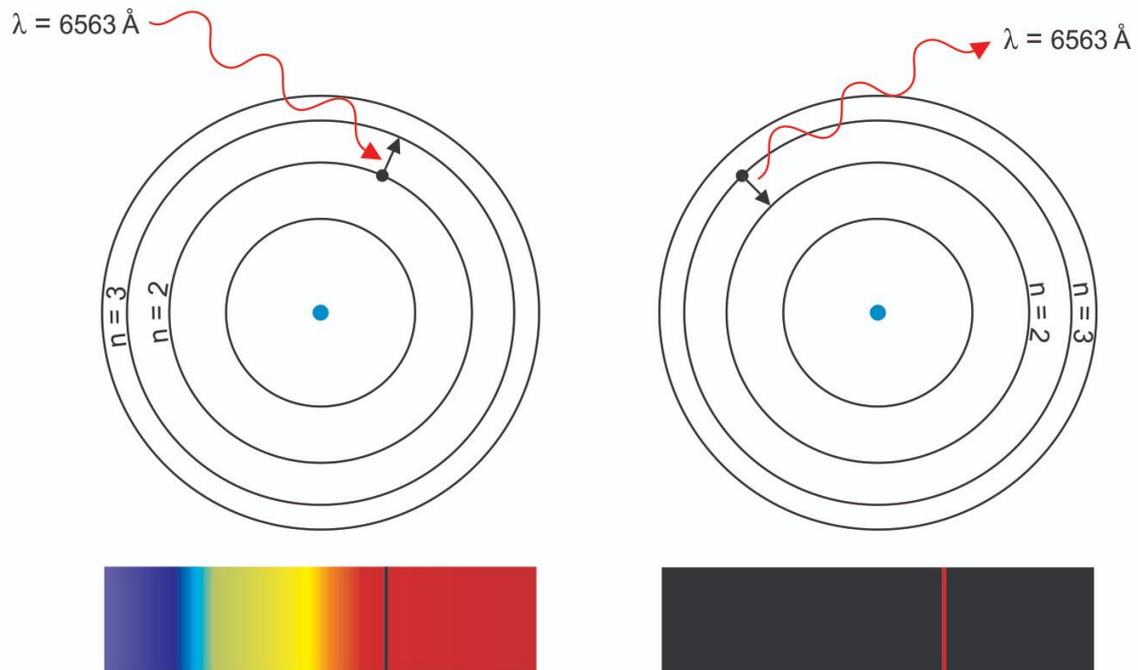
Figura 7- Átomo de Bohr.



Fonte: <https://www.caracteristicass.de/modelo-atomico-de-bohr/>

Quando o átomo recebe energia externa, o elétron a absorve, mudando para uma órbita mais externa como num salto. Como não pode permanecer nessa camada, volta para sua origem, devolvendo a energia que recebeu na forma de luz ou fóton. Da próxima vez que acender uma lâmpada fluorescente pense nesse processo.

Figura 8- Esquema do elétron saltando de órbita.



A figura acima ilustra esse processo, com o elétron recebendo energia externa, saltando para uma órbita acima e logo depois voltando para seu estado original, não sem antes liberar a energia que recebeu. Voltaremos a esse assunto quando tratarmos da Espectroscopia.



Niels Bohr

Nasceu em 1885 na Dinamarca, trabalhou com Thomson e Rutherford na Inglaterra. Estudou as propriedades do espectro do átomo de hidrogênio e, depois de reformular o modelo atômico introduzindo o conceito de orbitais, conseguiu prever alguns resultados experimentais conhecidos na época. Foi laureado com o Prêmio Nobel de Física de 1922. Durante a Segunda Guerra Mundial, percebendo a gravidade da situação em relação à produção da bomba atômica, tentou demover o então presidente dos Estados Unidos dessa ideia, embora não tenha obtido êxito. Morreu em 1962.

Bohr resolveu o problema da estabilidade atômica com um postulado simples, representando um avanço interessante no campo das investigações atômicas, embora seu modelo funcionasse bem para o átomo de hidrogênio, com um elétron apenas. Os espectros emitidos pelos átomos eram bem conhecidos e uma análise mais profunda revelou que havia uma estrutura fina nos mesmos, ou seja, onde parecia ter uma linha espectral somente, revelou-se outra, demonstrando que o modelo não conseguia lidar com a descoberta sem um ajuste.

E esse ajuste foi resolvido por William Wilson e Arnold Sommerfeld. Os dois físicos substituíram as órbitas circulares por elípticas. Sem discutir os pormenores, o que acontece é que, numa órbita circular, tem-se apenas uma variável, o raio. Já na elíptica, obtem-se dois parâmetros, a saber, o semieixo maior e o semieixo menor. Isso aparece na forma de subcamadas, que todo estudante da primeira série do ensino médio aprende.

3.2- E A FÍSICA NUCLEAR, COMO FICA?

A pretensão é falar um pouco sobre Física Nuclear, pelo menos os principais aspectos da mesma para podermos relacioná-la à produção de energia nas estrelas. Como foi dito, essa área da física tem um marco, no momento em que Rutherford

propôs a existência do núcleo atômico. Embora isso seja verdade, é verdade também que o caminho vinha se delineando desde o fim do século XIX, com a descoberta dos raios-X por Roentgen. Quando Becquerel observou que sais de urânio emitiam certo tipo de energia, primeiramente pensou se tratar dos mesmos raios-X. Em seguida, o casal Pierre e Marie Curie estudaram essa radiação e mais tarde a chamou de radioatividade, verificando esse mesmo fenômeno em outros elementos, descobrindo, inclusive, dois novos, o polônio (400 vezes mais radioativo que o urânio) e o rádio (900 vezes).



Willhelm Conrad Roentgen

Nasceu na Alemanha no ano de 1845, tendo descoberto, 50 anos depois, ondas eletromagnéticas que batizou de raios-X, fazendo referência a algo desconhecido em matemática. A descoberta foi feita enquanto trabalhava com raios catódicos, percebendo que os mesmos produziam luminescência fora do tubo. Depois de estudar arduamente suas propriedades, começou a produzir as chamadas radiografias de diversos objetos, sendo uma das mais famosas a imagem dos ossos da mão de sua esposa, Bertha Roentgen. Foi ganhador do primeiro Prêmio Nobel de Física, em 1901, por uma descoberta que revolucionou a medicina e deu início ao caminho que levou à Física Nuclear. Morreu em 1923.

A maioria dos elementos químicos são estáveis, ou seja, não emitem radiação espontaneamente. Mas alguns possuem essa propriedade por terem núcleos mais instáveis. Essa instabilidade faz com que o núcleo emita partículas e radiação, provocando decaimento, transmutação de elemento químico em outro. Ora, basicamente o átomo é composto por elétrons, na eletrosfera e na região central, o núcleo, contém prótons e nêutrons. O que define um elemento químico é seu número atômico, ou seja, a quantidade de prótons. No processo de decaimento, a quantidade de prótons de elementos muda, portanto, mudando o número atômico também. Esse era o sonho dos alquimistas.

Assim, a composição do núcleo está de acordo com a relação

$$A = Z + n$$

onde A é o número de massa, Z o número atômico ou de prótons e n o número de nêutrons. Levando em consideração medidas modernas, as massas dessas partículas estão distribuídas assim: $m_p = 1,6726 \times 10^{-27}$ kg, $m_n = 1,6749 \times 10^{-27}$ kg e $m_e = 9,1094 \times 10^{-31}$ kg.



Marie Skłodowska Curie

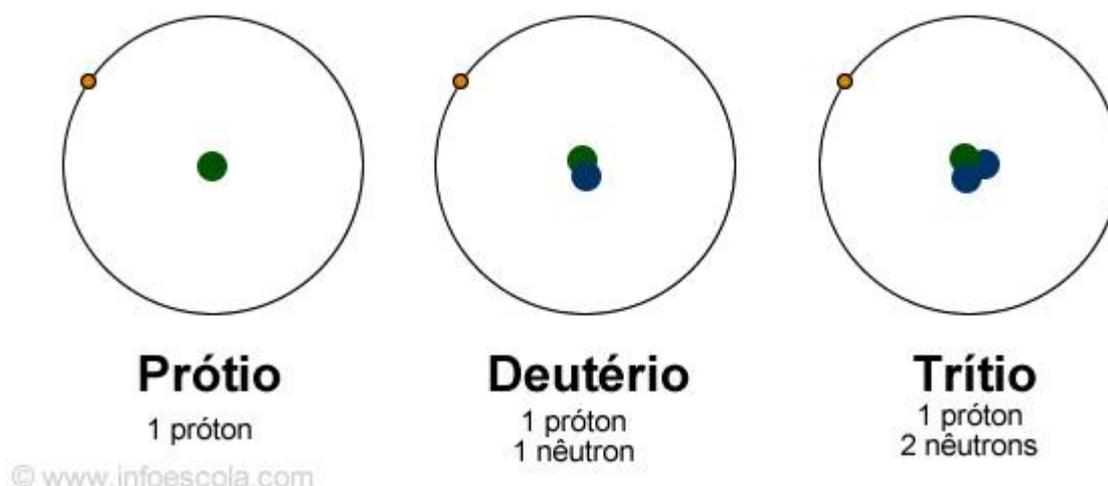
Nasceu em Varsóvia em 1867, na Polônia, se naturalizando francesa. Conduziu pesquisas importantes na área da radioatividade, desenvolvendo técnicas para isolar isótopos de elementos radioativos e participou da descoberta de dois elementos químicos, o rádio e o polônio. Casou-se com Pierre Curie, parceiro na vida e no trabalho científico. Ganhou o Nobel de Física em 1903 junto com seu marido e Henry Becquerel. Também foi laureada com o Nobel de Química em 1911, tornando-se a única mulher a ganhar dois Nobel em áreas diferentes. Morreu aos 66 anos em 1934,

por conta de uma leucemia provocada pela exposição a elementos radioativos.

Os núcleos podem ser representados com a simbologia ${}_Z X^A$, onde X é o elemento químico. Os núcleos de um mesmo elemento químico possuem o mesmo número atômico (prótons), podendo ter diferentes números de nêutrons. Nesse caso, são chamados de isótopos os elementos que possuem mesmo número atômico e diferentes números de massa. Exemplo disso é o carbono (C), que pode aparecer com 6 prótons e 6 nêutrons (${}_6\text{C}^{12}$) ou com 6 prótons e 8 nêutrons (${}_6\text{C}^{14}$). A maior parte dos núcleos tem formato esférico, sendo que poucos possuem o formato de elipse, porém, a diferença entre os semieixos não sendo muito expressiva.

Figura 9.

Isótopos do Hidrogênio



Os nêutrons não possuem carga, mas os prótons são positivos, o que, devido à repulsão coulombiana (aquela mesma que os estudantes da terceira série do ensino médio aprendem quando trabalham com eletrostática), deixaria a existência do núcleo impossível. Os prótons se repelem, disputando por espaço. De maneira geral, existe uma “cola” dentro do núcleo, chamada de força nuclear forte, que, a partir de certa distância (10^{-15} m), passa a superar o valor da força de repulsão, mantendo a estrutura intacta. Na verdade, é mais complicado do que isso, mas, para os devidos fins, serve como primeiro entendimento.



TÓPICO ESPECIAL: SOBRE AS INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

Isaac Newton foi o responsável por introduzir, de maneira formal, o conceito de força, pelo menos do ponto de vista matemático. Estabeleceu a força como princípio fundamental e desenvolveu toda a sua teoria baseada nesse conceito. Embora tenha sido superado pelas assertivas da Física Moderna, em particular depois que Einstein reformulou seu conceito de gravidade, usa-se seus princípios ainda hoje para situações

cotidianas. Para Newton, tudo no universo poderia ser explicado pela ação ou ausência de forças.

Com a sistematização do eletromagnetismo, a descoberta da estrutura atômica e de partículas elementares, houve uma verdadeira reestruturação do conceito de força, a partir do surgimento da ideia de campo. A força atua no raio de ação de um certo

campo, que é uma região de influência no espaço a partir de uma certa fonte.

Além disso, o bombardeamento de núcleos com partículas em aceleradores trouxe uma série de descobertas ligadas à estrutura das próprias partículas que os cientistas tomaram como elementares. Por exemplo, com exceção dos elétrons, os prótons e nêutrons são constituídos por outras partículas, estas sim parecendo ser fundamentais de fato. Surgiu a chamada Física de Partículas, inaugurando ou aperfeiçoando novas técnicas, além de elaborar uma nova teoria que desse conta dessa profusão de objetos microscópicos que surgia. Hoje se conhece mais de 300 tipos de partículas elementares, entre as detectadas em aceleradores e as observadas nos raios cósmicos. A teoria é chamada de Modelo Padrão e consegue explicar as observações com razoável precisão.

Cada partícula ou conjunto delas interage de modo específico com as outras ou com a matéria. O conhecimento acumulado admite que os fenômenos físicos no universo são manifestações de um ou mais dentre quatro interações fundamentais: gravitacional, eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca. A primeira já é conhecida desde que Isaac Newton publicou seu *Principia* e fundou a Mecânica Celeste. É resultado da massa de uma partícula. A eletromagnética é conhecida desde que os fenômenos elétricos e magnéticos foram unificados por James Clerk Maxwell e é resultado da ação de cargas positivas e negativas. As nucleares forte e fraca apareceram quando os fenômenos atômicos se tornaram evidentes, sendo que a primeira é

resultado da descoberta do núcleo e a segunda de fenômenos radioativos (também ligados ao núcleo). A interação forte, particularmente, é responsável por manter a estrutura do núcleo.

No Modelo Padrão, para cada interação, há a partícula chamada de mediadora. Para a interação fraca são os bósons W e Z ; na forte, os glúons; na eletromagnética, os elétrons; na gravitacional, os grávitons. No caso destes últimos, ainda não houve sua detecção. Espera-se que com a nova janela aberta com as ondas gravitacionais, dentro de algum tempo os grávitons possam se mostrar aos físicos.

Essa teoria é de fundamental importância não só para a física em si, mas para a Astronomia em particular, sendo a Cosmologia a principal delas. Se o big bang aconteceu de fato, no início, a densidade do átomo primordial era tão alta que não poderia haver as quatro forças fundamentais, admitindo-se que estavam todas unificadas. A especulação sobre a Teoria Unificada começou a ganhar força e, no estado atual da física, parece ser uma espécie de *pedra filosofal*. Mas o grande problema, de fato, está justamente na força gravitacional e a não detecção de sua partícula mediadora, o gráviton.

Com o avanço de medidas precisas envolvendo objetos celestes e novas teorias (uma candidata é a Teoria das Cordas), espera-se que dentro em breve a unificação ocorra, proporcionando uma compreensão mais profunda do universo. Ou o tempo revele que o nosso conhecimento é insuficiente. E assim a ciência caminha.

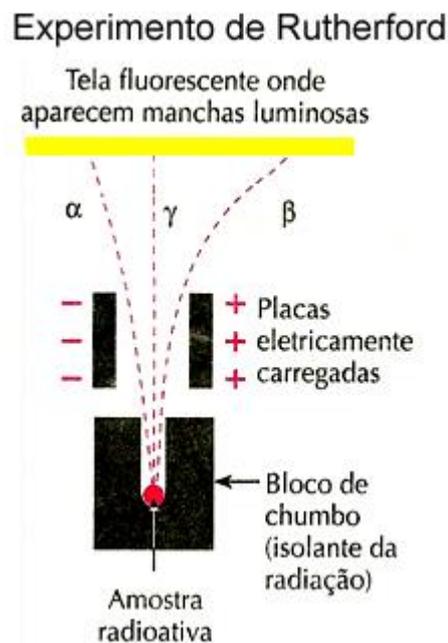
Mas por que ocorre essa emissão de radiação? Existem núcleos estáveis e instáveis. Usando um dispositivo chamado espectrômetro de massa, pode-se medir a massa do átomo. Verifica-se que a massa do núcleo é sempre menor que a soma das massas das partículas que o compõem. A essa diferença dá-se o nome de Energia de Ligação (E_L).

Em resumo, se a soma das massas das partículas é maior do que a massa do núcleo, tem-se que o núcleo é instável e este pode decompor-se em outros núcleos numa série de emissões radioativas, liberando energia, pois a tendência de todo isótopo é atingir a estabilidade. A liberação de energia pode ocorrer de duas maneiras: liberação de partículas do núcleo e emissão de fótons energéticos.

Mas que emissões podem ocorrer?

Em 1900, Rutherford e o casal Curie, independentemente, descobriram as radiações alfa(α) e beta(β), e P. Villard a radiação gama(γ). O próprio Rutherford investigou suas propriedades usando o aparato abaixo.

Figura 10.



Fonte: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/emissoes-radioativas-naturais.htm>

O experimento consistiu numa amostra radioativa colocada num bloco de chumbo. As emissões passaram entre duas placas carregadas com cargas de sinais opostos e atingiram uma tela fluorescente. Através da observação da cintilação da

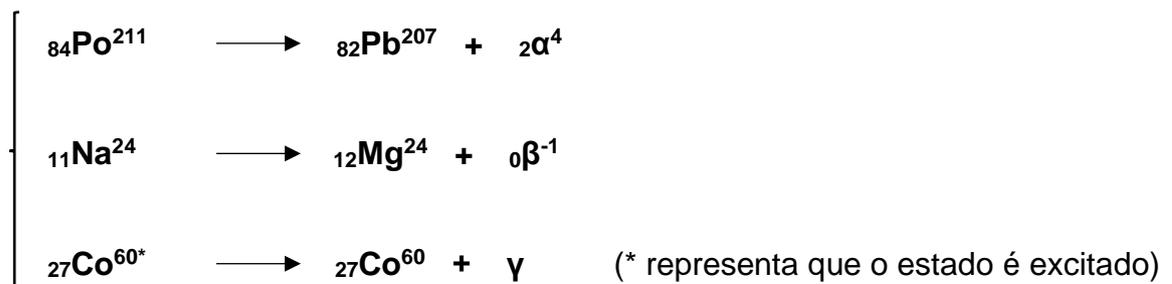
tela, é possível medir os possíveis desvios sofridos pelas partículas. Suas conclusões são mostradas abaixo.

Raios α : núcleos de hélio (2 prótons); carga positiva; muito pesados; velocidade de cerca de 20000 km/s; baixo poder de penetração (barrados por uma folha de papel).

Raios β : sofrem grandes desvios; carga negativa; semelhante a elétrons; velocidades próximas a da luz.

Raios γ : sem massa ou carga; se deslocam na velocidade da luz (cerca de 300000 km/s); alto poder de penetração; altamente energético.

Em suma, uma emissão espontânea ocorre sempre que um núcleo se encontra excitado, mas como sua condição natural é a estabilidade, o excedente de energia é liberado na forma de partículas e/ou onda eletromagnética. Sim, os chamados raios gama nada mais são do que ondas eletromagnéticas de altíssima energia. Falaremos dessas ondas mais tarde. Abaixo, tem-se alguns exemplos de decaimento.



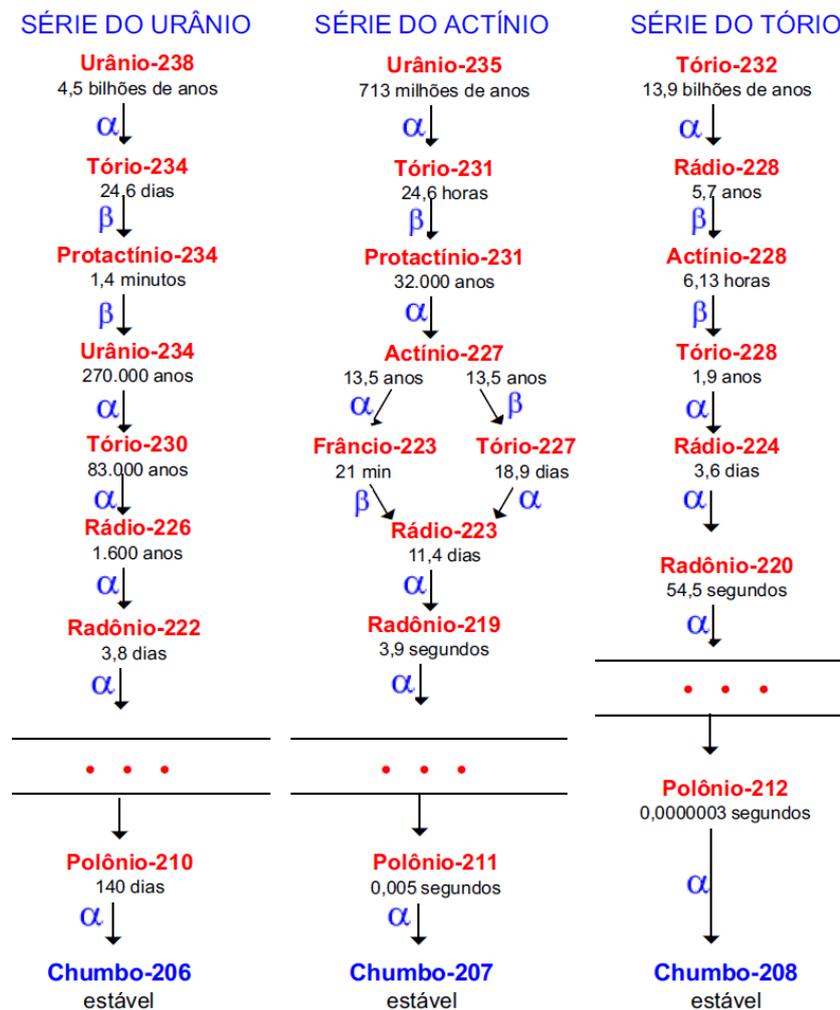
Com o tempo, a atividade da amostra de um material radioativo diminui, ou seja, seu poder de emissão cai. Para isso, usa-se uma grandeza chamada de meia-vida ($t_{1/2}$). Esse é o tempo que o número de desintegrações numa amostra cai pela metade. A meia-vida é característica de cada isótopo radioativo. Abaixo, seguem as meias-vidas de alguns deles.

- Urânio 238	—————>	4,5 bilhões de anos
- Rádio 226	—————>	1622 anos
- Césio 137	—————>	30 anos
- Radônio 220	—————>	54 segundos

Alguns núclídeos realizam decaimentos sucessivos até atingirem a estabilidade. Para um elemento em específico, essas transmutações ganham o nome de séries ou famílias radioativas. As mais importantes são:

- Série do Tório: começa com o Tório 232 e termina com o Chumbo 208;
- Série do Urânio: começa com o Urânio 238 e termina com o Chumbo 206;
- Série do Actínio: começa com o Actínio 227 e termina com o Chumbo 207.

Figura 11- Principais séries radioativas.



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-9-REPRESENTACAO-DAS-FAMILIAS-OU-SERIES-RADIOATIVAS-COM-ESTABILIDADE-EM-ATOMOS-DE_fig8_318472240

As séries acima terminam com o Chumbo (Pb), elemento mais estável. Outra informação importante é que as mesmas são todas reações naturais.

Mas o que dizer sobre as reações nucleares artificiais? Em uma parte do texto acima, foi falado do sonho dos alquimistas. Esses precursores da química moderna buscavam encontrar o *Elixir da Vida* e tinha como meta também a chamada *Pedra Filosofal*, uma forma de transmutar qualquer objeto em ouro. Sabe-se hoje que teoricamente isso só é possível alterando o número de partículas do núcleo atômico e que a natureza executa essa tarefa com certa eficiência. Mas a grande pergunta que fica é: se a natureza pode controlar esse fenômeno, será que ao ser humano também não é permitido? Com esse pensamento, Rutherford e outros começaram algumas investigações nesse sentido. Aliás, o pai da Física Nuclear foi o responsável pela primeira reação nuclear artificial da história. Ele fez passar partículas alfa por um tubo contendo diversos tipos de gases, sem resultados mesmo depois de meses de tentativa. Quando colocou nitrogênio (N₂), detectou a ejeção de partículas que podiam alcançar distâncias muito maiores do que as alfas. Mais tarde, verificou que possuíam carga positiva e foram chamados de prótons. Ele tinha observado a formação de O¹⁷. A descoberta foi feita em 1919.



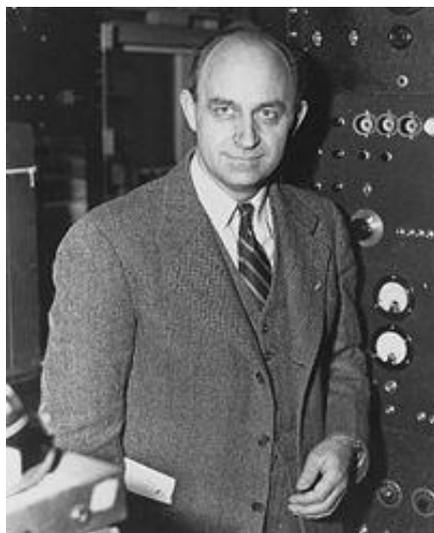
Outros experimentos foram feitos com câmaras de nuvens. A descoberta do nêutron só foi possível com esse tipo de aparato, embora não tenha sido uma tarefa fácil, experimento esse realizado por James Chadwick em 1932. A obtenção é descrita pela equação:



Os projéteis que passaram a ser usados foram núcleos de hidrogênio (H¹), que são prótons e, com a descoberta dos nêutrons, essas partículas se mostravam tão adequadas quanto, pois possuem massa semelhante. Na verdade, os pesquisadores observaram que o uso de prótons no bombardeio era dispendioso em termos de energia, pois, ao se aproximarem do núcleo do elemento em questão, sofriam repulsão coulombiana (cargas de mesmo sinal), tendo que vencer essa barreira. Com os nêutrons isso não acontecia, pois, os mesmos não possuem carga. Essas

partículas, no entanto, tinham que ser arremessadas com velocidades cada vez maiores. Foi preciso desenvolver aparelhos específicos para o alcance do intento, chamados de aceleradores de partículas, hoje tão importantes na Física de Partículas e Altas Energias.

Esse procedimento passou a ser usado também na obtenção de elementos químicos artificiais, proposta feita por Enrico Fermi em 1934. O primeiro transurânico foi sintetizado em 1940, o netúnio (Np), de número atômico 93. Nessa técnica, o nêutron penetra o núcleo, fazendo emitir um elétron e se transmutando num próton. Isso aumenta o número atômico do original. Elementos com Z acima de 100 só podem ser produzidos por fusão nuclear, onde aceleradores de partículas fazem dois núcleos colidirem tão fortemente que os mesmos se fundem, produzindo núcleos mais pesados.



Enrico Fermi

Nasceu em Roma no ano de 1901, naturalizado estadunidense. Destacou-se pelos estudos da Física Atômica e Nuclear, tendo desenvolvido o primeiro reator de fissão da história. Recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1938. Participou do Projeto Manhattan, esforço gigantesco na construção da bomba atômica. Depois da Segunda Guerra, se dedicou à Física de Partículas, dando grandes contribuições. Morreu em 1954. O elemento químico artificial de número atômico 100 foi batizado de férmio em sua homenagem.

Nesse momento podemos recordar de uma passagem do filme *Homem de Ferro 2* (2009), quando o personagem Tony Stark descobre que o elemento paládio (Pd) que figura no seu peito está provocando sua morte lenta. Através das anotações do seu pai, resolve sintetizar um novo elemento químico e para isso, constrói um acelerador de partículas. Depois de bombardear nêutrons com algum núcleo não identificado, consegue realizar a tarefa e substituir o paládio no peito. Apesar de toda a ficção envolvida, a técnica usada pelo personagem vem acompanhando a

ciência há décadas, sendo que vários elementos artificiais foram sintetizados dessa forma.

O estudo da Física Nuclear possibilitou enormes avanços não somente das investigações a respeito da estrutura da matéria, mas também aplicações em diversas áreas do conhecimento, desde medicina, passando pela indústria e engenharia, até controle de pragas e alimentos.

Figura 12- Comparando alimento irradiado com alimento natural. Apesar da polêmica envolvida, a irradiação de alimentos melhora a aparência dos mesmo e evita a proliferação de microrganismos.



Fonte: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/alimentos-irradiados.htm>

Tabela 1- Alguns usos para as radiações. Fonte: Física Moderna e Contemporânea, Peruzzo et. al. (2014).

Traçadores radioativos	Usados, por exemplo, para estudo do comportamento de abelhas, formigas, etc., podendo ser acompanhadas por detectores
Controle de pragas	Esterilização de insetos, por exemplo
Indústria	Examinar soldas, junções metálicas, rachaduras em peças, desgastes das partes móveis de um motor, etc.
Datação radioativa	Determinar idades de rochas, fósseis, objetos históricos, etc.
Preservação de alimentos	Irradiação de batatas, cebolas, carnes, etc., para melhor conservação, na medida em que diminui a ocorrência de doenças nos mesmos.

3.3- ESTAMOS EXPOSTOS O TEMPO TODO ÀS RADIAÇÕES

A radioatividade não é algo novo nas nossas vidas. Ela está presente na natureza desde antes dos seres humanos. É claro que a tecnologia fez com que essa presença aumentasse ainda mais, causando problemas para organismos vivos. Porém, em níveis controlados, essa exposição a elas não causa malefício algum, nada que um pormenorizado estudo não possa provar.

Devemos ter em mente que existem radiações não ionizantes e radiações ionizantes. As não ionizantes nos cercam de várias formas e não provocam mudanças consideráveis em estruturas vivas, por exemplo, pois possuem pouca energia. São exemplos desse tipo a luz, o calor e as ondas de rádio.

As ionizantes possuem altos níveis de energia, sendo que metade dessa exposição vem de radiação cósmica, ou seja, de fora do planeta, composta por prótons, íons pesados, raios-X e gama, estes, os mais perigosos. Quanto mais alto se estiver em relação ao solo, mais expostos estaremos a essas radiações, que ao entrarem na atmosfera se desdobram em outras partículas e atingem o solo. Um dado reconfortante é que apenas um terço dessa exposição diária vem de fontes não naturais. Dentre outras fontes que se enquadram nesse quesito, inclui-se a emissão de usinas nucleares e resíduos vindos da queima do carvão, que libera anualmente para o ar 9000 toneladas de tório e 4000 toneladas de urânio, ambos radioativos.

Alguns dados são fornecidos abaixo:

- Potássio (K): em 1 litro de leite de vaca encontra-se 1,4 g de potássio, sendo 0,0118% de K^{40} ;
- Em outros alimentos: C^{14} , Ra^{228} e Ra^{226} ;
- Cada tonelada de granito possui 20 g de tório e 9 g de urânio;
- Ao verificar o rótulo de uma garrafa de água mineral, observa-se a presença de alguns elementos radioativos, como o potássio e o magnésio em pequenas quantidades, revelando as características da fonte em questão.

Em várias outras situações podem ser encontrados esses elementos, o que prova que estamos imersos nesse universo radioativo desde sempre, embora, como dito, nossa tecnologia fez aumentar essa exposição.

Levando em consideração as fontes naturais, o radionuclídeo mais presente é o radônio (Rn), que é originado da desintegração do rádio (Ra). Um dos motivos de

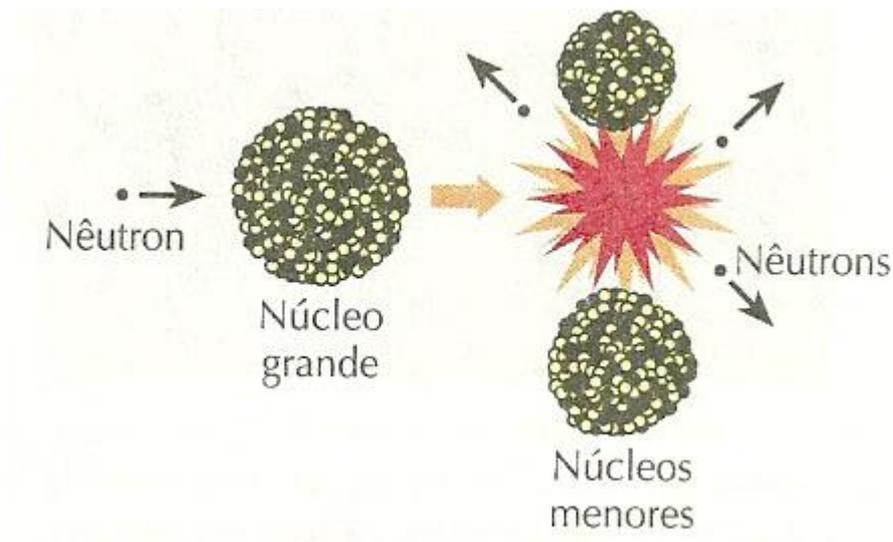
se manter um ambiente sempre arejado é que o gás Rn pode se infiltrar de diversas formas no ambiente, e se inalado em grandes quantidades pode provocar câncer.

3.4- FISSÃO NUCLEAR: A QUEBRA DO NÚCLEO LIBERA ENERGIA

O físico italiano Enrico Fermi propôs a obtenção de elementos mais pesados a partir do bombardeamento por nêutrons. Juntamente com Emilio Segrè, começou uma série de experimentos nesse sentido, bombardeando urânio com nêutrons e imaginaram ter obtido o elemento com número atômico 93 (como já dito, sintetizado em 1940). Ao analisar os resultados, a química Ida Noddack interpretou-os de modo diferente. Para ela, o que eles tinham conseguido foi quebrar o núcleo de urânio. Os dois pesquisadores continuaram suas experiências, ainda discordando da química, quando, em 1938, Otto Hahn e Fritz Strassmann, ao bombardear núcleos de urânio, obtiveram, sem sombra de dúvidas, o elemento químico bário (Ba), com quase metade da massa do urânio. A interpretação: o núcleo de urânio tinha se partido.

Segundo cálculos feitos por Lise Meitner e Otto Frisch, seu sobrinho, a energia liberada nesse processo era milhões de vezes maior do que a liberada em uma reação química. A técnica envolve adicionar nêutrons a um núcleo, mudando suas características geométricas. Nesse ponto, a força nuclear, que mantinha sua estabilidade, é superada pela repulsão elétrica, que passa a dominar. Esse domínio atinge um limite, fazendo o núcleo se romper. Os modelos admitem que o núcleo se estica a tal ponto que a "cola" que o mantém coeso (a força nuclear forte) não consegue impedir o estirão. Tem-se a chamada Fissão Nuclear.

Figura 13- Esquema simples da fissão nuclear.



Lise Meitner

Física austríaca nascida em Viena em 1878, foi a intérprete da fissão nuclear. Na Universidade de Viena, foi aluna de Ludwig Boltzmann. Juntamente com Otto Hahn, descobriu o elemento protactínio. Fugiu da Alemanha para a Suécia, onde trabalhou com poucos recursos por conta do preconceito com as mulheres, embora se mantivesse atualizada sobre as pesquisas por Hahn através de cartas. Em 1939, Meitner publicou à Revista Nature a interpretação do fenômeno que denominou de fissão nuclear, junto com seu sobrinho Otto Frisch. Por sua pesquisa em fissão nuclear, Otto Hahn

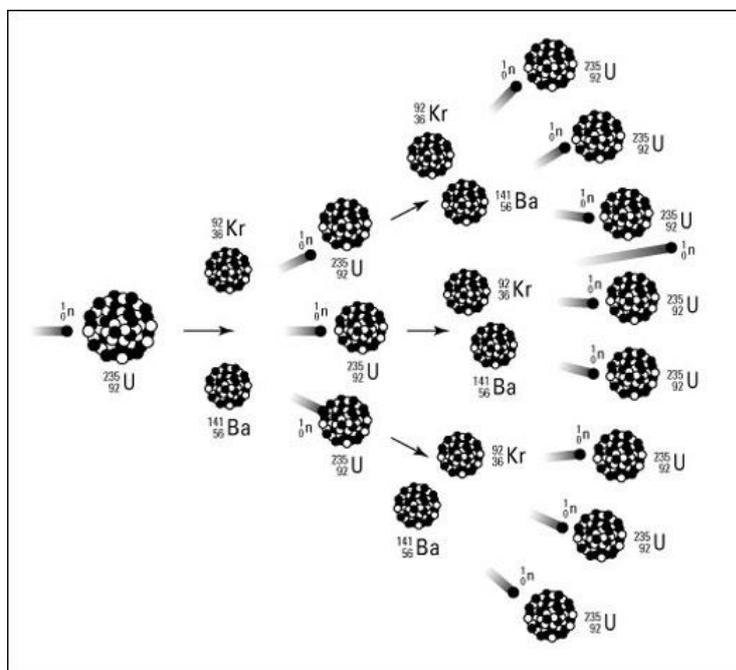
recebeu o Prêmio Nobel de Química em 1944, não reconhecendo, no entanto, a verdadeira participação de Lise Meitner. Apesar disso, é considerada a mulher mais importante na ciência do século XX. O elemento químico meitnério foi batizado assim em sua homenagem. Morreu em 1968.

Como o núcleo se parte, os pedaços são compostos por partículas e outros elementos químicos, geralmente radioativos. E o material resultante pode ter diversas reações diferentes. Considere-se a reação:



Nessa combinação, além dos produtos bário e criptônio, obtém-se também três nêutrons. Se cada nêutron ejetado colidir com mais um núcleo, tem-se um total de nove nêutrons no final. Se o processo seguir, a produção de nêutrons aumenta exponencialmente, constituindo o que se chama de reação em cadeia. Foi obtida pela primeira vez sob a supervisão de Enrico Fermi.

Figura 14- Representação de uma reação em cadeia.



Fonte: <https://www.infoescola.com/quimica/reacao-em-cadeia/>

Um isótopo que permite a fissão nuclear é chamado de físsil, sendo que os mais usados são o urânio 235 e 233 e o plutônio 239. Somente o U^{235} é encontrado naturalmente, extraído do U^{238} , que não é físsil.

Infelizmente, muitas pesquisas em fissão nuclear nasceram na esteira do que viria a ser a Segunda Guerra Mundial, especificamente no Projeto Manhattan. É de conhecimento de todos que o resultado disso foi a construção e lançamento das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki, que ceifaram inúmeras vidas. Finda a guerra, os pesquisadores investiram tempo e esforços na pesquisa de uma forma de produzir energia elétrica a partir da fissão. O processo tem que ser controlado dentro de reatores. Mas a polêmica envolvendo o seu uso gira em torno dos perigos, principalmente dos núcleos originados da reação, grande parte radioativos.

3.5- A FUSÃO NUCLEAR: MUITO MAIS ENERGIA

Se, por um lado, ao bombardear um núcleo com nêutron, obtém-se núcleos menores e geralmente radioativos, o que acontece se dois deles forem forçados a colidirem? Ocorre outra reação, conhecida como fusão nuclear. Essa área nasceu quando os estudos do plasma ganharam força, fazendo com que os pesquisadores percebessem que o processo de fusão era bastante promissor, pois trazia mais vantagens que a fissão.

Em linhas gerais, no que consiste o plasma? Se aquecermos um material sólido, o mesmo passa para o estado líquido. Permanecendo o aquecimento, passa para o estado gasoso, dando mais liberdade para as partículas se moverem. Todo estudante chega ao ensino médio sabendo desses detalhes. A matéria se apresenta em três estados: sólido, líquido e gasoso. Quando o aquecimento da massa gasosa se mantém, os elétrons se dissociam dos átomos, a matéria passando a se constituir por uma “sopa” de núcleos e elétrons. Isso é o plasma, o quarto estado da matéria. A fusão nuclear pode ocorrer facilmente aí dentro.

No que consiste, então, a fusão nuclear? Ocorre quando dois núcleos são aproximados o bastante para que se fundam, formando outro elemento químico mais pesado. Quando isso ocorre, a massa do núcleo formado é um pouco menor do que a massa dos núcleos individuais. A diferença é transformada em energia, de acordo com a equação de Einstein

$$E = mc^2,$$

onde m é a diferença de massa entre os reagentes e o produto e c é a velocidade da luz, que é de 3×10^8 m/s.

Essa energia emitida é bem maior do que a obtida com a fissão. A fusão em altas temperaturas é chamada de fusão termonuclear.



No exemplo acima, temos 4 átomos de hidrogênio se fundindo para formar um átomo de hélio, mais duas partículas beta e energia. Essa reação é bastante clássica e sua importância será discutida mais adiante.

Em termos de comparação, a porcentagem da massa transformada em energia na fissão é de 0,1% e na fusão, 0,7%.

Na aproximação dos dois núcleos, a repulsão coulombiana deve ser vencida de alguma maneira. Quando é suficiente, a atração nuclear se torna superior e os núcleos se fundem. Isso acontece quando a distância entre eles é da ordem de mais ou menos 10^{-15} m, distância conhecida como 1 fermi.

Segundo Peruzzo *et. al.* (2014), as condições para a ocorrência da fusão são:

- a) Temperaturas elevadas do plasma: entre 45 e 400 milhões de kelvin;
- b) A quantidade de íons por unidade de plasma deve ser alta;
- c) Tempo de confinamento deve ser grande.

Essa fonte de energia é bastante promissora, mas reproduzir essas condições aqui na Terra é muito difícil. Um esforço mundial vem sendo feito há décadas nesse sentido e estima-se que em mais alguns anos, um reator de fusão esteja operacional.

4- SERÁ QUE JÁ TEMOS ALGO A DIZER SOBRE A FONTE DE ENERGIA NAS ESTRELAS?

Bem, terminamos o capítulo 2 com a proposta de Eddington para esse problema. Na verdade, foi uma suposição. Lá pelos idos de 1920, o astrofísico se preocupou com o mecanismo que poderia fazer uma estrela como o Sol produzir tanta energia de maneira estável e por tanto tempo. Lembremos que a idade da Terra tinha sido calculada em alguns bilhões de anos e que o Sol não poderia ter menos do que isso. Sua proposta foi algum mecanismo ligado ao átomo. Imaginou a fusão do hidrogênio para a produção dessa energia, a partir de dados obtidos por F. W. Aston. Físicos como George Gamow e Edward Teller, nos anos seguintes, contribuíram com cálculos importantes nesse sentido.



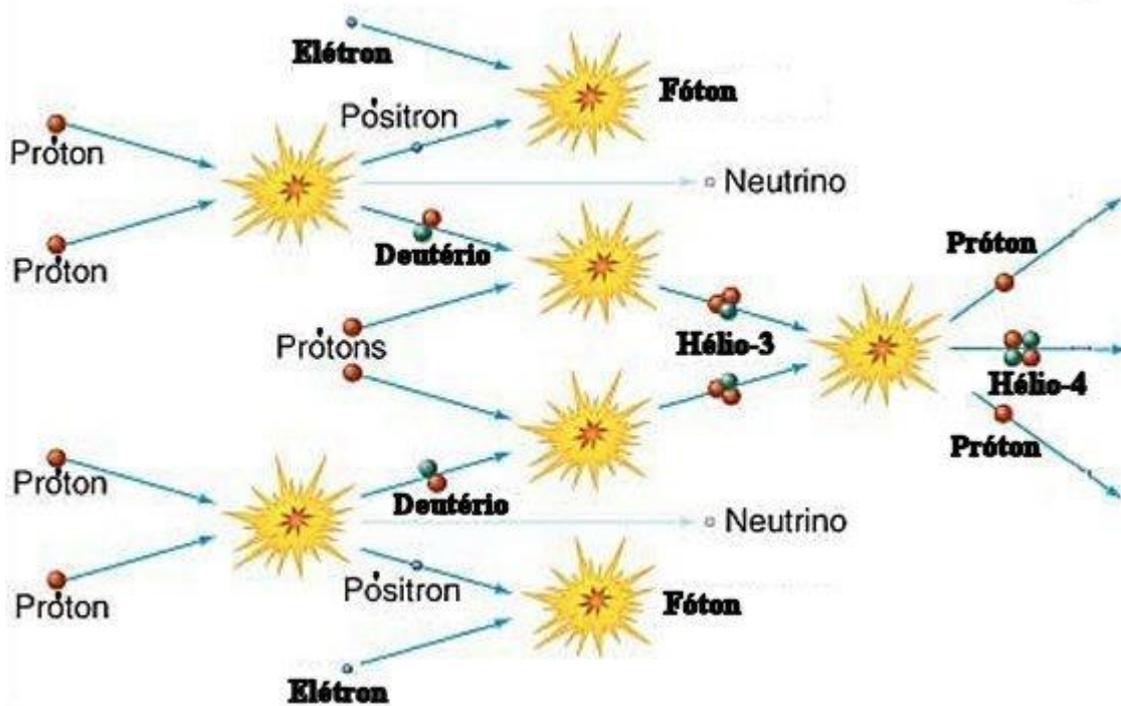
George Gamow

Físico nascido na Ucrânia em 1904, também um divulgador da ciência, tornando-se cidadão estadunidense em 1940. Na década de 1930 iniciou estudos em cosmologia, ao lado de Edward Teller, dedicando-se a entender o processo de formação dos elementos químicos em um universo em nascimento. Publicou uma série de artigos tratando do tema, propondo o que viria a se chamar de Teoria do Big Bang, uma ideia já proposta por Lemaitre. Junto com Ralph Alpher e Robert Herman, previu a existência de uma radiação cósmica de fundo que poderia ser detectada, mas foram ignorados por outros cientistas. Mais tarde, a radiação foi detectada nos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos, tornando-se uma das principais evidências da teoria do big bang. Gamow morreu em 1968.

Mas foi Hans Bethe, alemão, quem deu o mais importante passo no entendimento da produção de energia das estrelas, antes da Segunda Guerra Mundial. Depois de uma conferência que reuniu astrônomos e físicos nos Estados Unidos, em 1939, Bethe publicou um artigo intitulado “*A Produção de Energia nas Estrelas*”, que lhe valeu o Prêmio Nobel de Física em 1967. Nesse trabalho desenvolveu a teoria de como a fusão nuclear permite o mecanismo que faz as estrelas brilharem. Ele analisou diferentes possibilidades para o processo de fusão

do hidrogênio em hélio, chamado ciclo próton-próton, concluindo que em estrelas menores, como o Sol, esse era o mecanismo predominante. Para estrelas mais quentes e maiores, o processo é conhecido como ciclo CNO (carbono-nitrogênio-oxigênio). Nessa queima, a temperatura é fator importante, por isso se chama fusão termonuclear.

Figura 15- Ciclo próton-próton.



Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/evol/reacoes/reacoes.htm>

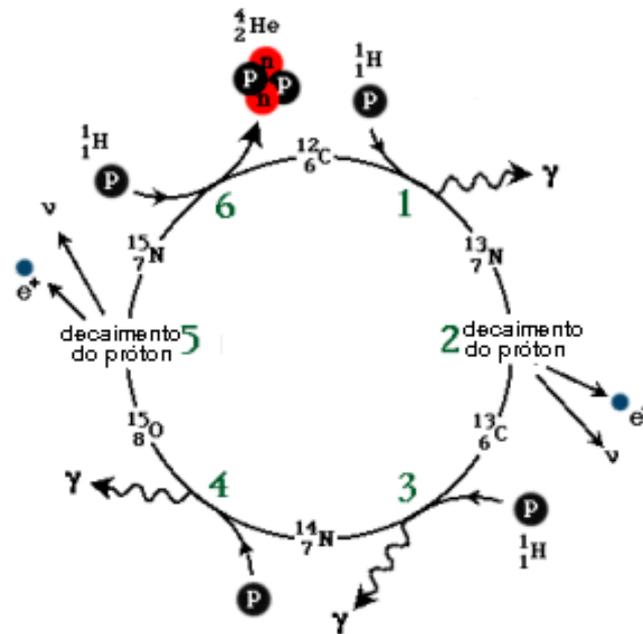
No ciclo próton-próton dois pares de prótons se fundem separadamente, formando deutério, que, ao receberem um próton cada um, produzem hélio 3, logo depois se juntando e formando hélio 4.



Hans Albrecht Bethe

Nasceu em 1906 na Alemanha, tornando-se cidadão estadunidense. Graduou-se em física em Frankfurt e fez doutorado em Munique, estudando a teoria do campo cristalino, rapidamente aplicada no estudo dos sólidos iônicos. Deixou a Alemanha em 1933 depois que os nazistas assumiram o poder, indo para a Inglaterra e depois Estados Unidos. Usando as reações nucleares, principalmente a fusão, estabeleceu como as estrelas produzem energia através desse processo, ganhando o Prêmio Nobel de Física em 1967. Faleceu em março de 2005 nos Estados Unidos, aos 98 anos de idade.

Figura 16- Representação esquemática do ciclo CNO.



Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/evol/reacoes/reacoes.htm>

Em teoria, a fusão também pode ser obtida acelerando-se dois núcleos, fazendo com que a alta energia cinética force a ocorrência do evento. Na prática, isso é bem difícil. Por isso se usa a temperatura para esse intento, que faz com que os núcleos se juntem, rompendo em certo momento a barreira coulombiana. Um dos

grandes problemas em se reproduzir esse mecanismo aqui na Terra é justamente esse: a temperatura deve chegar na casa dos milhões de kelvin, no mínimo.

Tabela 2- Exemplos de reações e temperaturas mínimas para ocorrerem.

REAÇÃO	TEMPERATURA MÍNIMA
$4\text{H}^1 \longrightarrow \text{He}^4$	8 milhões de kelvin
$3\text{H}^4 \longrightarrow \text{C}^{12}$	100 milhões de kelvin
$2\text{C}^{12} \longrightarrow \text{Mg}^{24}$	1 bilhão de kelvin

Anteriormente, falamos da barreira coulombiana que os núcleos devem vencer para a ocorrência da fusão. O problema é que, por exemplo, em uma temperatura de 15 milhões de kelvin, como é o interior do Sol, os núcleos possuem energia cinética mil vezes menor do que a barreira. É como quebrar uma porta de vidro espessa caminhando a uma velocidade de meio metro por segundo! Como explicar, então, a ocorrência da fusão de núcleos? Impossível do ponto de vista clássico.

Um dos trabalhos de George Gamow, ainda na década de 1920, foi justamente demonstrar esse efeito. Os prótons são considerados partículas quânticas, tendo certa probabilidade de participarem da fusão, mesmo com energias tão baixas. Esse é o chamado Efeito Gamow, uma espécie de tunelamento, onde a partícula consegue, de alguma maneira, atravessar uma barreira que lhe parecia intransponível. O que nos leva à conclusão de que, sem a Física Quântica, esse fenômeno não poderia ser compreendido.

A tabela abaixo faz uma comparação entre as energias liberadas por três tipos de reações diferentes: química, fissão e fusão nuclear. A disparidade entre os valores das energias química e por fissão diante da fusão nuclear é bastante alta.

Tabela 3- Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node10.htm>

	Química	Fissão	Fusão
Exemplos de reação	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$n + U^{235} \rightarrow Ba^{143} + Kr^{91} + 2n$	$H^2 + H^3 \rightarrow He^4 + n$
Combustível Típico	Carvão	UO ₂ (3% U ²³⁵ + 97% U ²³⁸)	Deutério & Lítio
Temperatura para reação (C)	873	1273	1 000 000
Energia liberada por kg de Combustível (J/kg)	$3,3 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{12}$	$3,4 \times 10^{14}$

Vamos analisar alguns dados obtidos para o Sol sobre sua produção de energia. Veremos mais adiante que nossa estrela é de pequeno a médio porte, mas seus números em relação aos que os seres humanos lidam no dia a dia são impressionantes.

- Cada metro quadrado da Terra recebe do Sol 1400 Watts de potência, sendo o Watt equivalente a Joule por segundo. Tem-se aproximadamente a mesma potência gerada por 215 lâmpadas de led de 6,5 W;
- Sua luminosidade é de 4×10^{26} Watts, algo como 5 trilhões de bombas de hidrogênio por segundo. Essa energia seria suficiente para abastecer a Terra durante 9 milhões de anos;
- Aproximadamente 600 milhões de toneladas de hidrogênio são convertidos em hélio por segundo.

A seguir, faremos alguns cálculos com dados bastante conhecidos para obtermos o tempo que nossa estrela levará transformando hidrogênio em hélio. A matemática envolvida é simples e pode ser reproduzida por qualquer pessoa com o mínimo de conhecimento sobre a mesma. Esses cálculos foram baseados nos encontrados no livro *Astronomia e Astrofísica*, do Kepler de Souza.

Como dito anteriormente, a massa que entra numa reação de fusão é maior do que a massa resultante. Essa falta é explicada pela liberação de energia através da equação de Einstein

$$E = mc^2.$$

No Sol, por exemplo, 4 prótons se fundem formando hélio. A massa dos 4 prótons juntos é 4,0324 u, onde u é a unidade de massa atômica, de valor aproximado de $1,66 \times 10^{-24}$ kg. A massa do átomo de hélio é de 4,0039 u. Sendo Δm a diferença de massa, tem-se

$$\Delta m = 4,0324 u - 4,0039 u = 0,0285 u$$

Dividindo Δm pela massa dos 4 prótons antes da fusão, obtém-se

$$\frac{0,0285}{4,0324} = 0,007$$

Isso significa que 0,7% da massa da reação é transformada em energia. Levando em consideração que a massa que entra na reação corresponde a 10% do total de hidrogênio da estrela, a equação para a energia produzida é, já com as correções:

$$E = 0,007 \times 0,1 \times M_S \times c^2$$

Sendo M_S a massa do Sol, cujo valor é de $1,99 \times 10^{30}$ kg e a velocidade da luz é de 3×10^8 m/s. Substituindo na equação, temos

$$E = 1,26 \times 10^{44} \text{ Joules.}$$

Prosseguindo, a luminosidade do Sol é de 4×10^{26} J/s. Fazendo uma regra de três simples com os valores da energia e luminosidade, podemos calcular o tempo que o Sol levará produzindo energia.

$$t = \frac{1,26 \times 10^{44}}{4 \times 10^{26}} = 3,15 \times 10^{17} \text{ s.}$$

Por fim, se um ano tem $3,15 \times 10^7$ s, depois de uma outra regra de três, obtém-se:

$$t = \frac{3,15 \times 10^{17}}{3,15 \times 10^7} = 1,0 \times 10^{10} \text{ anos.}$$

Isso equivale a 10 bilhões de anos produzindo energia através da fusão termonuclear do hidrogênio em hélio, antes de começar o processo de instabilidade. Os cálculos mais aceitos dão conta de que o Sol possui cerca de 5 bilhões de anos de idade, o que sobra mais ou menos o mesmo tempo até começar a “morrer”. Para as demais estrelas, os cálculos são feitos com base nos dados do Sol, sendo que as equações envolvidas dependem dos mesmos.

São décadas de observação feitas pelos astrônomos, aliando novas técnicas e teorias para criar o arcabouço teórico que se conhece como Evolução Estelar, que une áreas tão díspares quanto Física Térmica e Teoria Quântica. O que a ciência sabe sobre as estrelas é motivo de comemoração por parte dos especialistas, principalmente no quesito ligado à produção de energia. Esses astros fascinantes garantem as condições necessárias para que ocorra a fusão nuclear, considerada o processo mais importante do universo. O ser humano busca não só entendê-lo como reproduzi-lo aqui na Terra. Muitos acreditam que esse caminho possa levar à solução dos problemas energéticos do planeta.

5- UM POUCO SOBRE EVOLUÇÃO ESTELAR: UMA ESTRELA NASCE, CRESCE E MORRE

Parece estranho associar a vida de uma estrela à vida humana. O próprio termo “vida” se mostra deslocado em certo sentido, pois a entendemos como uma propriedade de seres que interagem com outros, de alguma maneira promovendo uma relação harmoniosa com outrem. Mas não é harmoniosa a relação entre as estrelas e os demais objetos celestes? Não foi uma estrela que permitiu o florescimento da vida na Terra? Quase todos os elementos químicos são produzidos em uma estrela e na sua morte, outros mais pesados são lançados no espaço profundo. Nós mesmos somos feitos desses elementos, formando a matriz de toda a vida, já se tornando um lugar comum o fato de sermos “poeira de estrelas”.

É muito poético pensar nesses termos e pode servir de introdução para um dos temas mais interessantes e controversos da ciência. Mas não devemos perder de vista que, apesar dessas relações feitas, a evolução estelar se dá por processos puramente físicos e que, mesmo usando-se termos associados à vida e à morte, esses objetos não são seres biológicos. O que não tira a sua importância para a compreensão do estado em que se encontra o universo, com toda sua complexidade, incluindo passado, presente e futuro.

Foi demonstrada a jornada para a compreensão da forma como uma estrela produz energia, levando os cientistas a desenvolverem ferramentas e teorias modernas que têm transformado a humanidade de maneira irreversível. A Física Nuclear desvendou esse mistério, oportunizando a sua aplicação para a geração de energia na Terra, espera-se, em um futuro próximo.

Mas o estudo do universo permite grandes perguntas, em particular, referentes às estrelas. Como se dá o “nascimento” de uma estrela? Quais as etapas da chamada evolução estelar? E talvez a pergunta mais fascinante: Quais os estágios finais da vida de uma estrela? As respostas obtidas ao longo de décadas são desconcertantes e serão tratadas nas próximas seções de forma leve, porém, permitindo aos leitores uma compreensão geral do tema.

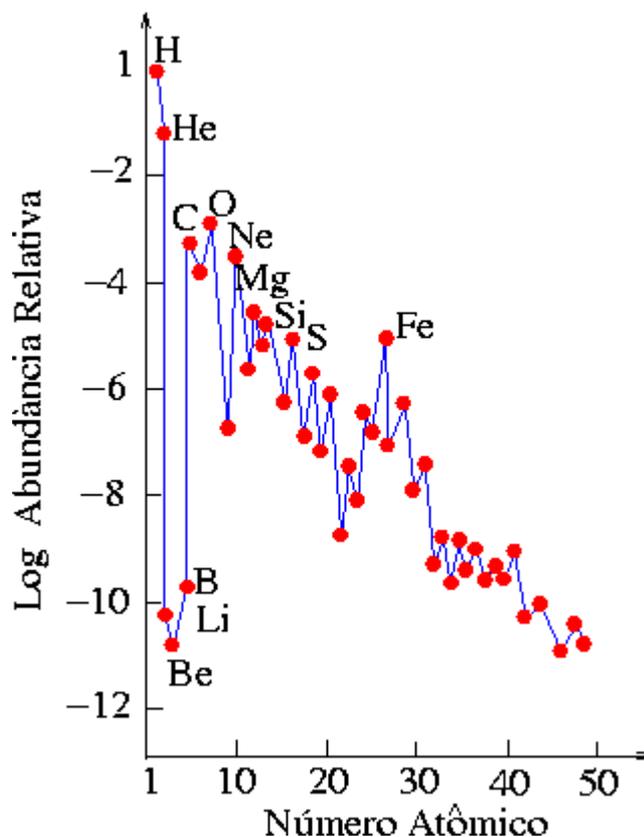
5.1- O ELEMENTO MAIS ABUNDANTE DO UNIVERSO

A ciência tenta seguir um princípio básico estabelecido há séculos conhecido como Navalha de Occam, ideia na qual uma assertiva científica deve ser a mais simples possível dentre outras candidatas a explicar a natureza. Mas será que a sensação que fica ao se estudar física, por exemplo, é a ideia de que as teorias são realmente as mais simples? Um estudante do ensino médio vai dizer categoricamente que não. As teorias que eles estudam não são as mais simples. Pode-se concordar com isso até certo ponto. Afinal, o que garante que a teoria aceita é realmente a mais simples?

Toda essa retórica acima serve para iniciar uma discussão sobre o elemento mais abundante do universo. A tabela periódica foi organizada de modo a atender ao crescimento do número atômico, que representa o número de prótons no núcleo de cada elemento químico. Sem levar em consideração os detalhes dessa organização, temos, de um modo geral, elementos naturais e artificiais. O de estrutura mais simples, o primeiro nessa organização, é o hidrogênio, que possui um próton e um nêutron no seu núcleo. O mais simples, então, é mais abundante. Formado nos primórdios do universo, algum tempo após o big bang, ainda é disparado o elemento mais presente, permeando regiões imensas do universo em variadas densidades. E faz parte também da constituição de uma estrela. Sim. Uma estrela é formada quase que completamente por hidrogênio. O nosso Sol, por exemplo, é uma imensa esfera de gás degenerado, composta por 91,2% de hidrogênio, 8,7% de hélio e o restante de outros elementos.

Essa distribuição para o Sol é tão importante que há um gráfico, batizado de abundância cósmica, que foi elaborado com base em dados obtidos por medidas na fotosfera e vento solar, além de meteoritos. Isso, apesar de representar a distribuição no sistema solar, pode ser estendido para o restante do universo.

Figura 17- Abundância cósmica.



Fonte: <http://www.astro.iag.usp.br/~ronaldo/intrcosm/Glossario/AbundCosm.html>

Para o universo visível, as porcentagens são:

- 73,5 % de hidrogênio
- 24,9 % de hélio
- O restante de outros elementos

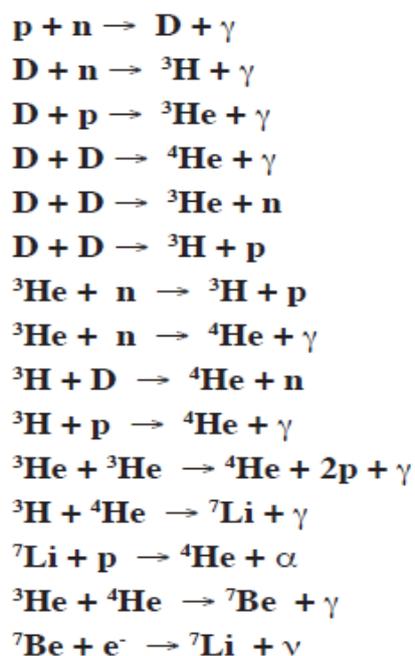
Nesse sentido, podemos falar dos processos de formação dos elementos químicos. Não era possível responder à pergunta até que se tivessem dados suficientes e precisos, bem como uma base teórica para isso. Hoje, se admite três processos: nucleossíntese primordial, nucleossíntese estelar e nucleossíntese interestelar. Vamos dar ênfase especificamente aos dois primeiros processos, os que mais interessam o presente trabalho.

5.2- NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL

A teoria mais aceita para a formação do universo é conhecida como big bang, mas, a despeito de várias confirmações bem-sucedidas, não é uma unanimidade. Seguindo essa ideia, tudo começou com um ponto de alta densidade e temperatura, tão particular, que os cosmólogos buscam uma teoria unificada para a sua compreensão (ver seção sobre as forças fundamentais). O fato é que nesse momento só existiam partículas elementares, como elétrons, prótons etc., além de radiação. Com a expansão, a temperatura e a densidade foram diminuindo, até atingir o estado atual. Aliás, uma das grandes vitórias da teoria do big bang foi alcançada com a previsão e detecção da diluição dessa energia com a expansão, chamada de radiação cósmica de fundo, a 2,7 kelvin de temperatura, feito que rendeu o Prêmio Nobel de Física a Arno Penzias e Robert Wilson em 1978.

Nos primeiros segundos de expansão a temperatura era da ordem de alguns trilhões de kelvin e com o resfriamento, ao atingir a ordem dos bilhões de kelvin, foram sintetizados o deutério, o trítio e isótopos de hélio e lítio. As reações ocorridas estão listadas abaixo.

Figura 18



Fonte: Maciel (2004).

As reações terminam no Li^7 por que, com a expansão, as temperaturas não são mais suficientes para a sintetização de elementos mais pesados.

5.3- NUCLEOSSÍNTESE ESTELAR

Nesse momento, o material primordial que compõe o universo foi sintetizado e, à medida que se expande, há o seu espalhamento em todas as regiões. Com abundância de hidrogênio, mais leve e simples, por toda a parte vão se criando bolsões desse elemento e pouco a pouco, sua densidade vai aumentando. Esses são os aglomerados moleculares. É a hora da gravidade atuar. Quanto mais denso, maior a atração gravitacional, que vai gerando rotação como um carrossel composto de gás. O que se tem são aglomerados de gás e poeira, se aglutinando e girando. Sabe-se que, quando um gás é comprimido, sua pressão e temperatura aumentam (termodinâmica básica), o que de fato ocorre, sendo que no centro, esse aumento é maior. As regiões mais próximas dele têm maior temperatura do que as mais afastadas, isso se chama de gradiente.

Pois bem, as camadas mais externas comprimem a região central até uma densidade limite, onde começa um equilíbrio, no qual as mais internas suportam a pressão gravitacional das outras. A temperatura sobe o suficiente e atinge cerca de 150000 kelvin nesse estado. Diz-se, então, que há a formação de uma protoestrela.

A temperatura e pressão continuam subindo na parte interna e quando atinge a casa dos milhões de kelvin, inicia-se o processo de fusão termonuclear. Como já sabemos, átomos de hidrogênio se fundem e formam átomos de hélio, um dos eventos mais poderosos do universo. Uma estrela acaba de nascer.

O que é uma estrela, então? “Estrelas são esferas autogravitantes de gás ionizado cuja fonte de energia é a transmutação de elementos através de reações nucleares, isto é, da fusão nuclear de hidrogênio em hélio e, posteriormente, em elementos mais pesados” (S. O. Kepler e Saraiva, 2010, p. 231). Portanto, só há estrela se houver fusão termonuclear. A maioria das estrelas nasce em aglomerados, permanecendo juntas por toda a vida ou se desgarrando com o passar do tempo.

Figura 19- M8 é uma nebulosa de emissão localizada em Sagitário. Conhecida como a Nebulosa da Lagoa.



Fonte: <http://www.astropt.org/2016/12/22/m8-a-nebulosa-da-lagoa-em-alta-definicao-do-vst-por-roberto-colombari-e-e-recurt/>

Quando uma estrela nasce, começa o processo de queima do hidrogênio, entrando assim numa fase chamada de Sequência Principal (SP). Continuando a comparação com o ser humano, é a sua fase produtiva, onde brilha durante anos, sendo que sua estrutura é mantida em equilíbrio. Há uma intensa queda de braço entre a geração de energia no núcleo, a chamada pressão de radiação, e a pressão gravitacional das camadas mais externas. Esse equilíbrio é tênue e enquanto houver fusão, ele é mantido. A maior parte do tempo de vida de uma estrela corresponde à sequência principal.

O que define quanto tempo uma estrela passa na sequência principal é a sua massa. Estrelas de grande massa queimam o hidrogênio mais rapidamente do que as de pequena massa. A tabela abaixo mostra valores para alguns casos.

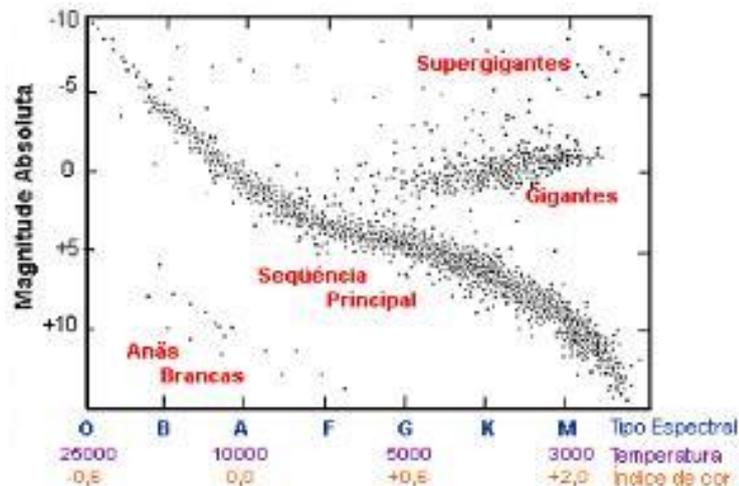
Tabela 4- Características e tempo de vida na sequência principal (baseado em Peruzzo *et. al.* (2014))

Massa	T(K) superfície	Luminosidade	Tempo na S.P.
25	35000	80000	3 milhões de anos
15	30000	10000	15 milhões de anos
3	11000	60	500 milhões de anos
1	6000	1	10 bilhões de anos
0,5	0,025	0,025	200 bilhões de anos

O estudo do espectro de uma estrela revela os elementos químicos que a compõem, bem como sua temperatura superficial, o que define sua cor. A Espectroscopia será abordada mais adiante.

Dados importantes da Evolução Estelar podem ser reunidos em um gráfico chamado de Diagrama H-R. Isso foi feito de forma independente pelo dinamarquês Ejnar Hertzsprung em 1911 e pelo americano Henry Russel (daí o nome do diagrama) em 1913. Os dados para sua construção foram obtidos na época, associando luminosidade e temperatura superficial de várias estrelas catalogadas.

Figura 20- Diagrama H-R.



Nesse diagrama, a temperatura cresce para a esquerda e a luminosidade cresce para cima. A maior parte das estrelas se encontram na sequência principal, ou seja, transmutam hidrogênio em hélio. Nas outras regiões são apresentadas outras categorias de estrelas, como as gigantes, supergigantes e anãs brancas.

Uma curiosidade é que as estrelas gigantes são mais frias que o Sol, mesmo sendo maiores e mais brilhantes. As anãs brancas são mais quentes do que o Sol, portanto, mais azuis, ao mesmo tempo que são mais luminosas e menores.

Como dito anteriormente, o estudo de uma estrela é feito tomando o Sol como referência. Nesse sentido, as massas das estrelas variam entre $0,08M_s$ e $100M_s$. Objetos gasosos menores que $0,08M_s$ não conseguem produzir a fusão termonuclear. Nas estrelas acima de $100M_s$, a temperatura é tão alta no seu núcleo que a faria se destruir, impossibilitando sua existência.

Uma estrela passa a maior parte de sua vida sendo produtiva, transformando hidrogênio em hélio, o que, no caso do nosso Sol, possibilita a manutenção da vida na Terra. Mas é uma constatação que nada é eterno. Uma estrela não queima seu combustível para sempre. Vimos que quando 10% do hidrogênio é queimado, algo começa a acontecer. O equilíbrio é interrompido e a estrela sai da sequência principal. Uma sequência de fases acontece e o caminho depende de sua massa. É o que vamos discutir a seguir.

5.4- A ESTRELA ENTROU EM DESEQUILÍBRIO. E AGORA?

Esgotou-se o hidrogênio do núcleo e a chamada pressão de radiação diminuiu, provocando a instabilidade, pois a gravidade empurra o núcleo contra si mesmo, agora composto por hélio. O núcleo aumenta sua temperatura e como efeito cascata, faz as camadas externas também ficarem mais quentes. Nestas, o hidrogênio presente começa a fundir, produzindo mais hélio, fazendo com que a estrela aumente consideravelmente seu tamanho. A estrela se torna uma gigante vermelha.

Enquanto isso, o núcleo continua se contraindo e aumentando sua temperatura, quando chega a cerca de 100 milhões de kelvin, suficiente para começar a queima do hélio, que se transforma em carbono e oxigênio. Em geral, a partir desse ponto, a evolução estelar depende se a mesma pertence a um binário ou múltiplo ou é uma simples. No primeiro caso, depende de sua massa e separação entre si. No segundo, depende somente de sua massa. É o caso que vamos nos ater.

Se uma estrela tiver entre $0,08M_s$ e $0,8M_s$, ao queimar o hidrogênio do núcleo, se expande ao provocar a queima do hidrogênio nas camadas que estão mais acima,

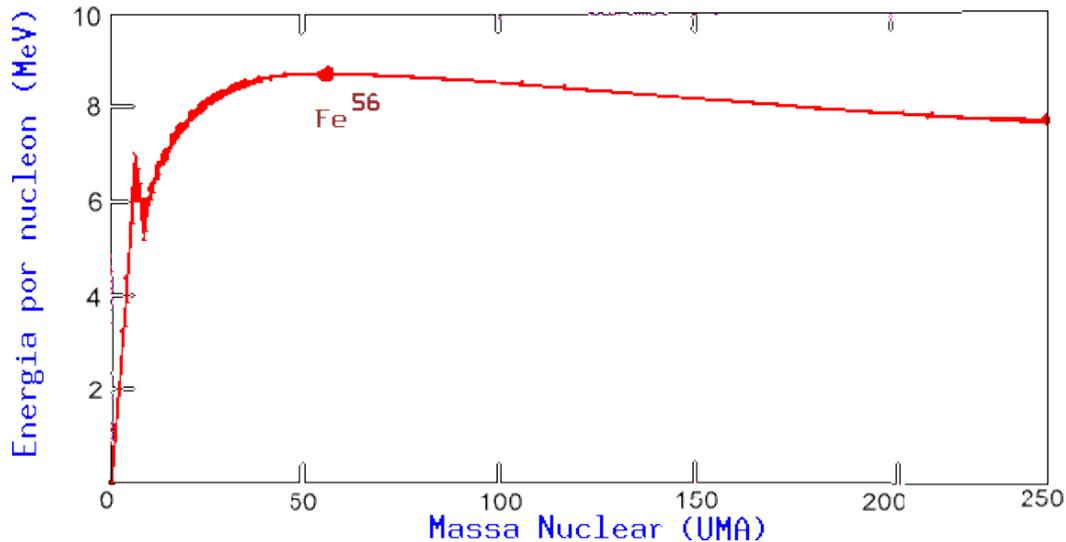
como relatado anteriormente. O núcleo, por sua vez, não tem temperatura suficiente para a fusão do hélio, tornando-se uma anã branca com núcleo composto por esse elemento. A fase final de estrelas desse tipo ainda não foi observada por que a idade do universo não é suficiente para elas terem saído da sequência principal (vide Tabela 4).

Se sua massa inicial for entre $0,8M_{\odot}$ e $10M_{\odot}$, após queimar o hidrogênio central, passa a fundir o hélio criado, tornando-se gigante e supergigante vermelha. O núcleo torna-se composto por carbono e oxigênio e as camadas superiores, ao queimar hidrogênio e hélio, fazem a estrela se contrair e expandir continuamente. Isso ejeta as camadas mais externas para o espaço, formando as nebulosas planetárias. Depois de alguns milhares de anos, essa matéria se dispersa, expondo um caroço que, ao se resfriar, também se torna uma anã branca, sem ocorrência de fusão. Esse será o destino do Sol, que ao se expandir, levará consigo a vida na Terra (se ainda houver). Mas estimativas indicam que isso ocorrerá dentro de 5 ou 6 bilhões de anos.

Se a massa for acima de $10M_{\odot}$, após a fase de supergigante, ocorre um dos eventos mais energéticos conhecidos, chamado de supernova. Assim, ejetará grande parte de sua massa ao espaço, dando origem, inclusive, a elementos mais pesados. O que acontece é que estrelas de grandes massas evoluem muito rapidamente pela aceleração da produção de energia. A temperatura atinge a casa dos bilhões de kelvin, permitindo a fusão dos elementos O^{16} , Mg^{24} , Si^{28} , S^{32} , Cl^{35} , Ca^{40} , Sc^{45} , Ti^{48} e assim sucessivamente até o ferro (Fe^{56}).

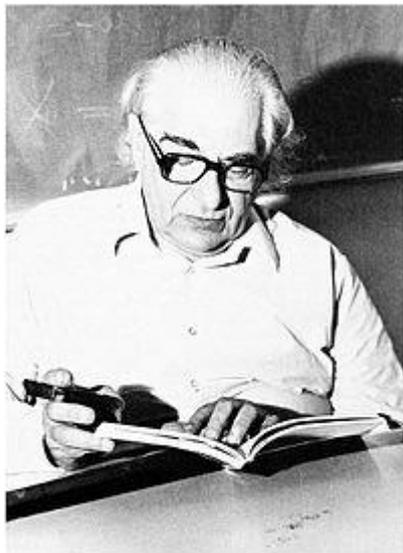
Observando o gráfico abaixo, que mostra a energia de ligação dos átomos, percebe-se que há liberação de energia por fusão até o Fe^{56} , com o crescimento da curva. Portanto, sua energia de ligação é mais alta.

Figura 21- Energia de Ligação



<http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node12.htm>

A partir do ferro, a reação nuclear mais vantajosa é a fissão, ou seja, a quebra do átomo. A pressão e a temperatura são tão altas, que elétrons e prótons se fundem, gerando nêutrons. Estes ocupam menos espaço por não possuírem carga, aumentando o calor, o que produz a emissão de neutrinos, que deixam a estrela. Neutrinos são partículas subatômicas sem carga, muito mais leves que os elétrons e por isso de difícil detecção. Essa fuga de neutrinos leva consigo a energia central da estrela, gerando colapso gravitacional e uma explosão violenta denominada de supernova ocorre. Esse fenômeno foi estudado, dentre outros, pelo físico brasileiro Mario Schenberg. Conta-se que George Gamow lhe mostrou uns cálculos sobre o assunto, onde não conseguia resolver o problema. Schenberg, chegando em casa, se debruçou sobre os mesmos, encontrando a solução. Quando a mostrou a Gamow, fez referência ao fato de que no cassino da Urca, no Rio de Janeiro, o dinheiro foge como os neutrinos. Juntos, publicaram um artigo em 1941, quando o fenômeno passou a ser chamado de Processo Urca.



Mario Schenberg

Nascido no Recife em 1914, é considerado o maior físico teórico do Brasil. Formado em engenharia elétrica e matemática. Em 1939 foi para a Europa, trabalhando na Universidade de Roma com Enrico Fermi, Wolfgang Pauli em Zurique e em Paris com Frédéric Joliot-Curie, genro do casal Curie. Mais tarde trabalharia com George Gamow em problemas de astrofísica, como o Processo Urca e com o físico indiano Subrahmanyan Chandrasekhar, onde juntos estabeleceram o limite de Schenberg-Chandrasekhar, estabelecendo a maior massa que pode ter o núcleo de uma estrela sem ocorrência de reações nucleares. Foi um ativista político, deputado estadual duas vezes pelo estado de São Paulo, sofrendo perseguições durante a ditadura militar. Teve uma vida política e acadêmica bastante prolífica, conhecendo diversos físicos de renome mundo afora em uma época em que a física fervia de descobertas importantes que moldaram o nosso conhecimento sobre o universo.

Em uma supernova, a luminosidade aumenta tanto, que corresponde à mesma luminosidade de uma galáxia com 200 bilhões de estrelas. Um dos primeiros relatos desse fenômeno foi feito em 1054 d. C. pelos chineses, se tornando, durante várias semanas, o objeto mais brilhante no céu depois do Sol e da Lua. Esse evento originou a Nebulosa do Caranguejo.

Figura 22- Nebulosa do Caranguejo.



Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node14.htm>

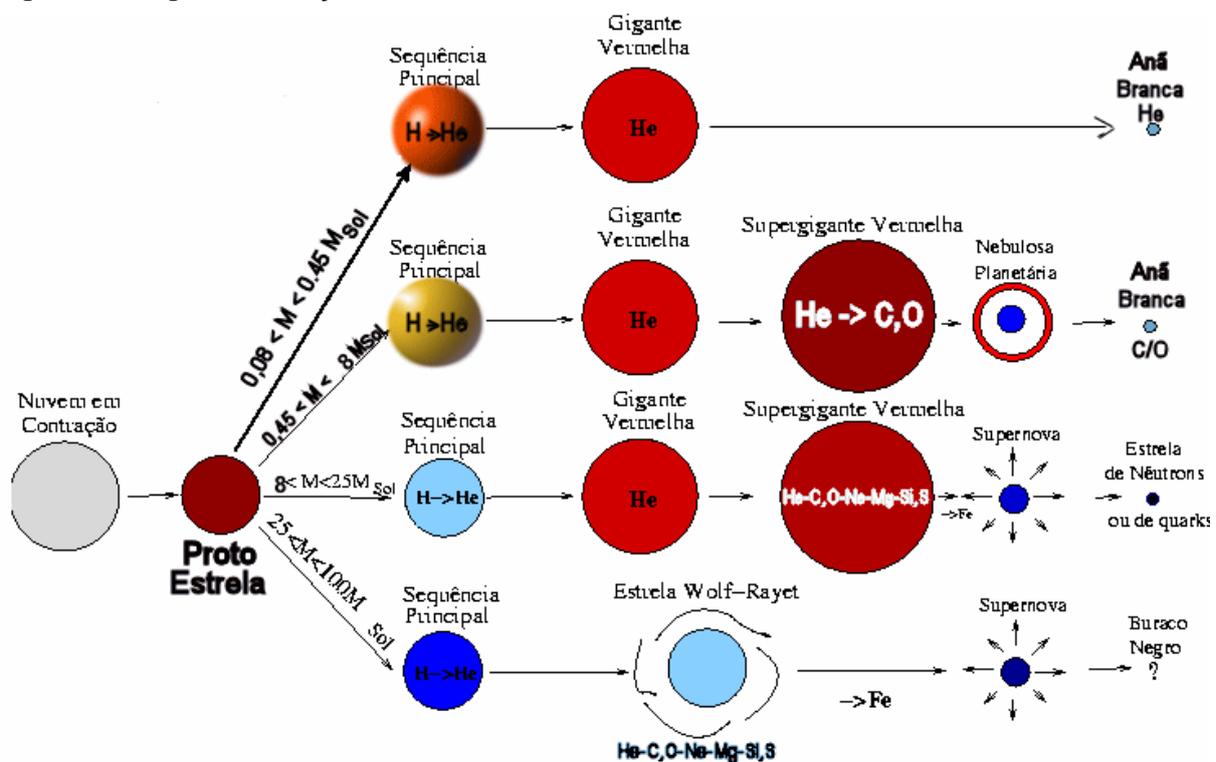
A última supernova observada a olho nu foi a SN1987A, na galáxia Grande Nuvem de Magalhães, em 1987. A sua ocorrência foi relativamente próxima da Terra, sendo um deleite para os astrônomos, pois permitiu o estudo usando instrumentos modernos. Tudo começou com a intensa detecção de neutrinos vindos daquela região, o que deixou em alerta vários observatórios ao redor do mundo.

A ejeção de matéria e energia de uma supernova é grande, mas depois de algum tempo vai se esmaecendo, revelando um núcleo central composto por nêutrons, produzidos pela fusão de elétrons e prótons. É a chamada estrela de nêutrons, objeto com alta densidade, girando velozmente e enviando sinais de rádio que podem ser detectados com bastante precisão. Também são chamadas de pulsares. Sua densidade é tão alta que um cubo de um centímetro de lado de sua matéria pesa cerca de 100 milhões de toneladas! E o seu campo gravitacional pode chegar a um bilhão de vezes o campo gravitacional da Terra!

Estrelas de nêutrons surgem após uma supernova para estrelas que iniciam sua vida com massa entre $10M_{\odot}$ e $25M_{\odot}$. O que acontece com estrelas de massa acima de $25M_{\odot}$? A evolução delas é a mesma das anteriores. Porém, o colapso gravitacional, que antes era barrado pela compressão dos nêutrons, para estrelas supermassivas, continua em ritmo acelerado e após a supernova, o que resta é um objeto tão denso que nem mesmo a luz (fóton) consegue escapar. Em 1967 o físico

John Wheeler, em uma palestra em Nova York, ao se referir a esse tipo de fenômeno, alguém na plateia sugeriu que usasse o termo buraco negro, termo que apareceria com frequência em textos futuros. Sim, o que fica após a supernova é um buraco negro. Como curiosidade, essa proposta já havia sido feita pelo astrônomo inglês John Michell, em 1784.

Figura 23- Infográfico Evolução Estelar.



Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node14.htm>

As supernovas são importantes para a produção de elementos mais pesados e por espalhá-los no espaço. Os elementos que a estrela sintetizou ao longo de sua vida e outros produzidos na sua morte constituem, de modo geral, a formação dos demais objetos astronômicos, como planetas, asteroides e até mesmo nós, seres humanos. O lugar comum que afirma poeticamente que somos poeira de estrelas é cientificamente verdadeiro.

6- COMO OS ASTRÔNOMOS SABEM TANTAS COISAS SOBRE AS ESTRELAS?

Frequentemente, pessoas com pouco conhecimento científico se perguntam como os cientistas conseguem descobrir tanta coisa sobre a natureza. Essas indagações ganham outros contornos quando o assunto é Astronomia, onde se costuma dizer que o laboratório é literalmente o universo. No caso das estrelas, a mais próxima da Terra está a 150 milhões de quilômetros, reinando no sistema que ganha seu nome e mantendo outros astros orbitando à sua volta. Foi dito que o Sol serve de base para entendermos como funcionam as outras estrelas, porém, mesmo estando próxima, os eventos que produz não nos permitem trazer um pedaço seu ou mesmo enviar uma sonda que adentre sua atmosfera e testemunhe em tempo real a fusão nuclear e a geração de energia que a mantém em funcionamento. Então, tudo passa de especulação? Talvez sim. Mas até as especulações podem ter base científica.

O que foi mostrado anteriormente, a Evolução Estelar, as previsões de suas mortes, bem como seus constituintes, foram propostos a partir de dados coletados durante décadas, sendo que a virada em relação aos mesmos se deu a partir do século XIX. Uma estrela emite luz, a mesma nos atingindo mais ou menos fortemente dependendo da distância que se encontra de nós. As investigações demonstraram que a luz emitida por elas carrega informações importantíssimas sobre sua composição, temperatura e outros dados que serviram de base para traçarmos o caminho histórico e conceitual mostrado nos capítulos anteriores.

Novamente, fica-se com a sensação que estudar as estrelas traz algo de poético. Seu brilho nos ensina muita coisa sobre seu comportamento.

6.1- A LUZ

As especulações sobre a natureza da luz datam da Grécia antiga. À época, uma das teorias que surgiram considerava a luz como pequenas partículas, fazendo parte da teoria atomística da matéria. Com poucas modificações, a teoria corpuscular da luz passou séculos sem muitos avanços, até que o árabe Alhazen a retomou, dando grandes contribuições ao que se costumou chamar de Óptica.

A natureza da luz daria um salto com a ideia de que a mesma era uma onda, sendo que fenômenos ligados a esse ente físico foram se mostrando idênticos aos que aconteciam com a luz. Um dos grandes expoentes nesse sentido foi Christian Huygens, que a tratava como uma sucessão de ondas que se propagam pelo espaço, chegando a demonstrar que na mesma havia reflexão, refração e se propagava em linha reta.

No entanto, um outro estudioso defendia a ideia corpuscular, tendo escrito um livro intitulado sugestivamente *Optiks* (Óptica). Isaac Newton, depois de fazer uma série de experimentos, conseguiu explicar ocorrências com a ideia de que a luz era composta por partículas, incluindo a refração da mesma por um prisma. Nesse trabalho, Newton provou que a luz do Sol era composta pelas cores do arco-íris, quando a fez passar por um prisma, obtendo essas cores projetadas em um anteparo. O experimento crucial foi, ao colocar um outro prisma diante da luz decomposta, recuperar a luz branca original. Ao conjunto de cores produzido pela decomposição da luz, chama-se de espectro.

A teoria ondulatória ficou eclipsada durante praticamente todo o século XVIII, esperando o século seguinte para ganhar a notoriedade necessária. Enquanto essas discussões passavam à margem, a instrumentação astronômica, que depende da luz, foi se aprimorando com lentes acopladas em telescópios cada vez maiores para a investigação do céu.

A verdade é que ambas as teorias, a ondulatória e a corpuscular, tinham limitações, mas o século XIX trouxe descobertas importantes em favor da primeira. Fenômenos como difração e interferência, observados por cientistas como Thomas Young, foram de fundamental importância. Tudo parecia caminhar para a vitória da luz como onda. Mas, que tipo de onda? Uma onda precisa de um meio, mas a luz parecia que não. Ou se tinha um, ainda não fora detectado, como era o caso do éter.

Mas foi James Clerk Maxwell, na segunda metade do século XIX, que pareceu por fim à discussão. Fundador e grande unificador da Teoria Eletromagnética Clássica (aquela que se estuda na Terceira Série do Ensino Médio), uniu vários resultados da eletricidade e do magnetismo com a óptica e demonstrou, entre outras coisas, que a luz era um tipo de onda, chamada de eletromagnética, com características como comprimento de onda e frequência. Seus trabalhos também previram a existência dessas ondas, bem como sua geração a partir da variação de campos elétricos e magnéticos em uma fonte. Embora quando da sua morte não tinha sido reconhecido,

suas previsões foram confirmadas por Heinrich Hertz, transformando o seu trabalho na base do que se chama de Eletromagnetismo. A velocidade das ondas previstas por Maxwell concordavam com as medidas da velocidade da luz, levando à conclusão de que a mesma é uma onda eletromagnética.



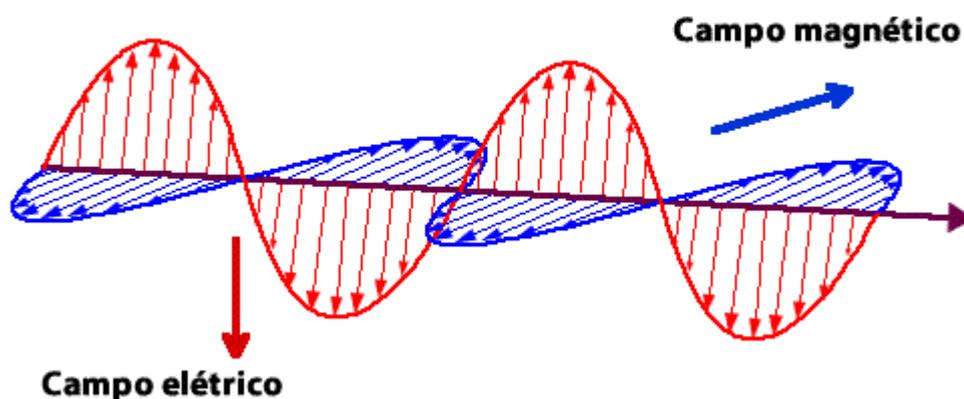
James Clerk Maxwell

Físico e matemático escocês nascido em 1831. Conhecido como fundador da Teoria Eletromagnética, unindo a eletricidade, o magnetismo e a óptica, com quatro belas equações que revolucionaram a física. Com as mesmas, previu a existência das ondas eletromagnéticas, sua teoria sendo capaz de provar que a luz é uma delas. Trabalhou também em Mecânica Estatística, desenvolvendo o que se chama de distribuição de Maxwell-Boltzmann. Considera-se

a Teoria Cinética dos Gases, na qual também se debruçou, fundamental no desenvolvimento posterior da física quântica. Faleceu em 1879.

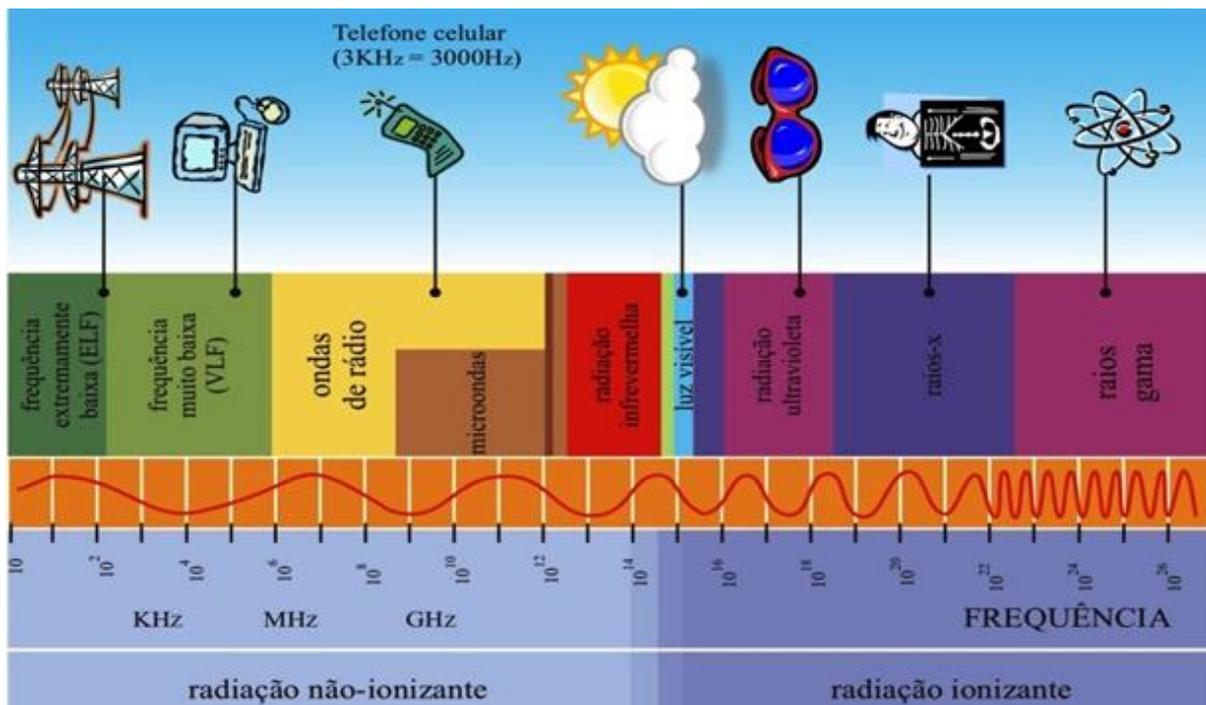
O que significa a luz como onda eletromagnética? Uma onda desse tipo é resultado da oscilação de uma carga elétrica, que faz variar seu campo elétrico e gera campo magnético, também oscilante. Essa sucessão de oscilações é a onda em questão em todas as direções.

Figura 24- Esquema básico da propagação de uma onda eletromagnética



O chamado espectro eletromagnético é o conjunto de ondas eletromagnéticas separadas pela sua frequência ou comprimento de onda. Cada uma carrega uma quantidade de energia, que cresce de acordo com sua frequência. A chamada luz visível compreende uma pequena parte do espectro e é chamada assim por que sensibiliza os nossos olhos. As duas ondas mais energéticas do espectro já foram apresentadas e são geradas em processos atômicos e nucleares, sendo, portanto, as mais perigosas para tecidos vivos.

Figura 25- Espectro eletromagnético.



Fonte: <https://www.resumoescolar.com.br/fisica/espectro-eletromagnetico/>

Mas o que é a luz de fato? A luz é uma onda eletromagnética. E também é outra coisa. Por ora, nos ateremos ao primeiro caso.

6.2- E A ASTRONOMIA?

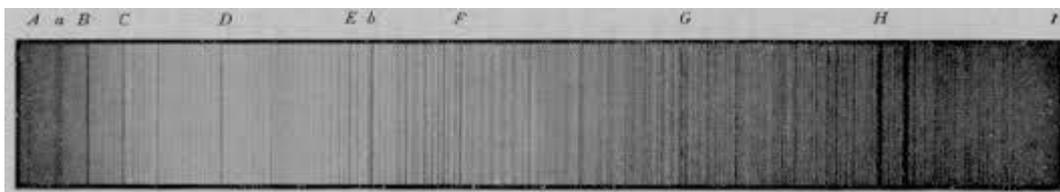
Newton havia observado a luz branca do Sol ser decomposta em suas cores e, para ele, comprovado que as cores não são modificações dessa luz, mas sim, fazia parte da mesma. Sem entrar no mérito sobre a metodologia aplicada por ele ser

adequada ou não, o fato é que suas descobertas tiveram um impacto significativo na confecção de telescópios, que foram melhorados e nas décadas seguintes, viriam a ampliar o conhecimento dos objetos celestes.

A observação feita por Newton do espectro solar parece ter sido responsável pela retomada das discussões sobre a natureza da luz, mas, no século seguinte, trouxe poucos avanços no entendimento da mesma. O inglês havia aberto o caminho que culminaria com o nascimento de uma área, a Espectroscopia, a análise da luz emitida por objetos ou substâncias. A Análise Espectral permitiu o nascimento da Astrofísica e particularmente da Física Estelar.

Em 1802, William H. Wollaston observou linhas escuras no espectro solar, imaginando que eram os limites das cores do arco-íris. Em 1819, Joseph von Fraunhofer, enquanto observava a dispersão da luz em vidros de diversos tipos, descobriu as mesmas linhas escuras no espectro superpostas às cores do arco-íris. Foram 576 linhas finas e negras ao todo, as quais foram denominadas com letras. Verificou posteriormente que a luz vinda de planetas possuía as mesmas linhas que o espectro solar, concluindo que os mesmos refletiam a luz do Sol. No mesmo conjunto de experimentos, verificou que a luz emitida por estrelas não possuía todas as mesmas linhas apresentados pelo Sol, ou seja, não tinham a mesma distribuição. Mas estavam lá.

Figura 26- Linhas de Fraunhofer.



Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/rad/espec/espec.htm>

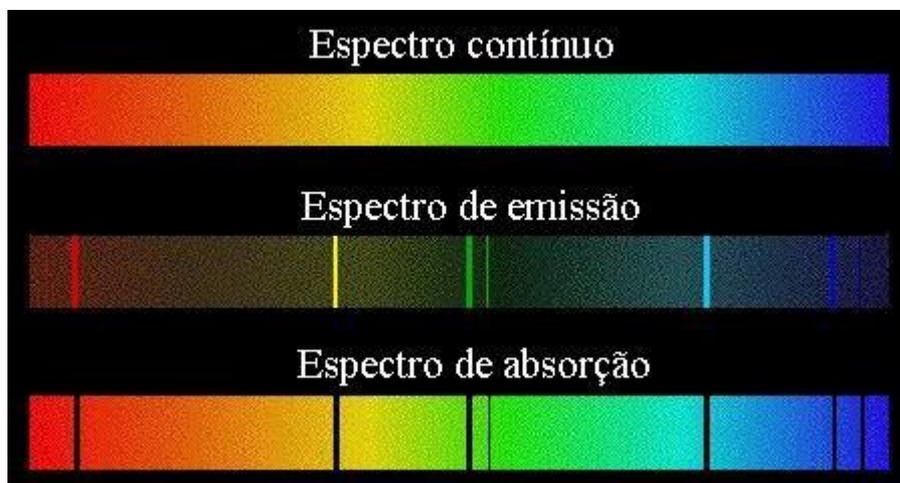
Ao que tudo indica, foi o próprio Fraunhofer o primeiro a usar o que se chama hoje de rede de difração para a análise espectral, substituindo o prisma nesse papel. É um dispositivo com uma rede de fios finos capaz de separar a luz em seus diferentes comprimentos de onda. Ao conjunto que faz essa análise (não só com redes de difração) dá-se o nome de espectroscópio.

Nos anos seguintes, poucos avanços significativos foram produzidos, ganhando destaque o Efeito Doppler-Fizeau, fenômeno que provoca a variação do

comprimento de onda da luz quando a fonte se desloca. Esse fenômeno foi usado para medir as velocidades relativas de estrelas, mostrando-se de extrema importância futura para a espectroscopia. Em seguida, vários cientistas, entre eles Leon Foucault e Anders Ångstron, verificaram que haviam linhas indicadas por Fraunhofer, que coincidia com uma linha específica do sódio, mas não tiraram grandes conclusões disso.

A espectroscopia enquanto disciplina parece ter nascido de fato com os trabalhos do químico Robert Wilhelm Bunsen e o físico Gustav Robert Kirchhoff, aperfeiçoando juntos um espectroscópio. Descobriram que uma substância quando incandescente produzia um espectro contínuo, sem raias. Os gases apresentavam um espectro com raias brilhantes (discreto) e a medida dos comprimentos de onda indicavam a sua natureza.

Figura 27- Tipos de espectro.



Fonte: Prado e Leite (2012).

Em linhas gerais, os dois cientistas descobriram que:

- 1- Um sólido, líquido ou gás muito denso, emitem radiação contínua;
- 2- Um gás incandescente, à baixa pressão, emite espectro com linhas brilhantes (emissão), sendo que o número e a posição das mesmas são propriedades específicas;
- 3- Se o espectro contínuo passar por um gás frio, este causa a presença de linhas escuras (absorção), sendo que a posição das mesmas depende dos elementos químicos presentes no gás.

Com o advento dessas leis, a Espectroscopia ganha contornos definitivos, pois o espectro emitido por uma substância é uma espécie de DNA da mesma. Isso possibilita a descoberta de novos elementos químicos e a identificação de vários outros na investigação astronômica. Com a técnica e as leis, foi possível verificar definitivamente que as linhas escuras no espectro solar era sódio, indicando a presença desse elemento na sua atmosfera. O Sol era feito de um gás muito denso ou sólido quente, segundo Kirchhoff.

Seguindo as linhas das descobertas, em 1862, Ångstron identifica hidrogênio no Sol, confirmando um resultado obtido em 1766 por Cavendish. Em 1868, Norman Lockyer descobriu uma linha estranha na parte amarela do mesmo espectro, identificando, assim, um novo elemento químico, o hélio. Somente 27 anos depois o hélio foi descoberto na Terra.

As linhas espectrais são explicadas pelo modelo atômico de Bohr, por conta dos orbitais dos elétrons. Quando um átomo fica excitado, os elétrons mudam de camada por absorverem energia. Como não podem permanecer em órbitas proibidas, voltam à sua órbita original, emitindo a energia que receberam na forma de luz (fótons) com valor específico.

6.3- RADIAÇÃO TÉRMICA

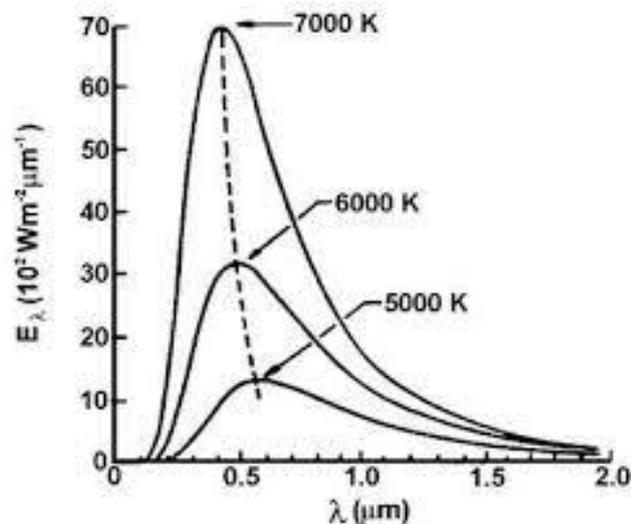
Anteriormente foi falado que substâncias incandescentes emitem um espectro contínuo, com cores características do material de que é feita. Kirchhoff era um estudioso dessas emissões, tendo se debruçado nisso em diversas ocasiões e, mais ou menos na mesma época, definiu um tipo de objeto específico, denominado corpo negro. Antes de entender seu conceito é preciso definir radiação térmica. É toda radiação emitida por um corpo devido exclusivamente à sua temperatura. As antigas lâmpadas incandescentes são um belo exemplo disso. O filamento de tungstênio se aquece tanto pela passagem de corrente elétrica que passa a emitir luz.

O que é então um corpo negro? É um objeto que absorve toda a radiação incidente sobre ele. Assim, emite um espectro de radiação que depende apenas da sua temperatura. O modelo usado por Kirchhoff usava um forno hipotético aquecido, com um pequeno orifício em uma das faces (uma caixa). Por esse orifício, uma

pequena quantidade de radiação poderia escapar e ser detectada. Esse modelo funciona bem na observação de alguns fenômenos, como no caso de uma barra metálica sendo aquecida, por exemplo. A temperatura da barra aumenta e, em determinado momento, torna-se incandescente. Observa-se que, permanecendo o aquecimento, a cor da barra vai variando, até atingir um tom branco-azulado. A luz é uma onda eletromagnética (pelo menos até o início do século XX) e a cor que apresenta depende da temperatura. No fim das contas, a frequência é proporcional à temperatura.

Se isso é verdade, ao estudar corpos com estas características, pensou-se em obter a distribuição espectral para a emissão do objeto em questão, para cada temperatura. Uma quantidade importante nesse estudo é a intensidade da radiação emitida, observando-se um pico de emissão em determinado comprimento de onda diferente, para uma dada temperatura. Por exemplo, para corpos abaixo de 600 °C, a emissão mais forte é no infravermelho. Entre 600 °C e 700 °C, a cor é vermelho escuro. Acima disso, a faixa muda para o vermelho claro, tendendo ao branco. Para cada faixa de temperatura dessas, a emissão máxima representa um comprimento de onda específico (ou frequência).

Figura 28- Curva de Corpo Negro para cada temperatura.



Fonte: <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-5.html>

Em pouco tempo, surgiram diversas curvas como esta, representando dados experimentais muito bem detalhados.

A emissão cresce de acordo com a temperatura e isto foi enunciado em 1879 por Josef Stefan e Ludwig Boltzmann, com a relação:

$$I = \sigma T^4$$

Na equação acima, σ representa a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^2$.

Experimentalmente, as curvas demonstram um deslocamento para o comprimento de onda na emissão máxima com a temperatura e a lei expressa é chamada de deslocamento de Wien.

$$\lambda_{max} \times T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ mK}.$$

As tentativas de se equacionar o problema como um todo se mostraram infrutíferas, pois nenhuma delas dava conta dos dados experimentais. Uma delas levava ao que ficou conhecido como catástrofe do ultravioleta, pois, para os comprimentos de onda grandes, a emissão tendia a um valor infinito. Isto não é observado. Para comprimentos de onda pequenos e grandes, a emissão cai para zero. Várias tentativas foram feitas no sentido de resolver esse problema levando em consideração as teorias vigentes na época. A física estava próxima de uma grande mudança de pensamento.

6.4- A SOLUÇÃO DADA POR PLANCK

Esse trabalho apresentou a Física Moderna quando falou sobre os modelos atômicos, que levou à Física Nuclear, permitindo entender o mecanismo de produção de energia nas estrelas. Mas o primeiro passo, a primeira ideia que levou a essa revolução, foi omitido. Costuma-se admitir que o início da Física Moderna se localiza no ano de 1900, quando Max Planck apresentou a solução para o problema da Radiação de Corpo Negro.

Depois de 6 anos de trabalho, Planck chegou a uma solução elegante admitindo que a oscilação dos átomos das paredes da cavidade do corpo teórico

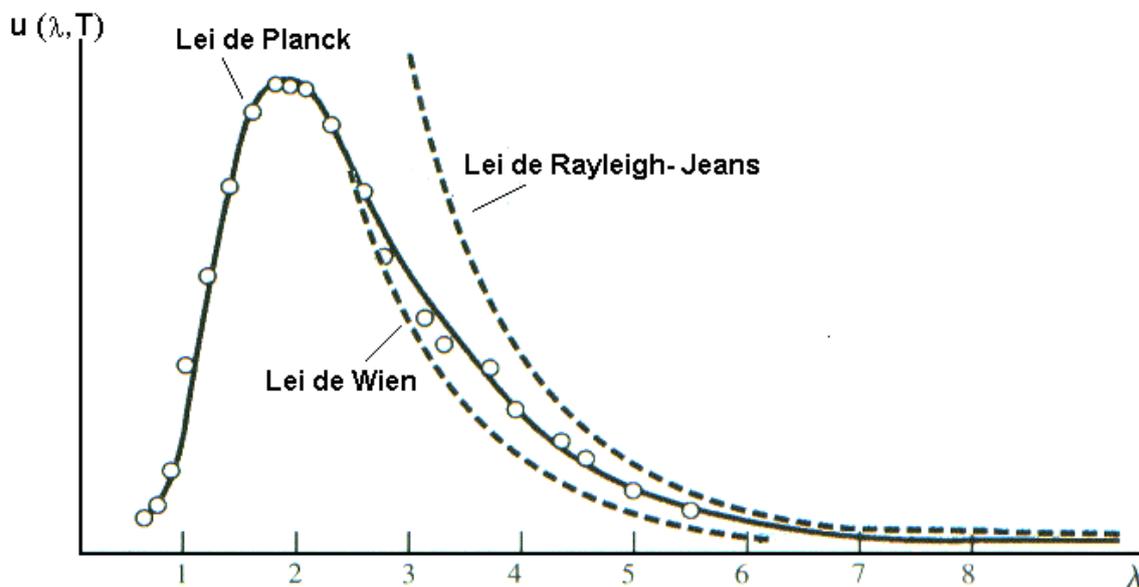
idealizado por Kirchhoff só permitia valores específicos de energia, ou seja, não era contínua. Assim, a mesma era quantizada, contrariando o que se pensava até àquela época, de que a energia era contínua. Os valores permitidos são dados pela equação:

$$E_n = nhf,$$

sendo n um inteiro positivo, f a frequência de oscilação e h uma nova constante da natureza, batizada de constante de Planck, cujo valor é $6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$.

Sua equação, que não vai ser mostrada aqui, concordava muito bem com as experiências, como no gráfico abaixo. A lei de Stefan-Boltzmann e a lei de deslocamento de Wien são obtidos diretamente da mesma.

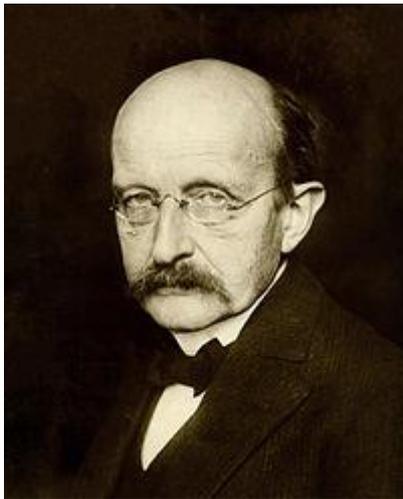
Figura 29- Comparação entre os dados e a Lei de Planck para a Radiação de Corpo Negro.



Fonte: <http://www.ensinoadistancia.pro.br/EaD/Fisica-4/Aulas/Aula-18/aula-18.html>

A despeito do sucesso de sua interpretação, a aceitação pela comunidade científica não foi imediata, pois encontrar um significado físico parecia impossível. A ideia de que a energia, mesmo que para aquele caso específico, aparecia em valores discretos, como pacotes (aliás, o termo “quântico” vem de “quantum”, que significa pacote) era contrária à chamada Física Clássica. Assim, parecia um contrassenso admitir isso, pois a energia não se apresentava “granulada”, mas poderia assumir

qualquer valor. É sempre assim quando se trata de uma nova ideia surgindo no meio de outras tão arraigadas e que, de certa forma, tinham levado as coisas muito longe conceitual e experimentalmente. Sentimentos como esse levou o Lord Kelvin a propagar que a Física tinha descoberto todos os segredos da natureza e os próximos passos seriam ajustes normais às teorias. O próprio Planck pareceu tratar sua nova ideia como um artifício matemático. Um cientista da velha guarda tinha dado o pontapé inicial para uma revolução sem precedentes no pensamento humano.



Max Karl Ernst Ludwig Planck

Físico alemão nascido em 1858, considerado um dos mais importantes do século XX. Tornou-se especialista em Termodinâmica, debruçando-se sobre o problema da radiação de corpo negro. Em dezembro de 1900, publicou um artigo no qual apresentou a solução para o problema, introduzindo o conceito de quantum, dando início a uma revolução no pensamento científico. Foi nomeado reitor da Universidade de Berlim em 1913. Em 1918, foi laureado com o Prêmio Nobel de Física. À época do nazismo, tentou convencer Hitler a dar liberdade aos cientistas judeus, sem sucesso. Faleceu em 1947.

6.5- CLASSIFICAÇÃO DAS ESTRELAS

Uma quantidade enorme de dados foi sendo obtida, em diversos lugares na Europa, usando os espectros estelares. Citar todos aqui seria uma tarefa monumental, fugindo ao escopo desta obra. Um astrônomo amador, em particular, foi de extrema importância nessa catalogação, William Huggins, que se tornou membro da Royal Society de Londres. Outro importante estudioso foi Ângelo Secchi, do Observatório do Vaticano. Ambos chegaram à conclusão de que nem todas as estrelas produzem espectro como o do Sol. Em 1863, Secchi fez a primeira classificação do espectro das estrelas, levando em consideração as linhas de absorção (escuras). Dividiu em classes: I para as brancas; II para as amarelas; III para vermelhas; IV para as vermelhas escuras.

A essa época, a fotografia como técnica de armazenamento da informação ainda não era muito usada. A foto do espectro solar foi obtida em 1842 e a primeira foto do espectro de outra estrela (que não o Sol) só foi feita por Henry Draper em 1872. Com a técnica fotográfica se espalhando, inúmeros dados foram sendo coletados, envolvendo os espectros de estrelas diversas.

No final do século XIX, Edward Charles Pickering, no Observatório de Harvard, começou uma série de coletas de espectros estelares, utilizando espectroscópios e fotografias. Em 1890 publicou uma classificação espectral de mais de 10000 estrelas (todas localizadas no Hemisfério Norte), classificação esta quase que exclusivamente feita por Williamina Fleming, que não era astrônoma, mas foi treinada para a tarefa. Annie Jump Cannon, em conjunto com Pickering, ampliaram essa classificação entre 1918 e 1924, no chamado Henry Draper Catalogue, com a classificação de mais de 225000 mil estrelas.

Essa é a classificação atual, baseada nas suas temperaturas e composições químicas. Toda estrela é, com boa aproximação, um corpo negro. Sua curva de irradiação em função do comprimento de onda, é semelhante à curva para este corpo. A emissão depende da temperatura e sua cor reflete isso.

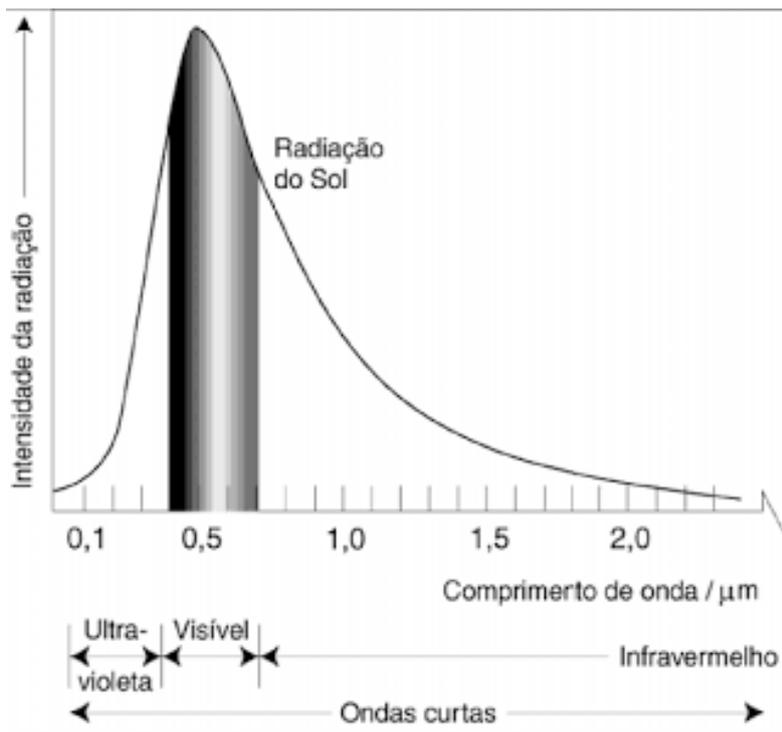


Annie Jump Cannon

Nasceu em 1863, em Dover, Estados Unidos. Estudou física e astronomia no Wellesley College, graduando-se em 1884. Em 1896 se tornou assistente no Observatório de Harvard, passando a integrar um grupo conhecido pejorativamente como “as mulheres de Pickering”, responsáveis por catalogar estrelas. Esse trabalho proporcionou a criação de uma classificação que é usada até hoje em astronomia, sendo que depois de 1924, tinha catalogado dezenas de milhares de estrelas até a magnitude 11, de observação bastante difícil. Descobriu 300 estrelas variáveis e 5 novas, explosão causada pela acreção de hidrogênio na superfície

de um anã branca. Foi a primeira mulher a se tornar uma oficial da American Astronomical Society. Somente em 1938 foi nomeada para a faculdade de Harvard. A cratera lunar Cannon foi nomeada em sua homenagem. Faleceu em 1941.

Figura 30- Curva de corpo negro para o Sol.



Adaptado de <http://qnint.sbg.org.br/novo/index.php?hash=tema.21>

O trabalho feito por Pickering e Cannon é conhecido como Classificação Espectral de Harvard, apresentando as características resumidas abaixo.

Figura 31- Classificação Espectral de Harvard e algumas características.

Tipo Esp.	Cor	T _{sup} (K)	Linhas proeminentes de absorção	Exemplos
O	Azul	30.000	He ionizado (fortes), elementos pesados ionizados (OIII, NIII, SiIV), fracas linhas de H	
B	Azulada	20.000	He neutro (moderadas), elementos pesados 1 vez ionizados	Rigel (B8)
A	Branca	10.000	He neutro (muito fracas), ionizados, H (fortes)	Vega (A0) Sirius (A1)
F	Amarelada	7.000	elementos pesados 1 vez ionizados, metais neutros (FeI, CaI), H (moderadas)	Canopus (F0)
G	Amarela	6.000	elementos pesados 1 vez ionizados, metais neutros, H (relativamente fracas)	Sol (G2) Alfa Cen (G2)
K	Laranja	4.000	elementos pesados 1 vez ionizados, metais neutros, H (fracas)	Arcturus (K2) Aldebaran (K5)
M	Vermelha	3.000	Átomos neutros (fortes), moleculares (moderadas), H (muito fracas)	Betelgeuse (M2)

Fonte: Jatenco-Pereira e Gregório-Hetem (s.d.)

Outra importante astrônoma nesse seguimento foi Cecília Payne, inglesa que viu nos Estados Unidos uma oportunidade para conseguir seu objetivo, que era obter um doutorado. Chegando em Harvard, começou uma série de estudos dos espectros estelares, chegando a determinar a proporção dos elementos químicos nas mesmas. Concluiu que os principais constituintes de uma estrela são o hidrogênio e o hélio. O astrônomo Henry Russell (o mesmo do Diagrama HR) discordou dos resultados, pois na época a proporção dos elementos químicos nas estrelas era considerada a mesma da Terra. Mas, anos depois, chegou à mesma conclusão, admitindo que a colega estava certa. Mesmo diante do próprio Russell creditando a descoberta à Payne, frequentemente ele aparece como o pesquisador que a fez.



Cecilia Payne-Gaposchkin

Nasceu em 1900 na Inglaterra, entrou em Cambridge em 1919. Assistiu uma palestra de Arthur Eddington sobre as expedições para confirmar a Teoria da Relatividade Geral de Einstein, o que a inspirou na escolha pela astronomia. Foi para os Estados Unidos continuar seus estudos, tendo recebido uma bolsa para estudar em Harvard em 1923, entrando para o observatório. Fez parte da equipe feminina de Pickering. Em seu Ph.D., estudou as atmosferas estelares e, usando vários resultados, estabeleceu que as mesmas são feitas basicamente de hidrogênio e hélio. Casou-se com o astrônomo soviético Sergey Gaposchkin, depois de conseguir uma colocação para ele em Harvard, pois o mesmo não pôde retornar à União Soviética por problemas políticos. Em 1956, Payne foi nomeada professora titular em Harvard, se aposentando em 1966. Faleceu em 1979.



TÓPICO ESPECIAL: AS MULHERES NA CIÊNCIA

A história humana é cheia de contradições e momentos nebulosos. Vivemos hoje em um mundo melhor, embora ainda se espere muita coisa para ser feita em diversos campos. A ciência, como parte da história, reflete ou acompanha esses momentos. Um desses capítulos foi a dificuldade que as mulheres sempre tiveram em se impor perante uma sociedade machista e excludente. Discutir esse tipo de assunto não é simplesmente levantar uma bandeira feminista, rótulo que entrou em moda nas últimas décadas associado às pessoas que defendem que as mulheres possam ocupar qualquer lugar e contrárias à ideia de que são inferiores a quem quer que seja. Para entender e atestar isso, basta evocar a própria ciência. Por que a mente de uma mulher seria inadequada para o trabalho científico?

Mas durante muitos anos, essa pareceu ser a regra. A educação das mulheres era feita em casa, em conventos ou instituições desse tipo e suas funções, quando ultrapassavam os limites da cozinha e dos cuidados com a família, era algo ligado a lecionar as séries iniciais. Isso não foi um problema só de alguns países, mas do mundo, que viu avanços científicos brilhantes, contudo permanecia com uma visão tacanha da sociedade. Um homem ou uma mulher de décadas atrás que fosse transportado para o século XXI iria ficar bestificado com as posições que as mulheres ocupam, embora reconhecesse certa semelhança em algumas situações, como o fato de o salário médio de uma mulher ainda ser inferior ao de um

homem, com a mesma função e nível de escolaridade.

É a ciência um trabalho masculino?

Em termos de dados, por exemplo, com relação à física no Brasil, a Sociedade Brasileira de Física (SBF) possui 27% de mulheres filiadas e a Sociedade Astronômica Brasileira (SAB), 29% (Menezes, 2017, p. 342). E o número de bolsistas ainda é menor, cerca de 10% em física e astronomia. Então, a resposta à pergunta é um sonoro sim. Nesse caso, é preciso cooptar mais mulheres para a carreira científica. Estudos demonstram que talvez os responsáveis sejam pais e professores nesse processo.

Os dados acima se referem ao Brasil, mas podem ser estendidos a outros lugares do mundo, com uma ou outra adaptação. O fato é que, historicamente, a presença de mulheres nas áreas científicas nunca foi substancial e quando aconteceu, muitas delas não receberam o devido reconhecimento. Um caso atípico foi o de Madame Curie, laureada com dois nobéis, de física e química. Especula-se que o reconhecimento talvez tenha sido feito pela presença do marido, embora tenha passado também por alguns percalços. Mas o que importa é que outras tantas, inclusive contemporâneas a ela, não receberam os mesmos louros.

Lise Meitner, por exemplo, foi a intérprete da fissão nuclear, colaborando em diversas descobertas importantes para a Física Nuclear. Quando do reconhecimento pelos resultados, nem mesmo seus colegas, como Otto Hahn, foram capazes de citá-la. Enfrentou

dificuldades para ingressar em uma universidade devido às leis vigentes na Áustria sobre o acesso de mulheres e quando começou sua carreira, trabalhou cinco anos sem remuneração, de 1907 a 1912. Foi reconhecida em 1966 quando recebeu o Prêmio Fermi, ao lado de Hahn e Fritz Strassmann, pela descoberta da fissão.

Outro caso emblemático é referente às “mulheres de Pickering” ou calculadoras de Harvard. Edward Pickering contratou uma equipe de mulheres para analisar chapas fotográficas de espectros e imagens de estrelas, tarefa que tinha começado com uma ex-empregada sua, Williamina Fleming. Pagando aproximadamente a metade do valor que pagava a um homem realizando a mesma atividade, essas mulheres começaram um processo sem precedentes na história da ciência. Horas e horas de trabalho, dias a fio, anos de análise, foram gerando catálogos importantes com a classificação espectral estelar. Destaque para Annie Jump Cannon, que desenvolveu a classificação espectral atual e Cecilia Payne, que demonstrou que as estrelas são basicamente feitas de hidrogênio

e hélio no seu Ph.D. Fica a curiosidade de que a classificação espectral não ganhou o nome de Cannon, mas sim, de Classificação Espectral de Harvard.



Nas últimas décadas, casos como esses estão sendo reavaliados por pesquisadores em história da ciência, na tentativa de mostrar à sociedade que a mulher contribuiu e contribui para a ciência, só faltando oportunidade para realizarem seus trabalhos. A ciência, assim como qualquer outra área, é sim lugar de mulher.

◆

6.6- INSTRUMENTOS DE OBSERVAÇÃO

Essa etapa do presente livro está tratando de como os astrônomos descobrem tantas coisas sobre o universo, em particular, sobre as estrelas, esses objetos que fascinam a muitos ao redor da Terra. Já foi apresentada a Espectroscopia que, aliada às investigações sobre a radiação térmica, permitiram e permitem conhecer a

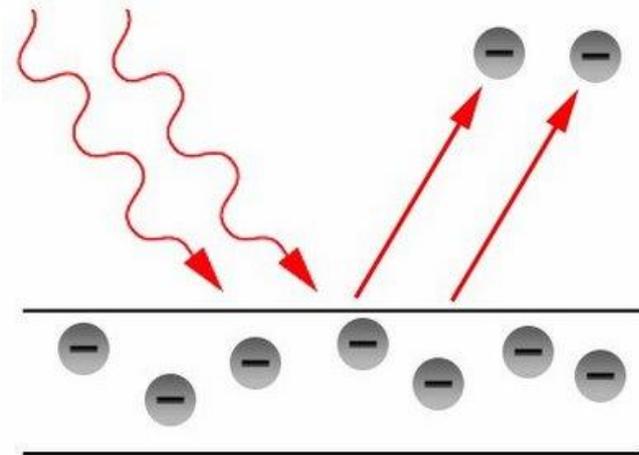
composição de diversos corpos celestes. A Análise Espectral tornou-se uma técnica de fundamental importância para o nascimento das Astrofísica.

Para atingir esse nível de conhecimento, o pensamento científico teve que dar um salto conceitual, com a ruptura provocada pela Física Moderna, especificamente a chamada Física Quântica. Organizemos as coisas: com a solução do problema do Corpo Negro dada por Planck, nasce a Física Quântica; a ideia de quantização é aplicada ao modelo atômico de Bohr, que inclui o núcleo descoberto por Rutherford anos antes; as investigações da Radioatividade e da Física Atômica levam ao surgimento da área conhecida como Física Nuclear, chave para o entendimento das estrelas; a Espectroscopia é uma área que surgiu no século XIX, portanto, antes da Física Moderna, mas foi com esta que ganhou forças e outros contornos. Porém, ficou um buraco.

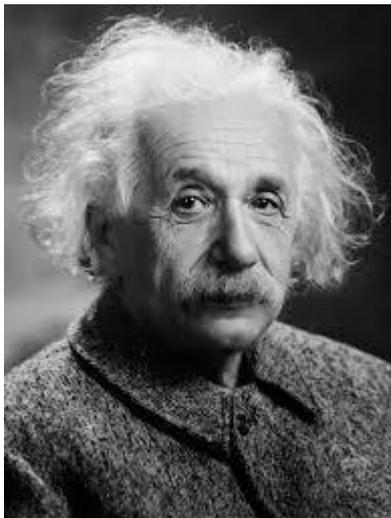
Max Planck, quando quantizou a energia de cavidade, não pareceu ter ficado satisfeito com sua proposta, seguindo o que parte dos cientistas da época acreditavam. Afinal, suas considerações teóricas estavam em conflito com as ideias vigentes. Quem foi o responsável, então, por demover os pares na aceitação de que a natureza se comportava realmente daquele jeito? Bem, claro que a pergunta acima carrega um peso enorme, ou melhor, o cientista que executou a tarefa foi quem comprou a ideia de que os fenômenos são o que são e não se comportam como os seres humanos determinam.

Albert Einstein e sua mente privilegiada trouxe certo frescor ao mundo quântico que acabara de nascer. Debruçou-se sobre um problema descoberto no século XIX (esse século parece ter sido fundamental para a ruptura proporcionada pela Física Moderna). Em 1887 Heinrich Hertz tentava produzir as ondas eletromagnéticas previstas por James Clerk Maxwell, verificando que apareciam mais centelhas entre os eletrodos quando fazia incidir luz sobre eles. Phillip Lenard investigou ainda mais o problema e descobriu que, quando mais intensa a luz, mais elétrons avançavam do metal, mas isso acontecia somente com luz acima de certa frequência. O fenômeno ficou conhecido como Efeito Fotoelétrico, consistindo na ejeção de elétrons de um metal quando da incidência de luz de uma certa frequência.

Figura 32- Esquema simplificado do efeito fotoelétrico.



A Física Clássica não conseguia explicar o fenômeno, sendo um dos problemas o fato de que, com o aumento da intensidade da luz, deveria aumentar a energia com que os elétrons eram ejetados. E deveria acontecer para qualquer frequência. Mas isso não era observado. Os cientistas tinham um pequeno problema ainda sem solução.



Albert Einstein

Físico alemão nascido em 1879, desenvolveu as teorias da relatividade restrita e geral, ajudou a estabelecer a física quântica, entre outras contribuições. Ganhador do Prêmio Nobel de Física de 1921 pela explicação do efeito fotoelétrico. Em 1905, considerado os anos milagrosos, Einstein publicou uma série de artigos sobre temas diversos. Apresentou ao mundo a desconcertante Teoria da Relatividade Restrita, onde demonstrou que a velocidade da luz é uma constante e que por conta disso, fenômenos nada intuitivos acontecem com partículas que andam com velocidades próximas a mesma. Foi nesse mesmo ano que escreveu o artigo sobre o efeito fotoelétrico. Também se debruçou sobre o movimento browniano, bem como o estabelecimento da relação entre a massa e a energia, em uma famosa equação. Anos depois, generalizou a Teoria da Relatividade, também provocando discussões a respeito de suas conclusões. Tornou-se celebridade internacional e passou a viajar o mundo inteiro dando palestras. Faleceu em

1955. Em 1999 foi considerado por vários cientistas o físico mais importante de todos os tempos. Sua biografia é tão extensa que não cabe em poucas palavras.

Debruçando-se sobre ele, Albert Einstein partiu das ideias de Planck para resolvê-lo. Propôs que, se a luz incidente fosse tratada como partícula, o fenômeno seria visto como uma colisão entre partículas de luz e elétrons. Assim, toda a energia da partícula hipotética é transferida para o elétron, que ganha energia cinética. Chamando de ϕ a energia necessária para arrancar os elétrons do metal (função trabalho) e a energia cinética adquirida por eles de E_c , a equação para o efeito fotoelétrico é dada por

$$E_c = E - \phi$$

O termo E representa a energia das partículas de luz, batizadas de fótons pelo físico Gilbert Lewis, em 1926. Einstein chamou cada fóton de *quantum* de luz (fazendo referência aos trabalhos de Planck). Essa energia depende apenas da frequência e da constante de Planck, dada pela expressão

$$E = hf,$$

sendo f a frequência da luz. Assim, quanto maior a frequência da luz, maior a energia dos fótons. Sua teoria explicou com muito sucesso os dados experimentais. A energia dos elétrons emitidos depende da frequência dos fótons e da função trabalho do metal.

Einstein ampliou a quantização proposta por Planck, na medida em que considerou a própria energia radiante como sendo formada por partículas, com energia definida. Isso foi tão novo na época, que grande parte dos cientistas não a aceitou. A mudança veio quando, dois anos mais tarde, publicou um outro artigo discutindo o calor específico dos sólidos à baixas temperaturas, adotando o modelo de vibração quantizada de Planck. As previsões foram confirmadas pela experimentação. Depois da realização do I Conselho Solvay, na Bélgica em 1911, os cientistas participantes discutiram essas e outras ideias, tornando a nova física algo que pudesse ser desenvolvido futuramente.

Albert Einstein ganhou o Prêmio Nobel de Física em 1921 pela explicação do efeito fotoelétrico. Em 1916, o físico norte-americano Robert Millikan comprovou

experimentalmente as hipóteses de Einstein, obtendo a medida da constante de Planck. Por esse feito, ele também recebeu o Prêmio Nobel de Física, agora em 1923.

O efeito fotoelétrico hoje tem inúmeras aplicações, como a ativação da iluminação pública e controle do tempo de exposição da luz em câmeras fotográficas. Esta última aplicação interessa a este livro em particular, pois foi e é de fundamental importância para a Astronomia. A revolução que se seguiria após as propostas de Einstein e Planck ainda dá frutos teóricos, experimentais e tecnológicos, que mudaram para sempre o entendimento do ser humano sobre a natureza.

Diante dessas descobertas, como fica a natureza da luz? A luz é uma onda, mas também é uma partícula. Experimentalmente, ela pode comportar-se como uma ou como outra coisa. Desconcertante essa possibilidade, mas há evidências de que tudo seja desse jeito. A Física Quântica precisa desses modelos para descrever suas observações e ambos funcionam muito bem, o que era impensável com a Física Clássica, que admitia a luz e os objetos como tendo uma natureza só. Os avanços promovidos pelas novas ideias apenas corroboram uma teoria já bem estabelecida.

6.7- COMO O EFEITO FOTOELÉTRICO INFLUENCIOU AS OBSERVAÇÕES ASTRONÔMICAS?

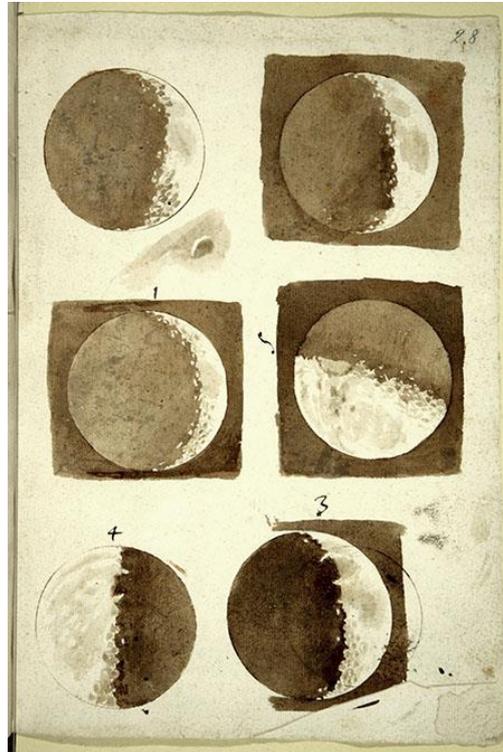
Desde que a humanidade se encantou pelos céus e dominou o processo de registro do que via, mesmo que de forma rudimentar, o resultado dessas observações pode ser visto espalhado pelo mundo em cavernas e outros lugares. Alguns dos registros mais comuns e mais interessantes encontrados pelos especialistas tem relação direta com a Astronomia, ou seja, contém imagens do céu noturno recheado de constelações, etc.

Com o domínio da escrita, as civilizações foram aprimorando a forma como observavam a natureza, desenvolvendo técnicas especiais para alcançar objetivos diversos. A astronomia, como uma ciência antiga, foi bastante beneficiada por isso. O instrumento principal usado durante séculos foi o olho humano. Mas essas observações precisavam de registro, para que pudessem ser analisadas por outros, por exemplo. E não tinha nada melhor do que os desenhos. Durante muito tempo,

todo astrônomo era também um artista. E foi assim até a segunda metade do século XIX, quando outra técnica foi introduzida.

Mesmo quando Galileu, em 1609, introduziu o uso do telescópio para observar os astros, o método de registro continuou o mesmo.

Figura 33- Desenhos da Lua feitos por Galileu em 1609.



Fonte: <http://www.lna.br/~museuvirtual/evolucao.html>

Depois da revolução de Isaac Newton com o aperfeiçoamento do telescópio refletor, ampliando o raio de visão humano e permitindo, nos séculos seguintes, avanços significativos em novas descobertas sobre o universo, ainda os desenhos eram a única forma de perpetuar os eventos. Então, os astrônomos de modo geral tinham que desenvolver habilidades cada vez mais precisas para desenhar com mais alto nível de fidedignidade o que observavam.

Como garantir que esses desenhos representavam os eventos tal qual eram de fato? Não é preciso ser especialista para saber que não há garantia alguma, mesmo o astrônomo em questão sendo talentoso na arte de desenhar. Precisava-se de um método mais eficaz de registro. Com a invenção da fotografia, a sua aplicabilidade começou a ser explorada em Astronomia. A primeira imagem que chegou até nós é um registro da Lua feito por John Whipple. Um dos pioneiros do uso

da fotografia (não na Astronomia) foi Joseph Niépce que, em 1842, fez o registro de uma imagem em uma superfície tratada quimicamente.

Figura 34- Imagem da Lua obtida por Whipple.



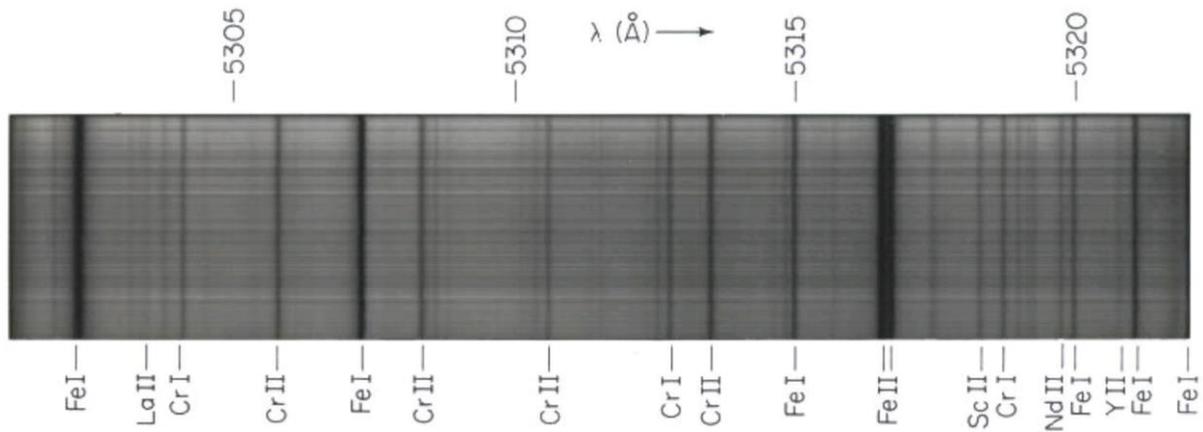
Fonte: <http://www.lna.br/~museuvirtual/evolucao.html#primordios>

Essa técnica permitiu os astrônomos avançarem em suas investigações, pois passaram a analisar as imagens obtidas em outros momentos, inclusive promovendo a colaboração entre especialistas que não participaram diretamente da observação.

Em verdade, o olho humano é mais eficiente do que a fotografia. A eficiência quântica é a medida da fração de radiação registrada por um detector: o olho humano tem eficiência quântica de 10%, enquanto que o filme fotográfico, de no máximo 3%. Mas uma vantagem da fotografia é o tempo de exposição. O olho humano registra a luz em aproximadamente 100 milissegundos (0,1 s), enquanto uma chapa pode ser exposta por horas. O fato é que a fotografia promoveu avanços importantes e um dos resultados mais interessantes foi que, em 1925, Edwin Hubble ampliou a nossa imagem do universo fazendo medidas fotométricas precisas da então nebulosa de Andrômeda, constatando que a mesma é uma galáxia maior do que a nossa.

Na área da espectroscopia, a revolução não foi menor. Os espectros antes eram desenhados à mão. Os espectros estelares passaram a ser fotografados, o que possibilitou a análise mais detalhada dos mesmos. A chapa era colocada no plano focal do espectroscópio.

Figura 35- Espectro do Sol mostrando as diversas linhas de absorção.



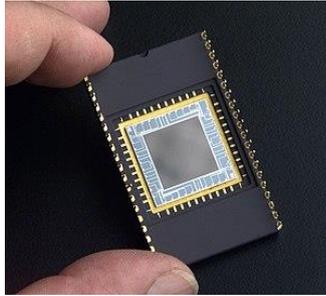
Fonte: Picazzio *et.al.* (2011).

Chegou, então, em meados do século XX, a revolução eletrônica, especificamente depois da Segunda Guerra Mundial. Tudo isso se deve à ramificação das aplicações do efeito fotoelétrico. O transistor foi inventado em 1948 por John Bardeen, Walter H. Brattain e William Shockley, dispositivo que serve como amplificador eletrônico. Seus autores ganharam o Prêmio Nobel de Física em 1956.

Mas foi o surgimento do Dispositivo de Carga Acoplada (Charge-Coupled Device) ou CCD, em 1969, que viria, anos mais tarde, a mudar mais uma vez o registro astronômico. Seus desenvolvedores foram Willard Boyle e George Smith, ambos ganhadores do Prêmio Nobel de Física de 2009. Esse hiato grande entre o seu desenvolvimento e o reconhecimento da sua importância em diversas áreas é justamente por que as décadas seguintes viram florescer a microeletrônica, não somente afetando áreas científicas, mas também diretamente a sociedade.

Basicamente um CCD funciona com uma matriz de fotoelementos, cada elemento denominado de *pixel*. O pixel acumula carga proporcionalmente à luz incidente, em linhas gerais, produzindo uma imagem eletrônica.

Figura 36- Dispositivo de Carga Acoplada (CCD).



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Dispositivo_de_carga_acoplada

O CCD foi substituindo a fotografia convencional na Astronomia, até que na década de 1980 ocorreu a mudança definitiva. Em termos técnicos, a popularização do dispositivo se deu principalmente pela eficiência quântica, que, dependendo da faixa de frequência, chega a 90% da luz incidente. Outro motivo é que as imagens digitais podem ser comprimidas e enviadas para estudo em diversos lugares sem perda de resolução. Em comparação, a imagem obtida com um CCD permite o registro de objetos milhões de vezes mais fracos que os visíveis a olho nu, através do ajuste do tempo de exposição.

O Dispositivo de Carga Acoplada rompeu os muros da Astronomia e hoje é encontrado em câmeras digitais e nos *smartphones*, sendo usado no dia a dia de diversos cidadãos pelo mundo.

7- COMO FICAMOS?

Depois de uma viagem histórica e conceitual, agora estamos compreendendo um pouco mais sobre a natureza. A física é um campo científico rico em descobertas, apresentando alta capacidade para conversar com outras áreas. Embora a afirmativa pareça arrogante, a verdade é que o pensamento humano enquanto representação da realidade foi moldado por suas assertivas. O caso da mecânica newtoniana, incluindo a Astronomia desenvolvida a partir daí, é um belo exemplo disso. A última grande revolução ocorrida no século XX foi a promovida pela Física Moderna, em particular, as ideias do mundo quântico. Não somente em termos de ciência, mas a própria filosofia e percepção da realidade, foram profundamente reavaliados depois das teorias modernas.

Deixando de lado as questões filosóficas, tentou-se demonstrar que a Astronomia avançou bastante com o advento da Física Moderna, embora tenha havido um recorte importante sem a inclusão de todos os pormenores. O objetivo foi abordar questões conceituais das ideias iniciais da grande revolução, costurando com informações históricas, na medida em que perguntas referentes às estrelas foram sendo colocadas pelos cientistas.

As estrelas despertam o interesse de muitas pessoas, bem como a Física Moderna. Nas últimas décadas, o ensino de física no Brasil vem sendo alvo de muitas discussões, a maioria delas fazendo referência à introdução de suas ideias mais recentes no ensino médio. Ao juntar as duas áreas no texto, o mesmo pode servir de base para esse objetivo, embora o tema não tenha sido esgotado. Oriundo de um trabalho de pesquisa do Mestrado Profissional em Astronomia da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), optou-se por deixar de fora desse livro as atividades realizadas com os estudantes, dando liberdade a professores e alunos usarem-no da forma que lhe aprouver. A relação entre Física e Astronomia ficou evidente nesse sentido, deixando claro que suas aplicações se estendem além dos campos onde inicialmente surgiram, com forte impacto nas nossas vidas, como é o caso da Física Nuclear e do Efeito Fotoelétrico.

Fazendo esse tipo de correlação, espera-se que os possíveis leitores compreendam o mundo a sua volta e principalmente, possam enxergar a ciência como parte da cultura humana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERY, M. A.; MICHELETTO, N.; SÉRIO, T. M. P.; RUBANO, D. R.; MOROZ, M.; PEREIRA, M. E.; GIOIA, S. R.; GIANFALDONI, M.; SAVIOLI, M. R.; ZANOTTO, M. L. **Para compreender a ciência: uma perspectiva histórica**. 13ª ed. Rio de Janeiro: Garamond; São Paulo: EDUC, 2004.

CAPOZZOLI, U.; DAMINELI, A.; MOLINA, E. C.; PICAZZIO, E.; NETO, G. B. L.; HETEM, J. G.; COSTA, R.; JATENCO, V.; MACIEL, W. **O céu que nos envolve: Introdução à astronomia para educadores e iniciantes**. São Paulo. Odysseus. 2011.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 6ª ed. Editora Campus, Rio de Janeiro.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Lições de Física de Feynman**. Tradução: Adriana Válio Roque da Silva, Kaline Rabelo Coutinho. Porto Alegre. Bookman, 2008.

GREGORIO-HETEM, J.; JATENCO-PEREIRA, V.; OLIVEIRA, C. M. **Fundamentos de Astronomia**. Apostila, IAG-USP, Departamento de Astronomia, s. d.

MACIEL, W. J. **Introdução à Estrutura e Evolução Estelar**. São Paulo. EDUSP. 1999.

MACIEL, W. J. **A Formação dos Elementos Químicos**. *Revista USP*, São Paulo, n. 62, p. 66-73, julho/agosto, 2004.

MARTINS, R. A. **Becquerel e a descoberta da radioatividade: uma análise crítica**. Campina Grande: EDUEPB/Livraria da Física, 2012.

MENEZES, D. P. **Mulheres na Física: A realidade em Dados**. *Caderno brasileiro de Ensino de Física*, v. 34, n. 2, p. 341-343, ago. 2017.

MIZRAHI, SALOMON. **Mulheres na Física: Lise Meitner**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 4, p. 491-493, 2005.

MOREIRA, M. A. **O Modelo Padrão da Física de Partículas**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 1, 1306, 2009.

OLIVEIRA, I. S. **Física Moderna: para iniciados, interessados e aficionados**. 2ª ed. Editora Livraria da Física. São Paulo, 2009.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. 2ª ed. Livraria da Física, 2004.

PERUZZO, J.; POTTKER, W. E.; PRADO, T. G. **Física Moderna e Contemporânea: das teorias quânticas e relativísticas às fronteiras da física**. Vol. 1 e 2. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2013.

PIETROCOLA, M.; POGIBIN, A.; ANDRADE, R.; ROMERO, T. R. **Física em contextos: pessoal, social e histórico**. v. 3. São Paulo: Editora FTD, 2010.

PIZA, A. F. R. T. **Física Nuclear: conteúdo, contatos imediatos e aura**. *Revista USP*, São Paulo, n. 66, p. 62-73, julho/agosto, 2005.

PRADO, R. J.; LEITE, D. O. **Espectroscopia no Infravermelho: Uma Apresentação para o Ensino Médio**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, n. 2, 2504, 2012.

ROSA, C. A. P. **História da Ciência: Da Antiguidade ao Renascimento Científico**. 2ª ed. Brasília. FUNAG, 2012.

ROSA, C. A. P. **História da Ciência: O Pensamento Científico e a Ciência no Século XIX**. 2ª ed. Brasília. FUNAG, 2012.

ROSA, C. A. P. **História da Ciência: A Ciência e o Triunfo do Pensamento Científico no Mundo Contemporâneo**. 2ª ed. Brasília. FUNAG, 2012.

NA INTERNET

https://pt.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:P%C3%A1gina_principal

Observatório Nacional <http://www.on.br/index.php/pt-br/>

Museu de Astronomia e Ciências Afins <http://www.mast.br/pt-br/>

Astronomia e Astrofísica <http://astro.if.ufrgs.br/>

<http://www.astrosurf.com/>

Enciclopédia Britânica <https://www.britannica.com/>

Laboratório Nacional de Astrofísica <http://Inapadrao.lna.br/>

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP)
<http://www.iag.usp.br/>