



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE FÍSICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE

FÍSICA

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

**FÍSICA DOS GASES IONIZADOS: UMA PROPOSTA PARA INTRODUÇÃO DE
CONCEITOS E EXPERIMENTOS PARA ESTUDO DO QUARTO ESTADO DA
MATÉRIA - O PLASMA NO ENSINO MÉDIO.**

Rodrigo Pacios de Andrade

**BRASÍLIA – DF
2017**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENSINO DE
FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA**

**FÍSICA DOS GASES IONIZADOS: UMA PROPOSTA PARA INTRODUÇÃO DE
CONCEITOS E EXPERIMENTOS PARA ESTUDO DO QUARTO ESTADO DA
MATÉRIA - O PLASMA NO ENSINO MÉDIO.**

Rodrigo Pacios de Andrade

Dissertação realizada sob orientação do Prof. José Leonardo Ferreira, a ser apresentada à banca examinadora como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Ensino de Física - Área de Concentração: Atualização do currículo de física no Ensino Médio, pelo Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade de Brasília.

**BRASÍLIA – DF
2017**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Rodrigo Pacios de Andrade

**FÍSICA DOS GASES IONIZADOS: UMA PROPOSTA PARA INTRODUÇÃO DE
CONCEITOS E EXPERIMENTOS PARA ESTUDO DO QUARTO ESTADO DA
MATÉRIA - O PLASMA NO ENSINO MÉDIO.**

Dissertação apresentada à banca examinadora como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Ensino de Física – Área de Concentração “Atualização do currículo de física no Ensino Médio” pelo Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade de Brasília.

Aprovada em __/__/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Leonardo Ferreira
(Presidente - IF UnB)

Prof. Dr. Ivan Soares Ferreira
(Membro interno vinculado ao programa – IF UnB)

Prof. Dr. Ronni Geraldo Gomes de Amorim
(Membro interno vinculado ao programa – FGA UnB)

Prof. Dr. Diego Oliveira Nolasco da Silva
(Membro externo não vinculado ao programa – UCB)

FICHA CATALOGRÁFICA

de ANDRADE, Rodrigo Pacios.

Física- Física Dos Gases Ionizados: Uma Proposta Para Introdução De Conceitos E Experimentos Para Estudo Do Quarto Estado Da Matéria - O Plasma No Ensino Médio. / UnB, Brasília, 2017. 122 P.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Instituto de Física.

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

1. Educação em Ciências. 2. Ciências – Estudo e Ensino. 3.Física 4. Ensino de Ciências – Pesquisa – Universidade de Brasília.

Dedicatória

À minha esposa, Isabel, inesgotável fonte de força e inspiração.

Agradecimentos

À Deus pela vida e seu sentido.

À Isabel pelo amor, paciência e incentivo.

Ao dedicado e imprescindível Prof. Dr. José Leonardo Ferreira.

À minha mãe, Amábile, por sempre acreditar em mim.

À meu pai, Milso, pelo apoio incondicional.

Ao Rafael e à Pablina.

Ao Gustavo, Rendisley, Ronni, Pedroza, Ivan, e Diego.

Aos professores do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, pólo UnB.

À Sociedade Brasileira de Física.

Aos meus alunos do colégio Dromos e da Escola Americana de Brasília.

“Our job is to help kids exceed what they think they can do.”
John Hattie

RESUMO

PÁCIOS DE ANDRADE, Rodrigo. **Física dos gases ionizados: uma proposta para introdução de conceitos e experimentos para estudo do quarto estado da matéria – o plasma no Ensino Médio.** 2017.

Dissertação (Mestrado). Brasília : Universidade de Brasília, julho/2017.

Neste trabalho, apresentamos uma proposta para inserção do estudo do Estado Plasma no Ensino Médio, com o propósito de atualização do currículo de física brasileiro. Para isso, lançamos mão dos conhecimentos comumente ensinados e, quando uma inovação se fez imperativa, procuramos demonstrar que existe uma simplificação coerente para o conteúdo, para que seja apresentada na mesma linguagem e formato pedagógico adotado para os outros estados físicos. A necessidade e importância dessa atualização é amplamente evidenciada, pelo que argumentamos como ela se encaixa na visão do futuro daquela ciência no Brasil, de acordo com o Ministério da Educação, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Sociedade Brasileira de Física (SBF). Incluídos na proposta, estão: (a) um método para anexação da transição de fase gás-plasma; (b) uma sugestão para cálculo da temperatura de ionização (em um plasma ideal); (c) um exemplo de aplicação contextualizada no espectrômetro de massa, por meio de roteiros de aulas planejadas de conformidade com a teoria de Robert M. Gagné, para a introdução qualitativa do conteúdo ao aluno; (d) dois experimentos sugeridos para a visualização do comportamento da matéria em estado plasma; e (e) um website para suporte à professor e aluno para implementação dos temas deste trabalho. Todas as mudanças apresentadas foram pensadas de modo a minimizar o impacto no banco de horas das escolas. Apesar de não terem sido possíveis a aplicação e a avaliação completas desse trabalho, no tempo de sua produção, incluímos um questionário aplicado antes e após aulas por nós ministradas, com vistas a verificação da efetividade da aprendizagem, o qual nos proporcionou resultados encorajadores.

Palavras-chave: Estado plasma, Gás ionizado, Eventos de instrução, Espectrômetro de massa, Transição de fase, Atualização do currículo de física no Ensino Médio.

ABSTRACT

PACIOS DE ANDRADE, Rodrigo. **Physics of ionized gases: a proposal to introduce concepts and experiments to study fourth state of matter – plasma in High School.** 2017.

Dissertation (Master's degree). University of Brasilia. julho./2017.

In this paper, we present a proposal for inclusion of the study of the state Plasma in High School, with the purpose of updating the Brazilian Physics curriculum. For this purpose, we used the commonly taught knowledge and, when an innovation became imperative, we try to demonstrate that there is a consistent simplification for the content so that it appears in the same language and teaching format adopted for other states of matter. The need and importance of this update is widely evident, thus we argue how it fits into the vision of the future of that science in Brazil, according to the Ministry of Education, the Higher Education Personnel Improvement Coordination (CAPES) and the Brazilian Physics Society (SBF). Included in the proposal, are: (a) a method for attaching the gas-plasma phase transition; (b) a suggestion for calculating ionization temperature (in an ideal plasma); (c) an example of contextualized application in the mass spectrometer, through lessons planned according to the theory of Robert M. Gagné, for the qualitative introduction of the subject to the student; (d) two experiments suggested to visualize the behavior of matter in the Plasma state; and (e) a website to support teacher and student in the implementation of the themes of this paper. All changes offered were designed to minimize the impact on class time required of schools. Despite not having been possible to apply a complete implementation and evaluation of this work during the timeframe of the it's production, we have included a questionnaire administered before and after the class for us given, aiming to verify the effectiveness of learning happened, which gave us promising results.

Keywords: Plasma State, Ionized gas, Events of learning, Mass Spectrometer, Phase transition, High School Physics Curriculum update.

Lista de Figuras

- Figura 1: Tubo de Geissler francês de 1870. p. 22
- Figura 2: Sir William Crookes. p. 23
- Figura 3: J. J. Thomson. p. 24
- Figura 4: Ilustração de Thomson de um tubo de Crookes. p. 24
- Figura 5: Espectrômetro de massa. p. 25
- Figura 6: Joseph Larmor. p. 26
- Figura 7: Irving Langmuir. p. 27
- Figura 8: Dupla sonda de Langmuir em um tubo de descarga. p. 28
- Figura 9: Acelerador Linear do laboratório Australian Synchrotron, Clayton, Victoria. p. 29
- Figura 10: Lev Landau. p. 30
- Figura 11: Hannes Alfvén. p. 31
- Figura 12: Artigo de Alfvén publicado em Setembro de 1986 por *Physics Today*. p. 32
- Figura 13: Cinturões de Van Allen. p. 32
- Figura 14: *Wafers* de processadores. p. 34
- Figura 15: Tokamak NSTX, do *Princeton Plasma Physics Laboratory*. p. 35
- Figura 16: Curva de aquecimento e resfriamento. p. 37
- Figura 17: Visão microscópica dos estados da matéria 1. p. 38
- Figura 18: Visão microscópica dos estados da matéria 2. p. 38
- Figura 19: Os vários tipos de plasma. p. 42
- Figura 20: Os quatro estados clássicos da matéria. p. 49.
- Figura 21: Comparação gás-plasma. p. 50.
- Figura 22: Fases da matéria versus temperatura. p. 50.
- Figura 23: Temperaturas características da matéria em estado plasma, dadas em eV. p. 56.
- Figura 24: Blindagem de Debye. p. 57.
- Figura 25: Nove dias em um ano, filme soviético de 1962. p. 59.
- Figura 26: Aston e a terceira versão de seu espectrômetro de massa. p. 61.
- Figura 27: Esquema do espectrômetro de massa de Aston. p. 62.
- Figura 28: Calculadora de velocidade molecular. p. 66.
- Figura 29: Desenho do inventor do ciclotron Ernest O. Lawrence na sua patente. p. 67.

- Figura 30: Trajetória em hélice de um íon em um campo magnético e um campo elétrico. p. 69.
- Figura 31: Reações termonucleares. p. 70.
- Figura 32: Interior do JET. p. 70.
- Figura 33: Os campos magnéticos em um tokamak. p. 71.
- Figura 34: Espectrômetro de massa utilizando o raio de Larmor. p. 72.
- Figura 35: Seletor de velocidades. p. 73.
- Figura 36: Tubo de descargas remotamente controlado do PPPL. p. 75.
- Figura 37: Fim do workshop sobre plasmas na Escola Americana de Brasília. p. 76.
- Figura 38: As estruturas postuladas da aprendizagem cognitiva e os processos associados a eles. p. 77.
- Figura 39: Plano de aula de um professor de acordo com a teoria de Gagné. p. 79.
- Figura 40: Teste diagnóstico aplicado antes e depois das aulas. p. 83.
- Figura 41: Planejamento das aulas. p. 86.
- Figura 42: Website do editor de texto Atom. p. 88.
- Figura 43: A estrutura Jekyll. p. 89.
- Figura 44: A estrutura Bootstrap. p. 90.
- Figura 45: Site da plataforma GitHub. p. 90.
- Figura 46: Distribuição de Maxwell-Boltzmann para gases nobres. p. 122

Lista de Gráficos

Gráfico 1: número de íons calculado pela equação de Saha. p. 46.

Gráfico 2: número de íons calculado pelo equação de Saha, escala maior. p. 47.

Lista de Tabelas

Tabela 1: Nomenclatura das transições de fase. p. 36.

Tabela 2: Nomenclatura das transições de fase proposta. p. 40.

Tabela 3: Valores típicos de densidade e temperatura para o estado plasma. p. 41.

Tabela 4: Energia de ionização de H, N, e Ar. p. 44.

Tabela 5: Fórmulas de Eletromagnetismo. p. 63.

Tabela 6: Fórmulas de Movimento Circular. p. 63.

Tabela 7: Fórmulas de Energia e Momento Linear. p. 63.

Tabela 8: Fórmulas de Movimento Linear. p. 64.

Tabela 9: Eventos de instrução e sua relação com processos de aprendizagem. p 42.

Sumário

Capítulo 1 Introdução.....	13
Capítulo 2 Desenvolvimento histórico da física de plasmas.....	18
Capítulo 3 Transição de fase gás-plasma.....	36
3.1 O ensino atual das transições de fase e diagramas.....	36
3.2 Jekyll.....	41
3.3 Comentário sobre a capacidade térmica dos plasmas.....	48
3.4 Modelo de bolinhas.....	44
Capítulo 4 A Energia Interna de um Gás Perfeito: Medindo a temperatura em elétron-volts...52	
4.1 Teoria cinética dos gases.....	52
4.2 Os critérios para a identificação do estado plasma.....	55
Capítulo 5 Partículas carregadas em campos eletromagnéticos: O espectrômetro de massa....60	
5.1 Introdução.....	60
5.1 Conteúdo atual.....	62
5.3 Aplicações da física de plasmas.....	64
5.4 Experimentos sugeridos para o laboratório de física de plasmas da UnB e aplicação deste trabalho no EM.....	74
Capítulo 6 Aulas Planejadas.....	76
Capítulo 7 Desenvolvimento do produto educacional.....	87
7.1 HTML e CSS.....	87
7.2 Jekyll.....	89
7.3 GitHub.....	90
7.4 Elementos de Design.....	91
7.5 O produto final.....	92
Referências Bibliográficas.....	93
Anexo I.....	96
Anexo II Resultados do pré-teste.....	97
Anexo III Resultados do pós-teste.....	99
Anexo IV Tubo de descargas desenhado.....	101
Anexo V Produto: Site para facilitação das aulas.....	104
Anexo IV A distribuição de Maxwell-Boltzmann.....	122

1. INTRODUÇÃO

O atual currículo de Física para o Ensino Médio, constante dos Parâmetros Curriculares Nacionais aprovados pelo Ministério da Educação¹ ao final do século XX², omite o estudo do quarto estado da matéria, o plasma, embora elenque os conteúdos para sua compreensão pelos estudantes, contemplando conhecimentos suficientes de termodinâmica e eletromagnetismo. Alguns fenômenos físicos, como a fusão nuclear, compõem o cânon da disciplina, porém, sem que se destrinchem as características do estado que possibilita sua ocorrência.

O presente trabalho busca atualizar o currículo do ensino de Física, incluindo personagens e eventos históricos que favoreceram o desenvolvimento dessa área, propondo uma sequência de seminários, material didático e a proposta de construção de um espectrômetro de massa a ser acoplado a um tubo de Crookes já existente e testado no Laboratório de Física de Plasmas da UnB[27], como material didático no Ensino Médio para estudo de caso, em consonância com a segunda linha de pesquisa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF):

Atualização do currículo de Física para o Ensino Médio de modo a contemplar resultados e teorias da Física Contemporânea visando uma compreensão adequada das mudanças que esses conhecimentos provocaram e irão provocar na vida dos cidadãos.³

Constata-se, a priori, o que se afigura uma enorme contradição: de um lado, a quase-onipresença de fenômenos da física de plasma no dia-a-dia de qualquer pessoa, a começar pelo Sol, passando pela magnetosfera da Terra, os aceleradores de partículas, as auroras boreal e austral, os telões domésticos de plasma, e acabando diretamente acima de nossas cabeças, nas lâmpadas

¹ BRASIL. Ministério da Educação. Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio). Parte III: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília : MEC. Secretaria de Educação Básica, 2000. 58p. internet. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>>. Acesso em: 1/5/2015.

² "O Parecer do Conselho Nacional de Educação foi aprovado em 1/06/98 – Parecer no 15/98 da Câmara de Educação Básica (CEB), do Conselho Nacional de Educação (CNE), seguindo-se a elaboração da Resolução que estabelece as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, Resolução CEB/CNE no 03/98 e à qual o Parecer se integra." (Cf. BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. Parâmetros Curriculares Nacionais. Parte I: Bases Legais. Brasília : Secretaria de Educação Básica (MEC), 2000, p. 8. internet. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/blegais.pdf>>. Acesso em: 1/5/2015.

³ Cf. Linhas de Pesquisa, MNPEF. internet. Disponível em: <www.sbfisica.org>. Acesso em: 10/3/2014.

fluorescentes; de outro, a quase-completa ausência de seu estudo nos livros didáticos, nas provas de vestibulares e no currículo brasileiro em geral. Qual será o sentimento de um aluno, ao aprender que 99.9%⁴ do universo observável se encontra nesse estado, do qual nunca ouviu falar?

Reconhece-se, ainda, o crucial papel da física de plasmas para o desenvolvimento de novas tecnologias que poderão solucionar o problema da geração de energia via Fusão Termonuclear Controlada, eliminação de lixo tóxico, produção de novos materiais, propulsão de satélites. Este amplo escopo de aplicações da Física e da tecnologia dos plasmas tornam a área essencial para o desenvolvimento sustentável do Brasil e do mundo. No centro dessa situação está a produção da fusão controlada, para o estudo da qual o Brasil carece de profissionais, sendo por isso necessário empenhar esforços na divulgação e principalmente estímulo a vocações para a área via formação de mais estudantes no Ensino Médio que conhecem e se interessam por ela:

Infelizmente – uma vez que em boa parte a física evolui em busca de solução para os problemas da sociedade – quase sempre o Brasil está mal atendido exatamente nas áreas da física experimental que têm maior relevância para o avanço da tecnologia. Por exemplo, estamos muito incipientes em áreas da física encaradas como fundamentais para a solução do problema energético, o maior de todos os que a humanidade atualmente depara. Temos um número muito pequeno de especialistas em física experimental de plasmas (ver Figura 3.4, mais adiante), cujo entendimento é central para que eventualmente se consiga a fusão nuclear controlada. Se tal feito é realizado, resolve-se de vez o problema energético da civilização, mas os países que não estiverem cientificamente capacitados para dominar a tecnologia ficarão por longo tempo sem acesso à nova fonte de energia.⁵

Pode-se identificar, nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM) e nas Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNEM+), a intenção de inovar por parte da política de educação brasileira, sendo que, atualmente, a porção significativamente majoritária do currículo de física foi estudada e produzida ainda antes do século XX. Não se pretende, no entanto, inchar um currículo já enclausurado por limitações de tempo na carga horária mínima exigida. Porém, não se pode negar ser a física de plasma um braço da ciência que se desenvolveu nos últimos oitenta anos e que tem trazido inovações tecnológicas para cada vez mais perto da população, como é o caso do espectrômetro

⁴ Site da NASA. Disponível em: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/1999/ast07sep99_1. Acesso em: 11/7/2017.

⁵ Cf. CAPES. Física para um Brasil Competitivo, seção 3.2 - Pós-graduação em física, , p. 35. internet. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/v1/arquivos_diversos/publicacoes/FisicaCapes.pdf> Acesso em: 10/6/2015.

de massa em aeroportos, utilizado aqui como exemplo de teste com fins didáticos. Este trabalho busca demonstrar que existe uma simplificação coerente para que se ensine a física de plasma no Ensino Médio, lado a lado com o estudo dos estados sólido, líquido e gasoso, o que encontra guarida nas preocupações dos envolvidos na revisão atualizadora do ensino de Física:

Não se trata, portanto, de elaborar novas listas de tópicos de conteúdo, mas sobretudo de dar ao ensino de Física novas dimensões. Isso significa promover um conhecimento contextualizado e integrado à vida de cada jovem.⁶

Como modificar a forma de trabalhar sem comprometer uma construção sólida do conhecimento em Física? Até que ponto se deve desenvolver o formalismo da Física? Como transformar o antigo currículo? O que fazer com pêndulos, molas e planos inclinados? Que tipo de laboratório faz sentido? Que temas devem ser privilegiados? É possível “abrir mão” do tratamento de alguns tópicos como, por exemplo, a Cinemática? E na Astronomia, o que tratar? É preciso introduzir Física Moderna? Essas e outras questões estão ainda para muitos sem resposta, indicando a necessidade de uma reflexão que revele elementos mais concretos e norteadores. Nosso desafio é, portanto, buscar meios para concretizar esses novos horizontes, especialmente dentro da realidade escolar hoje existente no país.⁷

O problema da inserção desse conteúdo pode ser superado por uma estratégia pedagógica abrangendo quatro enfoques de estudo: o desenvolvimento histórico do conceito de plasmas; o estudo das transições de fase; o estudo da teoria cinética dos gases ideais e o comportamento de partículas carregadas em campos Eletromagnéticos (EM), sendo o espectrômetro de massa utilizado como exemplo de aplicação. São subprodutos do trabalho: quatro aulas de 45 minutos estruturadas de acordo com a teoria de *design* da instrução, de Robert M. Gagné; um *website* disponibilizado para os alunos, com o conteúdo apresentado em sala; uma investigação sobre alguns livros didáticos utilizados em sala de aula; sugestões de exercícios para prática dos estudantes; e dois experimentos recomendados para a demonstração dos fenômenos físicos em pauta. Também foi aplicado um questionário antes e depois da ministração das aulas, para avaliação da efetividade e motivação dos alunos em relação à matéria.

⁶ Cf. a seção Conhecimentos de Física, in BRASIL. Ministério da Educação. Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio). Parte III: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília : MEC. Secretaria de Educação Básica, 2000, p. 23. Disponível em: internet. <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>>. Acesso em: 1/5/2015.

⁷ Cf. PCN+ Ensino Médio : orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais, seção A Física no Ensino Médio, p. 3. Disponível em: internet. <http://www.sbfisica.org.br/arquivos/PCN_FIS.pdf>. Acesso em: 1/5/2015.

O capítulo 2 trata do desenvolvimento histórico do conceito de plasma, percorrendo o período de 1852 a 1970, identificando as principais personagens envolvidas e marcos históricos, como descobertas e definições consolidadas. Procura demonstrar como foi possível, a partir da construção dos tubos de Geissler e Crookes, e da descoberta do elétron, chegar ao desenvolvimento da espectrometria de massa, analisadores de energia, e à propulsão iônica em satélites da era espacial.

A ampliação do estudo das transições de fase, para incluir a ionização dos gases, e a recombinação dos plasmas, são discutidas no capítulo 3, definindo transição de fase contínua (de segunda ordem) e discutindo formas de se determinar uma temperatura de transição.

O capítulo 4 trata da teoria cinética dos gases ideais e de como ela pode ser extrapolada para aplicação no estado plasma, levando o aluno a entender como podemos medir temperaturas em unidades de energia.

No capítulo 5, é estudado o comportamento de partículas carregadas em campos EM, com foco em sua aplicação nos espectrômetros de massa. Procura-se evidenciar uma aplicação importante da ação da força de Lorentz. Finalmente, descrevem-se dois experimentos propostos demonstrativos dos fenômenos físicos temáticos abordados.

O capítulo 6 apresenta um resumo da teoria de *design* da instrução de Robert M. Gagné, seguido de aulas construídas tendo por base essa teoria. Também, esmiúça o questionário aplicado em sala, antes e depois das aulas, avaliando a efetividade destas sobre o conhecimento e a motivação dos estudantes.

O site desenvolvido é discutido brevemente no capítulo 7, traçando um roteiro de estudo para o professor que queira aprender a desenvolver um site similar.

A título de esclarecimento prévio, assume-se que o professor ou a escola que vier a se utilizar o conteúdo deste trabalho optará pela sequência programática "3", descrita nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio+ (PCNEM+), sendo essa a mais comum, dada uma inversão dos semestres do primeiro ano, de acordo com a sequência de apresentação destes conteúdos nos livros didáticos estudados.

Também se assume que uma das três sequências oficialmente sugeridas para o ensino de Química seja escolhida, pois qualquer delas possibilita o aproveitamento do estudo dos modelos atômicos e do processo de ionização pela Física, sendo estudados antes que se ensine transição de

fases. Por último, é importante registrar que todas as traduções contidas nesta dissertação foram feitas livremente pelo autor.

2. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DA FÍSICA DE PLASMAS

Para a narração histórica da gênese e maturação do conceito de estado plasma, foram selecionadas personagens diretamente envolvidos em experimentos com descargas ionizantes em gases, no estudo desses fenômenos ou em suas aplicações. Além disso, nomes já regularmente contemplados em sala de aula foram evitados, como os de André-Marie Ampère ou Michael Faraday. Esses serão naturalmente mencionados, quando necessário, sem no entanto se traçar uma biografia mais detalhada.

O texto apresentado neste capítulo deve ser percebido como um material para o professor, contendo biografias parciais objetivas, enquanto o texto proposto no capítulo 5, aula 2, é dirigido ao estudante, tendo, portanto, uma postura mais didática.

Um resumo do desenvolvimento da teoria eletromagnética no século XIX

Introduzimos nossa revisão histórica com um breve relato sobre a evolução da teoria EM entre 1820 e 1890. O propósito desta seção não é detalhar os experimentos realizados, nem as filosofias de cada cientista, longe disso: o alvo é evidenciar um efeito-dominó entre algumas das principais descobertas deste século e como, admiravelmente, uma geração de estudiosos propicia, para a próxima, a oportunidade de evolução. Tecemos, assim, um pano de fundo elucidante dos motivos pelos quais os experimentos com tubos de descarga foram realizados.

André-Marie Ampère (1775-1836) foi um expoente nas áreas da Física e da Química, trabalhando na ponta da ciência de sua época, o estudo dos fenômenos elétricos e magnéticos, mais especificamente na relação entre correntes elétricas e campos magnéticos. Em 1820, Hans Christian Oersted (1777-1851) demonstra, em uma série de palestras, que fenômenos elétricos e magnéticos estão relacionados, após perceber que a agulha de uma bússola é defletida ao se aproximar de um fio condutor de corrente elétrica. A notícia do experimento de Oersted logo se espalha pela Europa, levando Ampère a se interessar por estudar o fenômeno (A. Guerra, J.C. Reis, M. Braga, 2014). Naquele mesmo ano, cunha o termo *eletrodinâmica*, para unir sua área de atuação à teoria Newtoniana de forças e movimento. Após conduzir uma série de quatro experimentos, formula a seguinte hipótese: forças magnéticas são uma modificação de forças elétricas, devido ao movimento das cargas elétricas. Apesar de não ter avançado nesse sentido, suas ideias inspiraram Wilhelm E. Weber (1804-1891), dez anos mais tarde, na Alemanha (D'Agostino, 2000).

Weber foi um grande colaborador de Carl Friedrich Gauss (1777-1855), e juntos estudaram o geomagnetismo, elaborando, em co-autoria, uma série de mapas magnéticos compilados na obra "Atlas do Geomagnetismo : desenhado de acordo com elementos da teoria", entre outras publicações. Para traçar tais mapas, os dois colegas usavam um compasso sensível suspenso por um longo fio de seda, sem torção, funcionando como uma bússula, em conjunto com um magnetômetro de dois fios. Em 1843, Weber decide se dedicar a refazer os experimentos de Ampère e a completar sua teoria, confirmando a medida da força entre dois fios com corrente. Em outro experimento, fez variar a corrente elétrica em um solenóide e aproximou-o de um *loop* estacionário, confirmando a descoberta de Michael Faraday (1791-1867) da indução eletromagnética e também a lei de equivalência de Ampère entre imãs e sistemas de *loops* fechados com corrente. Imediatamente, Weber procura desenvolver uma teoria que desse conta das duas descobertas, culminando, em 1856, nos primeiros passos para o cálculo da velocidade da luz (Weber foi o responsável por designar a letra "c" à velocidade da luz). De fato, em sua teoria, "c" representa a velocidade constante em que duas "massas" elétricas se movimentariam enquanto não exercessem ação uma sobre a outra, e $c/\sqrt{2}$ seria a velocidade de propagação de uma onda de corrente elétrica.

Em 1855, William Thomson (1824-1907) sugere a James C. Maxwell (1831-1879) que lesse um artigo publicado por Weber. Seu comentário, em uma carta para Thomson, foi:

Eu tenho examinado sua [*i.e., de Weber*] maneira de conectar eletroestática com eletrodinâmica, indução, etc, eu confesso que inicialmente não gostei... mas eu suponho que o resto de seus pontos de vista estão fundados em experimentos que são tão dignos de confiança quanto elaborados.

J. Larmor, 1937

A partir de então, Maxwell passa a investigar mais a fundo os resultados de Weber, e começa a propor uma teoria elástica para a luz, em que a onda de corrente de Weber equivale a uma onda eletromagnética que se propaga no éter elétrico, e o fator "c" corresponde à velocidade dessa onda. Finalmente, Maxwell consegue mostrar que seu resultado teórico para a velocidade da onda eletromagnética equivale à velocidade da luz medida por Fizeau (1849) e Foucault (1862) (D'Agostino, 2000). Em 1873, Maxwell publica sua obra-prima: "Um tratado em Eletricidade e Magnetismo", que marca a segunda grande unificação da Física (eletricidade e magnetismo

passam a ser duas manifestações do mesmo fenômeno), sendo a primeira obtida por Newton, em 1687.

Em uma série de artigos publicados a partir de 1870, o físico alemão Hermann von Helmholtz (1821-1894) passa a avaliar diversas teorias eletrodinâmicas sob a luz de suas possíveis aplicações reais, em vez de julgar suas possíveis interpretações. Durante esse estudo, Helmholtz propõe sua própria teoria para a propagação da eletricidade em corpos condutores e isolantes, nos quais, segundo ela, meios dielétricos são polarizados por causa de uma variação no campo elétrico ou magnético. Suas ideias tiveram aceitação abrangente e diferiam, da teoria de Maxwell de duas maneiras fundamentais: primeiramente, uma carga elétrica poderia existir no vácuo absoluto, sem necessitar do éter; em segundo lugar, forças entre duas cargas elétricas emanariam delas, atuando, à distância, uma sobre a outra. Para avaliar qual das teorias melhor explicaria os fenômenos físicos, Helmholtz propõe uma série de experimentos, que moldaram o avanço da ciência nos vinte anos seguintes.

Heinrich Hertz (1857-1894) muda-se para Berlim, em 1878, passando a estudar sob a tutela de Helmholtz e a trabalhar no laboratório deste, realizando experimentos indicados por seu professor. Já em 1880, Hertz publica os primeiros resultados que obteve: “Uma pesquisa para determinar um limite superior para a energia cinética da corrente elétrica”, sendo premiado pela Faculdade de Filosofia de Berlim. Seu objetivo era provar que, em um circuito auto induzido, apenas uma fração limitada da corrente dependia da inércia desta porém, acabou por provar que os efeitos inerciais eram desprezíveis.

Esse resultado confirmou um dos pontos defendidos por Helmholtz em seus artigos de 1870 e teve profunda influência nas futuras pesquisas de Hertz, pois lhe comunicava que a eletricidade era impressionantemente móvel, fato que o direcionaria a suas mais importantes descobertas. Por sugestão de Helmholtz, a Academia ofereceu um prêmio para que pudesse estabelecer uma relação entre forças eletromagnéticas e a polarização dielétrica de materiais isolantes. Em 1885, Hertz aceita uma posição de professor de Física na Escola Técnica de Hochschule, após uma breve estada como professor na Universidade de Kiel, onde passa a planejar seus próprios experimentos. Durante a realização de alguns destes, notou que a presença de luz ultravioleta, em algumas das descargas elétricas produzidas, gerava correntes em outros fios condutores: havia sido descoberto o efeito fotoelétrico. Hertz, então, passa a perseguir uma solução para demonstrar a ação polarizante de forças EM em dielétricos, descrevendo um experimento que

testaria não a polarização de blocos materiais, mas a existência de polarizações no ar acompanhadas de forças elétricas.

Embora não seja claro porque Hertz decidiu tomar este caminho, o mais importante é notar que ele passou a ver a propagação de correntes no ar como análogas à propagação em fios condutores (D'Agostino, 2000). Seus resultados o levaram a aceitar a teoria de Maxwell, sendo esta a mais acurada, em relação a suas observações. Seu experimento consistia em concentrar um raio de luz de comprimento de onda de 66 cm usando uma superfície de zinco parabólica, fazendo o feixe gerado incidir sobre uma antena dipolo (de sua invenção), demonstrando em seguida, com barreiras e grades metálicas, que a propagação era retilínea e que o feixe era polarizado. Determina assim que luz, calor irradiado e ondas EM são o mesmo fenômeno.

Maravilhados com os resultados do experimento, seus alunos o perguntam o que poderia ser feito com o fenômeno, ao que responde: Não tem nenhum uso.
Indagam então qual seria o próximo passo, replicando: Acho que nada.
Instituto de Química, Universidade Hebraica de Jerusalém, 2015

Ao leitor que deseja conhecer mais a respeito do desenvolvimento da teoria EM neste período tão prolífico, recomenda-se a leitura das referências bibliográficas 13, 14, 15, 16, 17 e 18, indicadas ao final.

Passamos agora para os perfis dos cientistas que trabalharam diretamente com a investigação do estado plasma. Abaixo, o nome dos cientistas é seguido pelo ano por volta do qual suas maiores contribuições foram feitas, com o propósito de situar o aluno no contexto histórico. Assim, evita-se o uso de múltiplas datas, das quais a memorização, pelo estudante, seria infrutífera.

Heinrich Geissler e Julius Plücker (1858)

Nascido na vila de Igelshieb, que integra atualmente a Alemanha, Johann Heinrich Wilhelm Geissler foi um habilidoso físico e soprador de vidro, que desenvolveu, com Julius Plücker, tubos de vidro de baixa pressão interna e eletrodos nas extremidades. Sua família pertencia a uma longa linha de artesãos de vidro, sendo seu pai, Johann Georg Jakob Geissler, profissional excepcionalmente hábil e inovador, que produzia termômetros e barômetros. Heinrich Geissler aperfeiçoou a técnica para evacuação de tubos de vidro, podendo os instrumentos por ele produzidos alcançar pressões muito mais baixas. Instalado na Universidade de Bonn, tornou-se fornecedor de instrumentos de vidro para a instituição, onde se associou a Julius Plücker, físico e professor naquela instituição, que publicou as primeiras pesquisas sobre a ação de ímãs nas

descargas elétricas produzidas em gases rarefeitos. Plücker descobriu que as descargas causavam um brilho fluorescente nas paredes dos tubos de vidro, e que esse brilho poderia se movimentar quando um campo magnético, gerado por um eletroímã, fosse aplicado. Plücker também foi pioneiro na área de espectroscopia e, juntamente com Robert Wilhelm Bunsen e Gustav Kirchhoff, anunciou que as linhas espectrais eram características da substância química que as emitiam. Tubos de Geissler foram vendidos por muitos anos como objetos de decoração, culminando nos tubos de anúncios de gás neônio.

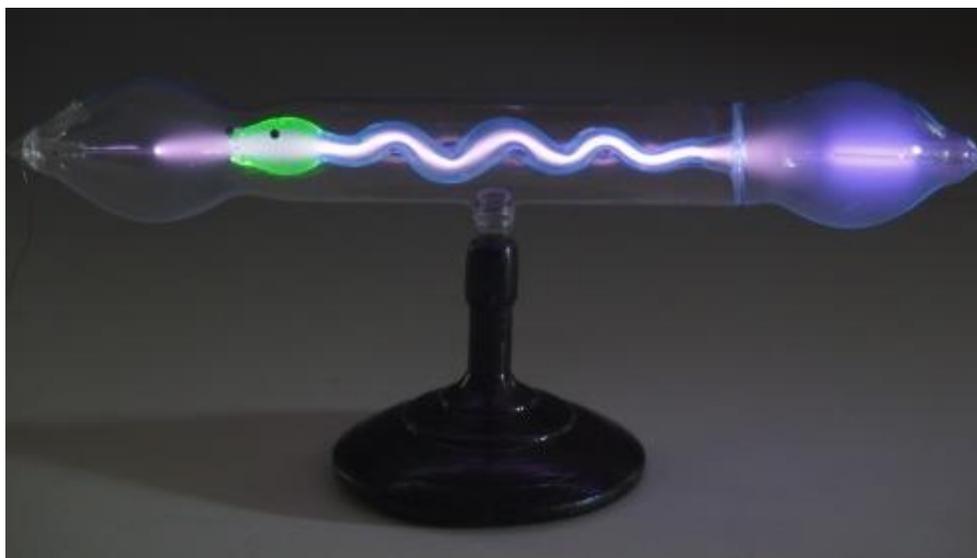


Figura 1: Tubo de Geissler francês de 1870⁸

William Crookes (1879)

William Crookes foi um físico e químico inglês, nascido em Londres, que aprimorou os tubos de Geissler-Plücker, para investigar os raios catódicos. Demonstrou que estes se propagam em linha reta, causam fluorescência quando atingem certas substâncias e podem provocar grande aumento da temperatura da superfície atingida. Ele acreditou ter descoberto o quarto estado da matéria em 1879 e o denominava “matéria radiante”, mas, de fato, não conseguiu defini-lo com precisão. Este quarto estado só foi definitivamente bem definido em 1928, por Irving Langmuir.

Trabalhando com o método de análise espectral, introduzida por Bunsen e Kirchhoff, Crookes descobriu os elementos: Tálcio, Hélio e Protactínio.

Não foi, no entanto, capaz de identificar a composição dos raios catódicos, o que coube a J.J. Thomson.

⁸ Disponível em: <http://www.crtsite.com/page6.html>. Acesso em: 11/7/2017.

Os fenômenos nesses tubos de descarga revelam para a ciência física um novo mundo - um mundo aonde a matéria pode existir em um quarto estado, aonde a teoria corpuscular da luz pode ser verdadeira, e aonde a luz nem sempre se move em linhas retas, mas aonde nunca poderemos entrar, e o qual precisamos nos contentar em observar e experimentar pelo lado de fora.

William Crookes, 1879

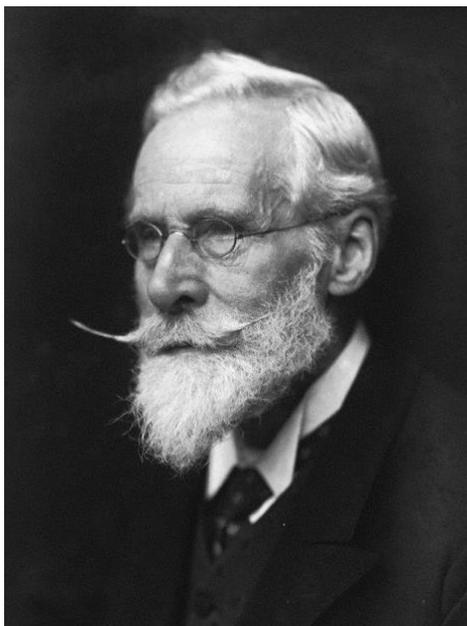


Figura 2: Sir William Crookes

J. J. Thomson (1897)

Poucas vezes na história nos deparamos com um físico de tão grande impacto histórico como Thomson. Habilidade físico inglês, nascido em Manchester e baseou-se na Universidade de Cambridge. Vencedor do sexto prêmio Nobel de Física, foi professor de outros sete ganhadores, inclusive seu filho, sendo consagrado como um dos maiores professores de todos os tempos.

Exímio teórico, estudou a fundo os dois volumes de Eletricidade e Magnetismo escritos por Maxwell, publicando um complemento a estes chamado "Notas nas recentes pesquisas em Eletricidade e Magnetismo", algumas vezes referido como "terceiro volume de Maxwell".

Suas habilidades experimentais eram igualmente impressionantes e, trabalhando com tubos de raios catódicos, percebeu que estes poderiam viajar uma distância muito maior do que o esperado para uma partícula do tamanho de um átomo.

Também foi capaz de estimar a massa dos raios catódicos, ao medir o aumento de temperatura que o choque destes causava a um termopar, e comparar à sua deflexão quando em um campo magnético.

Seus experimentos indicavam que os raios deveriam ser compostos de partículas mil vezes mais leves que um átomo de hidrogênio, e que não fazia diferença de que átomo eram provenientes. Assim, em 30 de abril de 1897, sugeriu que os raios catódicos eram compostos por partículas fundamentais pequenas, e chamou-as de “corpúsculos”, recebendo mais tarde o nome de "elétrons", como sugerido por George Stoney.

Em 1912, Thomson estuda os raios canais (anódicos), fazendo com que um raio colimado de íons de neônio passasse com campos elétricos e magnéticos, e medindo sua deflexão. Observando que esse raio se dividia em dois, concluiu que o neônio era composto de dois átomos diferentes (neônio-20 e neônio-22). Esse foi o nascimento da espectroscopia de massa e a primeira observação de isótopos de um elemento.



Figura 3: J. J. Thomson

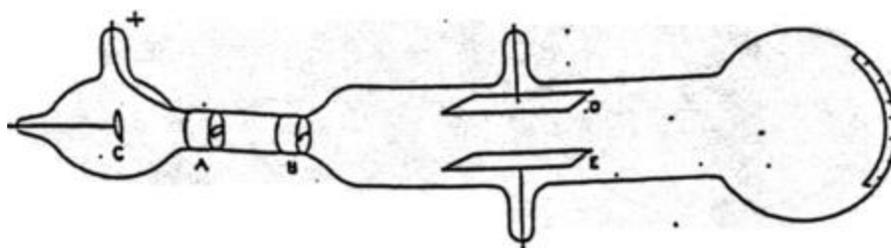


Figura 4: Ilustração de Thomson de um tubo de Crookes

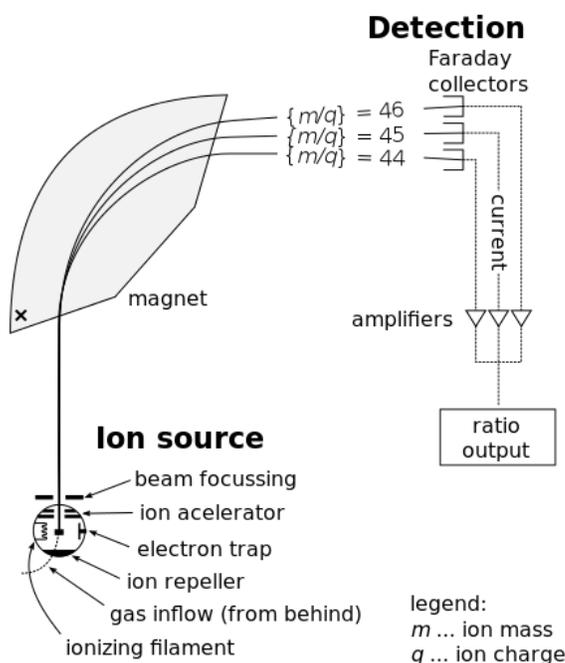


Figura 5: Espectrômetro de massa

Joseph Larmor (1900)

Foi um influente físico inglês, nascido em Belfast, que inovou o conhecimento da eletricidade, da dinâmica, da termodinâmica e da teoria eletrônica da matéria. Calculou o raio da trajetória do elétron em um campo magnético e a taxa de radiação eletromagnética de um elétron acelerado.

Larmor publicou as hoje famosas transformações de Lorentz, dois anos antes deste, porém, de maneira incompleta. Previu, também, o fenômeno da dilatação do tempo, escrevendo: "... elétrons individualmente descrevem partes correspondentes de suas órbitas em tempos mais curtos que o resto do sistema, de acordo com a razão $(1-v^2/c^2)^{1/2}$ " (Larmor, 1897). Verificou ele que corpos cujos átomos são ligados por forças eletromagnéticas sofrem contração espacial.

Apesar de inicialmente apoiar a teoria relativística de Einstein, logo se opôs a ela, clamando que um tempo absoluto era necessário para a astronomia.

Finalmente, Larmor parece ter predito a existência do spin do elétron, por explicar a separação das linhas espectrais dos átomos, em campos magnéticos, pela oscilação dos elétrons.



Figura 6: Joseph Larmor

Irving Langmuir (1919-1928)

Químico e físico americano, nascido em Nova Iorque, vencedor do prêmio Nobel de Química de 1932. Trabalhando como pesquisador para a General Electric, com tubos de vácuo, foi um dos primeiros cientistas a estudar o plasma, nomeando-o assim, em 1924, como uma alusão ao plasma sanguíneo. Determinou-se a configurar a temperatura e a densidade de elétrons em plasmas. Também inventou a solda a plasma.

A primeira definição formal do estado plasma foi elaborada por Irving Langmuir quando ele vinha estudando a temperatura de elétrons em gases ionizados a baixa pressão, e procurava entender por que a distribuição maxwelliana de velocidades de elétrons livres correspondia a temperaturas no intervalo de 5000 a 60000 Kelvin.

Entretanto, o livre caminho médio dos elétrons deveria ser tão grande que colisões comuns não poderiam gerar esse tipo de distribuição. Os elétrons, inicialmente acelerados pelo catodo quente, que formavam originalmente um feixe com velocidade de translação uniforme, rapidamente adquiriam movimento ou temperatura aleatória, que deveria resultar de impulsos

aplicados aos elétrons em direções randômicas. Suspeitou que oscilações elétricas de alta frequência e pequeno comprimento de onda poderiam produzir tal espalhamento.

Foi Ditmer quem previu que as oscilações deveriam ser da ordem de 10^8 Hz; no entanto, não foi capaz de medi-las, nem de oferecer uma explicação para sua origem. Penning mediu essas oscilações, no intervalo de 3×10^8 a 6×10^8 Hz, mas também não sugeriu uma causa possível.

Langmuir e seu colega Tonks confirmaram as observações de Penning e formularam sua hipótese: o que oscilava eram os elétrons, sendo comprimidos e descomprimidos de maneira análoga às ondas sonoras. Com exceção das regiões próximas aos cátodos, nas quais existem bainhas com poucos elétrons, o gás ionizado contém quantidades semelhantes de íons e elétrons, tornando a carga resultante quase nula. Langmuir decide, então, nomear como "plasma" a região onde as cargas de íons e elétrons estão balanceadas, pois o lembrava da maneira como o sangue carregava corpúsculos vermelhos e brancos (glóbulos), assim como um fluido eletrificado carregava íons e elétrons.



Figura 7: Irving Langmuir

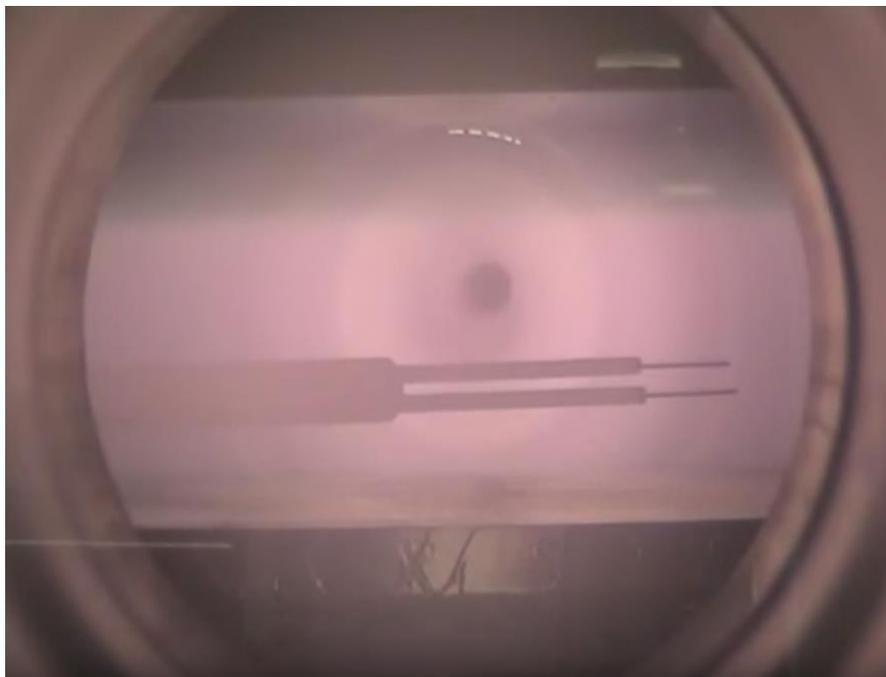


Figura 8: Dupla sonda de Langmuir em um tubo de descargas⁹

Gustav Ising (1924)

Físico sueco, nascido em Finja, professor de física da Universidade de Estocolmo e inventor do acelerador linear de partículas, sendo pioneiro nesta área de pesquisa, seu trabalho foi fundamental para a criação dos subsequentes aceleradores, como o LHC (The Large Hadron Collider¹⁰), na Suíça. O conceito proposto por ele foi colocado em prática e demonstrado por Rolf Wideroe, físico alemão. Também serviu de inspiração para E. O. Lawrence, inventor do ciclotron.

Seu acelerador linear consistia de um tubo de vácuo reto, no qual as partículas seriam aceleradas por campos oscilantes (rádio-frequência) em sincronia com a passagem das partículas.

⁹ Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6uZfcE80DDQ>. Acesso em: 11/7/2017

¹⁰ "O Grande Colisor de Hádrons", da Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear, conhecida como CERN (antigo acrônimo para *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) em Meyn, na região de Genebra, na fronteira Franco-Suíça.



Figura 9: Acelerador Linear do laboratório Australian Synchrotron, Clayton, Victoria¹¹

Edward V. Appleton (1929)

Físico inglês, nascido em Badford, ganhador do Nobel, em 1947, por provar a existência da ionosfera. Motivado pelo sucesso das transmissões de ondas de rádio de um lado a outro do Oceano Atlântico, utilizou-as para estudar a atmosfera, descobrindo que cada frequência seria refletida a uma determinada altitude. Ondas de maior comprimento de onda, são refletidas mais acima na atmosfera, tendo assim maior alcance. Seu trabalho culminou na invenção do radar, essencial para a vitória dos aliados na Segunda Guerra Mundial.

Lev Landau (1932)

Nascido em Baku, aluno de Niels Bohr, foi um físico russo prolífico, contribuindo em diversas áreas da física e produzindo uma série didática de dez volumes.

Desenvolveu a primeira teoria explicativa das transições de fase de segunda ordem, como gás-plasma e outros fenômenos críticos:

¹¹ Foto tirada por John O'Neill. Perfil: <https://en.wikipedia.org/wiki/User:Jjron> . Acesso em: 11/7/2017

Assim, uma transição de fase de segunda ordem é contínua no sentido de que o estado do corpo muda continuamente. Deve ser enfatizado, no entanto, que a simetria, é claro, muda descontinuamente no ponto de transição, e em qualquer instante nós podemos dizer a qual das fases o corpo pertence. Mas enquanto no ponto de transição de fase de primeira ordem corpos em dois diferentes estados estão em equilíbrio, os estados das duas fases são os mesmos em um ponto de transição de segunda ordem.¹²

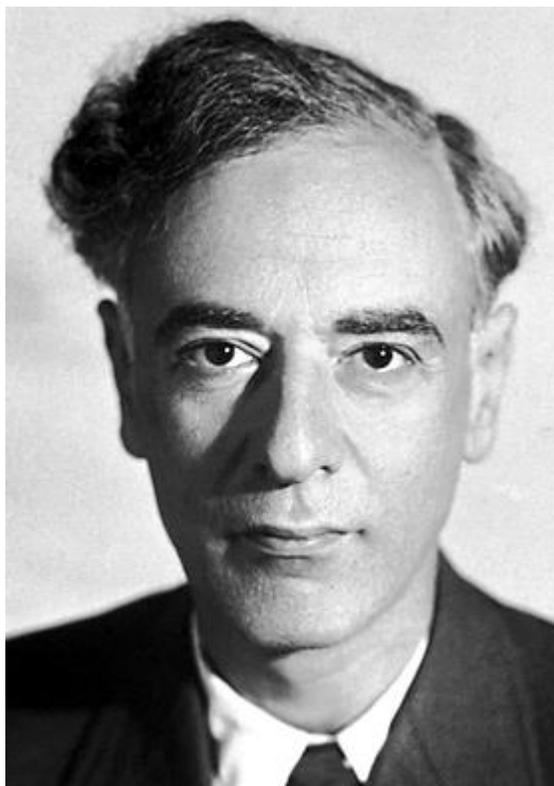


Figura 10: Lev Landau

Ernest Lawrence (1934)

Foi um físico americano, nascido em Canton, focado no estudo da física nuclear e vencedor do prêmio Nobel de 1939, pela invenção do *cyclotron*, precursor dos aceleradores de partículas atuais.

Por causa dos altos custos para a construção dos aceleradores de partículas, dedicou grande parte de sua vida para promover a política “Big science”, que defendia o uso de máquinas grandes e caras para o desenvolvimento da ciência.

Para nós brasileiros, vale comentar que Lawrence construiu um *synchrotron*, com dinheiro do pós-guerra, que entrou em operação em 1946. Trabalhando com Eugene Gardner em uma

¹² Cf. LANDAU, L.D; LIFSHITZ, E.M. *Statistical Physics*. 3 ed. New York : Pergamon, 1980, p. 447.

tentativa de recriar *mésons pi*, não teve sucesso. César Lattes, então, usou a máquina que eles haviam criado, para encontrar o *méson pi* negativo, em 1948.

Hannes O. G. Alfvén (1942)

Foi um físico sueco dedicado ao estudo da física de plasma, vencedor do prêmio Nobel de 1970, por seu trabalho sobre a propagação de ondas no plasma. Sua obra esclareceu o comportamento da magnetosfera terrestre, principalmente quando atingida por uma tempestade magnética, e também a ocorrência das auroras.

Em 1986, Alfvén ataca um problema semelhante ao que é enfrentado neste trabalho: o atraso na atualização curricular.

Um estudo de como um número dos mais usados livros de astrofísica trata importantes conceitos como duplas camadas, velocidade crítica, efeitos pinça, e circuitos é feito. Foi verificado que estudantes usando esses livros permanecem ignorantes até da existência desses conceitos, apesar do fato de alguns deles serem conhecidos há mais de meio século.¹³



Figura 11: Hannes Alfvén

Escreveu vários artigos que ajudaram a popularizar o estado plasma, cunhando em um deles o termo *Universo Plasma*, em publicação da *Physics Today* de Setembro de 1986, em que procurava mostrar a prevalência desse estado no universo e diversas aplicações de seu estudo.

¹³ Cf. Hannes Alfvén, "Double layers and circuits in astrophysics" (1986) *IEEE Transactions on Plasma Science* (ISSN 0093-3813), vol. PS-14, Dec. 1986, p. 779-793.

The plasma universe

A model based on the emissions and behavior of the most prevalent material in the universe leads one to view the world as an active and rapidly changing place, and helps one analyze the development of its components.

Hannes Alfvén

For millennia we have based our views of the universe on observations in the narrow visual octave of the electromagnetic spectrum, 400-800 nm, supplemented during the last half-century by infrared and radio observations. During the last decade, however, space research has opened the full spectrum, including the entire infrared region and the ultraviolet, x-ray and γ -ray regions (see the photo on the cover and figure 1).

The x-ray and γ -ray regions are of special importance—and are the focus of this article—because a number of unexpected phenomena have been discovered in them. Most emission at these wavelengths is likely to be produced by electrons with energies in excess of 10^5 eV. We know that processes in magnetized plasmas, especially in connection with electric fields aligned by magnetic fields, accelerate auroral electrons to 10^6 eV. Similar plasma processes in solar flares produce energies of 10^8 - 10^{10} eV. Under cosmic conditions, relativistic double layers—plasma formations in which a very high voltage exists across a thin sheet of vacuum—may generate even

Hannes Alfvén is professor emeritus in the department of plasma physics at The Royal Institute of Technology, in Stockholm, Sweden, and is a professor in the department of electrical engineering and computer science at the University of California, San Diego.

higher energies in magnetized cosmic plasmas.

Hence we can assume with some confidence that the x rays and γ rays we observe derive mainly from magnetized plasmas with electron energies in excess of 10^5 eV. It therefore appears legitimate to call the picture we get from these wavelengths the high-energy-gamma-plasma universe, or simply, the plasma universe.

As we shall see, the plasma universe is often drastically different from the traditional visual universe. Visible light comes from solid bodies such as planets, but to a much larger extent comes from stellar photospheres, which are typically plasmas with low energies—less than about 10 eV. Hence the visual universe is almost synonymous with the low-energy-plasma universe. In this article I compare the visual universe with the plasma universe.

High-energy magnetized plasmas emit not only x rays and γ rays, but also synchrotron radiation, which often falls in the radio bands. Hence radioastronomy also gives us information about the plasma universe. Laboratory experiments and *in situ* magnetospheric measurements of plasmas are another source of such information.

To test the usefulness of the plasma universe model I will apply it to cosmogony, the study of the origin and

development of the universe and its components. Specifically, I will show how one might use the model to account for the complicated structure of the Saturnian C ring and to reconstruct certain events that occurred 4-5 billion years ago.

Two universes

As the cover of this issue shows, the Sun as seen in x rays is shockingly different from our visual picture of it. Similarly, what appears as a galaxy in visible light may show up as an immense double radio source (figure 2) when mapped according to the synchrotron radiation that emanates from high-energy magnetized plasmas. The general time scales of the visual and the plasma universes are also often different. Our night sky gives an impression of calm—the Moon moving with a period of a month, the planets with periods of years or centuries. Gamma-ray bursts, the most energetic events in the high-energy region of the spectrum (figure 3), involve intensity changes of orders of magnitude in seconds or milliseconds—ten orders of magnitude more rapid than the changes we see in the visual universe.

The relation between the visual and the plasma universe is somewhat analogous to the relation between a visual and an x-ray picture of a human being. The visual picture is—literally—superficial. An x-ray picture of the wrist

Figura 12: Artigo de Alfvén publicado em Setembro de 1986 por *Physics Today*

James A. Van Allen (1958)

Físico americano, nascido em Iowa City, precursor da instrumentalização científica dos satélites. Em 1958, montou contadores Geiger-Muller em três satélites – Explorer 1, Explorer 3 e Pioneer 3 –, detectando, com eles, cinturões de radiação presos entre as linhas de campo magnético terrestres, regiões que hoje são chamadas de "cinturões de Van Allen".

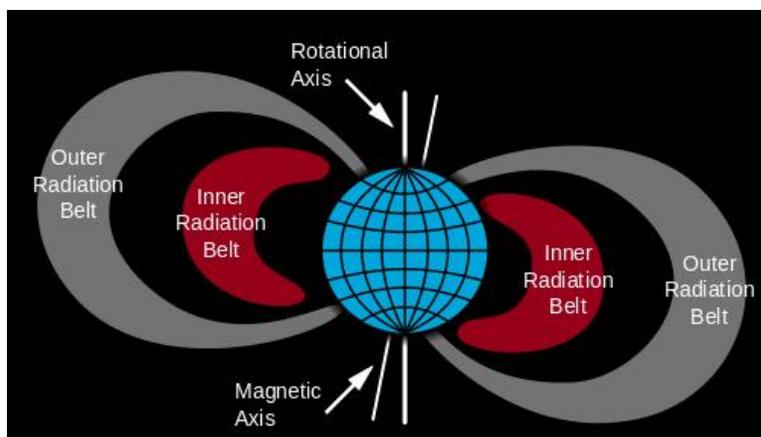


Figura 13: Cinturões de Van Allen

A partir de 1960

Essa, acima sinteticamente descrita, foi a gênese da física de plasmas. De se notar que a pesquisa de Langmuir fornece, atualmente, a base teórica para a maior parte das técnicas de processamento a plasma, para fabricar circuitos integrados. Após Langmuir, a pesquisa de plasmas se espalhou em diversas direções, das quais sete são particularmente importantes.

Em primeiro lugar, a teoria de propagação de ondas eletromagnéticas em plasmas magnetizados não-uniformes. O advento da transmissão de ondas de rádio levou à descoberta da ionosfera, que reflete essas ondas, permitindo que percorram maiores distâncias. Entretanto, algumas vezes essa camada da atmosfera pode absorver ou distorcer as frequências das ondas de rádio, levando vários cientistas a estudar o fenômeno para possivelmente corrigir esses efeitos.

Os astrofísicos rapidamente reconheceram que muito do universo consiste de plasma, sendo essa a segunda importante direção de pesquisa. O estudo da composição e comportamento dos objetos cósmicos concebeu a teoria da magnetohidrodinâmica (MHD), em que plasmas são tratados essencialmente como fluídos condutores. Essa teoria teve grande sucesso na investigação de manchas solares, do vento solar, de jatos solares, da formação de estrelas e de uma gama de outros tópicos, na astrofísica. O campo magnético terrestre, por exemplo, é mantido pelo movimento de seu núcleo derretido, que pode ser aproximado como um fluido MHD.

A criação da bomba de hidrogênio, em 1952, traz a terceira grande área a se desenvolver após os estudos de Langmuir. Despertou um grande interesse em obter fusão termonuclear controlada, como fonte de energia para o futuro, sendo as pesquisas nesta área desenvolvidas em secreto e independentemente, naquela época, no Estados Unidos, União Soviética e Grã-Bretanha. No entanto, em 1958, a pesquisa nessa área foi revelada ao público, levando à publicação de um número imenso de importantes e influentes textos. A rigor, a física de plasmas surge, então, como uma disciplina. A principal preocupação dos físicos de fusão é entender como um plasma termonuclear pode ser confinado, em geral utilizando campos magnéticos, e investigar as instabilidades que o permitem escapar.

A quarta direção de pesquisa surge com o trabalho inovador de James A. Van Allen, que colocou, pela primeira vez instrumentos científicos em satélites. Van Allen deu o ponta-pé inicial para a era de diagnósticos de diversas regiões do espaço, dentro e fora da órbita terrestre, sendo lançadas, por exemplo, as sondas *Voyager*. Surgiu, assim, a área de plasmas espaciais.

No fim dos anos 60, são desenvolvidos *lasers* de alta potência, inaugurando a física de plasmas gerados por *lasers*. Quando um *laser* muito poderoso incide sobre um sólido, parte do

material é imediatamente evaporado e uma camada de plasma se forma entre o alvo e o feixe. Plasmas criados por *laser* têm propriedades extremas, como densidades semelhantes às de sólidos, não encontradas em plasmas comuns. Uma aplicação dessas pesquisas é a tentativa de fusão, por foco, de vários *lasers* em um pequeno alvo esférico. A física de altas energias também usa técnicas de aceleração de plasmas por *lasers* para reduzir o tamanho e o custo de aceleradores de partículas.

A sexta direção é a conservação de alimentos, que é feita principalmente de duas formas: a aplicação de finas camadas de alumínio ou prata sobre plásticos de embalagem; o tratamento da superfície, para melhorar a sua adesão a outras substâncias, que receberá o metal é uma tecnologia de plasma. E a esterilização a plasma.

Finalmente, a sétima e, talvez, mais importante aplicação da física de plasmas é a produção de “wafers”¹⁴ de silicone cobertos por transistores. Bombardeia-se o *wafers* com os íons presentes no plasma, de maneira que ele desgaste lentamente o material, para produzir camadas ultra finas. Esse processo, chamado *sputtering*, é essencial para a produção de computadores cada vez menores e mais baratos.

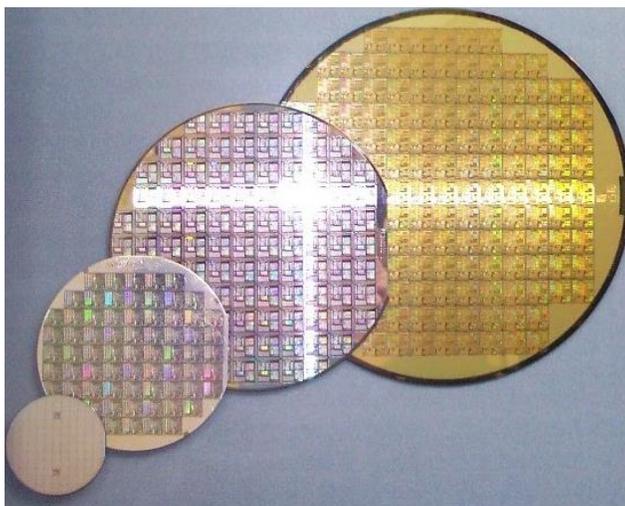


Figura 14: Wafers de processadores¹⁵

¹⁴ Designação devida à forma, que parece uma placa de biscoito leve e muito fino, assim denominado.

¹⁵ Foto por: Stahlkocher. Perfil: <https://de.wikipedia.org/wiki/Benutzer:Stahlkocher>. Acesso em 11/7/2017

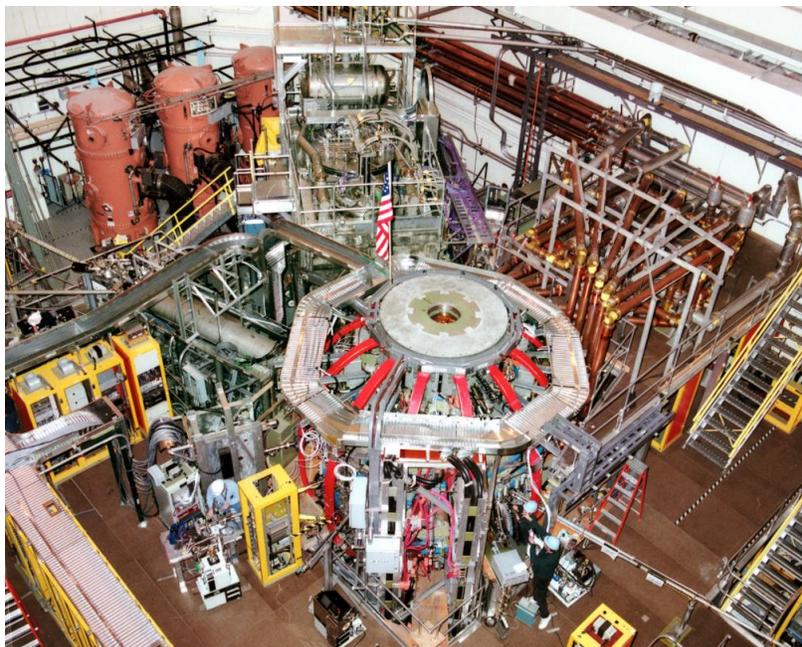


Figura 15: Tokamak NSTX, do *Princeton Plasma Physics Laboratory*¹⁶

¹⁶ Foto por: *Princeton Plasma Physics Laboratory*. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NSTX.jpg>. Acesso em: 11/7/2017

3. TRANSIÇÃO DE FASE GÁS-PLASMA

3.1 O ensino atual das transições de fase e diagramas.

O conteúdo deste capítulo diz respeito à apresentação da transição de fases, de acordo com os livros selecionados para análise (listados no Anexo I), e como ampliá-la, para fins pedagógicos. A seleção foi feita junto às maiores editoras de livros didáticos do Brasil, sendo, portanto, representativa das edições mais populares. Também foram considerados livros do currículo inglês *International Baccalaureate*, o mais largamente adotado no mundo.¹⁷ A apresentação do tema abaixo ocorre, normalmente, no segundo ano do ensino médio.

Em todos os livros pesquisados, nas seções ou volumes destinados aos alunos do segundo ano do Ensino Médio, estão presentes os seguintes tópicos de interesse para esta dissertação:¹⁸

1. Diferenciação entre temperatura e calor
2. Capacidade térmica
3. Calor sensível
4. Calor latente
5. Definição de equilíbrio térmico
6. Definição de sistema termicamente isolado
7. Alguma variação, geralmente um diagrama, da tabela abaixo:

Estado Inicial\Final	Sólido	Líquido	Gasoso
Sólido	x	Fusão	Sublimação
Líquido	Solidificação	x	Evaporação (ebulição)
Gasoso	x	Liquefação (condensação)	X

Tabela 1: Nomenclatura das transições de fase.

¹⁷ Cf. *The International School Consultancy*. Disponível em: <<http://www.iscresearch.com/>>. Acesso em: 2/7/2015.

¹⁸ Esses livros abordam também outros temas de termodinâmica, irrelevantes para o presente trabalho.

8. Diferenciação dos processos endotérmicos e exotérmicos

9. Curvas de aquecimento e resfriamento. Gráficos de temperatura *versus* calor, ainda que fora de escala, como no exemplo abaixo:



Figura 16: Curva de aquecimento e resfriamento.¹⁹

A sequência de exposição didática varia muito. Alguns livros apresentam os estados da matéria antes de tratar do calor sensível e latente; outros, fazem o inverso. Há livros que, possuem diagramas da “visão microscópica“ dos gases, líquidos e sólidos, mostrando um modelo de bolinhas para os átomos (p. ex., ALVARENGA, Beatriz; MÁXIMO, Antônio. *Curso de Física*); outros não apresentam tais modelos (como TSOKOS, K. A. *Physics for the IB Diploma*, e BÔAS, N. V.; DOCA, R. H; BISCUOLA, G. J. *Física 2*).

Tais modelos microscópicos não são essenciais para o estudo da termodinâmica, mas pode-se argumentar que são um bom método para a apresentação de algumas características que diferenciam os estados da matéria, macroscopicamente, quando se ilustra que um sólido mantém sua forma, um líquido ganha o formato do seu recipiente, e um gás ocupa o recipiente por completo. Sua utilidade se verifica também microscopicamente, pois se apresenta como uma oportunidade para que o professor discuta as forças intermoleculares que atuam em cada estado, o que é refletido na sua mobilidade. É comum que o professor desenhe esses diagramas no quadro, estejam presentes ou não na literatura utilizada. Exemplos:

¹⁹internet.Disp.em:<<http://labdequimicadopedro.blogspot.com.br/2012/03/curva-de-aquecimentoresfriamento.html>>. Acesso em: 7/5/2015.

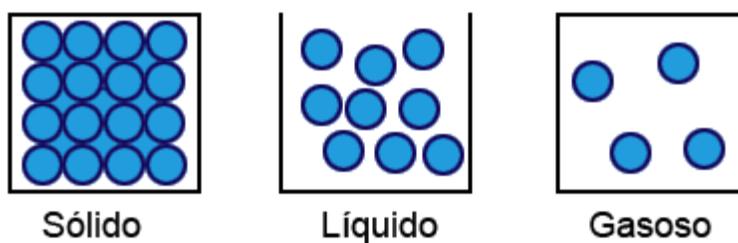


Figura 17: Visão microscópica dos estados da matéria 1.²⁰

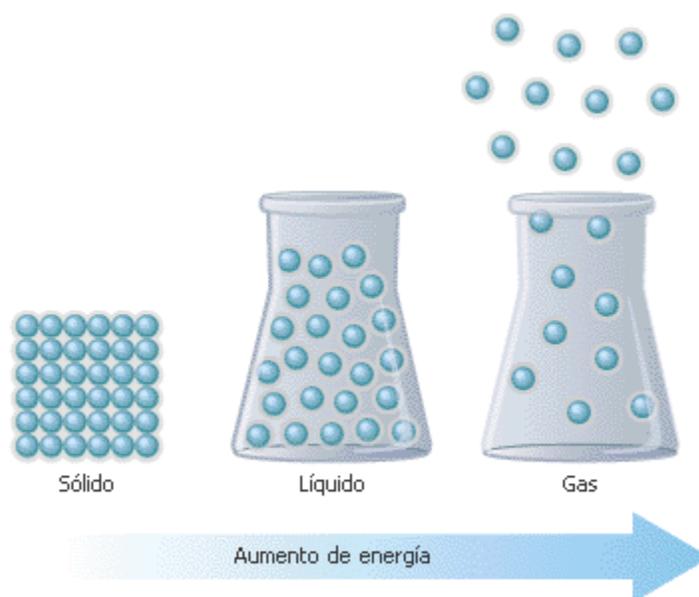


Figura 18: Visão microscópica dos estados da matéria 2.²¹

Claramente, tratam-se de simplificações feitas para tornar acessíveis ao estudante os conceitos de estado de agregação, caminho livre médio, energia interna, forças intermoleculares, energia cinética média, entre outros. Portanto, tais representações são mais ricas do que aparentam, conquistando seu lugar nesta proposta de atualização.

A seguir, esmiuçamos o processo de transição de fase gás-plasma, sugerindo ao longo do caminho mudanças à estrutura apresentada nos livros didáticos, de forma a integrar, da maneira mais natural possível, os conceitos da física de plasma à apresentação tradicional do conteúdo.

²⁰internet. Disponível em: <<http://fisicacampusararangua.blogspot.com.br/2010/12/por-que-ao-aquecer-uma-substancia.html>>. Acesso em: 16/4/2015.

²¹ internet. Disponível em: <<http://sacramentopintonatur2.blogspot.com.br/2015/02/1.html>>. Acesso em: 16/4/2015.

Definimos "plasma" como um gás quase neutro de partículas carregadas e neutras, que exhibe comportamento coletivo. Por possuir partículas carregadas, um plasma pode conter regiões de concentração de cargas; conseqüentemente, serão gerados campos elétricos internos a ele. A movimentação dessas partículas também cria campos magnéticos. Esses dois tipos de campos afetam o movimento de outras partículas carregadas, mais distantes das regiões de acúmulo de cargas. Isso diferencia o plasma de um gás ideal, em que todas as interações se dão por colisões, não havendo perturbações de outra natureza.

Assim, "comportamento coletivo" significa que a movimentação das partículas no plasma depende não somente das condições locais, mas também do estado do plasma em regiões remotas. Gases podem começar a mostrar comportamento de plasma quando têm tão pouco quanto 1% (um por cento) de grau de ionização (ou seja, 1% de seus átomos são íons). A densidade (número por m³) de átomos ionizados pode ser calculado pela equação de Saha:²²

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2,4 * 10^{21} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i} e^{-\frac{U_i}{KT}}$$

onde n_i é a densidade de átomos ionizados, n_n é a densidade de átomos neutros, K é a constante de Boltzmann, e U_i é a energia da primeira ionização do gás.²³

É fácil ver, usando essa equação, o porquê de o estado plasma não ocorrer naturalmente na Terra, mas ser abundante no meio espacial. A ocorrência natural de plasmas em altas temperaturas é a razão de ser o plasma designado o quarto estado da matéria.

Enquanto a temperatura aumenta, o grau de ionização permanece baixo, até que U_i seja um pequeno múltiplo de KT . Então, a densidade de átomos ionizados cresce abruptamente, e o gás se transformou em plasma. Uma vez ionizado o átomo, ele assim permanece até que encontre um elétron; neste caso, é muito provável que ele se recombinem com o elétron, para se tornar novamente neutro, para isso, emite um fóton, e por essa razão o plasma brilha. A taxa de recombinação claramente depende da densidade de elétrons, que pode ser assumida como igual à densidade de íons. A existência do plasma interestelar se dá por causa do baixo valor de n_i e, portanto, da baixa

²² Cf. CHEN, Francis F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2ed. New York: Plenum Press, 1985. p. 3.

²³ Cf. CHEN, Francis F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2ed. New York: Plenum Press, 1985. p.1.

taxa de recombinação.²⁴ De fato, a fotoionização garante um número mínimo de elétrons dentro da esfera de Debye, descrita abaixo neste capítulo.

A partir do trecho acima, podemos compreender porque a transição do estado gasoso para o estado plasma é chamado de "ionização" e porque a transição inversa é chamada de "recombinação". Alcançamos assim nossa primeira proposta:

Estado Inicial\Final	Sólido	Líquido	Gasoso	Plasma
Sólido	x	Fusão	Sublimação	X
Líquido	Solidificação	x	Ebulição	X
Gasoso	x	Liquefação	x	Ionização
Plasma	x	x	Recombinação	X

Em azul: transições de fase de primeira ordem

Em vermelho: transições de fase de segunda ordem

Tabela 2: Nomenclatura proposta para as transições de fase.

Desta forma, incluímos a transição de fase gás-plasma naturalmente, e sem dar a ela tratamento especial ou em separado. É importante associar a ionização aos processos endotérmicos e a recombinação aos processos exotérmicos.

Para uma turma mais avançada, ou em uma revisão ao fim do terceiro ano do Ensino Médio, ou ainda, para uma classe de estudantes familiarizados com o modelo do átomo de Bohr, esse momento pode ser ideal para se discutir a energia de ligação entre núcleo do átomo e seus elétrons, calculando-se a diferença na massa total do sistema íon e elétron, quando separados e quando recombinados.

Podemos classificar plasmas como frios, mornos ou quentes, de acordo com sua temperatura e grau de ionização:

No final das contas um grau de ionização muito pequeno é necessário para que um gás exiba propriedades eletromagnéticas e se comporte como um plasma: um gás

²⁴ Cf. CHEN, Francis F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2ed. New York: Plenum Press, 1985. p. 2 e 3.

alcança metade da sua condutividade elétrica quando está 0.1% ionizado e tem metade da sua condutância máxima quando está 1% ionizado.²⁵

Plasmas frios têm grau de ionização de 10^{-6} a 10^{-1} ; plasmas mornos têm qualquer grau de ionização maior que 10^{-1} e menor que 1; plasmas quentes são 100% ionizados.

3.2 Como determinar a temperatura de ionização/recombinação de um gás?

Assim como a temperatura de ebulição de um gás varia com a pressão, a temperatura de ionização também irá variar com a densidade de íons do plasma.

No Ensino Médio, esse dilema do ponto de transição variável é solucionado de duas formas: diagramas de estado, com curvas de fusão, vaporização e sublimação, e tabelas contendo as temperaturas típicas de fusão e ebulição à pressão de 1atm (logicamente, não se discute a relação de Clausius-Clapeyron em detalhe por causa das limitações matemáticas).

Assim, sugerimos que uma tabela com valores típicos seja fornecida, como o exemplo abaixo:

Meio	Densidade (partículas por m^3)	Temperatura (Kelvin)
Reator de fusão	10^{21}	10^8
Ionosfera	10^{11}	10^6
Tubo de descargas	10^{15}	10^5
Espaço Interplanetário	10^6	10^2
Chama	10^{14}	10^3

Tabela 3: Valores típicos de densidade e temperatura para o estado plasma.²⁶

²⁵ Cf. UMRAN, S. Inan; MAREK, Gołkowski. *Principles of Plasma Physics for Engineers and Scientists*. Cambridge : Cambridge University Press, 2011.

²⁶ Cf. CHEN, Francis F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2 ed. New York : Plenum Press, 1985, p. 12.

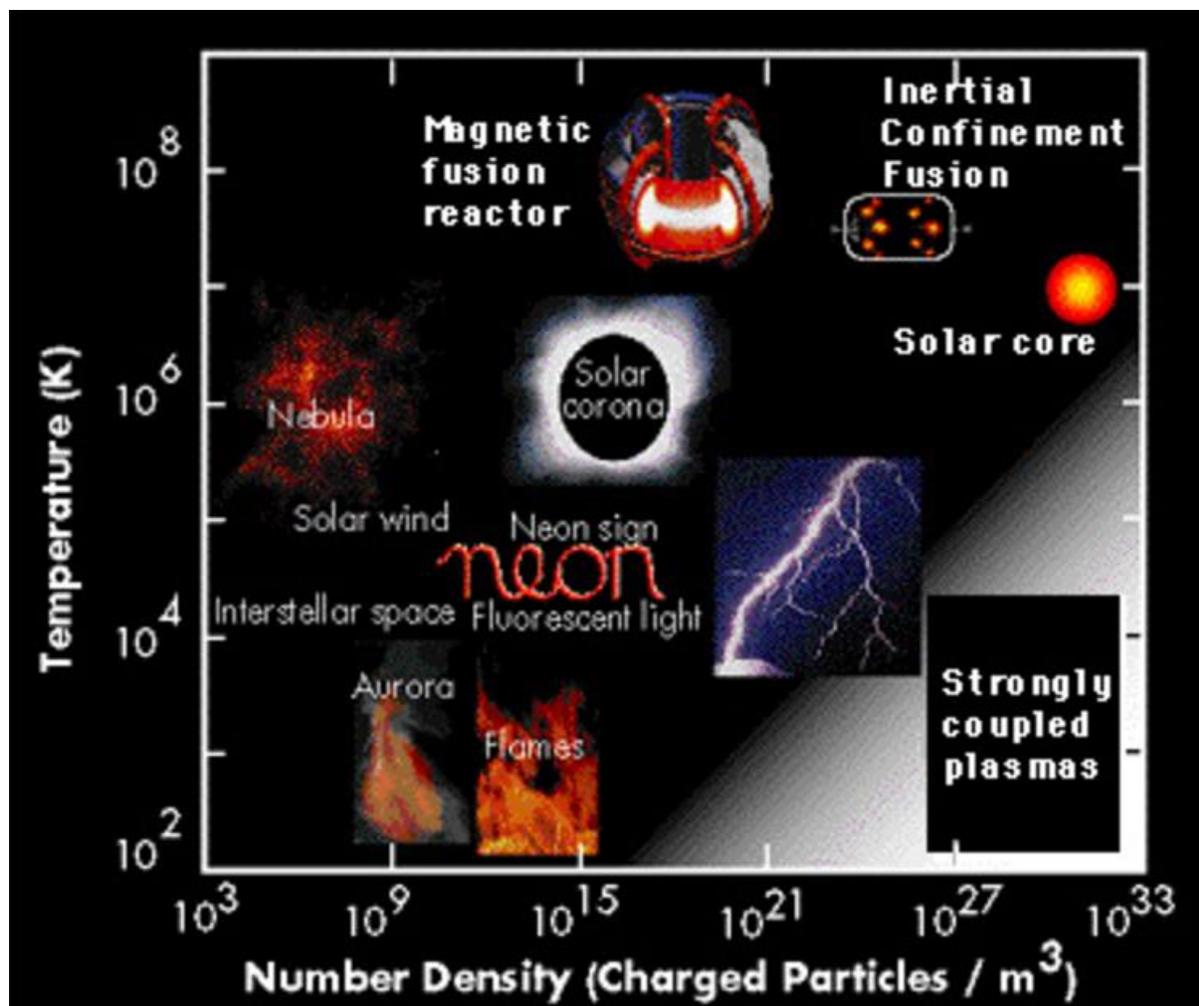


Figura 19: Os vários tipos de plasma²⁷

Resta agora encontrar um paralelo entre calor latente e sensível e a energia necessária para se ionizar um gás. Em verdade, ionização térmica é ineficiente, e a ionização geralmente se dá por colisões, radiofrequência, ou aplicação de um alto potencial elétrico. Ora, as outras transições de fase também podem ser produzidas de forma semelhante, por isso, podemos ver que é padrão que se ignorem as diversas fontes de energia recebidas pelo material, unindo-as sob uma única categoria: "aquecimento", e à energia recebida em si chama-se "calor". Sugerimos que a simplificação natural para a nomenclatura da energia necessária para se ionizar um gás é chamá-la calor de ionização.

²⁷ De *Contemporary Physics Education Project*. Disponível em: <http://www.cpepphysics.org/images/instructors-manual-5.jpg>. Acesso em: 11/7/2017

De fato, a transição de fase gás-plasma ocorre de forma diferenciada das outras transições. As transições comumente ensinadas no Ensino Médio recebem a classificação de transições de primeira ordem, ou descontínuas, enquanto que a transição gás-plasma é classificada como de segunda ordem, ou contínua, de acordo com a classificação de Ehrenfest. Argumentamos que as transições de segunda ordem são conceitualmente mais simples que as transições de primeira ordem, isto por causa do seu caráter contínuo:

Uma mudança de estado de equilíbrio de um mínimo local a outro constitui uma transição de fase de primeira ordem, induzida por ou uma mudança de temperatura ou por uma mudança em algum outro parâmetro termodinâmico. Os dois estados entre os quais uma transição de fase ocorre são distintos, ocorrendo em regiões separadas do espaço de configurações termodinâmicas.²⁸

Os estados entre os quais uma transição de fase de segunda ordem ocorre são contínuos no espaço de configurações termodinâmicas.²⁹

Enquanto, em um ponto de transição de primeira ordem, dois estados diferentes se encontram em equilíbrio, dificultando a identificação de qual dos dois estados o material se encontra, em uma transição de segunda ordem sempre se pode apontar o estado do material; neste, os dois estados são, de fato, o mesmo. Durante a transição de fase gás-plasma, ao se agregar ou retirar calor do material, ele continua a mudar sua temperatura, enquanto os processos de ionização e recombinação se realizam; assim, ele é intuitivamente mais confortável do que as outras transições, nas quais, apesar de continuamente fornecer (ou remover) calor ao sistema, a temperatura não muda. Concluímos que o calor de ionização é um híbrido entre o calor sensível e o latente parte da energia eleva a temperatura do sistema, e parte gera sua ionização.

Para o calor de ionização (ou ionizante) Q_i , nossa proposta inicial era assumir $3/2KT$ igual a U_i , seguindo a descrição de Francis F. Chen (1985), é importante mencionar que vamos nos limitar à primeira ionização.³⁰ Na verdade, quando a energia média das partículas chega aos valores da energia de ionização, o gás já se encontra no estado plasma há muito tempo. Isso, é claro, se deve à distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann e ao fato, mencionado anteriormente,

²⁸ Cf. CALLEN, Herbert B. *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. 2 ed. New York : Plenum Press, 1985, p. 217.

²⁹ Cf. CALLEN, Herbert B. *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. 2 ed. New York : Plenum Press, 1985, p. 218.

³⁰ Deixamos para o próximo capítulo o detalhamento de como apresentar aos alunos a técnica de medição da temperatura em termos de elétron-volts.

de que a ionização do gás se dá por colisões. Para uma breve introdução a esse tópico, ver anexo IV.³¹

Para o aumento de temperatura, assumimos o cálculo do calor sensível para um gás ideal. A ele somaremos o calor necessário para realizar a primeira ionização em todos os átomos, o que chamaremos de calor ionizante.

Em primeiro lugar, definimos calor específico ionizante: $c_i = \frac{\text{energia de ionização}}{\text{massa atômica}}$. Para U_i dado em eV:

$$c = \frac{U_i}{\text{massa atômica}}$$

A massa é dada em quilogramas. Portanto, podemos definir calor ionizante $Q_i = mc_i$. Exemplo de cálculo do calor ionizante para o argônio:

Elemento	Energia de ionização U_i (eV)
Hidrogênio	13.6
Nitrôgeno	14.6
Argônio	15.8

Tabela 4: Energia de ionização de H, N, e Ar.³²

Convertendo para o sistema internacional de unidades:

$$\frac{1,602\ 176\ 622 \cdot 10^{-19} \text{C} \cdot U_i}{1,660\ 539\ 0 \cdot 10^{-27} \cdot \text{kg} \cdot \text{massa em unidades atômicas}}^{33}$$

Ou,

$$\frac{9,648\ 533\ 2 \cdot 10^7 \cdot U_i \cdot C}{\text{massa em unidades atômicas} \cdot \text{kg}}$$

Para o argônio:

$$c = 3,82 \cdot 10^7 \text{Ckg}^{-1}$$

O calor total Q_i para se ionizar o gás se torna:

$$Q_i = mc\Delta T + mc_i$$

³¹ O entendimento ou ensino dessa distribuição é raro ou ausente, nas aulas do Ensino Médio.

³² Dados retirados da internet. Disponível em: <<http://www.ptable.com>>. Acesso em: 13/5/2015.

³³ Dados recomendados por CODATA, The Committee on Data for Science and Technology. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>>. Acesso em: 9/7/2017.

Para 1g de hidrogênio (1.00797 u.a) em um reator de fusão nuclear (10^8 K), adotamos mais uma simplificação padrão do Ensino Médio, o calor específico é considerado constante e igual a 14,31 J/g³⁴:

$$\Delta T = \left(14,31 * 10^8 + \frac{9,648\ 533\ 2 * 10^7}{1000} * \frac{13,6}{1,007\ 97} \right) K = 1,43 * 10^9$$

Ao compararmos o calor sensível, da ordem de 10^9 , ao calor ionizante, da ordem de 10^6 , fica aparente que, a uma temperatura tão alta, o hidrogênio teria sido ionizado há muito tempo. Seria aceitável então, exigir que a variação de temperatura seja tal que o calor ionizante seja da mesma ordem de grandeza do calor sensível?³⁵

Tal hipótese imporá uma variação de temperatura da ordem de 10^5 K para a densidade de 10^{18} partículas por m^3 , típico de tecnologias de plasma como as de encravamento de placas de circuito, lâmpadas fluorescentes, tubos de descarga, arcos elétricos, faíscas, limpeza a plasma, ou processamento de superfícies para aumentar as propriedades de adesão de tinta ou metais a uma superfície.³⁶

Traçando paralelo entre esse resultado e nossa proposta inicial, $U_i = 3/2$ KT, podemos calcular a temperatura de transição de fase estimada:

$$T = 13,6 * \frac{2}{3} * \frac{1}{8,617 * 10^{-5}} K = 1,05 * 10^5 K$$

Utilizando a equação de Saha, podemos averiguar quão acurado é este resultado. Tomando $n_n = 3 * 10^{18} m^{-3}$ como a densidade de átomos neutros em um tubo de descargas, e $U_i = 13.6$ eV:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2,4 * 10^{21} * \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i} e^{-\frac{U_i}{KT}}$$

Isolando n_i :

$$n_i \approx \sqrt{2,4 * 10^{21} * n_n * T^{\frac{3}{2}} * e^{-\frac{U_i}{KT}}}$$

$$\sqrt{2,4 * 10^{21} * 3 * 10^{18} * (a * 10^4)^{\frac{3}{2}} * e^{-\frac{13,6}{8,616 * 10^{-5} * a * 10^4}}} = 3,260 * 10^{18}$$

³⁴Disponível em: <http://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-d_976.html>. Acesso em: 13/5/2015.

³⁵ Esta hipótese não pôde ser testada durante a duração do mestrado, em virtude por causa da longa greve dos funcionários da UnB. O experimento, agora pronto, não pôde ser montado e realizado a tempo de atender ao prazo de entrega desta dissertação.

³⁶ GOLDSTON, Robert J.; RUTHERFORD, Paul H. *Introduction to plasma physics*. Princeton : Institute of Physics Publishing, 1995. p.9.

$$a = 0.79$$

Portanto, quando a temperatura for próxima a 8×10^3 K, o gás estará completamente ionizado, demonstrando o que já havia sido descrito por Chen (1985), a saber, que $U_i = 3/2KT$ é uma energia muito alta, e o gás já teria sido ionizado, basta que U_i seja um pequeno múltiplo de KT . Traçamos o gráfico a seguir, "número de íons *versus* temperatura":

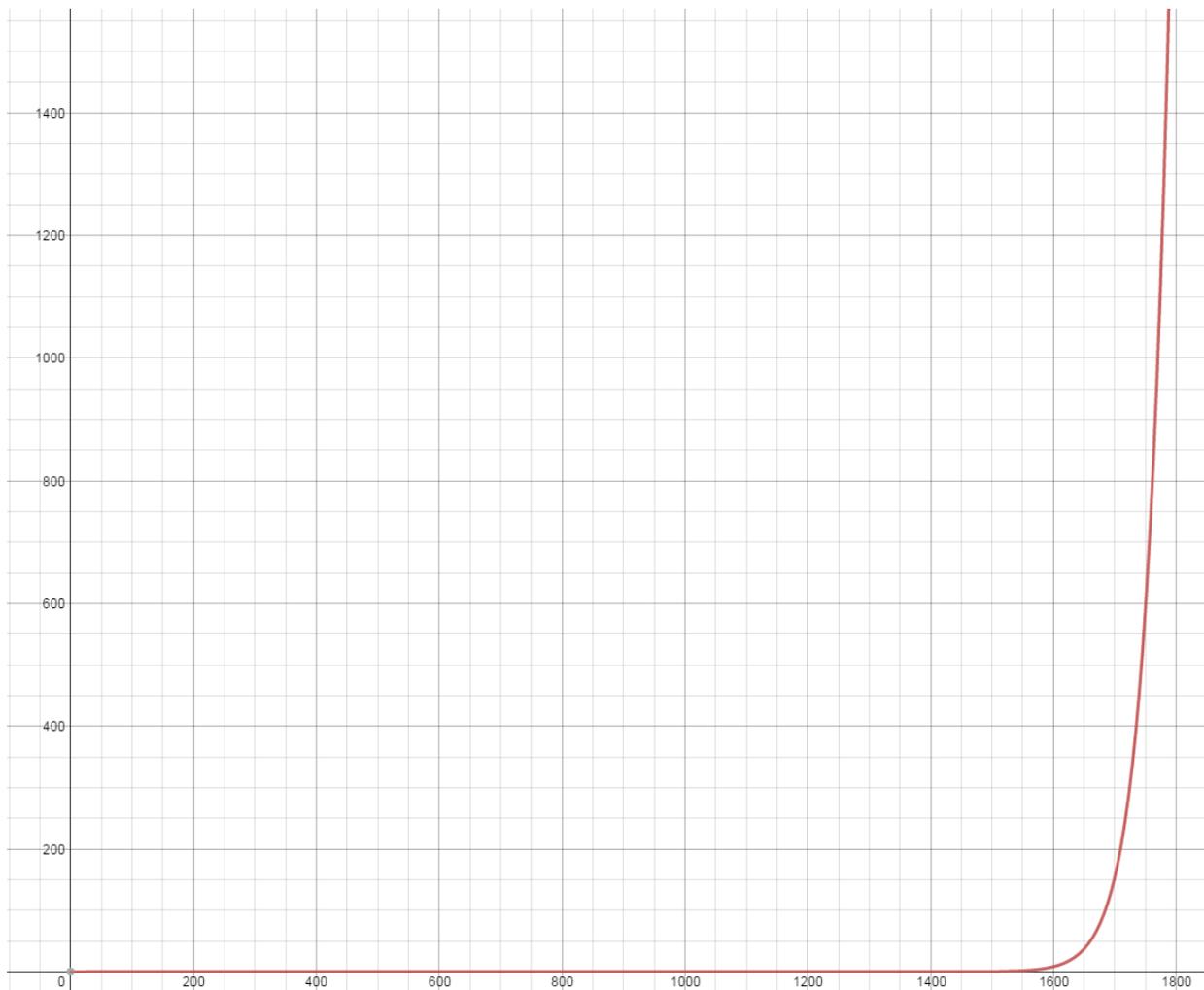


Gráfico 1: número de íons calculado pela equação de Saha.³⁷

³⁷ Gráfico criado utilizando o aplicativo *Desmos Calculator*. Fonte: internet. Disponível em: <<http://www.desmos.com>>.

Função cujo gráfico se encontra acima:

$$\sqrt{2,4 * 10^{21} * 3 * 10^{18} * x^{\frac{3}{2}} * e^{-\frac{13,6}{8,616 * 10^{-5} * x}}}$$

Em uma escala que comporta a temperatura encontrada:

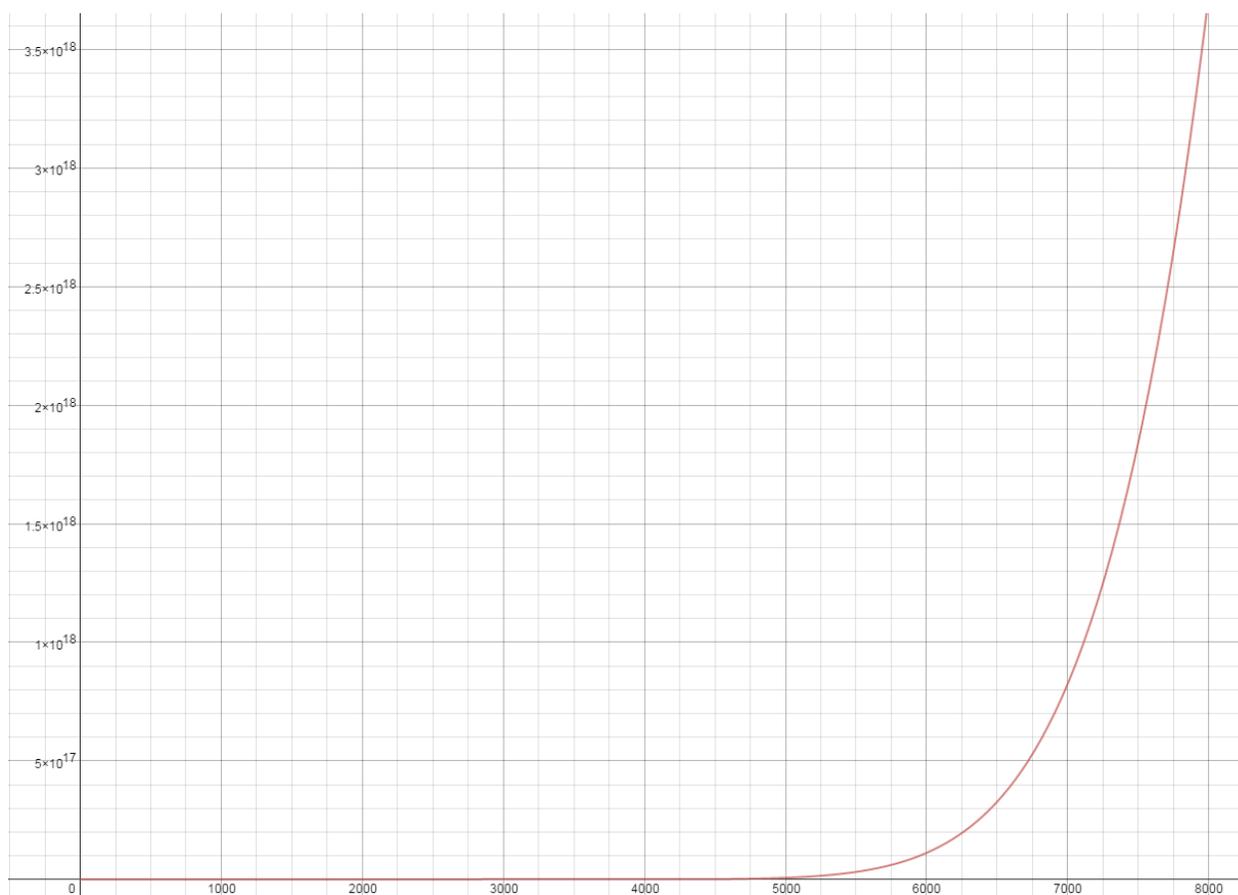


Gráfico 3: número de íons calculado pelo equação de Saha, escala maior.³⁸

³⁸ Gráfico criado utilizando o aplicativo *Desmos Calculator*. Fonte: internet. Disponível em: <<http://www.desmos.com>>.

O gráfico acima revela um pouco mais sobre como ocorre a transição, quando a substância chega a 60% da temperatura de 100% ionização, o gás já se encontra em estado plasma, tendo 10% de seus átomos ionizados. A partir de então, as colisões por interação Coulombiana tomam conta, por seu maior alcance, e o gás se ioniza rapidamente.

Concluimos que o caráter contínuo da transição implica que não há uma temperatura específica para a ionização/recombinação do gás, mas existe um intervalo de temperaturas dentro do qual ela ocorre. Então, só é possível selecionar um valor específico adotando-se um critério arbitrário, ou singular de cada elemento. Por exemplo, sabendo-se o grau de ionização necessário para que o gás argônio passe a agir como um plasma, seria lógico escolher a temperatura relativa a ele como a temperatura de ionização. Até que se realizem experimentos que determinem o grau de ionização a partir do qual o gás se comporta como plasma, exigir que os calores sensível e ionizante sejam da mesma grandeza, ou iguais ($Q_{\text{sensível}} = Q_i$, logo, $c\Delta T = c_i$), nos parece a simplificação mais coerente para aplicação no ensino médio. Assim, o aluno deduziria a variação da temperatura do gás da forma:

$$Q_i = mc\Delta T$$

$$\Delta T = 9,65 * 10^4 * \frac{U_i}{c * m}$$

Usando como exemplo 1 g de nitrogênio:

$$\Delta T = 9,65 * 10^4 * \frac{14,6}{1,04 * 1} K = 1,35 * 10^6 K^{39}$$

obtendo um valor típico para aplicações tecnológicas dos plasmas.⁴⁰

3.3 Comentário sobre a capacidade térmica dos plasmas

Foi assumido que o calor específico dos plasmas é igual ao dos gases e constante. Naturalmente esse não é o caso, justificamos essa escolha em dois argumentos. Em primeiro lugar, uma questão didática, o calor específico (e a capacidade térmica) é tratado como constante no EM. Em segundo, a maioria dos gases se torna plasma com baixa porcentagem de íons, assim,

³⁹ Aqui arredondamos a razão carga elementar sobre massa de uma unidade atômica de maneira arbitrária, para se assemelhar aos outros valores encontrados na equação, e ter um número de algarismos significativos mais comumente visto por alunos do Ensino Médio.

⁴⁰ Dados para o calor sensível do nitrogênio retirado da internet. Disponível em: <http://www.engineeringtoolbox.com/nitrogen-d_977.html>. Acesso em: 13/5/2015.

assumimos que até o limiar esfumaçado em que o gás passa a se comportar como plasma, podemos com certa segurança manter o calor específico do estado gasoso.

Devemos fazer ainda mais uma observação, o método proposto não contempla a densidade de partículas por unidade de volume. Para contornar esse problema, sugerimos solução já comumente implementada no EM, que o contexto das questões apresentadas aos alunos utilize sempre valores típicos de plasma, ou ainda, que se estabeleça um conjunto padrão de densidade e pressão de plasmas. Essa última, não foi explorada nesse trabalho.

A partir do ponto em que o estado plasma está configurado, aparecem complicações fora do escopo adequado para material a ser tratado antes do nível superior de ensino. Um plasma consiste de diferentes espécimes de partículas, elétrons e íons, que, para tempos curtos típicos da produção de plasmas, estarão em desequilíbrio térmico. Cada espécime terá uma capacidade térmica diferente, ou calculada a partir da distribuição de Fermi-Dirac, ou a partir da distribuição de Bose-Einstein^[28].

3.4 Modelo de bolinhas

Retornando à apresentação qualitativa do plasma, recomendamos ao docente a utilização dos diagramas adaptados:

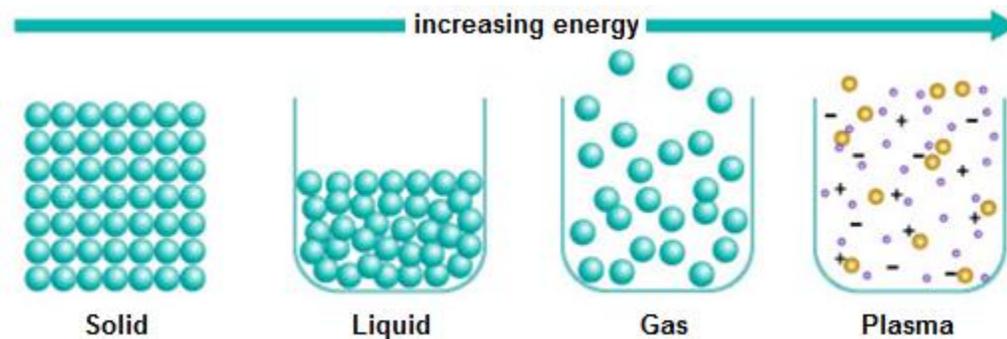


Figura 20: Os quatro estados clássicos da matéria.⁴¹

⁴¹ 5xDisponível em: <<http://jfb-levage.com/tag-plasma-4-states-of-matter.html>>. Acesso em: 13/5/2015.

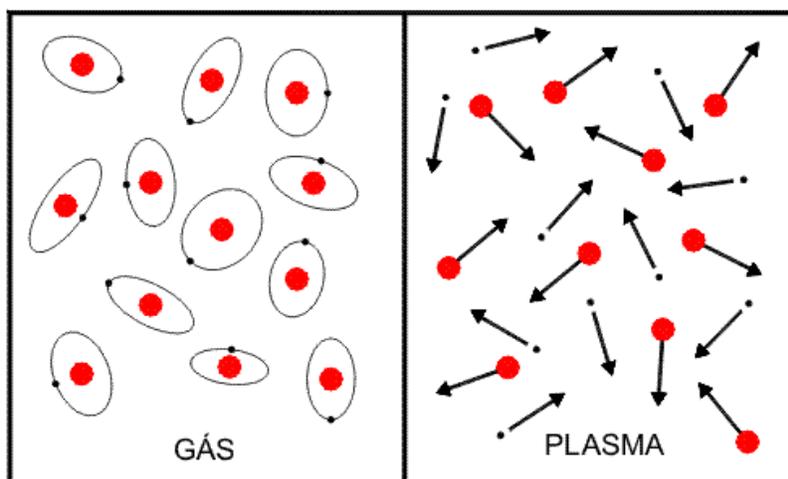


Figura 21: Comparação gás-plasma.⁴²

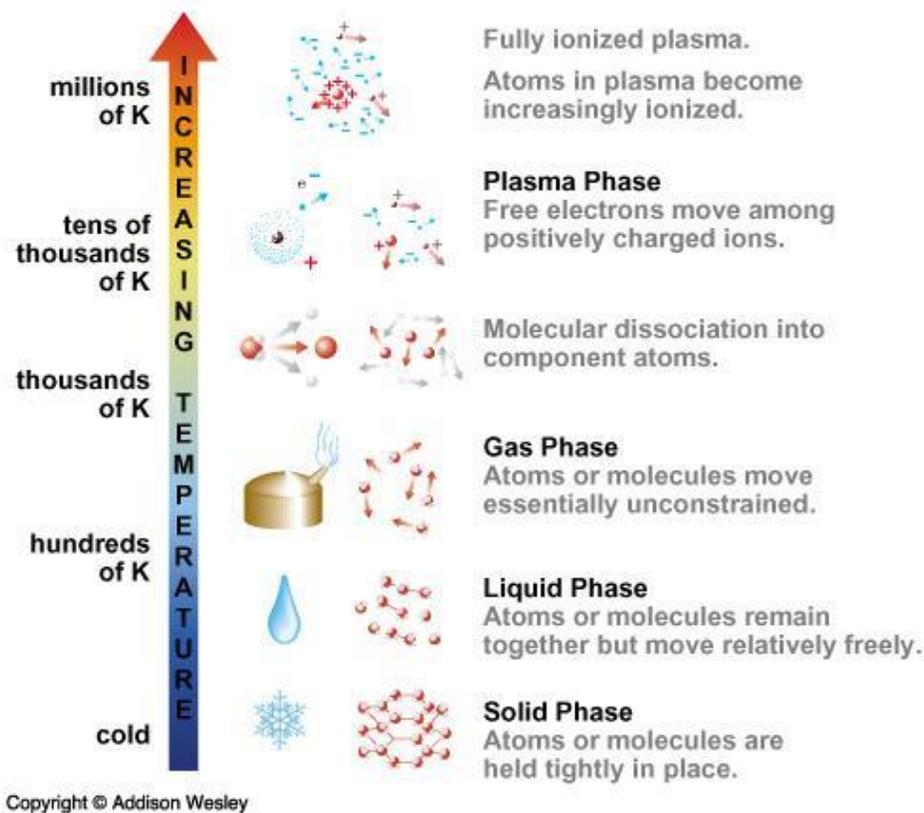


Figura 22: Fases da matéria *versus* temperatura.⁴³

⁴² internet. Disponível em: <http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Site/Text/Variety_of_Plasmas.htm>. Acesso em: 13/5/2015.

⁴³ Disponível em: <<http://cse.ssl.berkeley.edu/bmendez/ay10/2002/notes/lec5.html>>. Acesso em: 13/5/2015.

Por último, sugerimos uma singela adição às curvas de aquecimento e resfriamento, como consideramos que o calor específico na fase gasosa dos gases é constante, basta estender a linha da fase gasosa, possivelmente alterando a cor da linha, para que se identifiquem a ionização e a recombinação.

4. A Energia Interna de um Gás Perfeito: Medindo a temperatura em elétron-volts

4.1 Teoria cinética dos gases

Neste capítulo queremos apresentar alguns aspectos da teoria cinética dos gases, como: a relação entre pressão de um gás e a velocidade média das suas moléculas; a relação entre a velocidade média das suas moléculas e a temperatura do gás; e a energia cinética média em função da temperatura.

Tal cálculo é desenvolvido apenas em uma minoria dos livros consultados⁴⁴, logo, ausente em vários⁴⁵, porém, é essencial para a compreensão da fenomenologia dos plasmas, a saber, que um plasma pode ter várias temperaturas ao mesmo tempo, com cada espécime de íon, e os elétrons, com sua própria velocidade média. Podemos inferir que a exclusão deste conteúdo acontece por não fazer parte do conteúdo cobrado no Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM)⁴⁶, e em outros vestibulares pelo Brasil, pelo que entendemos por bem sugerir sua valorização no currículo de Física, o que nos motivou a sua inclusão neste trabalho.

Também é importante discorrer sobre os resultados aqui apresentados, para que o estudante aprenda a interpretar a temperatura quando dada em unidades de energia, especialmente em elétron-volts – que é mais adequada que o Joule, em termos de ordem de grandeza.

Uma introdução qualitativa à distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann, e seu papel na transição de fase gás-plasma, é proposta. O conteúdo aqui apresentado é pertinente ao segundo ano do ensino médio.

Antes de se apresentarem os cálculos acima elencados, é fundamental que tenham sido tratados, junto aos alunos, os postulados da teoria cinética dos gases perfeitos, abordando os seguintes pontos:

⁴⁴ Como: BOWEN-JONES, Michael; HOMER, David. *IB Physics Course Book : 2014 Edition*. Oxford : Oxford University Press, 2014. E: BÔAS, N. V.; DOCA, R. H; BISCUOLA, G. J. *Física 2*. Coleção Conecte. São Paulo : Saraiva, 2012.

⁴⁵ Por exemplo: ALVARENGA, Beatriz; MÁXIMO, Antônio. *Curso de Física*. São Paulo : Scipione, 2007. / FERRARO, N. G; SOARES, P. A. T.; FOGO, R. *Física Básica*. São Paulo : Atual, 2009. / TSOKOS. K. A. *Physics for the IB Diploma*. 5 ed. e 6 ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2009 e 2014.

⁴⁶ Cf. BRASIL, Ministério da educação. *Matriz de referência ENEM*. internet. Disponível em: <http://download.inep.gov.br/educacao_basica/enem/downloads/2012/matriz_referencia_enem.pdf>.

1. As moléculas se movem em todas as direções e em linha reta, entre as colisões, que são perfeitamente elásticas.
2. A distância percorrida pelas moléculas entre colisões é muito maior que seu diâmetro, assim como seu volume deve ser desprezível quando comparado ao volume do recipiente.
3. Fora as colisões, forças intermoleculares são desprezíveis. O tempo de duração das colisões é muito menor que o tempo entre duas colisões.
4. As moléculas são esferas perfeitas e rígidas, colidindo com as paredes do recipiente e transferindo momento, o que gera a pressão do gás.

Em uma caixa cúbica de lado L e volume V , colocam-se n mols de um gás perfeito. O sistema é mantido de tal forma que as paredes da caixa permanecem à temperatura T constante. Cada molécula tem massa m , velocidade v , com componentes v_x , v_y , v_z , e momento p . Considerando-se apenas as colisões com as paredes do recipiente, queremos calcular a força exercida pelas moléculas em apenas uma parede.

A variação do momento de uma partícula que colida com uma parede perpendicular à direção x será:

$$mv_x - (-mv_x) = 2mv_x$$

transmitindo à parede momento linear de mesma magnitude.

O tempo entre as colisões com a mesma parede pode ser calculado:

$$\Delta T = \frac{\text{distância}}{\text{velocidade}} = \frac{2L}{v_x}$$

Como a força resultante F_m , exercida por uma molécula na parede, é a taxa de variação do momento:

$$F_m = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{\frac{2L}{v_x}} = \frac{mv_x^2}{L}$$

Assim, a força total exercida por todas as moléculas (N sendo o número total de moléculas) é:

$$F_{total} = \sum_{i=1}^N \frac{mv_{xi}^2}{L} = \frac{m}{L} \sum_{i=1}^N v_{xi}^2 = \frac{m}{L} N \bar{v}_x^2$$

Onde \bar{v}_x^2 é o valor médio do quadrado da componente x das velocidades das moléculas. Substituindo N por $n \cdot A$ (A é o número de Avogadro, igual a $6,02 \times 10^{23}$), e lembrando que $m \cdot A$ = massa molar (M), podemos determinar a pressão P :

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{L^2} = \frac{m}{L^3} N \bar{v}_x^2 = \frac{m}{L^3} n A \bar{v}_x^2 = \frac{M}{L^3} n \bar{v}_x^2$$

Mas $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$. Portanto, como não há uma direção preferencial para o movimento das moléculas, os valores médios das componentes são iguais, ou $v_x^2 = \frac{1}{3} v^2$.

$$P = \frac{M}{3L^3} n \bar{v}^2$$

Logo:

$$\bar{v}^2 = \frac{3PL^3}{nM} = \frac{3PV}{nM}$$

Utilizando-se a equação de Clapeyron, $PV = nRT$:

$$\bar{v}^2 = \frac{3RT}{M} \text{ ou } T = \frac{M}{3R} \bar{v}^2$$

R é a constante universal dos gases perfeitos

Ora, em um gás perfeito – portanto, na ausência de potenciais (gravitacional, elétrico, etc) –, a energia interna (U) é determinada pela energia cinética total das moléculas. Seja m_g a massa do gás:

$$U = \frac{m_g \bar{v}^2}{2}$$

Por consequência, a energia média das moléculas é igual à energia cinética média (K) das mesmas:

$$K = \frac{m \bar{v}^2}{2} = \frac{m \cdot 3RT}{2M} = \frac{3RT}{2A} = \frac{3K_b T}{2}$$

Porque a temperatura e a energia média das partículas são tão proximamente relacionadas, é comum se dar a temperatura em termos de unidades de energia, fazendo-se a conversão entre os dois pelo uso da constante de Boltzmann K_b ($\frac{R}{A} = K_b$). Cada grau de liberdade é responsável por

$K_b T/2$. Assim, para evitar confusão sobre o número de dimensões envolvidas, a energia correspondente a KT é utilizada.⁴⁷

Um elétron no vácuo, acelerado por uma diferença de potencial elétrico de 1 Volt, receberá energia cinética igual a $W = qV = 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \text{ CV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Faz sentido definir uma nova unidade de energia a partir desse resultado – o elétron-volt (eV) –, sendo e equivalente à carga elementar omitida. Assim, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Tomando $K_b = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$, podemos calcular o fator de conversão entre eV e K:

$$\bar{E} = K_b T$$

$$T = \frac{E}{K_b} = \frac{1 \text{ eV}}{8,617 * 10^{-5}} \approx 11.600K$$

Plasmas podem ter diversas temperaturas ao mesmo tempo. Isto se deve às distribuições de velocidades relativas à cada espécie atômica presente. Os elétrons também têm sua própria distribuição Maxwelliana. O motivo dessa separação é a frequência de colisões: cada partícula colide com outra da mesma espécie mais vezes do que com as de outras espécies. Assim, os íons podem estar em equilíbrio térmico entre si, da mesma forma que os elétrons, mas o plasma tem que durar tempo suficiente para que as duas temperaturas se equilibrem.

O estudante pode ficar intrigado, ao se deparar com um fato interessante: a temperatura dentro de uma lâmpada fluorescente é de aproximadamente 20.000K, muito acima dos 310 K que podem ser esperados em um dia quente no Rio de Janeiro; no entanto, pode-se tocar a lâmpada sem maiores preocupações. É o momento ideal para discutir a capacidade térmica e a densidade das substâncias: mesmo que elétrons e íons tenham individualmente altas energias, não há número suficiente deles dentro da lâmpada, para que somadas as energias, obtenhamos calor capaz de causar queimaduras, em comparação, um litro de água fervente, muito mais frio que as cargas no tubo, é mais que capaz de causar queimaduras.

4.2 Os critérios para a identificação do estado plasma

Já detalhamos dois requisitos para a formação de um plasma, que o material seja quase neutro, e que tenha temperatura suficiente para que seja ionizado além de certa porcentagem que varia de elemento a elemento. Existem, no entanto, três condições que um plasma deve

⁴⁷ Cf. CHEN, Francis F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2 ed. New York : Plenum Press, 1985. p. 6.

satisfazer: o comprimento de Debye deve ser muito menor do que a dimensão ocupada pelo gás, o número de partículas na esfera de Debye deve ser muito maior do que 1, e o produto da frequência de oscilação de plasma vezes o tempo médio entre colisões entre átomos neutros deve ser maior que 1 (CHEN, 1985).

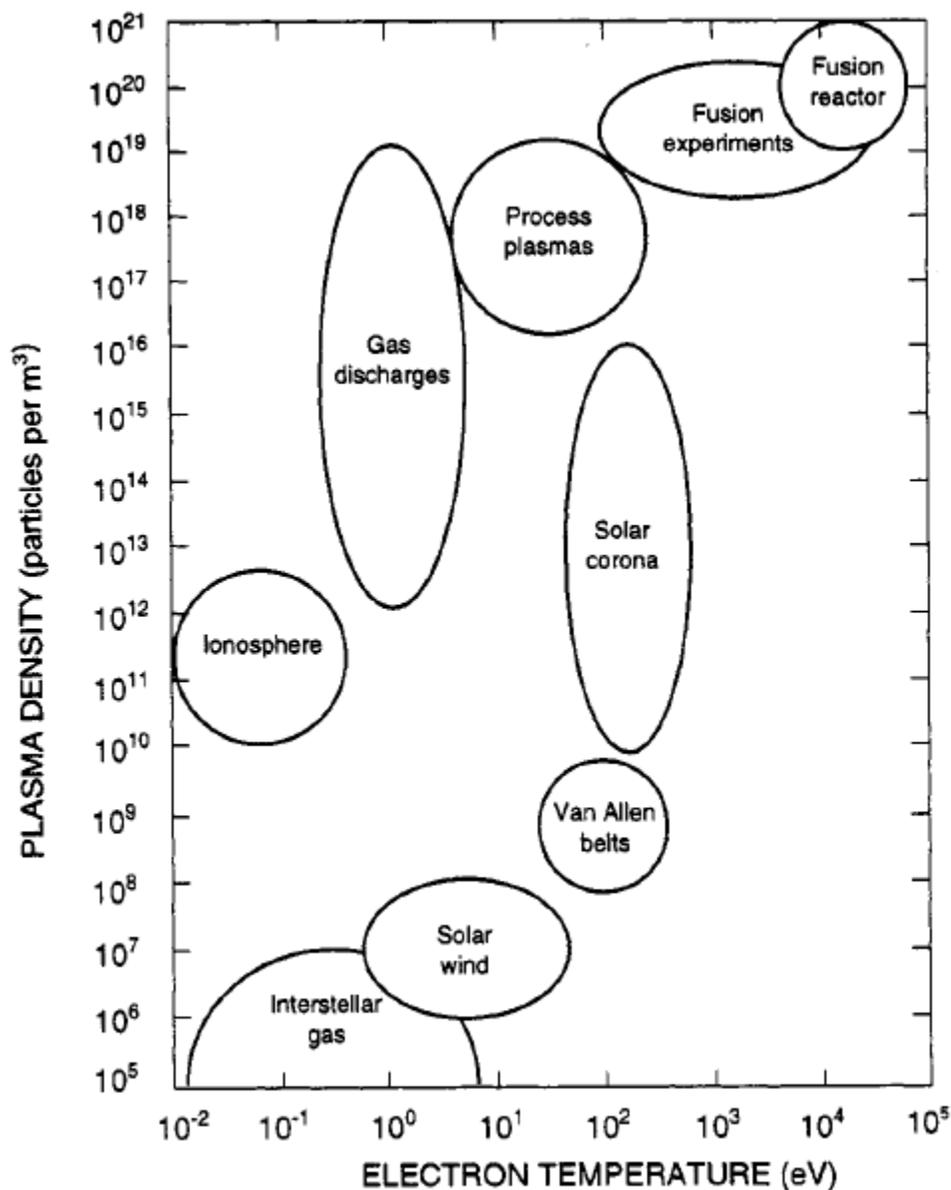


Figura 23: Temperaturas características da matéria em estado plasma, dadas em eV.⁴⁸

⁴⁸ [23] GOLDSTON, Robert J.; RUTHERFORD, Paul H. *Introduction to plasma physics*. Princeton : Institute of Physics Publishing, 1995. p. 9.

(a) Comprimento de Debye: ao colocar objetos eletricamente carregados dentro do plasma, quase instantaneamente esses objetos irão atrair partículas de cargas opostas, que rodearam o objeto cancelando o campo elétrico dentro do plasma. A fronteira dessa camada de cargas ao redor dos objetos ocorre no raio em que a energia potencial é aproximadamente igual à energia térmica KT das partículas, nesse ponto as partículas escapam do potencial, podendo assim existir potenciais elétricos dentro do plasma. Em um plasma suficientemente frio a blindagem se aproxima de 100%. A distância da superfície do objeto carregado até a fronteira em que partículas tem velocidade igual ou acima da de escape, é chamada de comprimento de Debye. Para que esteja configurado o estado plasma, é necessário que o plasma ocupe um espaço muito maior que a blindagem de Debye ao redor desses objetos carregados. Essa exigência tem relação direta com a quasineutralidade do plasma, ele não pode ser tão neutro tal que as forças eletromagnéticas desapareçam. O plasma também precisa ser denso o bastante tal que ele tenha partículas suficientes para blindar objetos carregados dentro de si, sem que seja dominado totalmente pela influência do objeto, ou seja, o comprimento de Debye deve ser muito menor que a dimensão do plasma.

$$\lambda_d = \left(\frac{\epsilon_o K T_e}{n e^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

λ_d : comprimento de Debye

ϵ_o : permissividade do vácuo

K: constante de Boltzmann

T_e : temperatura dos elétrons

n: densidade do plasma a uma grande distância do objeto

e: carga elementar

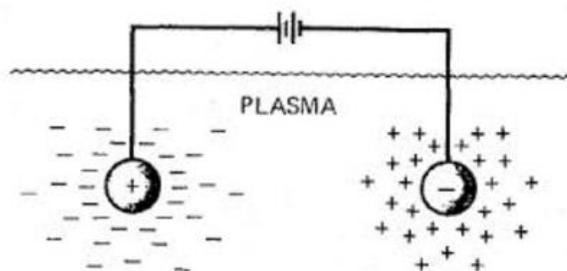


Figura 24: Blindagem de Debye⁴⁹

⁴⁹ CHEN, Francis (1985). p 8.

Finalmente, esse condição é uma simplificação adequada para a chamada “aproximação dos plasmas”, em que se assume que a densidade de íons é igual à densidade de elétrons mas $\nabla \cdot E \neq 0$ ao mesmo tempo⁵⁰.

- (b) Número de partículas na esfera de Debye: esta condição está estreitamente correlacionada a primeira, se houverem apenas uma ou duas partículas blindando o objeto carregado inserido no plasma, o conceito de blindagem não seria válido, portanto o número dessas partículas na bainha de plasma deve ser muito maior do que 1.

$$N_d = \frac{4}{3} n \pi \lambda_d^3 = \frac{1,38 * 10^6 * T^{\frac{3}{2}}}{n^{\frac{1}{2}}}$$

N_d : número de partículas na bainha

- (c) Frequência de oscilação do plasma e tempo médio de colisões: porque elétrons tem massa aproximadamente 1000 vezes menor que o menor íon, um próton, em um plasma, eles se movem de maneira muito mais célere que os últimos. De fato, podemos pensar que os íons formam um plano de fundo imóvel em relação aos elétrons. Quando os elétrons se deslocam em relação a esse plano de fundo, campos elétricos aparecem em direção tal que precipite o retorno à neutralidade do plasma, puxando-os de volta a sua posição inicial. Porém, como uma mola, os elétrons passam direto pela posição de equilíbrio, e o mesmo se repete na direção oposta. A frequência desse movimento é chamada de *frequência de plasma*⁵¹. Tipicamente, essa frequência é da ordem de 10^9 Hz. Para que se configure o estado plasma, é importante que o período de oscilações seja inferior ao tempo médio de colisões entre os íons, caso contrário, não se poderia dizer que o plasma realmente oscila, e portanto as forças eletromagnéticas não seriam dominantes, descaracterizando o estado plasma, assim, o produto da frequência de plasma vezes o tempo médio de colisões deve ser maior que 1.

$$\omega_p = \left(\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ω_p : frequência de plasma

n_0 : densidade de íons

m : massa do elétron

⁵⁰ CHEN, Francis (1985). p 77.

⁵¹ CHEN, Francis (1985). p 82.

Não recomendamos que o conteúdo desta subseção seja introduzido para os alunos de forma quantitativa, mas incentivamos o professor a discutir qualitativamente o comportamento dos plasmas por consequência desses parâmetros.



Figura 25: Nove dias em um ano, filme soviético de 1962.⁵²

⁵² Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=e6H-9xk2nb8>. Acesso em: 13/7/2017.

5. Partículas carregadas em campos eletromagnéticos: O espectrômetro de massa

5.1 Introdução

Múltiplos sub-tópicos de eletromagnetismo estão inclusos no currículo de Ensino Médio do país, nosso objetivo neste capítulo é tratar de como o professor pode utilizar estes para direcionar o estudo de fenômenos e usos da física de plasma. Quatro das principais máquinas utilizadas para se estudar substâncias no estado plasma são descritas e referenciadas como exemplos de aplicação, com foco na espectroscopia de massa, que identificamos como mais ausente dentro das salas de aula.

Como elucidado no primeiro capítulo deste trabalho, a história dos tubos de raios catódicos e da espectroscopia de massa começa com Geissler, Plucker, Crookes, e Thomson, é importante, no entanto, ressaltar mais alguns marcos importantes no desenvolvimento desta tecnologia.

Em 1886, William Crookes, em pronunciamento à *Chemical Section of the British Association at Birmingham*, disse (WHITE; WOOD, 1986. Tradução livre pelo autor):

Eu penso, portanto, que quando nós dizemos ‘o peso atômico de’, por exemplo, do cálcio é 40, nós realmente expressamos o fato que, embora a maioria dos átomos de cálcio de fato tenha 40 unidades de massa atômica, existe um número não pequeno que são representados por 39 ou 41, ou um número menor por 38 ou 42, e assim por diante. Não será possível, ou alcançável, que esses átomos mais pesados e mais leves possam ter em alguns casos subsequentes sido separados por um processo que lembra o fracionamento químico? Essa separação pode ter acontecido em parte quando a matéria atômica estava se condensando a partir estado primitivo de ignição intensa, mas também pode ter sido parcialmente afetado durante as eras geológicas por dissoluções e precipitações das várias terras. Isso pode parecer uma especulação audaciosa, mas eu não penso que está além do poder química testar a possibilidade.

De acordo com White e Wood (1986, p. 5), no mesmo ano, o físico alemão Eugen Goldstein, que investigava descargas em tubos a baixa pressão, observa que se o catodo fosse perfurado também havia um brilho em torno deste. Conclui assim que havia outros raios, além dos catódicos, indo na direção oposta. Porque esses raios passavam por dentro das perfurações, denominou-os raios canais. Treze anos depois, um alunos de Kirchhoff, Wilhelm Wien, mostra que esses raios, ou íons, poderiam ter sua trajetória desviada por um eletroímã. Durante esse mesmo período, Thomson estava no laboratório Cavendish, em Cambridge, estudando em detalhe as trajetórias de elétrons e íons positivos, percebendo que, quando defletidas por um campo magnético, se tornavam parábolas bem definidas e discretas, provando que átomos individuais do mesmo elemento tem aproximadamente a mesma massa. Assim nasceu a espectroscopia de massa, é importante esclarecer ao aluno de ensino médio o sentido da palavra espectro, a saber, o domínio dos valores possíveis para as massas. Thomson então declara (WHITE; WOOD, 1986. Tradução livre pelo autor):

Estou certo de que existem muitos problemas na química que podem ser resolvidos com mais facilidade desta forma do que de qualquer outro método. O método é surpreendentemente sensível, ainda mais que a espectroscopia ótica, requer uma

quantidade infinitesimal de material e não requer que esteja especialmente purificado. Essa técnica não é difícil se aparelhos que produzam alto vácuo estejam presentes.

Ainda de acordo com White e Wood (1986, p. 7), já em 1912 Thomson conseguia distinguir trajetórias de íons cuja massa diferia em apenas 10%. E em 1919, Francis William Aston, um colega de Thomson no laboratório Cavendish, foi capaz de estabelecer uma razão de abundância de 10 para 1 para Neônio de massa atômica 20 e 22, respectivamente, um resultado muito próximo do peso atômico conhecido de 20.18.

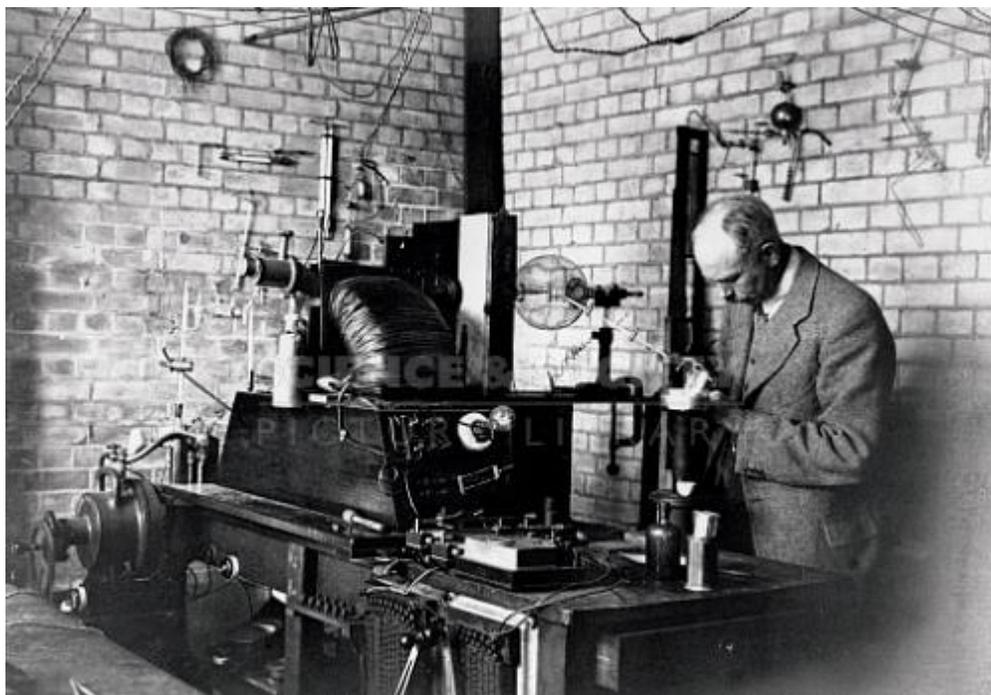


Figura 26: Aston e a terceira versão de seu espectrômetro de massa⁵³

⁵³ Foto de Science and Society Picture Library. Disponível em: <https://www.scienceandsociety.co.uk/results.asp?image=10296195&itemw=4&itemf=0002&itemstep=1&itemx=1>. Acesso em: 18/7/2016

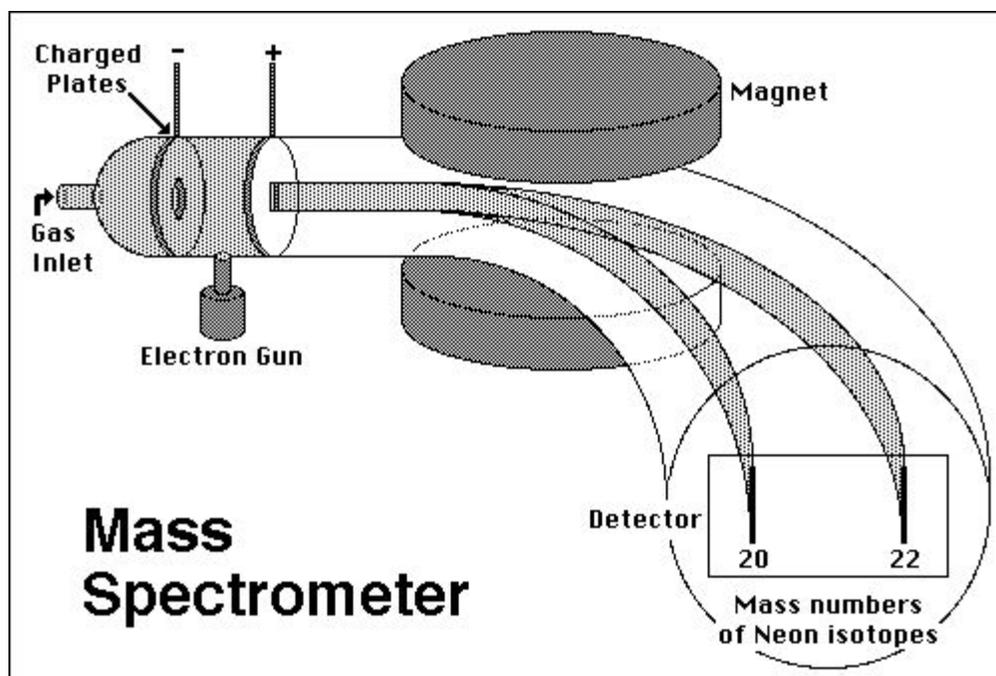


Figura 27: Esquema do espectrômetro de massa de Aston⁵⁴

Aston continuou a aperfeiçoar seu equipamento mapeando boa parte da tabela periódica, chegando a medir 212 isótopos diferentes. Determinou assim que a maioria, e não a minoria como se pensava, dos elementos possuem isótopos, e também a chamada lei do número inteiro, que diz que as massas dos isótopos são múltiplos inteiros da massa do átomo de hidrogênio. Recebeu o prêmio Nobel da química por seus esforços em 1922. A partir do trabalho de Aston, o espectrômetro de massa passou a ser estudado e desenvolvido em vários países do mundo, começando por Estados Unidos, e depois por Canadá, Alemanha, Suécia, Japão, e Rússia. O espectrômetro desenvolvido por Aston tinha poder de resolução de 600, com as várias melhorias feitas ao equipamento, em 1955 já existiam espectrômetros com resolução igual a 500,000.

A indústria petrolífera foi a primeira a adotar em massa os espectrômetros, para a análise qualitativa dos seus produtos. Já em 1943 o conteúdo de uma mistura de 9 componentes poderia ser determinado em 1 hora, o que levava 240 horas nos procedimentos anteriores (WOOD; WHITE, 1986, p. 3). Hoje, basicamente todas as indústrias de alta tecnologia utilizam esse equipamento, como aviação, comunicações, alimentos, petróleo, farmacêutica, fotografia, semicondutores, entre outros. O estudante talvez tenha se deparado com espectrômetros de massa em aeroportos, para controle de substâncias ilegais.

5.2 Conteúdo atual

⁵⁴ Foto de Laboratório Cavendish. Disponível em: http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/massspectrograph/massspectrograph1_1.htm. Acesso em: 18/7/2016

Analizamos os PCN e PCN+ para ciências da natureza e matemática, e o conteúdo dos livros didáticos pesquisados (Anexo I) para identificar fórmulas relevantes e úteis para nosso trabalho, como discernidas abaixo:

Eletromagnetismo:

$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$	$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ onde $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	$V = \frac{W}{q}$	$E = \frac{F}{q}$
$I = nAvq$	Primeira lei de Kirchhoff: $\Sigma V = 0$ (loop)	Segunda lei de Kirchhoff: $\Sigma I = 0$ (junction)	$R = \frac{V}{I}$
$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + \dots$	$\frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$	$\rho = \frac{RA}{L}$	$\epsilon = I(R + r)$
$F = qvB \sin \theta$	$F = BIL \sin \theta$		

Tabela 5: Fórmulas de Eletromagnetismo⁵⁵

Movimento circular:

$v = \omega r$	$a = \frac{v^2}{r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$	$F = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 r$
----------------	--	------------------------------------

Tabela 6: Fórmulas de Movimento Circular⁵⁶

Energia e momento linear:

$W = Fscos\theta$	$E_k = \frac{1}{2}mv^2$	power = Fv	$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$
$p = mv$	impulse = $F\Delta t = \Delta p$	$E_k = \frac{p^2}{2m}$	efficiency = $\frac{\text{useful work out}}{\text{total work in}}$

Tabela 7: Fórmulas de Energia e Momento Linear⁵⁷

Movimento Linear:

⁵⁵ Fórmulas retiradas de: *Physics Data Booklet, International Baccalaureate, 2016*

⁵⁶ Fórmulas retiradas de: *Physics Data Booklet, International Baccalaureate, 2016*

⁵⁷ Fórmulas retiradas de: *Physics Data Booklet, International Baccalaureate, 2016*

$v = u + at$	$s = ut + \frac{1}{2}at^2$	$v^2 = u^2 + 2as$
$s = \frac{(v+u)t}{2}$	$F = ma$	

Tabela 8: Fórmulas de Movimento Linear⁵⁸

Para as aplicações relacionadas abaixo, iremos nos ater às fórmulas presentes nas tabelas acima, alcançando assim nosso objetivo de não inflacionar a carga de trabalho dos estudantes de Ensino Médio e seus professores. Seu objetivo maior é fornecer contexto dentro da física de plasma para tratar dos tópicos desse trabalho.

5.3 Aplicações da física de plasmas

Tubos de Crookes: já são discutidos de forma qualitativa nas salas de aula, aqui, queremos incentivar o professor a introduzir termos e conceitos ligados à física de plasma, começando por adequadamente nomear o estado físico do elemento usado no tubo como estado plasma e não somente gás ionizado. Outra inserção de conceito é a explicação sobre o brilho do plasma, a saber, proveniente do processo de recombinação já discutido. Para o exemplo abaixo, demonstraremos como caracterizar um plasma de acordo com sua temperatura dada em unidades de energia, como descrito no capítulo 4.

Exemplo:

Em um tubo de Crookes, é inserido gás neônio (massa média 20.18 unidades de massa atômica) que é aquecido por uma diferença de voltagem entre o ânodo e o cátodo até entrar no estado plasma. A diferença entre as densidades de íons e elétrons por m^3 é de $10^3 m^{-3}$. a) Calcule a voltagem necessária para que a energia média dos íons de neônio seja de 3 eV.

Como:

$$E_{av} = \frac{3}{2}KT$$

$$KT = 2eV$$

Denominamos plasmas à essa temperatura de plasmas de 2-eV, esse valor é típico de tubos de descarga, outros casos ilustrativos são: ionosfera é um plasma de 0.05eV, plasma interplanetário é de 0.01eV, e experimentos de fusão 100 a 10.000eV.⁵⁹ Assumimos que a pressão seja baixa o suficiente para que a permissividade elétrica seja igual à de vácuo, os eletrodos pode ser assim tratados como um capacitor de placas paralelas.

⁵⁸ Fórmulas retiradas de: *Physics Data Booklet, International Baccalaureate, 2016*

⁵⁹ CHEN, 1985, p. 6

A energia cinética ganha por uma carga entre as placas de um capacitor de placas paralelas é igual a carga vezes a diferença de potencial, ou qV :

$$E_{av} = qV$$

$$V = \frac{E_{av}}{q}$$

A carga total pode ser obtida multiplicando-se a carga elementar pela diferença entre as densidades de íons e elétrons.

$$q = 1,6 * 10^{-19} * 10^3 C = 1,6 * 10^{-16} C$$

Portanto,

$$V = \frac{1,6 * 10^{-19} J}{1,6 * 10^{-16} C} = 1000 V$$

Obtendo um valor típico para tubos de descarga. Claramente, esse valor depende de valor próximo ao real para a diferença de densidades, de fato o caminho contrário, o valor da voltagem ser dado e calcular o excesso de cargas, pode ser considerado mais parecido com rotinas de laboratório de plasmas, onde a voltagem é a variável controlada. Nossa forma de lidar com as cargas é fundamentada na resolução da equação de Poisson em uma dimensão para capacitores de placas paralelas, como demonstrada por Chen (1985, p.9 e p. 12), e aproximações já solidificadas no Ensino Médio.

b) Calcule a velocidade dos íons de neônio, assumo que 1 unidade de massa atômica = $1,67 * 10^{-27}$ kg.

Novamente:

$$E_{av} = \frac{3}{2} KT$$

Mas $E_{av} = 1/2 mv^2$, assim:

$$v = \sqrt{\frac{3KT}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{6 * 1,6 * 10^{-19} J}{20,18 * 1,67 * 10^{-27}}} = 5,3 * 10^3 m s^{-1}$$

Podemos comparar com a velocidade média na distribuição de Maxwell, usando a ferramenta *Molecular Speed Calculation*, de HyperPhysics por Carl nave, do Departamento de Física e Astronomia da Georgia State University, (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>):

Molecular Speed Calculation

The speed distribution for the molecules of an ideal gas is given by

$$f(v) = 4\pi \left[\frac{M}{2\pi RT} \right]^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left[\frac{-Mv^2}{2RT} \right]$$

The calculation of [molecular speed](#) depends upon the molecular mass and the temperature. For mass

$m = 20.18$ amu
 $M = 0.02018$ kg/mol
 and temperature
 $T = 23873.15$ K
 $T = 23600$ C

the three characteristic speeds may be calculated. The nominal average molecular mass for dry air is 29 amu.

Maxwell Speed Distribution Function $f(v)$

Molecular Speed

Most probable speed v_p
 Mean speed \bar{v}
 Root mean squared speed v_{rms}

$$v_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Most probable speed = $v_p = 4435.34732$ m/s = 15967.2503 km/hr = 9921.5894 mi/hr
 Mean speed = $\bar{v} = 5004.75352$ m/s = 18017.1126 km/hr = 11195.3147 mi/hr
 RMS speed = $v_{rms} = 5432.16889$ m/s = 19555.8080 km/hr = 12151.4157 mi/hr

[Frequency of collisions](#) [Mean free path](#)

[HyperPhysics**** Heat and Thermodynamics](#) R Nave [Go Back](#)

Figura 28: Calculadora de velocidade molecular

A velocidade dos elétrons pode ser calculada de forma similar para dar início a um interessante debate sobre velocidade, energia, e temperatura, como mencionado no capítulo 4, e da mesma forma para se discutir o fato dos plasmas por muitas vezes não estarem em equilíbrio termodinâmico possuindo mais de uma temperatura como descrito no capítulo 3, ainda pode-se usar esta oportunidade para tecer comentários sobre a frequência de oscilação de plasmas. Sobre a última, utilizaria-se a fórmula $f_p = 9\sqrt{n}$ (CHEN, 1985, p. 85), onde f_p é frequência de plasma, e na densidade do plasma. Para tubos de descargas típicos, $n = 10^{15} \text{ m}^{-3}$, assim $f_p \approx 3 \cdot 10^8 \text{ Hz}$.

c) Calcule a temperatura do plasma

Como visto no capítulo anterior, 1eV equivale a aproximadamente 11.600°K, assim, 2eV equivalem a 23,200°K.

Acelerador de partículas: questões sobre aceleradores não são ausentes nas aulas de física brasileiras, o que pode confirmado por sua presença em provas de vestibular e no Exame

Nacional do Ensino Médio (ENEM). Trata-se de excelente plano de fundo para a inclusão da física de plasmas desde de que as espécies subatômicas em questão sejam mantidas abaixo de velocidade relativísticas. Assim, síncrotrons como o *Large Hadron Collider* não podem ser tratados como o tubo de Crookes da questão anterior, mas ciclotrons sim.

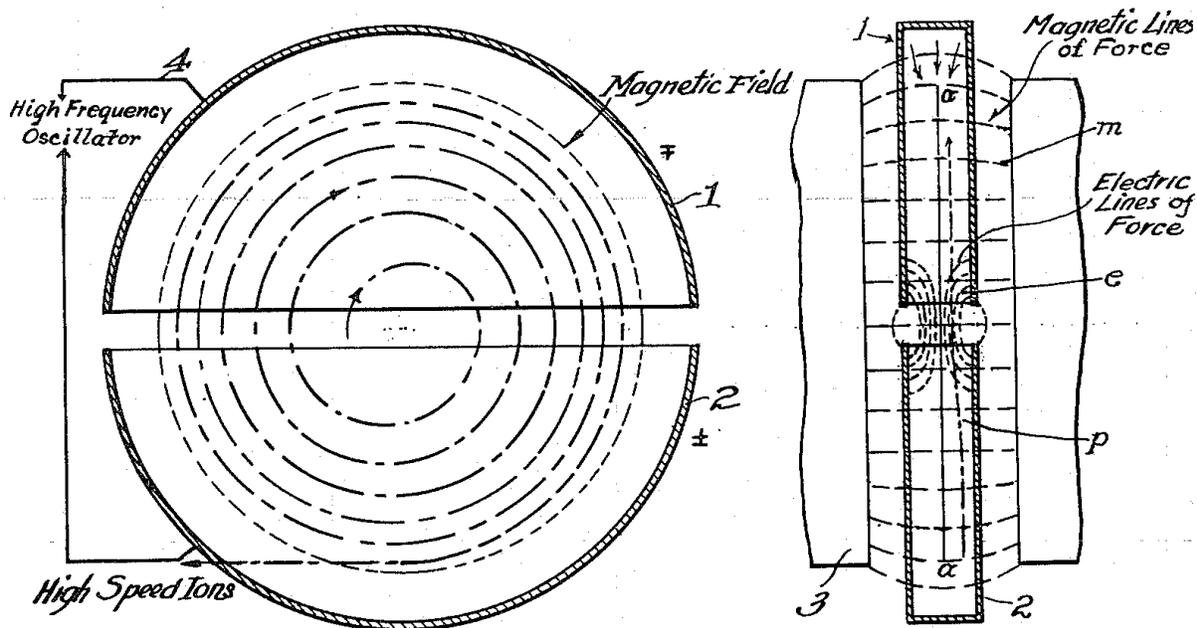


Figura 29: Desenho do inventor do ciclotron Ernest O. Lawrence na sua patente

Exemplo:

Uma máquina de radioterapia funciona usando um acelerador ciclotron. Hidrogênio no estado plasma é inserido no centro da câmara do ciclotron perpendicularmente ao campo magnético vertical, passando por um campo elétrico acelerador a cada meia volta. Após 6 voltas completas, o campo magnético é desligado causando que o feixe saia pela tangente em direção à área a ser tratada do paciente. Se o raio da última trajetória dos prótons é igual a 1m, o campo magnético igual a 0.5T, a) calcule a velocidade e a energia cinética das partículas ao ejetarem do ciclotron. b) calcule a temperatura do plasma.

As partículas descrevem trajetórias circulares e a força de Lorentz é a única força atuante fora da região dos campos elétricos:

$$F_C = \frac{mv^2}{r}$$

$$F_L = qvB$$

Igualando:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

Assim, podemos isolar e calcular a velocidade:

$$v = \frac{qBr}{m} = \frac{1,6 * 10^{-19} * 0,5 * 1}{1,66 * 10^{-27}} ms^{-1}$$

$$v = 4,8 * 10^7 ms^{-1}$$

A energia cinética será então:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} 1,67 * 10^{-27} * (4,8 * 10^7)^2 = 1,9pJ$$

Passando para o item b, sabemos que 1eV equivale a 11,600°K:

$$1,9pJ = 12 * 10^6 eV$$

$$11.600 * 12 * 10^6 eV = 1,4 * 10^{11} K$$

É interessante comparar esse resultado com alguns dados do LHC, para o qual a relação anterior não vale por causa dos efeitos relativísticos. A energia de colisão do feixe de partículas é de 13TeV⁶⁰, e a maior temperatura já registrada foi de 5.5 * 10¹²K⁶¹.

Para finalizar, existem duas notáveis relações importantes para cíclotrons e para a física de plasma em geral no cálculo das trajetórias de partículas. Uma fórmula para a frequência ciclotrônica pode ser facilmente derivada, sabendo-se que a velocidade de translação v é igual à frequência angula w vezes o raio r :

Substituímos:

$$v = wr$$

em:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

Isolando w :

$$w = \frac{qB}{m}$$

Chamada frequência ciclotron.

A segunda relação é o raio de Larmor (raio ciclotron), que é o raio da partícula no cíclotron e, se for adicionado um campo elétrico ao plasma, será o raio de rotação da trajetória em hélice da partícula.

⁶⁰ Dados do site do LHC, disponível em: <https://home.cern/about/engineering/restarting-lhc-why-13-tev>. Acesso: 19/7/2017

⁶¹ Dados do site do Guinness Book of Records, disponível em: <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/highest-man-made-temperature>. Acesso: 19/7/2017.

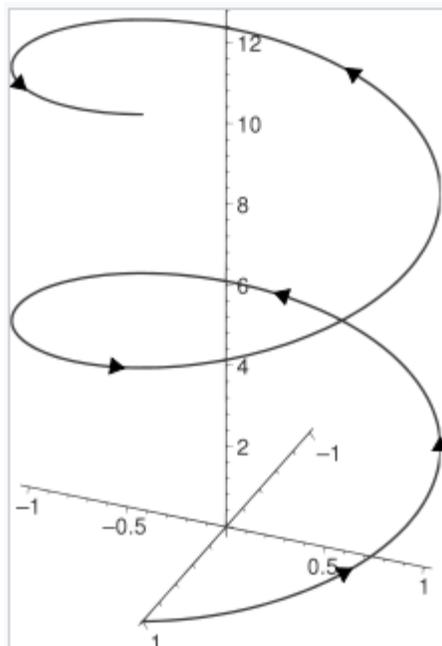


Figura 30: Trajetória em hélice de um íon em um campo magnético e um campo elétrico

Novamente de:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

Resolvemos para r:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Tokamak: A mais comum máquina de confinamento de plasma, seu nome é um acrônimo em russo para câmara toroidal com campo magnético axial. É a maior aposta para a geração de energia a fusão controlada no mundo, através do projeto *International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER)⁶², ao ser concluído em 2027 será a segunda maior máquina do mundo, após o LHC. O ITER representa um avanço em relação ao atual maior tokamak em funcionamento, o *Joint European Tokamak* (JET), que não conseguiu satisfazer o critério de Lawson, o produto da temperatura, densidade, e tempo de confinamento, do plasma, chegando a um quinto do valor esperado de $5 * 10^{21} \text{m}^{-3} \text{s keV}$. Em 1955, J. D. Lawson procurou determinar o que seria necessário para que uma máquina de fusão produzisse mais energia do que utilizasse, calculou que uma temperatura deveria estar na casa de 10^8K , e a densidade deveria ser um milhão de vezes menos denso que o ar, ambas condições são comumente satisfeita em máquinas atuais. Os maiores avanços recentes foram feitos sobre o tempo de confinamento, passando de apenas microssegundos no tempo de Lawson, para 1 segundo no JET, e o ITER planeja alcançar 5 segundos de confinamento. É por esse último motivo que o ITER é tão imenso, para aumentar o volume do

⁶² Esse é o acrônimo original, hoje em dia o projeto adota 'iter' do latim, que quer dizer caminho

plasma, 10 vezes maior que o JET, em relação a sua área superficial, diminuindo a velocidade em que é disperso.⁶³

De acordo com Chen(2016, p. 357), a ideia é criar plasmas confinados por campos magnéticos, em equilíbrio térmico, e com distribuições de Maxwell, de tal maneira que a energia ganha ou perdida em colisões elásticas seja retornada à distribuição térmica. Apenas algumas colisões resultam em fusão, assim, é suficiente criar um plasma de 30 keV, para que existam suficientes íons na parte mais energética da distribuição para gerar fusão. Portanto, o tokamak apresenta excelente oportunidade para o professor tocar qualitativamente na distribuição de Maxwell, e na energia liberada pelas diferentes reações de acordo com a tabela abaixo, onde D representa deutério e T trítio:

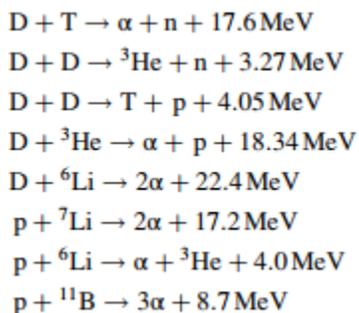


Figura 31: Reações termonucleares (CHEN, 2016, p. 357)



Figura 32: Interior do JET⁶⁴

⁶³ Site da Euro Fusion (projeto JET). Disponível em: <https://www.euro-fusion.org/2013/02/triple-product/>. Acesso: 20/7/2017

⁶⁴ Site da Euro Fusion. Disponível em: <https://www.euro-fusion.org/jet/jets-main-features/>. Acesso: 20/7/2017.

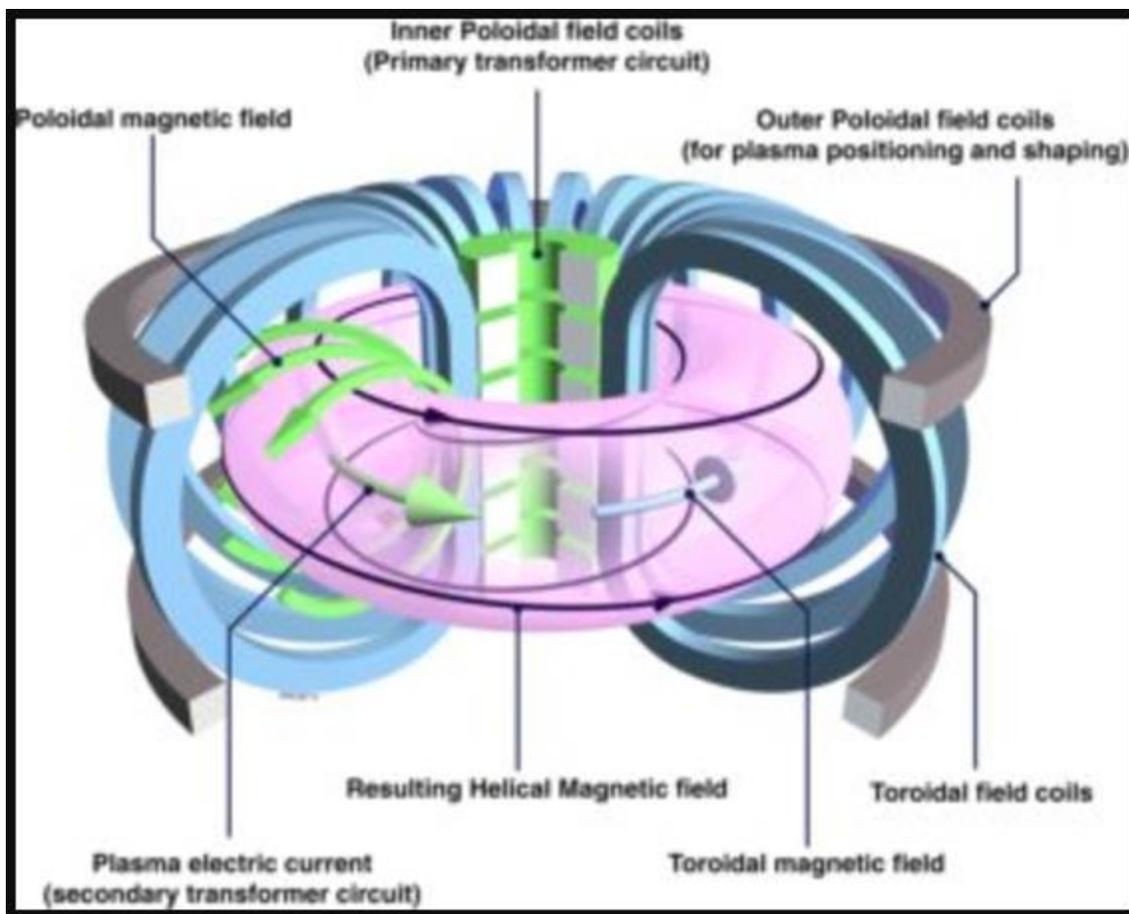


Figura 33: Os campos magnéticos em um tokamak⁶⁵

É fácil calcular a temperatura do plasma e velocidades iônicas e eletrônicas da mesma forma que nos exemplos anteriores.

Espectrômetro de massa: 5 prêmios Nobel já foram dados a pioneiros da espectroscopia de massa, pode-se argumentar que é o instrumento de análise mais importante da era moderna. Sendo assim, não é possível que se continue a ser ignorado na educação ssecundária. Iremos ilustrar uma maneira pela qual se pode identificar íons pela sua massa, utilizando um par de campos magnético e elétrico, e descrever um seletor de velocidades, muitas vezes usado em conjunto com o anterior para que analise tão somente íons da velocidade desejada.

A primeira ilustração é a seleção pelo raio de curvatura do íon dentro de um campo magnético uniforme. O íon é acelerado por um campo elétrico, e então sai deste campo adentrando um campo magnético perpendicular a seu movimento. É fácil mostrar que o raio depende da sua massa, desde que todas as espécies de íons tenham mesma carga.

⁶⁵ Culham Centre of Fusion Energy. Disponível em: http://www.cfe.ac.uk/How_fusion_works.aspx . Acesso: 20/7/2017.

Dado o raio de Larmor:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

O substituímos na equação para a energia cinética de uma partícula carregada acelerada por um campo elétrico:

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV$$

Isolando a velocidade:

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

Para obter:

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}}$$

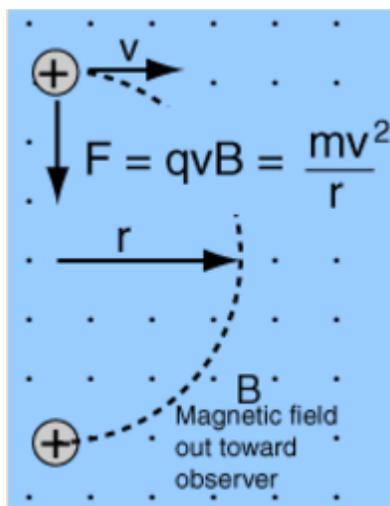


Figura 34: Espectrômetro de massa utilizando o raio de Larmor⁶⁶

A segunda ilustração é o uso um seletor de velocidades. São aplicados simultaneamente um campo elétrico e um magnético tal que a força elétrica atuante nos íons seja diametralmente oposta à força magnética atuante nos mesmos. Uma placa com um orifício é colocado de frente à direção inicial de movimentação dos íons, de acordo com a figura:

⁶⁶ Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/maspec.html#c1>. Acesso: 20/7/2017.

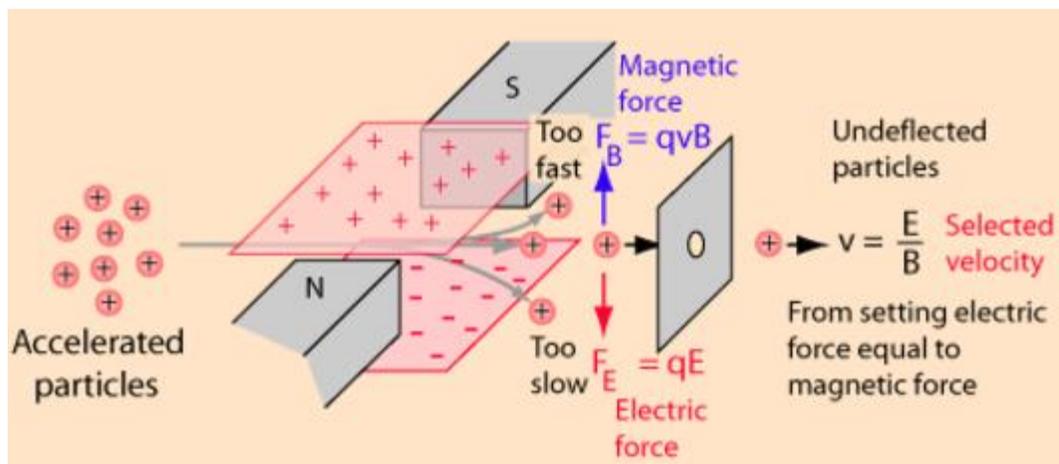


Figura 35: Seletor de velocidades⁶⁷

Para que o íon não se desvie do seu curso e passe pelo orifício, as forças de Lorentz e de Coulomb devem ter a mesma magnitude:

$$qE = qvB$$

A velocidade selecionada será então:

$$v = \frac{E}{B}$$

Exemplo:

Um feixe contém dois tipos de íons de Ca^+ , com massas atômicas relativas de 39.9u (onde u é a unidade de massa atômica) e 43.9u. Os íons no feixe estão inicialmente parados e são acelerados por uma diferença de potencial igual a 10.0kV, depois, passam por uma fenda adentrando uma região onde existe um campo magnético constante e igual a 1.50T que é perpendicular à velocidade dos íons. Cada íon viaja em uma trajetória semi-circular e atinge uma placa fotográfica. Considere $1u = 1.66 \cdot 10^{-27}\text{kg}$ e a carga elementar $e = 1.60 \cdot 10^{-19}\text{C}$.⁶⁸

- a) Encontre a velocidade dos íons de massa relativa igual a 39.9u ao entrar na região de campo magnético uniforme.

Como vimos:

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

$$v = 2,20 \cdot 10^5 \text{ms}^{-1}$$

- b) Encontre o raio do semicírculo em que os íons de 39.9u viajam.

⁶⁷ Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/maspec.html#c1> . Acesso: 20/7/2017.

⁶⁸ Tradução livre de: https://isaacphysics.org/questions/mass_spectrometer com adaptações. Acesso: 20/7/2017.

Usando:

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}}$$

Encontramos como resultado:

$$r = 6,07 * 10^{-2}m$$

c) Qual é a distância entre as marcas que as duas espécies de íons deixam na placa fotográfica? Calculamos o raio da segunda utilizando a mesma fórmula da anterior, obtendo:

$$r_{43,9} = 6,36 * 10^{-2}m$$

A distância d entre as marcas será a diferença entre os diâmetros das trajetórias.

$$d = 2 * 0,0636 - 2 * 0,0607 = 5,80 * 10^{-3}$$

5.4 Experimentos sugeridos para o laboratório de física de plasmas da UnB e aplicação deste trabalho no EM

Durante o desenvolvimento do presente trabalho, colaboramos com o, à época, aluno Gustavo Venceslau, hoje mestre pelo MNPEF, para construir um tubo de descargas para demonstração da produção e confinamento de plasmas. O tubo se encontra pronto e operante no laboratório de Física de Plasmas da UnB, sob direção do professor José Leonardo Ferreira. Esquemas produzidos podem ser encontrados no Anexo III deste trabalho. Acreditamos na importância da visualização e interação do aluno com materiais didáticos como este, que reduzem o nível de abstração requerido para que o estudante possa compreender os fenômenos de plasma. O instrumento no entanto, não é de prático deslocamento, sendo a possibilidade de sua utilização em salas de aula do EM pelo Brasil significativamente reduzida. Para maiores informações, consulte VENCESLAU, 2015.

Há porém, uma luz no fim do túnel, o laboratório de física de plasmas da universidade de Princeton (PPPL) mantém experimento de tubo de descargas similar que pode ser operado remotamente. Câmeras podem ser usadas para ver o tubo 24h, no site: <http://scied-web.pppl.gov/RGDx/>. O site contém valiosas informações sobre plasmas e o experimento, porém não há traduções do inglês. Visitando o site, alunos e professores podem controlar a voltagem aplicada ao gás, o campo magnético, das duas bobinas que envolvem o tubo de vidro, e ainda a pressão do gás. Alterando essas variáveis, pode-se estudar o plasma gerado, captando inclusive dados sobre a voltagem aplicada e a transição de fase gás-plasma, criando um gráfico a ser analisado pelo usuário. Ainda, é possível ver como um plasma reage à presença de um campo magnético, facilitando a compreensão da física de confinamento de plasmas.

Por último, deixamos aqui a sugestão para um trabalho futuro, que seja desenvolvido um simples espectrômetro de massa, que possa ser inserido no tubo de descargas, usando-o como fonte de íons, para que alunos possam fazer cálculos semelhantes aos demonstrados acima e visualizar os resultados experimentais corroborativos.

PPPL PRINCETON PLASMA PHYSICS LABORATORY RGDX Online Lab

Level 1 Level 2

Position: 1 of 1

Rodrigo
Remaining time: 07:04 min
Quit

Introduction

- > What am I looking at?
- > How can I make it glow?
- > What is **PLASMA**?
- > Why does the plasma glow?

Controls

Tasks

Electrode Voltage (Volts):
2000 < 0 500 1000 1500 2000 > Quick Start
Lights

Electromagnet (Gauss):
200 < 0 100 200 >

Pressure (mTorr):
100 92 < 10² 10³ >

USER LEFT
1 Rodrigo 07:04 min

Figura 36: Tubo de descargas remotamente controlado do PPPL

6. Aulas Planejadas



Figura 37: Fim do workshop sobre plasmas na Escola Americana de Brasília

A teoria de Robert M. Gagné

A fim de verificarmos a prática do ensino da física de plasma para alunos do Ensino Médio, desenvolvemos planos e ministramos quatro aulas para educandos do último ano dessa etapa escolar. A teoria utilizada para apresentar o conteúdo foi baseada nos trabalhos de Robert Gagné (1916-2002), segundo o qual⁶⁹, qualquer ato de aprendizagem pode ser resumido como:

⁶⁹ GAGNÉ, R. M; BRIGGS, L. J; WAGER, W. W. *Principles of Instructional Design*. 4 ed. Orlando : Harcourt Brace College Publishers, 1992. Pg. 187.

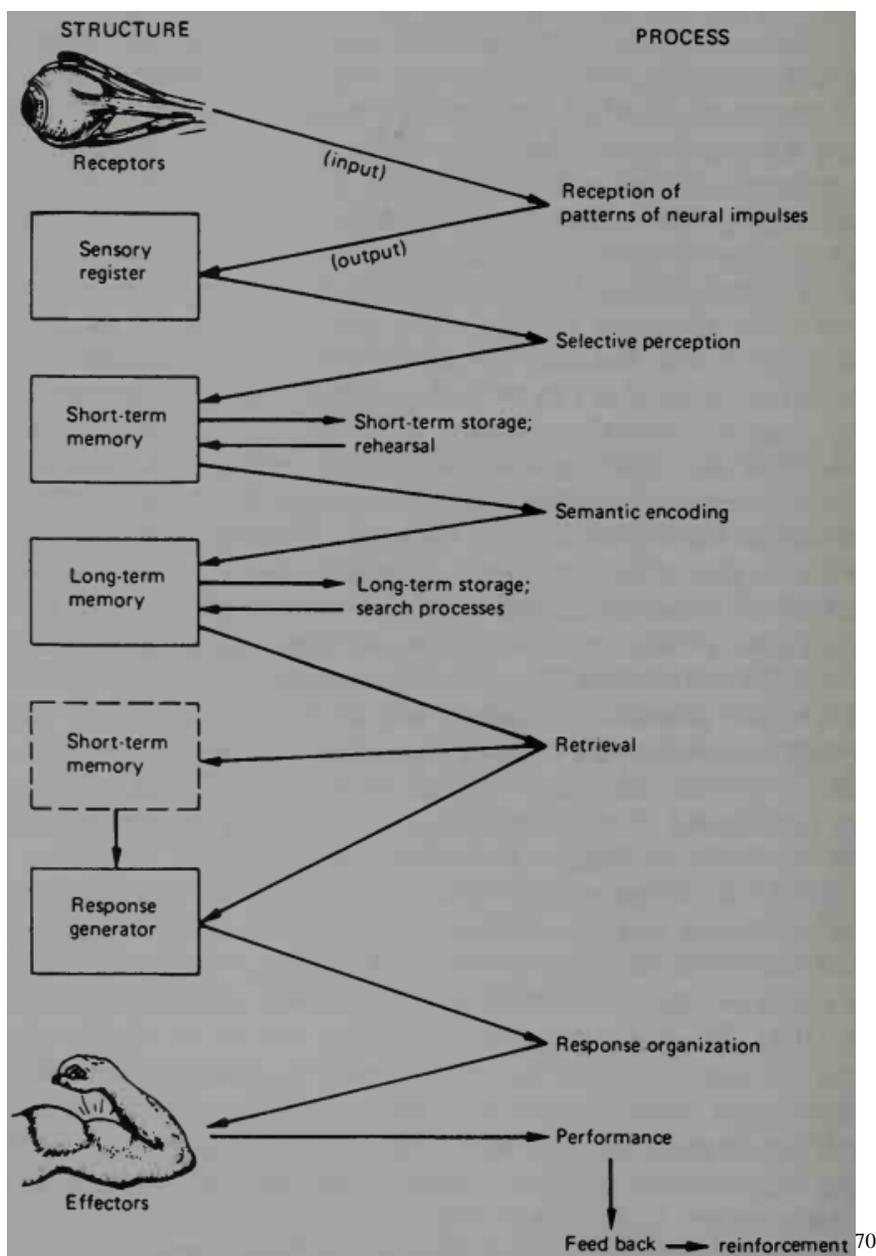


Figura 38: As estruturas postuladas da aprendizagem cognitiva e os processos associados a eles.

p 41.

- (1) Atenção: Determina a extensão e natureza do estímulo recebido.
- (2) Percepção seletiva (ou reconhecimento de padrões): Transforma o estímulo em características de objetos, para armazenamento na memória de curto prazo.
- (3) Ensaio: Mantém e renova os itens guardados na memória de curto prazo.

⁷⁰ GAGNÉ, R. M. *The Conditions of Learning*. 4 ed. Fort Worth : Holt, Rinehart and Winston, 1985.

- (4) Codificação semântica: Prepara informação para armazenamento de longo prazo.
- (5) Busca(*retrieval*), incluindo procura(*search*): retorna informação armazenada para a memória de trabalho ou a um gerador de resposta.
- (6) Organização de resposta: Seleciona e organiza performance.
- (7) Resposta (*feedback*): Provê o aprendiz com informação sobre a performance e coloca em movimento o processo de reforço.
- (8) Controle executivo do processo: Seleciona e ativa estratégias cognitivas; essas alteram quaisquer dos processos listados anteriormente.

Gagné foi um psicólogo e educador que dedicou-se, entre outros trabalhos, a entender os processos que levam o indivíduo a aprender. Chegou aos chamados "Eventos de Instrução", que consistem em nove momentos que compõem uma instrução, para que essa⁷¹:

<p>(1) ganhe a atenção dos alunos;</p> <p>(2) informe os objetivos da lição;</p> <p>(3) estimule a lembrança de aprendizados anteriores;</p> <p>(4) apresente o material de estímulo;</p> <p>(5) guie o aluno pelo conteúdo;</p> <p>(6) ofereça exercícios de prática;</p> <p>(7) dê o retorno quanto à performance nessa prática;</p> <p>(8) avalie; e</p> <p>(9) aprimore a retenção e transferência de conhecimento.</p>	<p>(1) Recepção de impulsos neurais</p> <p>(2) Ativa o processo de controle executivo</p> <p>(3) Busca de aprendizado anterior para memória de trabalho</p> <p>(4) Enfatiza características para percepção seletiva</p> <p>(5) Codificação semântica</p> <p>(6) Organização de resposta</p> <p>(7) Reforço</p> <p>(8) Ativa busca; permitindo reforço</p> <p>(9) Cria estratégias para busca</p>
---	--

Tabela : Eventos de instrução e sua relação com processos de aprendizagem

As fases determinadas por Gagné servem como norte para professores que lecionam qualquer disciplina e estão em qualquer estágio de sua carreira. São fases baseadas nos estímulos necessários para o cérebro reter seja qual for a informação, começando com "chamar a atenção dos

⁷¹ GAGNÉ, R. M; BRIGGS, L. J; WAGER, W. W. *Principles of Instructional Design*. 4 ed. Orlando : Harcourt Brace College Publishers, 1992. Pg. 188 a 198.

ouvintes", passando pela apresentação dos objetivos e promoção da prática, até a retenção e possibilidade de transferência do conhecimento.

Introduction	<p>Background: A class of 24 students in the second grade. Student abilities range from below to above average with the vast majority in the middle range.</p> <p>Goal: To understand the concept, "air takes up space."</p> <p>Objective: By the end of the lesson, students will be able to accurately describe the concept, "air takes up space," by describing their observations made during two in-class activities: parachutes and sailboat submarines, and applying this knowledge to the development of a new demonstration of the concept.</p>
Body	<p>Introductory Discussion: Review the process for making scientific observations; introduce the new concept, "air takes up space"; and preview the parachutes and sailboat submarines activities.</p> <p>Toy Parachutes: Using clothespins, string, and paper towels, students create their own parachutes and test them by throwing them into the air and observing their descent.</p> <p>Sailboat Submarines: Using walnut shells, toothpicks, construction paper, and glue, students create small sailboats and use transparent plastic cups placed over their boats to submerge them in a glass tank filled with water, observing how the upper portions of the boats stay dry even while submerged.</p>
Conclusion	<p>Summative Discussion: Students draw conclusions about their observations related to "air takes up space."</p>
Assessment	<p>Students are asked to develop their own demonstrations for the concept, "air takes up space." Acceptable responses range from simple reconfigurations of the activities (for example, "flying an airplane under water") to new and original demonstrations of the concept.</p>

Figura 39: Plano de aula de um professor de acordo com a teoria de Gagné.⁷²

Mas, como ganhar a atenção de um público de jovens adolescentes? Segundo Gagné, essa tarefa pode ser realizada a partir de perguntas que promovem a possibilidade de elaborar uma opinião após a qual o sujeito é atraído à realidade, para saber se sua "aposta" estava de acordo, ou não. Como em um jogo de apostas, o jogador aposta e não desvia a atenção do jogo até que saia o resultado, confirmando ou não sua estimativa. Um exemplo de perguntas que geram esse tipo de resposta do aluno, são situações-problema onde o educando tem a oportunidade de oferecer uma possível solução e se sente em posição de alerta para verificar se sua predição estava correta.

Após a pergunta – ou situação-problema – atrair os olhares da sala de aula, é necessário envolver os alunos, que, com frequência, indagam o motivo de aprender certos conceitos. Conhecendo essa necessidade humana de saber o porquê dos fatos, Gagné inclui um momento para

⁷² BROWN, A. H; GREEN, T. D. *The Essentials of Instructional Design*. 3 ed. New York : Routledge, 2016. p 105.

explicitar o objetivo e utilidade do objeto de estudo que será aprendido na aula. Esse objetivo deve estar exposto permanentemente durante a aula, para o caso dos alunos perderem o foco e precisarem ser redirecionados ao propósito do aprendizado.

Antes de avançar para novos conceitos, se faz necessário verificar o conhecimento prévio dos alunos e deixá-los saber quais competências serão necessárias para o novo aprendizado. Como quem abre gavetas com arquivos antigos, para acrescentar novos, a ativação da memória, para os pré-requisitos e a relação entre essas informações e as que ainda serão apresentadas, é fase primordial do aprendizado e, portanto, também está presente como o terceiro passo da teoria de Gagné. Esse processo pode ser realizado através de um pequeno exercício diagnóstico, pelo qual o professor pode verificar quais são as áreas de proficiência e quais são as áreas em que os alunos necessitam de mais instrução e prática, para conseguir acompanhar o que está por vir.

Com a atenção dos alunos, os objetivos da aula explícitos e os pré-requisitos revisitados, chega a hora de apresentar o novo material. Para tanto, o professor torna o conteúdo acessível de diversas formas, incluindo estímulos visuais, auditivos e, sempre que possível, tangíveis, como, por exemplo, experimentos e materiais manipulativos de matemática.

O próximo e quinto passo leva o educando a pensar sobre as diversas situações nas quais pode se deparar com a utilização do novo conhecimento adquirido, e como deve ser sua aplicação. Ao mesmo tempo em que o aluno estuda a aplicação do conceito, ele está fazendo conexões e observando a resolução de exercícios pelo professor. Em última análise, o professor está guiando o aluno pela aplicação do conhecimento, ao mostrar exemplos e reforçar o conceito apresentado no momento anterior.

Seguindo a resolução dos exercícios pelo professor, deve ser proporcionado aos alunos a chance de realizar as tarefas por si próprios, para que possam verificar se realmente entenderam o que foi ministrado. Este momento é utilizado pelos alunos para fazer perguntas e confirmar seu aprendizado junto a colegas e ao professor.

Este, passando de carteira em carteira, observa a demonstração da aprendizagem dos alunos e tem a possibilidade de oferecer retorno imediato e reforçar questões específicas, quando se fizer necessário. Há diferentes maneiras de organizar esse momento, que precisa ocupar boa parte do tempo com apresentação do conteúdo, permitindo que os estudantes apliquem o que aprenderam. Para tanto, os alunos podem ser agrupados de diversas maneiras, com pares de habilidades semelhantes ou com pares que estão mais avançados ou com mais dificuldades. Essas diferentes

disposições possibilitam experiências variadas ao aluno: a de explicar o que sabe, ouvir diferentes pontos de vista e dúvidas sobre as quais não havia pensado antes, e colaborar sem se sentir constrangido por não saber ou na obrigação de sempre ter que ajudar o outro. Deve ser alocado também um momento individual de prática, para que o aluno tenha a experiência de como seria em uma avaliação sem consulta.

Ao fim de um amplo momento de prática do conceito, em que se avalia que todos os alunos tiveram a oportunidade de realizar exercícios e receber o devido retorno sobre suas respostas, é chegada a hora da avaliação. (O momento anterior também pode ser entendido como uma avaliação, mas essa é para a construção do aprendizado, na qual se espera que o aluno ainda tenha a oportunidade de errar e buscar proficiência, recebendo o apoio necessário vindo dos pares e do professor.) Porém, nesse caso, estamos falando de avaliação do conhecimento, momento no qual o aluno precisa demonstrar domínio do material e o professor não mais oferece assistência, apenas avalia sua performance.

O último passo tem como objetivo aprimorar a retenção e verificar se o aluno é capaz de transferir e aplicar o que aprendeu. Uma das formas de realizar essa tarefa pode ocorrer após a realização e correção das avaliações, quando o professor retoma as questões e pede aos alunos que demonstrem proficiência em cada uma delas, para explicar para o restante da turma como foi sua linha de raciocínio até àquela resolução. O sistema brasileiro também prevê a chamada "recuperação paralela", que consiste em oferecer ao aluno uma segunda oportunidade de realizar a prova e demonstrar seu conhecimento. Para chegar a um novo resultado, é ideal que o professor disponibilize um momento para tirar dúvidas e ofereça mais momentos de prática.

Como foi dito ao início desse capítulo, preparamos um material didático para ser exposto aos alunos do terceiro ano do Ensino Médio de uma instituição de ensino particular, em Brasília - DF, a saber, a escola americana de Brasília. Lecionamos as aulas, fundamentadas na base pedagógica de Gagné, e realizamos dois momentos de diagnóstico, prévio e posterior, para identificarmos o conhecimento dos alunos antes e depois de serem expostos ao conteúdo proposto. O conjunto das atividades desenvolvidas constitui um estudo de caso com uma população discente atípica, composta em 80% por alunos brasileiros e 20% internacionais. As aulas foram ministradas em inglês de acordo com a política da escola para aulas de ciências.

Plasma Physics Workshop

If you don't know the answer for a question, please write "NA" which stand for no answer.

1. In the context of the subject area of Physics, what is a plasma?

Short answer text
.....

2. Have you heard of Thermonuclear Power production? How does it work?

Long answer text
.....

3. What is a Tokamak?

Short answer text
.....

4. How does a particle accelerator work?

Long answer text
.....

5. Do you know what a mass spectrometer is?

Long answer text
.....

6. Is it important to study physics? Why?

Long answer text
.....

7. What is the importance of learning about electromagnetism?

Long answer text
.....

8. Do you consider any careers for yourself that require knowledge of Physics daily?

Long answer text
.....

9. How do you feel about this workshop taking place in you school?

Long answer text

Figura 40: Teste diagnóstico aplicado antes e depois das aulas

O pré-teste, com questões idênticas ao pós-teste, foi respondido por dez alunos, na foto acima o estudante mais à direita é na verdade um ex-aluno da escola que foi buscar sua irmã. O pós-teste foi realizado com os mesmos alunos. O teste em si consistiu de duas partes, as primeiras 5 questões são relativas diretamente à física dos plasmas e suas tecnologias, as últimas 4 questões sondam o sentimento dos estudantes com relação à física em suas vidas e a quão importante julgam a matéria.

As figuras do pré-teste (anexo II) explicitam que 50% dos alunos entrevistados responderam inicialmente que não conheciam o conceito de plasma. Essa informação imediatamente corrobora a necessidade de introduzir o conceito aos alunos de ensino médio, que, cada vez mais, com o avanço da tecnologia, estarão expostos a instrumentos gerados pelo plasma, pensemos tão somente na camada de metal dos pacotes de batatas chips.

Os alunos reconhecem a importância do estudo da física, tanto em suas respostas ao pré-teste quanto no pós-teste, ao dizerem que essa ciência permite o conhecimento “de como as coisas funcionam” e “para ter conhecimento básico das coisas”.

O contraste entre as respostas da primeira pergunta, no pré-teste e no pós-teste, é extremamente significativo. Apenas 5 alunos indicaram que sabiam o que era plasma antes de participarem das aulas. Em contrapartida, do mesmo grupo de educandos, 100% dos alunos se sentiram confortáveis em dizer que entendiam o conceito, após a sua ministração.

A segunda pergunta do questionário tinha como principal objetivo averiguar a familiaridade dos alunos com uma importante aplicação da física de plasma, a produção de energia termonuclear. Antes das aulas, o grupo de alunos estava bem dividido: 5 estudantes demonstraram entendimento do tópico, 2 ligaram o termo à produção de armamentos bélicos, e 3 não souberam responder.

Na terceira pergunta, que indagava o conhecimento dos alunos sobre tokamaks e seu funcionamento, buscando *insight* sobre a familiaridade destes com tecnologias de confinamento

de plasmas. Nenhum aluno apresentou resposta positiva. Já, no pós-teste, apenas um aluno permaneceu sem saber em algum nível o que é um tokamak. Houve aqui um grande espectro de respostas, com 4 alunos ligando a máquina à fusão termonuclear, 7 dando aos tokamaks o propósito de gerar e confinar plasma, 2 associaram o projeto ITER aos tokamaks, e todos os 9 com respostas positivas conectaram a máquina à ciência dos plasmas.

Inicialmente, o conhecimento sobre os aceleradores de partículas foi quase tão ausente quanto sobre tokamaks, sendo o primeiro o alvo da questão seguinte. 70% dos alunos admitiram não ter conhecimento sobre o acelerador de partículas. Ainda mais familiarizados ao final das quatro aulas propostas, o número de alunos que sabiam o que significa um acelerador de partículas passou a ser de 100%. Estudantes conectaram essa máquina aos conceitos de: campos eletromagnéticos, LHC, colisão de prótons, big bang, e criação de novas partículas.

A pergunta de número cinco no pré-teste teve um resultado semelhante em termos das respostas da primeira e da segunda respostas dos alunos à questão. Para essa indagação, inicialmente nenhum dos alunos revelaram saber do que se tratava. O pós-teste revelou que 80% dos alunos fixou a definição e/ou funcionamento do espectrômetro de massa. Apenas três alunos revelaram ter feito a conexão entre espectrômetro de massa e acelerador de partículas, que foi um alvo das aulas. Cinco estudantes descreveram com sucesso o mecanismo pelo qual o espectrômetro pode identificar átomos, moléculas e isótopos. Dois alunos elucidaram o uso da máquina por forças de segurança.

A partir da idade em que os alunos entram no Ensino Fundamental II, há uma queda significativa no conceito que possuem sobre si próprios. Outra queda ocorre ainda na fase da adolescência, na transição para o Ensino Médio (Hinkelman, 2013, p. 3). Os alunos começam a se questionar sobre seu valor para a sociedade e suas competências. Quando esses adolescentes fazem sua escolha de carreira, ao final do 3o Ano do Ensino Médio, se sabe que é o momento em que se sentem mais inseguros sobre suas habilidades e sua auto-imagem. Obviamente que esse autoconceito irá impactar diretamente a escolha do curso que farão na universidade, afinal, se sentem-se inseguros terão expectativas mais baixas para suas carreiras acadêmicas e profissionais.

Os jovens, quase que unanimemente, responderam positivamente, tanto no pré como no pós-teste, sobre a importância de se estudar Física. No entanto, diante de suas inseguranças e sentimento de incapacidade ("Eu acho muito difícil.", e "Não acho que conseguiria"), não se sentem capacitados a seguir uma carreira relacionada a ciência ou matemática mesmo que essa

carreira seja algo que os fascine. Ou ainda não expressam tanto interesse em estudar física.

Sobre eletromagnetismo, as respostas dos alunos foram mais abstratas e crípticas, mostrando certa dificuldade dos estudantes resumirem um termo tão abrangente, ponderamos que haveriam respostas mais estimulantes se a pergunta fosse mais direcionada reduzindo seu foco. Todos os alunos presentes estudaram diversos tópicos dentro do eletromagnetismo, como circuitos, eletrostática, e força de Lorentz. O direcionamento dado durante as aulas ficou claro no pós-teste, quando as repostas dadas ficaram mais claras e conectadas à aulas, especialmente à construção dos instrumentos referentes às questões 1 a 5.

Sobre suas carreiras futuras, no pré-teste apenas 2 alunos mostraram interesse em perseguir profissões que usam física diariamente. Essa foi a questão que mostrou menor impacto das aulas ou mudança nas respostas. Apenas um aluno demonstrou influência do projeto alterando sua resposta de “Eu só considero carreiras em humanas” para “Provavelmente irei para humanas, mas quem sabe?”

Todas as respostas à última questão foram positivas quanto a opinião dos alunos acerca do aprendizado sobre física de plasma, reconhecendo o seu valor para suas práticas no cotidiano e para o avanço das tecnologias. Percebe-se que, ao encontrar relevância no conceito estudado, os alunos atribuíram valor (“Muito interessante e enriquecedor.”) ao conteúdo estudado. Os depoimentos dos alunos podem ser interpretados como uma boa indicação do estudo do plasma como um tópico atraente para esse público, além de ser também altamente necessário. Com a abordagem pedagógica de Gagné e uma estrutura de conteúdo que foca na aplicação dos conceitos apresentados, pretende-se desmistificar o estudo da física e atrair mais jovens para o mercado de trabalho e pesquisa nessa área.

Em termos gerais, as respostas às perguntas do pós-teste deixaram claro que a maioria alunos alcançaram os objetivos desejados e adquiriram novos conhecimentos relacionados à física de plasmas, o que os tornam mais equipados para entender o cotidiano e novas descobertas da física que possuem tanto impacto na nossa realidade.

Planejamento das aulas ministradas no Colégio Dromos - Brasília, 2015				
Data	Aula 1 - 25/05	Aula 2 - 25/05	Aula 3 - 28/05	Aula 4 - 28/05
Tema	O que é o estado Plasma?	História da física de Plasmas	Transição de fase gás-plasma/temperaturas do plasma	Campos EM no Plasma
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> • Sondar o conhecimento prévio dos alunos sobre o estado plasma • Definir o estado plasma • Ocorrência dos plasmas na natureza e na ciência 	<ul style="list-style-type: none"> • Traçar uma cronologia simplificada do desenvolvimento da ciência dos plasmas 	<ul style="list-style-type: none"> • Introduzir o estudante à transição de fase gás-plasma e a medição da temperatura de íons e elétrons 	<ul style="list-style-type: none"> • Familiarizar o aluno com o comportamento de partículas carregadas no plasma
Conteúdo	<ul style="list-style-type: none"> • O plasma como um gás ionizado • Plasmas Atmosféricos • Lâmpadas fluorescentes e TVs • Plasmas espaciais 	<ul style="list-style-type: none"> • Cronologia das personalidades mais importantes na física de plasmas de 1858 a 1962, indicando as aplicações mais importantes de suas ideias 	<ul style="list-style-type: none"> • Ionização e Recombinação • Medindo a temperatura em Joules • Distribuição de velocidades 	<ul style="list-style-type: none"> • Esfera de Plasma • Frequência de plasma • Raio de Larmor • Força de Lorentz e o espectrômetro de massa • Comprimento de Debye • Espectrômetro de massa
Estratégia/Metodologia	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicação de questionário para sondagem de conhecimentos prévios • Aula expositiva 	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentação da cronologia, mostrando imagens relevantes • Questões indutoras 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualização da distribuição de velocidades de um gás em desmos.com • Cálculo da velocidade média em função da temperatura • Análise energética de diversos plasmas, ex: fusão em Tokamaks 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaplicação do questionário
Recursos Materiais	<ul style="list-style-type: none"> • Questionário impresso • Projetor • Website 	<ul style="list-style-type: none"> • Website • Projetor 	<ul style="list-style-type: none"> • Website • Projetor 	<ul style="list-style-type: none"> • Website • Projetor • Questionário impresso
Duração	45mins	45mins	45mins	45mins

Figura 41: Planejamento das aulas

7. Desenvolvimento do produto educacional: website

Neste capítulo gostaríamos de descrever como se deu o desenvolvimento do produto de conclusão de curso que acompanha este trabalho, o alvo é tecer um roteiro de estudo e desenvolvimento que permita a criação de novos produtos, da mesma natureza do apresentado aqui, que contemplem uma miríade de tópicos. Infelizmente, conhecimento básico de inglês é necessário em todos os passos, já que recursos em português de qualidade ainda não foi desenvolvido para algumas das ferramentas que serão apresentadas. Todos os recursos usados estão gratuitamente disponíveis na internet (open source), e não possuem quaisquer direitos autorais sobre recursos desenvolvidos através de seu uso.

7.1 HTML e CSS

A base para o funcionamento de websites são arquivos de texto salvos em servidores. Cada dispositivo ligado à internet recebe um endereço, chamado *Internet Protocol address* (endereço de IP, ou endereço de protocolo da internet), e o trabalho deste protocolo é trocar informações entre dispositivos conectados. Muitas vezes chamamos esses arquivos no servidor de páginas da internet. *Browsers* (navegadores) como Chrome, Edge, e Firefox, permitem que dois endereços de IP acessem as portas de acesso um do outro para trocar pedidos e informações. O protocolo para troca de arquivos entre endereços de IP chama-se *Transmission Control Protocol* (TCP), e este irá carregar o pedido de uma página específica do computador do usuário, ao servidor. Assim, um usuário acessa uma página em seu *browser* quando este requer ao servidor o arquivo desejado, o que faz digitando na barra de navegação do *browser* um endereço de *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP), que é levado de um endereço de IP a outro por TCP. Sem entrar em mais detalhes pode-se entender o processo metaforicamente: o IP é a estrada entre computador e servidor, o TCP é o caminhão de transporte, e o HTTP é a carga que, neste caso, é um pedido de arquivo específico salvo no servidor.

Navegadores leem os arquivos de texto, ou páginas, e convertem linguagem de programação em uma imagem a ser mostrada no monitor do usuário. Obviamente, é necessário que o arquivo esteja escrito em uma linguagem que o *browser* compreenda. Hoje em dia, navegadores são capazes de traduzir diversas linguagens diferentes, porém, a linguagem original, e ainda a mais usada, para se escrever páginas da internet, é a chamada HTML (*hypertext markup language*) muitas vezes usada em conjunto com outra linguagem para se escrever páginas da internet voltada para a decoração destas, a CSS (*cascading style sheets*). Qualquer editor de texto pode ser usado para criar arquivos .html ou .css (como Word, Notepad, OpenOffice, ou Pages), porém alguns são otimizados para essa tarefa, possuindo colorização sintática que facilita a vida do programador. Assim, para começar, recomendamos o uso de um editor *open source* chamado Atom, que pode ser obtido em: <https://atom.io/>.

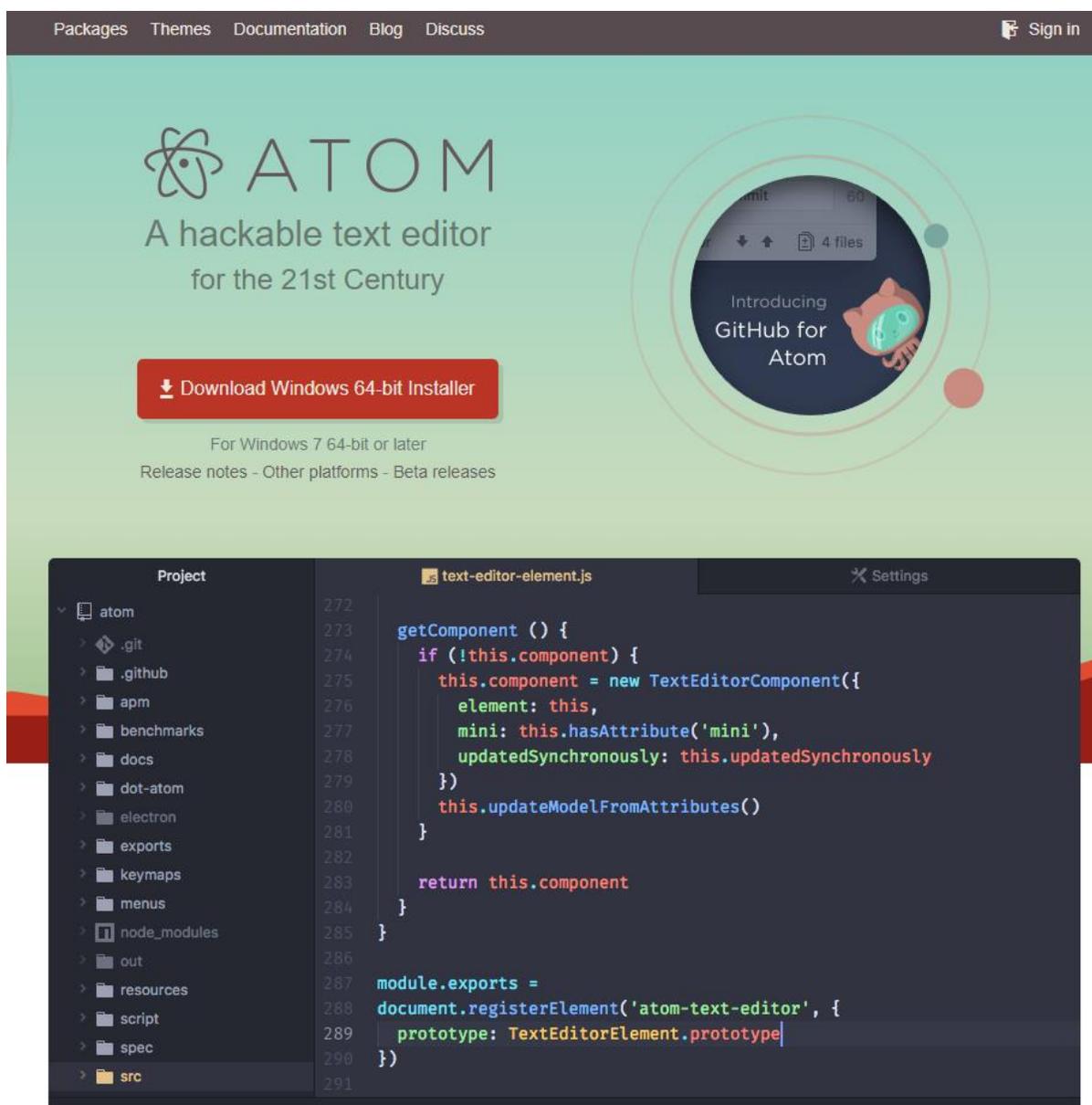


Figura 42: Website do editor de texto Atom⁷³

Existe grande quantidade de recursos educacionais que ensinam a se escrever arquivos HTML e CSS, listamos uma seleção abaixo, recomendando o uso do primeiro recurso da lista:

Codecademy.org - <https://www.codecademy.com/>

Html.net (português) - <http://pt-br.html.net/>

W3schools.com - <https://www.w3schools.com/>

⁷³ Disponível em: <https://atom.io/>. Acesso 25/6/2017.

Em codecademy.org é possível aprender a escrever páginas da internet no próprio browser, vendo o resultado de suas ações instantaneamente. Completar o curso de HTML e CSS neste site é suficiente para poder escrever páginas estáticas como as usadas neste projeto, ele tem aproximadamente 4 horas de duração.

7.2 Jekyll

O presente trabalho adotou um *framework* (estrutura) automatizante para construção das páginas do site chamado Jekyll. Este aplicativo permite que páginas dividam elementos entre si, como por exemplo barras de navegação, links, rodapés, layouts, entre outros. Tornando assim a programação mais célere, pois esse sistema evita que se precise escrever, ou copiar e colar, a mesma informação mais que uma vez. O Jekyll vem com uma linguagem interna chamada Liquid, esta permite programação básica como loops e lógica aritmética. Existem dois recursos principais para se aprender a utilizar o aplicativo: a página oficial disponível em <https://jekyllrb.com/> (ver o link DOCS), e uma série de vídeos e materias didáticos livremente disponibilizados no site YouTube pelo professor Thomas Bradley da universidade de design canadense Algonquin College, disponível em: <https://learn-the-web.algonquindesign.ca/topics/jekyll/>.

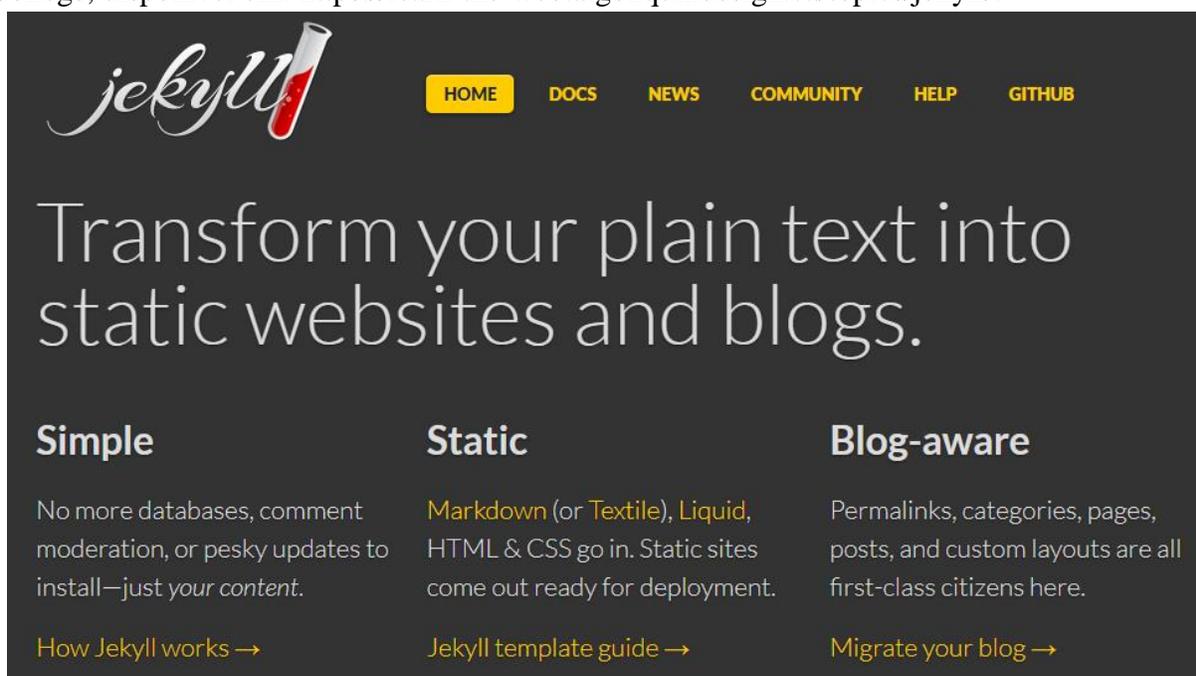


Figura 43: A estrutura Jekyll⁷⁴

Esta estrutura permite o uso de recursos externos que tornam a programação das páginas ainda mais rápida, como arquivos css, fontes, e ícones. Ao invés de se criar os recursos gráficos do site do zero, a aparência deste pode ser construída a partir de serviços gratuitos distribuídos

⁷⁴ Disponível em: <https://jekyllrb.com/>. Acesso 25/6/2017.

gratuitamente por grandes empresas procurando espalhar seu estilo de interface do usuário, como google Material Design, e Twitter Bootstrap, para este projeto optamos pela segunda opção.

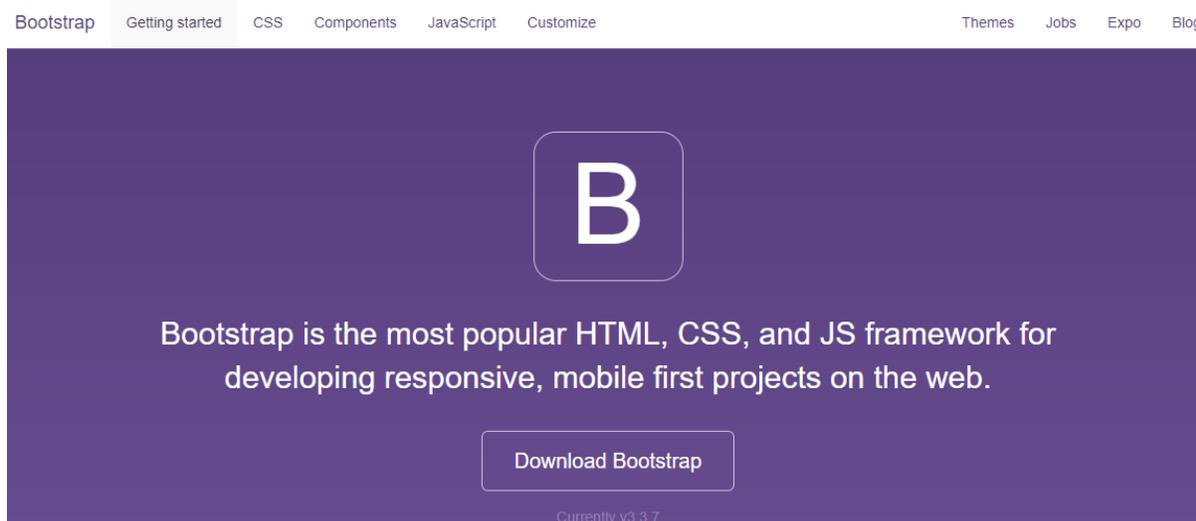


Figura 44: A estrutura Bootstrap⁷⁵

Como foi dito, a adoção desta ferramenta em muito diminui o tempo de programação do site, pois permite que as páginas sejam construídas simplesmente copiando e colando o código dos elementos de html e css desejados a partir da página da ferramenta. O tutorial incluso no site oficial foi suficiente para nós, porém, existem abundantes recursos online que fazem excelente trabalho em ensinar a se usar essa estrutura, inclusive em português, assim como diversos canais do YouTube. Para um guia rápido de como se combinar Jekyll com Bootstrap recomendamos a leitura de: <http://veithen.github.io/2015/03/26/jekyll-bootstrap.html>. Por último, a ferramenta bootstrap permite um design responsivo facilitado, isso significa que o site se adapta a tela do dispositivo que o está mostrando.

7.3 GitHub

Para manter os arquivos do site na nuvem, onde permanecem livremente acessados de qualquer lugar, mantidos em segurança, e para hospedar o site de forma gratuita, escolhemos a plataforma mais popular para esse serviço, o GitHub.

⁷⁵ Disponível em: <http://getbootstrap.com/>. Acesso 25/6/2017.

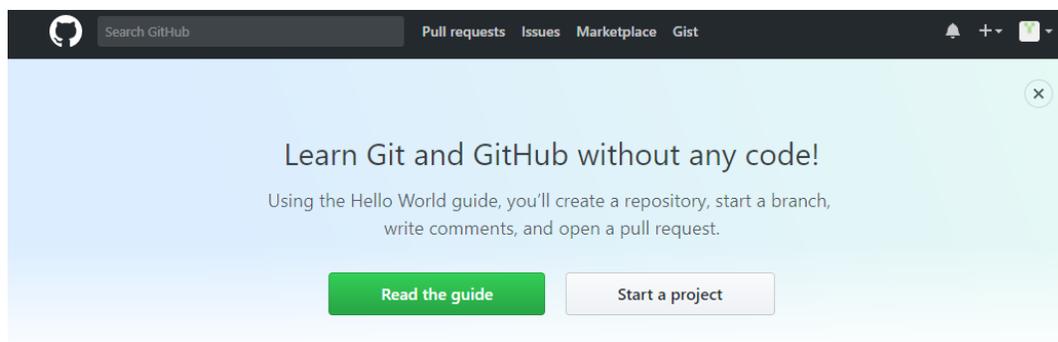


Figura 45: Site da plataforma GitHub⁷⁶

Git é um sistema de controle de versão, criado por Linus Torvalds (criador do sistema Linux) em 2005, ele permite acompanhar de mudanças feitas aos arquivos, recuperar versões anteriores para, por exemplo, desfazer uma mudança que criou um erro no site.

7.4 Elementos de design

Para que o site apele aos professores e estudantes desenhamos o site de acordo com os padrões visuais em alta. Esses padrões são considerados o ápice em termos de visualização em diversos dispositivos, navegação, atratividade e legibilidade. Apesar do site não ter qualidade profissional, ele deve parecer atual, evitando que o usuário o rejeite por parecer antiquado ou por não ter uma boa experiência do usuário. Sabemos que tendências em web design mudam a cada dia, mas acreditamos que por agora, o site se encaixa principalmente no contexto das redes sociais.

One page website: sites desenhados com esse princípio em mente procuram ser minimalistas em seu conteúdo e não ter outras páginas além da página inicial. A página pode possuir links externos mas não terá um link para uma outra página do mesmo site. Procuram assim focar a atenção do usuário no conteúdo mais importante, como disse Einstein: “Simplifique tudo ao máximo, mas não mais que isso”.

Esquema de cores monocromático: o ideia é que o site tenha apenas uma cor além do preto e do branco, variando os tons dessa cor quando necessário. Esse elemento de design facilita que se realce conteúdo importante e facilita a leitura.

Navegação prioritária: link importantes ganham destaque em meio a outros que, apesar de funcionais, não são clicados com a mesma frequência. Assim o usuário tem sua visão direcionada aos links mais relevantes.

Navegação grudanta: mesmo que a página possa ser rolada para baixo (scroll down), a navegação se mantém na tela a todo momento permitindo que o usuário veja o conteúdo que quer com agilidade.

⁷⁶ Disponível em: <https://github.com/>. Acesso 25/6/2017.

Call to action (CTA) de coluna única: botões, vídeos e imagens cruciais para o conteúdo e para o usuário são apresentados em uma faixa horizontal que não é dividida com outros conteúdos.

Design responsivo: Como já comentado, o site se adapta ao tamanho da tela do dispositivo pelo qual está sendo visualizada.

Apresentação do conteúdo em cartas: elemento de design que apresenta o conteúdo dentro de caixas em alto ou baixo relevo se destacando do plano de fundo. Esse tipo de design pode ser visto em sites como YouTube, Pinterest, Facebook, e Twitter.

7.5 O produto final

O site pode ser acessado em: <https://rodrigopacios.github.io/mrpacios/PlasmaPhysics/>. Prints do produto podem ser vistos no Anexo IV.

Referências Bibliográficas

- [1] CALLEN, Herbert B. *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. 2 ed. New York : Plenum Press, 1985.
- [2] CHEN, Francis F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2 ed. New York : Plenum Press, 1985.
- [3] EHRENFEST, Paul; EHRENFEST, Tatiana. *The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics*. 1 ed. Ithaca : Cornell University Press, 1959.
- [4] UNIVERSIDADE HEBRAICA DE JERUSALÉM. Instituto de Química. Heinrich Rudolf Hertz. internet. Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20090925102542>>. Acesso em: 25/5/2015.
- [5] PAPON. P; LEBLOND, J; MEIJER, P.H.E. *The Physics of Phase Transitions*. 2 ed. Berlim : Springer, 2006.
- [6] FRANZEN, H.F. *Second Order Phase Transitions and the Irreducible Representation of Space Groups*. 1 ed. Berlim: Springer, 1982.
- [7] LANDAU, L; KITAIGORODSKY, A. *Physics for Everyone - Motion Heat*. Moscou : Mir Publishers, 1978.
- [8] LANDAU, L.D; LIFSHITZ, E.M. *Statistical Physics*. 3 ed. New York : Pergamon, 1980.
- [9] TONELLI, L.G.G. *Uma Proposta para Introdução dos Plasmas no Estudo dos Estados Físicos da Matéria no Ensino Médio*. Porto Alegre : MNPEF, 2014.
- [10] BRASIL. Ministério da Educação. Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio). internet. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>> Acesso em: 17/5/2015.
- [11] BRASIL. Ministério da Educação. Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. internet. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/arquivos/PCN_FIS.pdf>. Acesso em: 10/5/2015.
- [12] MOREIRA, Marco Antônio. *Metodologias de Pesquisa em Ensino*. São Paulo : Editora Livraria da Física, 2011.
- [13] D'AGOSTINO, Salvo. *A History of the Ideas of Theoretical Physics*. Roma : Ed. Kluwer Academic Publisher, 2000.

- [14] MARTINS, A. Roberto. *A dinâmica relativística antes de Einstein*. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2005.
- [15] GUERRA, A; REIS, J.C; BRAGA, M. *Uma abordagem histórico filosófica para o eletromagnetismo no Ensino Médio*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, 2004.
- [16] J.F.M. Rocha. *O conceito de “campo” em sala de aula - uma abordagem histórico-conceitual*. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2002.
- [17] BELÉNDEZ, A. *La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la “síntesis electromagnética” de Maxwell*. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2008.
- [18] LARMOR, Joseph. *Origins of Clerk Maxwell’s Electric Ideas as Described in Familiar Letters to William Thomson*. Cambridge : The University Press, 1937.
- [19] DAHL, P.F. *Flash of the cathode rays: a history of the electron of J.J.Thomson*. Boca Raton : CRC Press 1997.
- [20] CAPES. *Física para um Brasil Competitivo*. internet. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/v1/arquivos_diversos/publicacoes/FisicaCapes.pdf>. . Acesso em: 10/6/2015.
- [21] ALFVÉN, Hannes. "Double layers and circuits in astrophysics" (1986) *IEEE Transactions on Plasma Science* (ISSN 0093-3813), vol. PS-14, Dec. 1986.
- [22] UMRAN, S. Inan; MAREK, Gołkowski. *Principles of Plasma Physics for Engineers and Scientists*, Publ. Cambridge University Press, 2011.
- [23] GOLDSTON, Robert J.; RUTHERFORD, Paul H. *Introduction to plasma physics*. Princeton : Institute of Physics Publishing, 1995.
- [24] GAGNÉ, R. M; BRIGGS, L. J; WAGER, W. W. *Principles of Instructional Design*. 4 ed. Orlando : Harcourt Brace College Publishers, 1992.
- [25] GAGNÉ, R. M. *The Conditions of Learning*. 4 ed. Fort Worth : Holt, Rinehart and Winston, 1985.
- [26] BROWN, A. H; GREEN, T. D. *The Essentials of Instructional Design*. 3 ed. New York : Routledge, 2016.
- [27] VENCESLAU, Gustavo M. *Física de Plasma no Ensino Médio*. 127 folhas. Dissertação de conclusão do MNPEF, Universidade de Brasília, 2015.
- [28] ASLANYAN, Valentin. *Extreme ultraviolet lasers and their interactions with matter*. 152 folhas. Tese de conclusão de doutorado, Universidade de York, Inglaterra, 2016.

- [29] HOWATSON, A. M. *Introduction to gas discharges*. 1ed. Oxford, Inglaterra : Pergamon, 1965.
- [30] WHITE, F. A; WOOD, G. M. *Mass Spectrometry*. 1ed. Albany, Estados Unidos : John Wiley and Sons, 1986.
- [31] CHEN, Francis F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. 3 ed. New York : Springer, 2016.
- [32] HINKELMAN, L. *Girls Without Limits*. 1 ed. Thousand Oaks : Corwin, 2013.

Anexo I

Lista de livros didáticos de Física para o Ensino Médio pesquisados

- BÔAS, N. V; DOCA, R. H; BISCUOLA, G. J. *Física 2*. Coleção Conecte. São Paulo : Saraiva, 2012.
- ALVARENGA, Beatriz; MÁXIMO, Antônio. *Curso de Física*. São Paulo : Scipione, 2007.
- FERRARO, N. G; SOARES, P. A. T; FOGO, R. *Física Básica*. São Paulo : Atual, 2009.
- TSOKOS. K. A. *Physics for the IB Diploma*. 5 ed. e 6 ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2009 e 2014.
- BOWEN-JONES, Michael; HOMER, David. *IB Physics Course Book: 2014 Edition*. Oxford : Oxford University Press, 2014.
- ALLUM, John; TALBOT, Christopher. *Physics for the IB Diploma*. 2 ed. Londres : Hodder Education, 2014.
- BÔAS, N. V; DOCA, R. H; BISCUOLA, G. J. *Tópicos de Física, 1º, 2º e 3º anos*. 21 ed. São Paulo : Saraiva, 2012.
- KAUHITO; FUKU; CARLOS. *Os Alicerces da Física, 1º, 2º e 3º*. São Paulo: Saraiva, 2007.
- GASPAR, Alberto. *Compreendendo a Física*. São Paulo : Ática, 2010.
- PENTEADO, Nicolau; TORRES, Toledo. *Física, Ciência e Tecnologia*. São Paulo : Moderna, 2001.

Anexo II - Resultados do Pré-teste

1. In the context of the subject area of Physics, what is a plasma?	2. Have you heard of Thermonuclear Power production? How does it work?	3. What is a Tokamak?	4. How does a particle accelerator work?	5. Do you know what a mass spectrometer is?
A physical state of matter	Yes. Works by breaking uranium atoms in two.	NA	NA	NA
NA	Exothermic process in nuclear power plants	NA	I've heard of it but I don't know how it works.	NA
NA	NA	NA	NA	NA
NA	NA	NA	NA	NA
A physical state like solid, liquid, and gas	How energy is produced in nuclear power plants	NA	NA	NA
NA	Bombs	NA	NA	NA
state of stars like the sun	two atoms become one and releases energy	NA	NA	NA
A state of aggregation, as are solid, liquid and gas. The state of flames and stars.	Yes. Isotopes of hydrogen are fused together releasing energy that is converted into electricity.	NA	It accelerates protons in opposite directions and make them collide to find out what they are made out of.	NA
NA	Na	NA	NA	NA
The fourth state of matter	Isn't it used to make bombs?	NA	The LHC is in switzerland	NA

Figura : Respostas dos alunos parte 1

6. Is it important to study physics? Why?	7. What is the importance of learning about electromagnetism?	8. Do you consider any careers for yourself that require knowledge of Physics daily?	9. How do you feel about this workshop taking place in you school?
Yes. To understand how stuff works.	Yes. Because it's important to know how magnets work.	No, I'm into humanities	It is going to bring further learning to the students.
No, because there are too many equations.	NA	No, I want to be an administrator	Different, interesting.
No, I find it very hard.	To understand how regular household objects work	No, too much math	Cool but I don't really know what it is yet.
Yes. To have a basic understanding of things.	To build electromagnets	No. I don't think I could do it	Interesting.
Yes. Because I need to know a lot of physics to become an engineer.	So we learn about electricity and how to use it.	I'm going to be an engineer, so yea.	Important because it shows us things we don't know much about.
yes, so i can do well on exams	Because it will be on exams	It's not my calling.	I'm here because I like Mr. Pacios
I can see why it's important but I don't want to have a career that uses physics	to understand how equipment works	I want to be a physician, not a lot of physics needed	Motivating and interesting.
Yes, because it makes you think.	It is the fundamental science behind everything that requires electricity.	Yes, I want to be an astrophysicist	It's very important because most of the universe is plasma
Yes, to learn about different phenomenon	na	I only consider careers in humanities	unexpected but very intriguing
Yes, so I can pass the vestibular.	Because it's a required subject for college..	No. Not my cup of tea.	Good, it's going to shows us different things

Figura : Respostas dos alunos parte 2

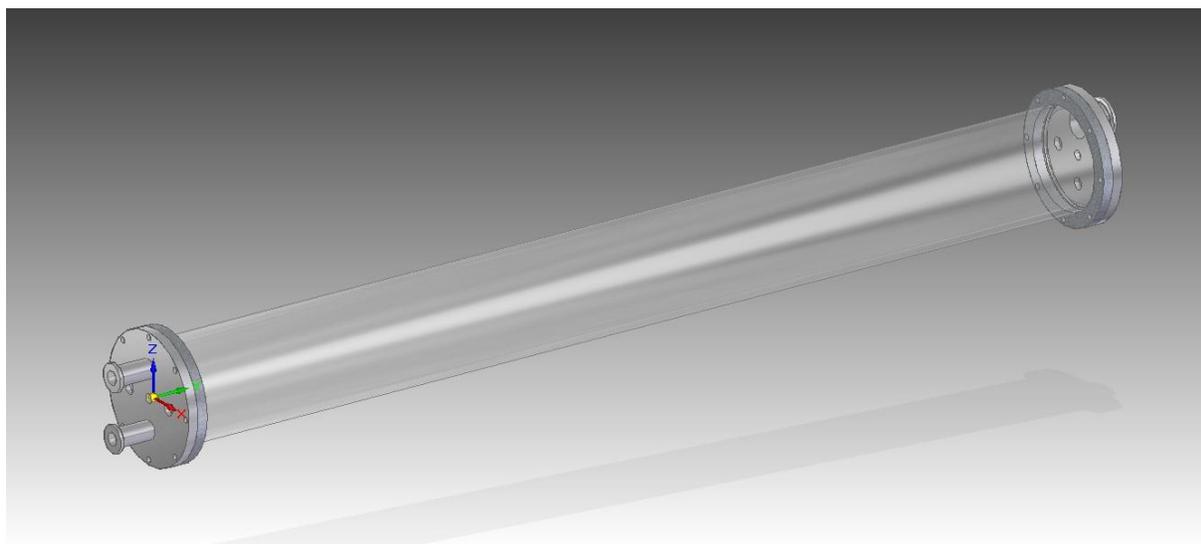
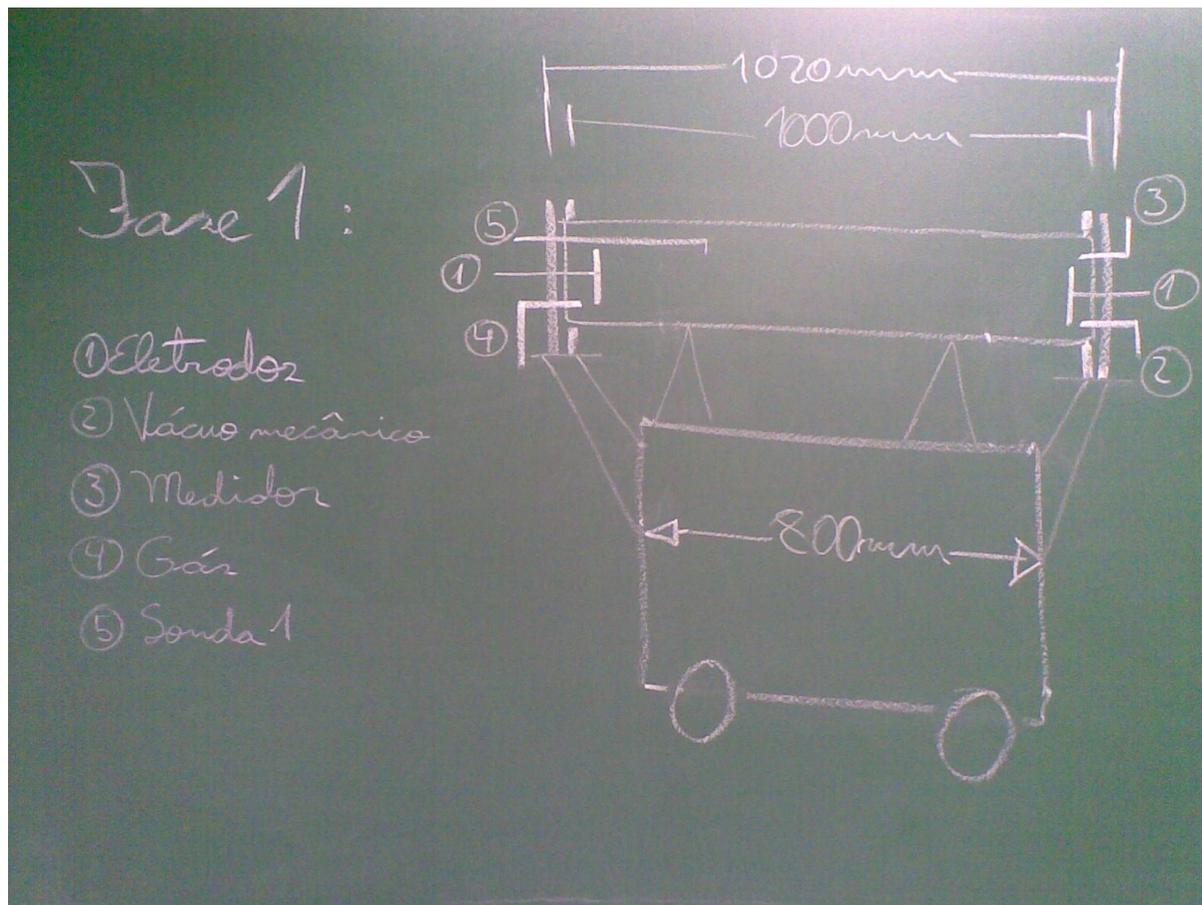
Anexo III - Resultados do Pós-teste

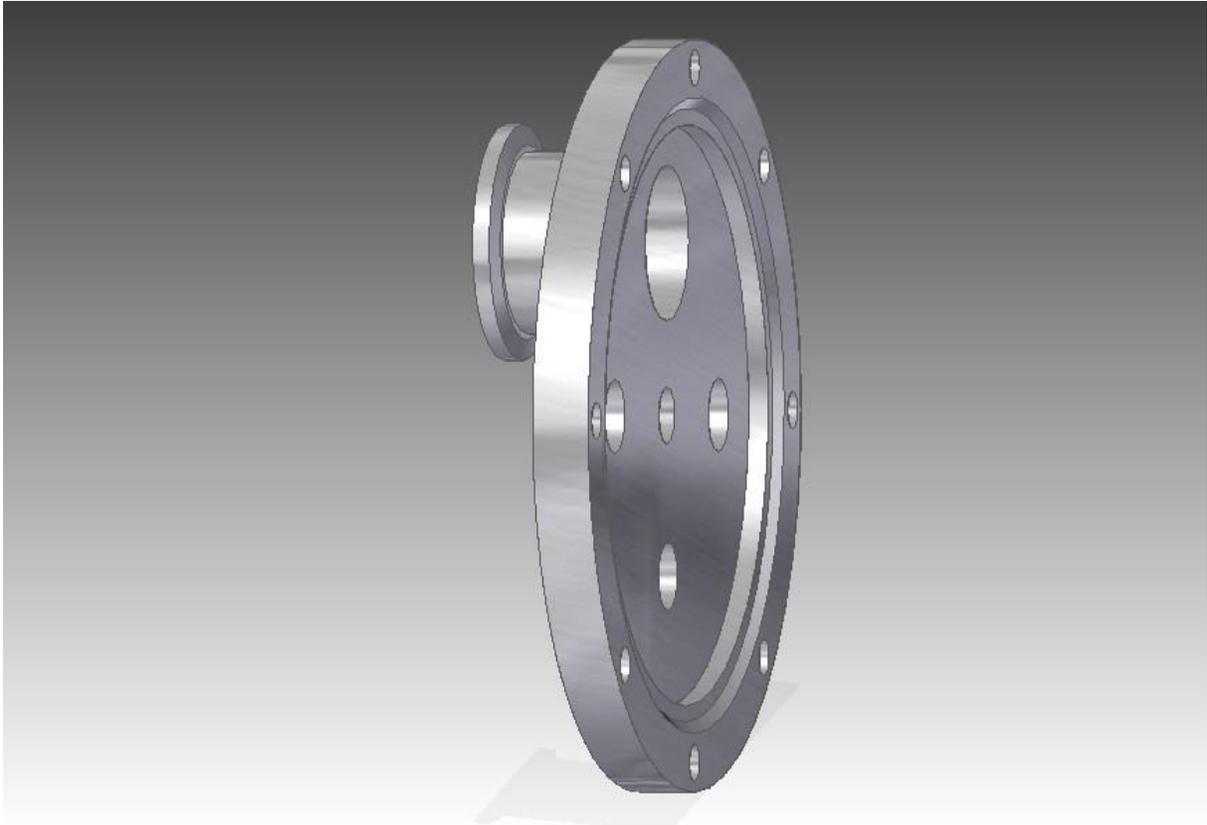
1. In the context of the subject area of Physics, what is a plasma?	2. Have you heard of Thermonuclear Power production? How does it work?	3. What is a Tokamak?	4. How does a particle accelerator work?	5. Do you know what a mass spectrometer is?
The fourth state of matter, beyond gas	Yes. By colliding hydrogen with other hydrogen to form helium	It is a machine that has plasma inside.	It makes protons collide to see what they are made out of.	Yes. It allows for the identification of substances. used in airports
A state of matter	Yes. Two atoms of hydrogen fuse to form one of helium. The helium one has less energy so some of it is converted to heat.	An experiment to create plasma	The LHC has beams of protons going against one another. when they collide many other particles are formed.	It's like a particle accelerator that identifies atoms by the radius of their paths
The state of matter hotter than gas	It was explained but I forgot.	Still don't know	By making a proton go faster and faster until it hits another proton.	NA
Ionized gas, is it's own state of matter, electrons get too hot and separate from nuclei.	Yes. How future power plants will produce energy.	A big machine being built in France that will make energy from plasma	A machine that wants to recreate the big bang.	It's a machine that differentiates between ions by using magnetic fields
A physical state like solid, liquid, and gas	Yes. Two isotopes of hydrogen are collided, they stick together and form one atom of helium. The process releases a lot of energy.	It's where the hydrogen atoms will be used to produce energy.	It has beams of protons going around a ring, then they collide, the protons are so energetic they create new particles.	Ions are accelerated by an electric field. Then, they have to move in a curve inside a magnetic field. Depending on the bend you can tell which atom is which.
The fourth and most abundant state of matter	Yes. In a plasma two atoms fuse to become a bigger one.	A machine that confines plasma inside.	It works by making protons go in the direction of each other, inside a plasma.	NA
Most things in the universe are in the plasma state, like lightning, stars and interstellar space.	Yes. Gas is heated until it becomes a plasma. The particles are moving so fast that when they collide they merge, releasing energy.	A russian machine made for holding plasma inside, then you can study it.	It has fields that accelerate protons against one another.	It's a machine used in airports to detect illegal substances.
A state of matter that you get after you heat up a gas and it becomes ionized.	When a hydrogen plasma is sufficiently hot so that the collision between two isotopes results in their merger, creating helium. Excess energy is released as heat.	A toroidal machine used to confine plasma. Scientist are building the biggest one in the south of France that will try to produce nuclear fusion to generate green electricity.	The particle accelerator has electric and magnetic fields that accelerate beams of particles in the opposite direction of each other, they go around the ring many times until they collide. The collision is so energetic it resembles the big bang.	It's a machine that by applying electric and magnetic fields accelerated ions through a magnetic knee, each ion will have a different radius according to their mass, so you can identify compounds. It used by police to detect illegal substances.
The most energetic state of matter, the fourth and hottest.	Yes, it is a complicated process that happens inside a plasma where two hydrogen atoms go through fusion and release energy.	It's a machine that can hold plasma.	By making protons collide.	A machine that identifies atoms by making them curve.
The fourth state of matter	Yes. Inside a big tokamak two atoms collide releasing energy.	It's where fusion will take place.	particle accelerators like the LHC attempt to recreate the big bang	Airports use mass spectrometers to detect illegal substances.

Figura : Respostas dos alunos parte 1

6. Is it important to study physics? Why?	7. What is the importance of learning about electromagnetism?	8. Do you consider any careers for yourself that require knowledge of Physics daily?	9. How do you feel about this workshop taking place in you school?
Yes. Because it's everywhere and it's the basis for technology.	It explains how tokamaks, fusion, particle accelerators, and mass spectrometers work	No, I'm into humanities	It was important because I learned about the fourth state of matter
Yes, but not as much for everyone	objects with electricity use it	I'm going to do administration	Very interesting.
Yes, I can see why it is important but I won't be using it.	the study of electromagnetism allows for the development of technologies.	I don't want to do anything that uses a lot of math	A new subject for us, very cool and inspiring.
Yes. It explains how things work	To learn about things.	Too hard	It was good for the students who participated
Yes. Studying physics allows us to create better technology.	So we can build machines that are useful.	I'm going to be an engineer, so yea.	Interesting, allowed for a break from regular content.
yes, to understand the world around us	Because it describes the fields that make particles move	I don't know, it's too early for me to choose.	Excellent way to learn more about physics
Yes. Engineers use it to build new machines.	Electromagnetism is used to produce better machines.	I will be a physician	Enriching, now I know what plasma is.
Yes. Physics is the most fundamental of sciences, it helps explain the inner workings of the universe.	You study electromagnetism to be able to understand how charged particles move inside electric and magnetic fields.	I want to be an astrophysicist.	I liked it a lot, now I know more about the universe.
Yes, we can use it to make technology better	It is the science of electricity and magnets	Probably going to humanities, but who knows?	Very cool and interesting
Yes. Because it helps us understand things.	It's what rules electric and magnetic fields	No.	Estimulates students, very good.

Figura : Respostas dos alunos parte 2

Anexo IV - Tubo de descargas desenhado



Anexo V - Produto: Site para facilitação das aulas

A glowing plasma ball with a central red sphere and intricate blue and red filaments radiating outwards, set against a black background.

Introdução à Física dos Plasmas

Fonte: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6c/Plasma_Ball_\(short_exposure\).jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6c/Plasma_Ball_(short_exposure).jpg)

Começar

Muito além do estado gasoso

Na sua primeira visita, realize o pré-teste que pode ser encontrado no menu à direita.

Aula 1: Descobrimo o estado plasma

Responda: Quanto da matéria do universo observável se encontra no estado plasma?

Objetivos:

- Sondar o conhecimento prévio dos alunos sobre o estado plasma
- Definir o estado plasma
- Familiarizar o estudante com a ocorrência dos plasmas na natureza e na ciência

Por que estudar o estado plasma no Ensino Médio?



O presente trabalho busca atualizar o currículo do ensino de Física, incluindo personagens e eventos históricos que favoreceram o desenvolvimento dessa área, e propondo uma sequência de seminários, material didático e a proposta de construção de um espectrômetro de massa, a ser acoplado a um tubo de Crookes já existente e testado no Laboratório de Física de Plasmas da UnB, como material didático no Ensino Médio para estudo de caso, em consonância com a segunda linha de pesquisa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF).

Reconhece-se, o crucial papel da física de plasmas para o desenvolvimento de novas tecnologias que poderão solucionar o problema da geração de energia via Fusão Termonuclear Controlada, eliminação de lixo tóxico, produção de novos materiais, propulsão de satélites. Este amplo escopo de aplicações da Física e da tecnologia dos plasmas tornam a área essencial para o desenvolvimento sustentável do Brasil e do mundo. No centro dessa situação está a produção da fusão controlada, para o estudo da qual o Brasil carece de profissionais, sendo por isso necessário se empenhar esforços na divulgação e principalmente estímulo a vocações para a área via formação de mais estudantes no Ensino Médio que conhecem e se interessam por ela.

De acordo com a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES): (Fonte: http://www.sbfisica.org.br/v1/arquivos_diversos/publicacoes/FisicaCapes.pdf)

Infelizmente – uma vez que em boa parte a física evolui em busca de solução para os problemas da sociedade – quase sempre o Brasil está mal atendido exatamente nas áreas da física experimental que têm maior relevância para o avanço da tecnologia. Por exemplo, estamos muito incipientes em áreas da física encaradas como fundamentais para a solução do problema energético, o maior de todos os que a humanidade atualmente depara. Temos um número muito pequeno de especialistas em física experimental de plasmas, cujo entendimento é central para que eventualmente se consiga a fusão nuclear controlada. Se tal feito é realizado, resolve-se de vez o problema energético da civilização, mas os países que não estiverem cientificamente capacitados para dominar a tecnologia ficarão por longo tempo sem acesso à nova fonte de energia.

O problema da inserção desse conteúdo pode ser superado por uma estratégia pedagógica abrangendo quatro enfoques de estudo: o desenvolvimento histórico do conceito de plasmas; o estudo das transições de fase; o estudo da teoria cinética dos gases ideais e o comportamento de partículas carregadas em campos Eletromagnéticos (EM), sendo o espectrômetro de massa utilizado como exemplo de aplicação. São subprodutos do trabalho: quatro aulas de 45 minutos estruturadas de acordo com a teoria de design da instrução, de Robert M. Gagné; este website disponibilizado para os alunos, com o conteúdo apresentado em sala; uma investigação sobre alguns livros didáticos utilizados em sala de aula; sugestões de exercícios para prática dos estudantes; e duas propostas de experimentos recomendados para a demonstração dos fenômenos físicos em pauta.

Definição do estado plasma

Definimos "plasma" como um gás quase neutro de partículas carregadas e neutras, que exibe comportamento coletivo. Por possuir partículas carregadas, um plasma pode conter regiões de concentração de cargas; conseqüentemente, serão gerados campos elétricos internos a ele. A movimentação dessas partículas também cria campos magnéticos. Esses dois tipos de campos afetam o movimento de outras partículas carregadas, mais distantes das regiões de acúmulo de cargas. Isso diferencia o plasma de um gás ideal, em que todas as interações se dão por colisões, não havendo perturbações de outra natureza.

Existem, no entanto, três condições que um plasma deve satisfazer: o comprimento de Debye deve ser muito menor do que a dimensão ocupada pelo gás, o número de partículas na esfera de Debye deve ser muito maior do que 1, e o produto da frequência de oscilação de plasma vezes o tempo médio entre colisões entre átomos neutros deve ser maior que 1 (CHEN, 1985).

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Aula 1

Aula 2

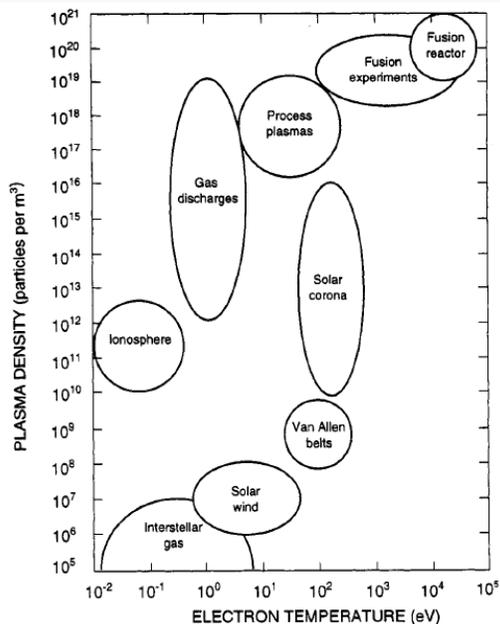
Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

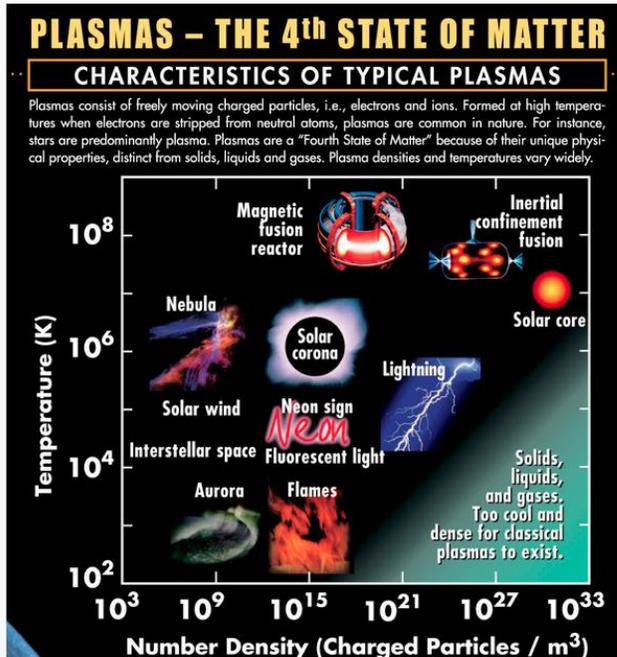


(a) Comprimento de Debye: ao colocar objetos eletricamente carregados dentro do plasma, quase instantaneamente esses objetos irão atrair partículas de cargas opostas, que rodeiam o objeto cancelando o campo elétrico dentro do plasma. A fronteira dessa camada de cargas ao redor dos objetos ocorre no raio em que a energia potencial é aproximadamente igual à energia térmica kT das partículas, nesse ponto as partículas escapam do potencial, podendo assim existir potenciais elétricos dentro do plasma. Em um plasma suficientemente frio a blindagem se aproxima de 100%. A distância da superfície do objeto carregado até a fronteira em que partículas tem velocidade igual ou acima da de escape, é chamada de comprimento de Debye. Para que esteja configurado o estado plasma, é necessário que o plasma ocupe um espaço muito maior que a blindagem de Debye ao redor desses objetos carregados. Essa exigência tem relação direta com a quasineutralidade do plasma, ele não pode ser tão neutro tal que as forças eletromagnéticas desapareçam. O plasma também precisa ser denso o bastante tal que ele tenha partículas suficientes para blindar objetos carregados dentro de si, sem que seja dominado totalmente pela influência do objeto, ou seja, o comprimento de Debye deve ser muito menor que a dimensão do plasma.

(b) Número de partículas na esfera de Debye: esta condição está estreitamente correlacionada a primeira, se houverem apenas uma ou duas partículas blindando o objeto carregado inserido no plasma, o conceito de blindagem não seria válido, portanto o número dessas partículas na bainha de plasma deve ser muito maior do que 1.

(c) Frequência de oscilação do plasma e tempo médio de colisões: porque elétrons tem massa aproximadamente 1000 vezes menor que o menor íon, um próton, em um plasma, eles se movem de maneira muito mais célere que os últimos. De fato, podemos pensar que os íons formam um plano de fundo imóvel em relação aos elétrons. Quando os elétrons se deslocam em relação a esse plano de fundo, campos elétricos aparecem em direção tal que precipite o retorno à neutralidade do plasma, puxando-os de volta a sua posição inicial. Porém, como uma mola, os elétrons passam direto pela posição de equilíbrio, e o mesmo se repete na direção oposta. A frequência desse movimento é chamada de frequência de plasma. Tipicamente, essa frequência é da ordem de 10⁹Hz. Para que se configure o estado plasma, é importante que o período de oscilações seja inferior ao tempo médio de colisões entre os íons, caso contrário, não se poderia dizer que o plasma realmente oscila, e portanto as forças eletromagnéticas não seriam dominantes, descaracterizando o estado plasma, assim, o produto da frequência de plasma vezes o tempo médio de colisões deve ser maior que 1.

Aula 1
 Aula 2
 Aula 3
 Aula 4
 Pré-teste
 Pós-teste
 Para o professor

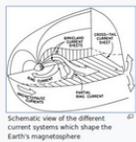


Aula 1
Aula 2
Aula 3
Aula 4
Pré-teste
Pós-teste
Para o professor

7 direções importantes da pesquisa em plasmas:



Em primeiro lugar, a teoria de propagação de ondas eletromagnéticas em plasmas magnetizados não-uniformes. O advento da transmissão de ondas de rádio levou à descoberta da ionosfera, que reflete essas ondas, permitindo que percorram maiores distâncias. Entretanto, algumas vezes essa camada da atmosfera pode absorver ou distorcer as frequências das ondas de rádio, levando vários cientistas a estudar o fenômeno para possivelmente corrigir esses efeitos.



Os astrofísicos rapidamente reconheceram que muito do universo consiste de plasma, sendo essa a segunda importante direção de pesquisa. O estudo da composição e comportamento dos objetos cósmicos concebeu a teoria da magnetohidrodinâmica (MHD), em que plasmas são tratados essencialmente como fluidos condutores. Essa teoria teve grande sucesso na investigação de manchas solares, do vento solar, de jatos solares, da formação de estrelas e de uma gama de outros tópicos, na astrofísica. O campo magnético terrestre, por exemplo, é mantido pelo movimento de seu núcleo derretido, que pode ser aproximado como um fluido MHD.



A criação da bomba de hidrogênio, em 1952, traz a terceira grande área a se desenvolver após os estudos de Langmuir. Despertou um grande interesse em obter fusão termonuclear controlada, como fonte de energia para o futuro, sendo as pesquisas nesta área desenvolvidas em secreto e independentemente, naquela época, no Estados Unidos, União Soviética e Grã-Bretanha. No entanto, em 1958, a pesquisa nessa área foi revelada ao público, levando à publicação de um número imenso de importantes e influentes textos. A rigor, a física de plasmas surge, então, como uma disciplina. A principal preocupação dos físicos de fusão é entender como um plasma termonuclear pode ser confinado, em geral utilizando campos magnéticos, e investigar as instabilidades que o permitem escapar.

Aula 2
Aula 3
Aula 4
Pré-teste
Pós-teste
Para o professor



A quarta direção de pesquisa surge com o trabalho inovador de James A. Van Allen, que colocou, pela primeira vez instrumentos científicos em satélites. Van Allen deu o pontapé inicial para a era de diagnósticos de diversas regiões do espaço, dentro e fora da órbita terrestre, sendo lançadas, por exemplo, as sondas Voyager. Surgiu, assim, a área de plasmas espaciais.



No fim dos anos 60, são desenvolvidos lasers de alta potência, inaugurando a física de plasmas gerados por lasers. Quando um laser muito poderoso incide sobre um sólido, parte do material é imediatamente evaporado e uma camada de plasma se forma entre o alvo e o feixe. Plasmas criados por laser têm propriedades extremas, como densidades semelhantes às de sólidos, não encontradas em plasmas comuns. Uma aplicação dessas pesquisas é a tentativa de fusão, por foco, de vários lasers em um pequeno alvo esférico. A física de altas energias também usa técnicas de aceleração de plasmas por lasers para reduzir o tamanho e o custo de aceleradores de partículas.



Lingote de alumínio obtido com processo de reciclagem a plasma

A sexta direção é a conservação de alimentos, que é feita principalmente de duas formas: a aplicação de finas camadas de alumínio ou prata sobre plásticos de embalagem; o tratamento da superfície, para melhorar a sua adesão a outras substâncias, que receberá o metal é uma tecnologia de plasma. E a esterilização a plasma.



Finalmente, a sétima e, talvez, mais importante aplicação da física de plasmas é a produção de "wafers" de silicone cobertos por transistores. Bombardeia-se o wafer com os íons presentes no plasma, de maneira que ele desgaste lentamente o material, para produzir camadas ultra finas. Esse processo, chamado sputtering, é essencial para a produção de computadores cada vez menores e mais baratos.

[Aula 1](#)

[Aula 2](#)

[Aula 3](#)

[Aula 4](#)

[Pré-teste](#)

[Pós-teste](#)

[Para o professor](#)

Fixe o conteúdo assistindo em casa a palestra do prof. Luiz Fernando Ziebell, da UFRGS



[Aula 1](#)

[Aula 2](#)

[Aula 3](#)

[Aula 4](#)

[Pré-teste](#)

[Pós-teste](#)

[Para o professor](#)

Aula 2: História da física dos plasmas

Responda: Qual a importância do registro histórico para o desenvolvimento tecnológico?

Objetivos:

- Descrever o desenvolvimento histórico da física dos plasmas
- Discutir as áreas de desenvolvimento tecnológico da física de plasmas

Henrich Geissler (1858)



- Hábil vidreiro, fornecia instrumentos para a Universidade de Bonn.
- Aprimorou a técnica de evacuação de tubos de vidro.
- Tubos de Geissler são precursores dos tubos de gás neônio.

Julius Plucker (1858)

- Físico e professor da Universidade de Bonn.
- Trabalhou com os instrumentos feitos por Geissler
- Descobriu que descargas elétricas em um gás rarefeito geram brilho nas paredes do tubo de vidro.
- Pioneiro na área de espectroscopia.

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

William Crookes (1879)

- Físico inglês, professor na Universidade de Cambridge.
- Aprimorou os tubos de Geissler, agora chamados tubos de Crookes.
- Descreveu os raios catódicos.
- Acreditava ter descoberto o quarto estado da matéria.
- Usando as técnicas da época de espectroscopia, descobriu os elementos Tório, Hélio e Protactínio.

J.J. Thomson (1897)

- Físico inglês, professor na Universidade de Cambridge.
- Vencedor do sexto prêmio nobel de física por suas contribuições teóricas e experimentais sobre a condução de eletricidade por gases.
- Exímio professor, 7 de seus alunos receberam o mesmo prêmio, e também seu próprio filho.
- Descobriu que os raios catódicos eram compostos por partículas negativamente carregadas e 1000 vezes mais leves que um átomo de hidrogênio, os elétrons.
- Inventor da espectroscopia de massa, identificou isótopos pela primeira vez (neônio).

Joseph Larmor (1900)



- Físico inglês, professor na Universidade de Cambridge do departamento de matemática.
- Partículas carregadas emitem radiação.
- Raio da trajetória do elétron em um campo magnético.

Irving Langmuir (1924)



- Físico e Químico americano, pesquisador da General Electric, vencedor do prêmio Nobel de Química de 1932.
- Caracterizou e nomeou o quarto estado da matéria como "plasma".

Gustav Ising (1924)



- Físico sueco, professor na Universidade de Estocolmo.
- Criador do acelerador linear de partículas.
- Utilização de campos elétricos oscilantes (ondas de rádio) para acelerar partículas.

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Edward V. Appleton (1929)



- Físico inglês, professor em King's College, vencedor do prêmio Nobel de Física em 1947.
- Provou a existência da ionosfera através do estudo da reflexão de ondas de rádio pela atmosfera.
- Seu trabalho culminou na invenção do radar.

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Lev Landau (1932)



- Físico russo, professor da Universidade de Kharkiv.
- Formulador da primeira teoria de transição de fases de segunda ordem (contínuas).

Ernest Lawrence (1934)



- Físico americano, vencedor do prêmio Nobel de 1939 pela invenção do ciclotron.
- Defensor da política da "Big Science".

Hannes O. G. Alfvén (1942)



- Físico americano dedicado ao estudo da física de plasma, vencedor do prêmio Nobel de 1970.
- Pioneiro no estudo da magnetoidrodinâmica.
- Cunhou o conceito de "Universo Plasma"
- Grande popularizador do estado plasma

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

James A. Van Allen (1958)



- Físico americano, precursor da instrumentalização científica dos satélites.
- Montou contadores Geiger-Muller em satélites, conseguindo assim detectar cinturões de radiação presos entre as linhas de campo magnético terrestre, hoje chamados cinturões de Van Allen.

Aula 3: Termodinâmica

Responda: Como fazer um plasma?

Objetivos:

- Entender a transição de fase gás-plasma
- Descrever porque o plasma brilha
- Calcular a temperatura de um plasma
- Compreender a distribuição de velocidades de Maxwell

Transição de fase

Estado Inicial/Final	Sólido	Líquido	Gasoso	Plasma
Sólido	x	Fusão	Sublimação	x
Líquido	Solidificação	x	Ebulição	x
Gasoso	x	Liquefação	x	Ionização
Plasma	x	x	Recombinação	x

Em azul: transições de fase de primeira ordem
Em vermelho: transições de fase de segunda ordem

De fato, a transição de fase gás-plasma ocorre de forma diferenciada das outras transições. As transições comumente ensinadas no Ensino Médio recebem a classificação de transições de primeira ordem, ou descontínuas, enquanto que a transição gás-plasma é classificada como de segunda ordem, ou contínua, de acordo com a classificação de Ehrenfest. Argumentamos que as transições de segunda ordem são conceitualmente mais simples que as transições de primeira ordem, isto por causa do seu caráter contínuo, de acordo com Callen (1985):

De fato, a transição de fase gás-plasma ocorre de forma diferenciada das outras transições. As transições comumente ensinadas no Ensino Médio recebem a classificação de transições de primeira ordem, ou descontínuas, enquanto que a transição gás-plasma é classificada como de segunda ordem, ou contínua, de acordo com a classificação de Ehrenfest. Argumentamos que as transições de segunda ordem são conceitualmente mais simples que as transições de primeira ordem, isto por causa do seu caráter contínuo, de acordo com Callen (1985):

Uma mudança de estado de equilíbrio de um mínimo local a outro constitui uma transição de fase de primeira ordem, induzida por ou uma mudança de temperatura ou por uma mudança em algum outro parâmetro termodinâmico. Os dois estados entre os quais uma transição de fase ocorre são distintos, ocorrendo em regiões separadas do espaço de configurações termodinâmicas.

Os estados entre os quais uma transição de fase de segunda ordem ocorre são contínuos no espaço de configurações termodinâmicas.

Enquanto, em um ponto de transição de primeira ordem, dois estados diferentes se encontram em equilíbrio, dificultando a identificação de qual dos dois estados o material se encontra, em uma transição de segunda ordem sempre se pode apontar o estado do material; neste, os dois estados são, de fato, o mesmo. Durante a transição de fase gás-plasma, ao se agregar ou retirar calor do material, ele continua a mudar sua temperatura, enquanto os processos de ionização e recombinação se realizam; assim, ele é intuitivamente mais confortável do que as outras transições, nas quais, apesar de continuamente fornecer (ou remover) calor ao sistema, a temperatura não muda. Concluímos que o calor de ionização é um híbrido entre o calor sensível e o latente parte da energia eleva a temperatura do sistema, e parte gera sua ionização.

Para o aumento de temperatura, assumimos o cálculo do calor sensível para um gás ideal. A ele somaremos o calor necessário para realizar a primeira ionização em todos os átomos, o que chamaremos de calor ionizante.

Em primeiro lugar, definimos calor específico ionizante: $c_i = \frac{\text{energia de ionização}}{\text{massa atômica}}$. Para U_i dado em eV:

$$c_i = \frac{U_i}{\text{massa atômica}}$$

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

A massa é dada em quilogramas. Portanto, podemos definir calor ionizante $Q_i = mc$. Exemplo de cálculo do calor ionizante para o argônio:

Elemento	Energia de ionização U_i (eV)
Hidrogênio	13.6
Nitrogênio	14.6
Argônio	15.8

Tabela 4: Energia de ionização de H, N, e Ar.³²

Convertendo para o sistema internacional de unidades:

$$c_i = \frac{1,602\,176\,622 \cdot 10^{-19} C \cdot U_i}{1,660\,539\,0 \cdot 10^{-27} kg \cdot \text{massa em unidades atômicas}}^{33}$$

Ou,

$$c_i = \frac{9,6485332 \cdot 10^7 \cdot U_i}{\text{massa em unidades atômicas}} \frac{C}{kg}$$

Concluimos que o caráter contínuo da transição implica que não há uma temperatura específica para a ionização/recombinação do gás, mas existe um intervalo de temperaturas dentro do qual ela ocorre. Então, só é possível selecionar um valor específico adotando-se um critério arbitrário, ou singular de cada elemento. Por exemplo, sabendo-se o grau de ionização necessário para que o gás argônio passe a agir como um plasma, seria lógico escolher a temperatura relativa a ele como a temperatura de ionização. Até que se realizem experimentos que determinem o grau de ionização a partir do qual o gás se comporta como plasma, exigir que os calores sensível e ionizante sejam da mesma grandeza, ou iguais ($Q_{\text{sensível}} = Q_i$; logo, $c \Delta T = c_i$), nos parece a simplificação mais coerente para aplicação no ensino médio. Assim, o aluno deduziria a variação da temperatura do gás da forma:

$$Q_i = mc\Delta T$$

$$\Delta T = 9,65 \cdot 10^4 \cdot \frac{U_i}{c \cdot m}$$

Usando como exemplo 1 g de nitrogênio:

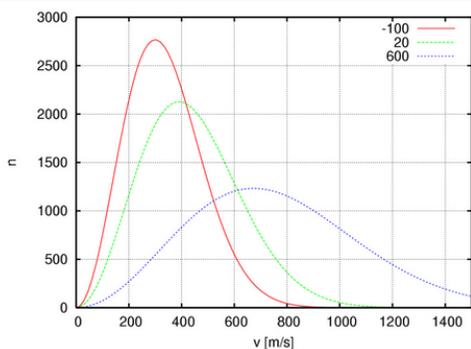
$$\Delta T = 9,65 \cdot 10^4 \cdot \frac{14,6}{1,04 \cdot 1} K = 1,35 \cdot 10^6 K^{39}$$

obtendo um valor típico para aplicações tecnológicas dos plasmas.⁴⁰

Aula 1
Aula 2
Aula 3
Aula 4
Pré-teste
Pós-teste
Para o professor

Aula 1
Aula 2
Aula 3
Aula 4
Pré-teste
Pós-teste
Para o professor

Calculando a temperatura em eletrons-volts



Assumindo a aproximação de gases perfeitos:

Em uma caixa cúbica de lado L e volume V , colocam-se n mols de um gás perfeito. O sistema é mantido de tal forma que as paredes da caixa permanecem à temperatura T constante. Cada molécula tem massa m , velocidade v , com componentes v_x , v_y , v_z e momento p . Considerando-se apenas as colisões com as paredes do recipiente, queremos calcular a força exercida pelas moléculas em apenas uma parede.

A variação do momento de uma partícula que colide com uma parede perpendicular à direção x será:

$$mv_x - (-mv_x) = 2mv_x$$

transmitindo à parede momento linear de mesma magnitude.

O tempo entre as colisões com a mesma parede pode ser calculado:

$$\Delta T = \frac{\text{distância}}{\text{velocidade}} = \frac{2L}{v_x}$$

Como a força resultante F_m , exercida por uma molécula na parede, é a taxa de variação do momento:

$$F_m = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{\frac{2L}{v_x}} = \frac{mv_x^2}{L}$$

Assim, a força total exercida por todas as moléculas (N sendo o número total de moléculas) é:

$$F_{total} = \sum_{i=1}^N \frac{mv_{xi}^2}{L} = \frac{m}{L} \sum_{i=1}^N v_{xi}^2 = \frac{m}{L} N \bar{v}_x^2$$

Onde \bar{v}_x^2 é o valor médio do quadrado da componente x das velocidades das moléculas. Substituindo N por $n \cdot A$ (A é o número de Avogadro, igual a $6,02 \times 10^{23}$), e lembrando que $m \cdot A =$ massa molar (M), podemos determinar a pressão P :

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{L^2} = \frac{m}{L^3} N \bar{v}_x^2 = \frac{m}{L^3} n A \bar{v}_x^2 = \frac{M}{L^3} n \bar{v}_x^2$$

Mas $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$. Portanto, como não há uma direção preferencial para o movimento das moléculas, os valores médios das componentes são iguais, ou $v_x^2 = \frac{1}{3} v^2$.

$$P = \frac{M}{3L^3} n \bar{v}^2$$

Logo:

$$\bar{v}^2 = \frac{3PL^3}{nM} = \frac{3PV}{nM}$$

Utilizando-se a equação de Clapeyron, $PV = nRT$:

$$\bar{v}^2 = \frac{3RT}{M} \quad \text{ou} \quad T = \frac{M}{3R} \bar{v}^2$$

R é a constante universal dos gases perfeitos

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Ora, em um gás perfeito – portanto, na ausência de potenciais (gravitacional, elétrico, etc) –, a energia interna (U) é determinada pela energia cinética total das moléculas. Seja m_g a massa do gás:

$$U = \frac{m_g \overline{v^2}}{2}$$

Por consequência, a energia média das moléculas é igual à energia cinética média (\overline{K}) das mesmas:

$$\overline{K} = \frac{\overline{mv^2}}{2} = \frac{m \overline{v^2}}{2} = \frac{m}{2} \frac{3RT}{M} = \frac{3RT}{2A} = \frac{3K_b T}{2}$$

Porque a temperatura e a energia média das partículas são tão proximamente relacionadas, é comum se dar a temperatura em termos de unidades de energia, fazendo-se a conversão entre os dois pelo uso da constante de Boltzmann K_b ($\frac{R}{A} = K_b$). Cada grau de

liberdade é responsável por $K_b T/2$. Assim, para evitar confusão sobre o número de dimensões envolvidas, a energia correspondente a KT é utilizada.⁴⁷

Um elétron no vácuo, acelerado por uma diferença de potencial elétrico de 1 Volt, receberá energia cinética igual a $W = qV = 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \text{ CV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Faz sentido definir uma nova unidade de energia a partir desse resultado – o elétron-volt (eV) –, sendo e equivalente à carga elementar omitida. Assim, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Tomando $K_b = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$, podemos calcular o fator de conversão entre eV e K:

$$T = \frac{\overline{E}}{K_b} = \frac{1 \text{ eV}}{8.617 \times 10^{-5}} \approx 11.600 \text{ K}$$

Plasmas podem ter diversas temperaturas ao mesmo tempo. Isto se deve às distribuições de velocidades relativas à cada espécie atômica presente. Os elétrons também têm sua própria distribuição Maxwelliana. O motivo dessa separação é a frequência de colisões: cada partícula colide com outra da mesma espécie mais vezes do que com as de outras espécies. Assim, os íons podem estar em equilíbrio térmico entre si, da mesma forma que os elétrons, mas o plasma tem que durar tempo suficiente para que as duas temperaturas se equilibrem.

O estudante pode ficar intrigado, ao se deparar com um fato interessante: a temperatura dentro de uma lâmpada fluorescente é de aproximadamente 20.000K, muito acima dos 310 K que podem ser esperados em um dia quente no Rio de Janeiro; no entanto, pode-se tocar a lâmpada sem maiores preocupações. É o momento ideal para discutir a capacidade térmica e a densidade das substâncias: mesmo que elétrons e íons tenham individualmente altas energias, não há número suficiente deles dentro da lâmpada, para que somadas as energias, obtenhamos calor capaz de causar queimaduras, em comparação, um litro de água fervente, muito mais frio que as cargas no tubo, é mais que capaz de causar queimaduras.

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Aula 4: Campos eletromagnéticos dentro do plasma

Responda: Como se comportam partículas carregadas dentro de campos EM?

Objetivos:

- O movimento das partículas de um plasma dentro de campos EM
- Aplicações tecnológicas dos plasmas
- Fusão termonuclear

Aula 1

Aula 2

Aula 3

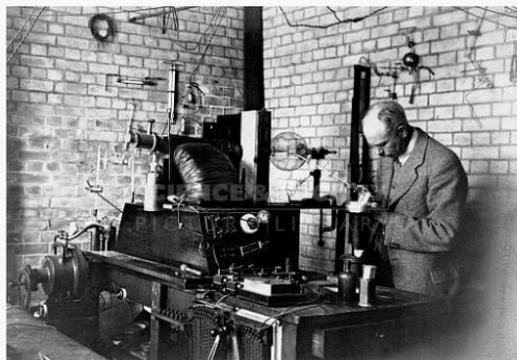
Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Histórico do espectrômetro de massa



Como elucidado na primeira aula deste trabalho, a história dos tubos de raios catódicos e da espectroscopia de massa começa com Geissler, Plucker, Crookes, e Thomson, é importante, no entanto, ressaltar mais alguns marcos importantes no desenvolvimento desta tecnologia.

Em 1886, William Crookes, em pronunciamento à Chemical Section of the British Association at Birmingham, disse (WHITE; WOOD, 1986. Tradução livre pelo autor):

Eu penso, portanto, que quando nós dizemos 'o peso atômico de', por exemplo, do cálcio é 40, nós realmente expressamos o fato que, embora a maioria dos átomos de cálcio de fato tenha 40 unidades de massa atômica, existe um número não pequeno que são representados por 39 ou 41, ou um número menor por 38 ou 42, e assim por diante. Não será possível, ou alcançável, que esses átomos mais pesados e mais leves possam ter em alguns casos subsequentes sido separados por um processo que lembra o fracionamento químico? Essa separação pode ter acontecido em parte quando a matéria atômica estava se condensando a partir estado primitivo de ignição intensa, mas também pode ter sido parcialmente afetado durante as eras geológicas por dissoluções e precipitações das várias terras. Isso pode parecer uma especulação audaciosa, mas eu não penso que está além do poder química testar a possibilidade.

De acordo com White e Wood (1986, p. 5), no mesmo ano, o físico alemão Eugen Goldstein, que investigava descargas em tubos a baixa pressão, observa que se o catodo fosse perfurado também havia um brilho em torno deste. Conclui assim que havia outros raios, além dos catódicos, indo na direção oposta. Porque esses raios passavam por dentro das perfurações, denominou-os raios canais. Treze anos depois, um aluno de Kirchhoff, Wilhelm Wien, mostra que esses raios, ou íons, poderiam ter sua trajetória desviada por um eletroímã. Durante esse mesmo período, Thomson estava no laboratório Cavendish, em Cambridge, estudando em detalhe as trajetórias de elétrons e íons positivos, percebendo que, quando defletidas por um campo magnético, se tornavam parábolas bem definidas e discretas, provando que átomos individuais do mesmo elemento tem aproximadamente a mesma massa. Assim nasceu a espectroscopia de massa, é importante esclarecer ao aluno de ensino médio o sentido da palavra espectro, a saber, o domínio dos valores possíveis para as massas. Thomson então declara (WHITE; WOOD, 1986. Tradução livre pelo autor):

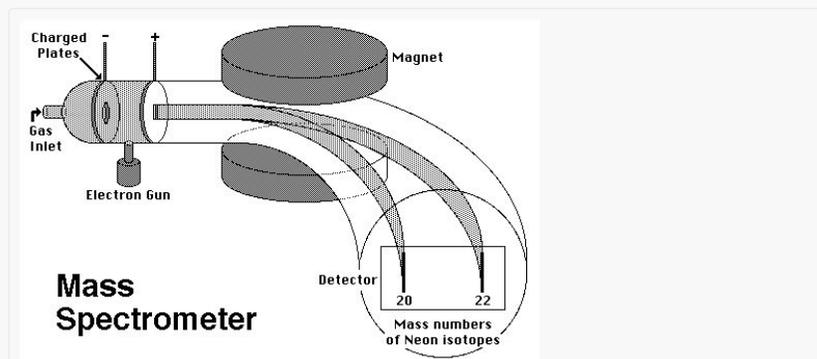
Estou certo de que existem muitos problemas na química que podem ser resolvidos com mais facilidade desta forma do que de qualquer outro método. O método é surpreendentemente sensível, ainda mais que a espectroscopia ótica, requer uma quantidade infinitesimal de material e não requer que esteja especialmente purificado. Essa técnica não é difícil se aparelhos que produzam alto vácuo estejam presentes.

Pós-teste

Pós-teste

Para o professor

Ainda de acordo com White e Wood (1986, p. 7), já em 1912 Thomson conseguia distinguir trajetórias de íons cuja massa diferia em apenas 10%. E em 1919, Francis William Aston, um colega de Thomson no laboratório Cavendish, foi capaz de estabelecer uma razão de abundância de 10 para 1 para Neônio de massa atômica 20 e 22, respectivamente, um resultado muito próximo do peso atômico conhecido de 20.18.



Aston continuou a aperfeiçoar seu equipamento mapeando boa parte da tabela periódica, chegando a medir 212 isótopos diferentes. Determinou assim que a maioria, e não a minoria como se pensava, dos elementos possuem isótopos, e também a chamada lei do número inteiro, que diz que as massas dos isótopos são múltiplos inteiros da massa do átomo de hidrogênio. Recebeu o prêmio Nobel da química por seus esforços em 1922. A partir do trabalho de Aston, o espectrômetro de massa passou a ser estudado e desenvolvido em vários países do mundo, começando por Estados Unidos, e depois por Canadá, Alemanha, Suécia, Japão, e Rússia. O espectrômetro desenvolvido por Aston tinha poder de resolução de 600, com as várias melhorias feitas ao equipamento, em 1955 já existiam espectrômetros com resolução igual a 500,000.

A indústria petroleira foi a primeira a adotar em massa os espectrômetros, para a análise qualitativa dos seus produtos. Já em 1943 o conteúdo de uma mistura de 9 componentes poderia ser determinado em 1 hora, o que levava 240 horas nos procedimentos anteriores (WOOD; WHITE, 1986, p. 3). Hoje, basicamente todas as indústrias de alta tecnologia utilizam esse equipamento, como aviação, comunicações, alimentos, petróleo, farmacêutica, fotografia, semicondutores, entre outros. O estudante talvez tenha se deparado com espectrômetros de massa em aeroportos, para controle de substâncias ilegais.

Aula 1

Aula 2

Aula 3

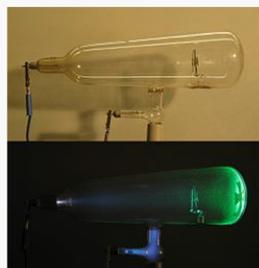
Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Aplicações da física de plasmas: Tubos de Crookes



Em um tubo de Crookes, é inserido gás neônio (massa média 20.18 unidades de massa atômica) que é aquecido por uma diferença de voltagem entre o ânodo e o cátodo até entrar no estado plasma. A diferença entre as densidades de íons e elétrons por m^3 é de $10^{-13} m^{-3}$. a) Calcule a voltagem necessária para que a energia média dos íons de neônio seja de 3 eV.

Como:

$$E_{av} = \frac{3}{2}KT$$

$$KT = 2eV$$

Denominamos plasmas à essa temperatura de plasmas de 2-eV, esse valor é típico de tubos de descarga, outros casos ilustrativos são: ionosfera é um plasma de 0.05eV, plasma interplanetário é de 0.01eV, e experimentos de fusão 100 a 10.000eV.⁵⁹ Assumimos que a pressão seja baixa o suficiente para que a permissividade elétrica seja igual à de vácuo, os eletrodos pode ser assim tratados como um capacitor de placas paralelas.

A energia cinética ganha por uma carga entre as placas de um capacitor de placas paralelas é igual a carga vezes a diferença de potencial, ou qV:

$$E_{av} = qV$$

$$V = \frac{E_{av}}{q}$$

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

A carga total pode ser obtida multiplicando-se a carga elementar pela diferença entre as densidades de íons e elétrons.

$$q = 1,6 * 10^{-19} * 10^3 C = 1,6 * 10^{-16} C$$

Portanto,

$$V = \frac{1,6 * 10^{-19} J}{1,6 * 10^{-16} C} = 1000 V$$

Obtendo um valor típico para tubos de descarga. Claramente, esse valor depende de valor próximo ao real para a diferença de densidades, de fato o caminho contrário, o valor da voltagem ser dado e calcular o excesso de cargas, pode ser considerado mais parecido com rotinas de laboratório de plasmas, onde a voltagem é a variável controlada. Nossa forma de lidar com as cargas é fundamentada na resolução da equação de Poisson em uma dimensão para capacitores de placas paralelas, como demonstrada por Chen (1985, p.9 e p. 12), e aproximações já solidificadas no Ensino Médio.

b) Calcule a velocidade dos íons de neônio, assuma que 1 unidade de massa atômica = $1.67 * 10^{-27} \text{kg}$.

Novamente:

$$E_{av} = \frac{3}{2} K T$$

Mas $E_{av} = \frac{1}{2} m v^2$, assim:

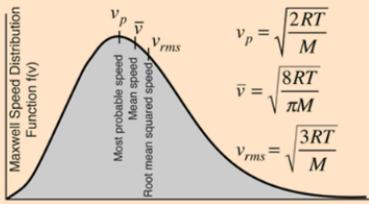
$$v = \sqrt{\frac{3 K T}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{6 * 1,6 * 10^{-19} J}{20.18 * 1.67 * 10^{-27}}} = 5.3 * 10^3 \text{ms}^{-1}$$

Podemos comparar com a velocidade média na distribuição de Maxwell, usando a ferramenta *Molecular Speed Calculation*, de HyperPhysics por Carl Nave, do Departamento de Física e Astronomia da Georgia State University, (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>):

Molecular Speed Calculation

The speed distribution for the molecules of an ideal gas is given by

$$f(v) = 4\pi \left[\frac{M}{2\pi RT} \right]^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left[\frac{-Mv^2}{2RT} \right]$$


Maxwell Speed Distribution Function f(v)

Molecular Speed

The calculation of [molecular speed](#) depends upon the molecular mass and the temperature. For mass

$m = 20.18$ amu

$M = 0.02018$ kg/mol

and temperature

$T = 23873.15$ K

$T = 23600$ C

the three characteristic speeds may be calculated. The nominal average molecular mass for dry air is 29 amu.

[Index](#)

[Kinetic theory concepts](#)

Most probable speed = $v_p = 4435.3473 \text{m/s} = 15967.250 \text{km/hr} = 9921.5894 \text{mi/hr}$

Mean speed = $\bar{v} = 5004.7535 \text{m/s} = 18017.1126 \text{km/hr} = 11195.3147 \text{mi/hr}$

RMS speed = $v_{rms} = 5432.1688 \text{m/s} = 19555.808 \text{km/hr} = 12151.415 \text{mi/hr}$

[Frequency of collisions](#) [Mean free path](#)

[HyperPhysics**** Heat and Thermodynamics](#)

R.Nave

[Go Back](#)

A velocidade dos elétrons pode ser calculada de forma similar para dar início a um interessante debate sobre velocidade, energia, e temperatura, como mencionado no capítulo 4, e da mesma

forma para se discutir o fato dos plasmas por muitas vezes não estarem em equilíbrio termodinâmico possuindo mais de uma temperatura como descrito no capítulo 3, ainda pode-se usar esta oportunidade para tecer comentários sobre a frequência de oscilação de plasmas. Sobre a última, utiliza-se a fórmula $f_p = 9 \sqrt{n}$ (CHEN, 1985, p. 85), onde f_p é frequência de plasma, e n a densidade do plasma. Para tubos de descargas típicos, $n = 10^{15} \text{m}^{-3}$, assim $f_p \approx 3 * 10^8 \text{Hz}$.

c) Calcule a temperatura do plasma

Como visto no capítulo anterior, 1eV equivale a aproximadamente 11.600°K, assim, 2eV equivalem a 23,200°K.

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Aula 1

Aula 2

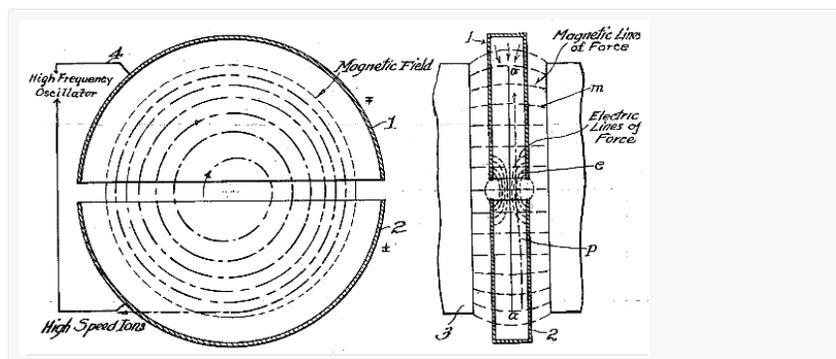
Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor



Uma máquina de radioterapia funciona usando um acelerador ciclotron. Hidrogênio no estado plasma é inserido no centro da câmara do ciclotron perpendicularmente ao campo magnético vertical, passando por um campo elétrico acelerador a cada meia volta. Após 6 voltas completas, o campo magnético é desligado causando que o feixe saia pela tangente em direção à área a ser tratada do paciente. Se o raio da última trajetória dos prótons é igual a 1m, o campo magnético igual a 0.5T, a) calcule a velocidade e a energia cinética das partículas ao ejetarem do ciclotron. b) calcule a temperatura do plasma.

As partículas descrevem trajetórias circulares e a força de Lorentz é a única força atuante fora da região dos campos elétricos:

$$F_C = \frac{mv^2}{r}$$

$$F_L = qvB$$

Igualando:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

Assim, podemos isolar e calcular a velocidade:

$$v = \frac{qBr}{m} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.5 \times 1}{1.66 \times 10^{-27}} \text{ms}^{-1}$$

$$v = 4.8 \times 10^7 \text{ms}^{-1}$$

A energia cinética será então:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot 1.67 \times 10^{-27} \times (4.8 \times 10^7)^2 = 1.9 \text{pJ}$$

Passando para o item b, sabemos que 1eV equivale a 11,600°K:

$$1.9 \text{pJ} = 12 \times 10^6 \text{eV}$$

$$T = 11,600 \times 12 \times 10^6 \text{eV} = 1.4 \times 10^{11} \text{K}$$

É interessante comparar esse resultado com alguns dados do LHC, para o qual a relação anterior não vale por causa dos efeitos relativísticos. A energia de colisão do feixe de partículas é de 13TeV⁶⁰, e a maior temperatura já registrada foi de 5.5 * 10¹²K⁶¹.

Para finalizar, existem duas notáveis relações importantes para ciclotrons e para a física de plasma em geral no cálculo das trajetórias de partículas. Uma fórmula para a frequência ciclotrônica pode ser facilmente derivada, sabendo-se que a velocidade de translação v é igual à frequência angular ω vezes o raio r :

Substituímos:

$$v = \omega r$$

em:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Isolando w :

$$w = \frac{qB}{m}$$

Chamada frequência ciclotron.

A segunda relação é o raio de Larmor (raio ciclotron), que é o raio da partícula no ciclotron e, se for adicionado um campo elétrico ao plasma, será o raio de rotação da trajetória em hélice da partícula.

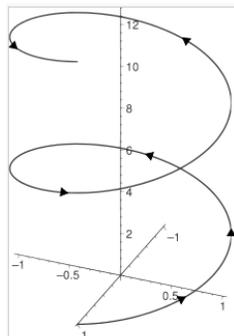


Figura: Trajetória em hélice de um íon em um campo magnético e um campo elétrico

Novamente de:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

Resolvemos para r :

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Aplicações da física de plasmas: Tokamak

Tokamak: A mais comum máquina de confinamento de plasma, seu nome é um acrônimo em russo para câmara toroidal com campo magnético axial. É a maior aposta para a geração de energia a fusão controlada no mundo, através do projeto *International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)*⁶², ao ser concluído em 2027 será a segunda maior máquina do mundo, após o LHC. O ITER representa um avanço em relação ao atual maior tokamak em funcionamento, o *Joint European Tokamak (JET)*, que não conseguiu satisfazer o critério de Lawson, o produto da temperatura, densidade, e tempo de confinamento, do plasma, chegando

a um quinto do valor esperado de $5 \cdot 10^{21} \text{m}^{-3} \text{s}$ keV. Em 1955, J. D. Lawson procurou determinar o que seria necessário para que uma máquina de fusão produzisse mais energia do que utilizasse, calculou que uma temperatura deveria estar na casa de 10^9K , e a densidade deveria ser um milhão de vezes menos denso que o ar, ambas condições são comumente satisfeitas em máquinas atuais. Os maiores avanços recentes foram feitos sobre o tempo de confinamento, passando de apenas microssegundos no tempo de Lawson, para 1 segundo no JET, e o ITER planeja alcançar 5 segundos de confinamento. É por esse último motivo que o ITER é tão imenso, para aumentar o volume do plasma, 10 vezes maior que o JET, em relação a sua área superficial, diminuindo a velocidade em que é disperso.⁶³

De acordo com Chen(2016, p. 357), a ideia é criar plasmas confinados por campos magnéticos, em equilíbrio térmico, e com distribuições de Maxwell, de tal maneira que a energia ganha ou perdida em colisões elásticas seja retornada à distribuição térmica. Apenas algumas colisões resultam em fusão, assim, é suficiente criar um plasma de 30 keV, para que existam suficientes íons na parte mais energética da distribuição para gerar fusão. Portanto, o tokamak apresenta excelente oportunidade para o professor tocar qualitativamente na distribuição de Maxwell, e na energia liberada pelas diferentes reações de acordo com a tabela abaixo, onde D representa deutério e T trítio:

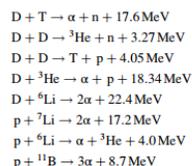


Figura : Reações termonucleares (CHEN, 2016, p. 357)

Aula 1

Aula 2

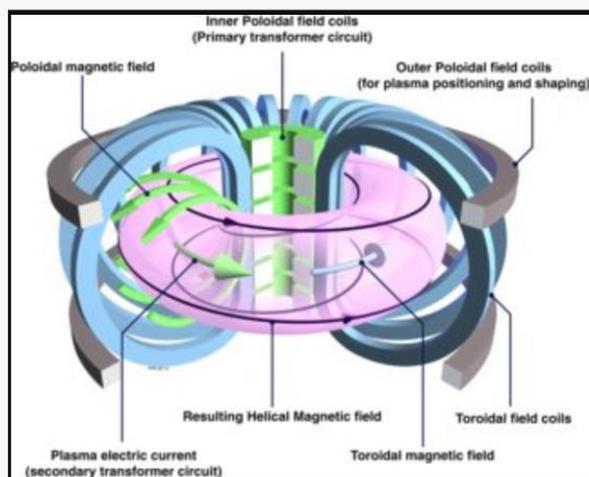
Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor



Aula 1
Aula 2
Aula 3
Aula 4
Pré-teste
Pós-teste
Para o professor

Aplicações da física de plasmas: Espectrômetro de massa

Espectrômetro de massa: 5 prêmios Nobel já foram dados a pioneiros da espectroscopia de massa, pode-se argumentar que é o instrumento de análise mais importante da era moderna. Sendo assim, não é possível que se continue a ser ignorado na educação secundária. Iremos ilustrar uma maneira pela qual se pode identificar íons pela sua massa, utilizando um par de campos magnético e elétrico, e descrever um seletor de velocidades, muitas vezes usado em conjunto com o anterior para que analise tão somente íons da velocidade desejada.

A primeira ilustração é a seleção pelo raio de curvatura do íon dentro de um campo magnético uniforme. O íon é acelerado por um campo elétrico, e então sai deste campo adentrando um campo magnético perpendicular a seu movimento. É fácil mostrar que o raio depende da sua massa, desde que todas as espécies de íons tenham mesma carga.

Dado o raio de Larmor:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

O substituímos na equação para a energia cinética de uma partícula carregada acelerada por um campo elétrico:

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV$$

Isolando a velocidade:

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

Para obter:

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}}$$

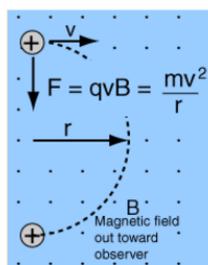


Figura : Espectrômetro de massa utilizando o raio de Larmor⁶⁶

Aula 1
Aula 2
Aula 3
Aula 4
Pré-teste
Pós-teste
Para o professor

A segunda ilustração é o uso um seletor de velocidades. São aplicados simultaneamente um campo elétrico e um magnético tal que a força elétrica atuante nos íons seja diametralmente oposta à força magnética atuante nos mesmos. Uma placa com um orifício é colocada de frente à direção inicial de movimentação dos íons, de acordo com a figura:

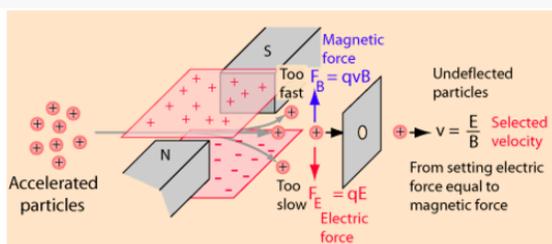


Figura: Seletor de velocidades⁶⁷

Para que o íon não se desvie do seu curso e passe pelo orifício, as forças de Lorentz e de Coulomb devem ter a mesma magnitude:

$$qE = qvB$$

A velocidade selecionada será então:

$$v = \frac{E}{B}$$



Um feixe contém dois tipos de íons de Ca^+ , com massas atômicas relativas de 39.9u (onde u é a unidade de massa atômica) e 43.9u. Os íons no feixe estão inicialmente parados e são acelerados por uma diferença de potencial igual a 10.0kV, depois, passam por uma fenda adentrando uma região onde existe um campo magnético constante e igual a 1.50T que é perpendicular à velocidade dos íons. Cada íon viaja em uma trajetória semi-circular e atinge uma placa fotográfica. Considere $1u = 1.66 \cdot 10^{-27}\text{kg}$ e a carga elementar $e = 1.60 \cdot 10^{-19}\text{C}$.⁶⁸

- a) Encontre a velocidade dos íons de massa relativa igual a 39.9u ao entrar na região de campo magnético uniforme.

Como vimos:

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

$$v = 2,20 \cdot 10^5 \text{ m s}^{-1}$$

- b) Encontre o raio do semicírculo em que os íons de 39.9u viajam.

Usando:

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}}$$

Encontramos como resultado:

$$r = 6.07 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

- c) Qual é a distância entre as marcas que as duas espécies de íons deixam na placa fotográfica?

Calculamos o raio da segunda utilizando a mesma fórmula da anterior, obtendo:

$$r_{43,9} = 6.36 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

A distância d entre as marcas será a diferença entre os diâmetros das trajetórias.

$$d = 2 \cdot 0,0636 - 2 \cdot 0,0607 = 5,80 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Aula 1
Aula 2
Aula 3
Aula 4
Pré-teste
Pós-teste
Para o professor

Aula 1
Aula 2
Aula 3
Aula 4
Pré-teste
Pós-teste
Para o professor

Anexo VI – Distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann

Derivada originalmente em 1860, por James Clerk Maxwell, e baseada na teoria cinética dos gases ideais, descreve a distribuição de velocidades entre as moléculas de um gás, de acordo com sua temperatura, após esse ter alcançado equilíbrio seguido de numerosas colisões entre as moléculas que o compõem. Boltzmann, em 1872, também derivou a distribuição através de argumentos da mecânica, também defendendo que ao longo do tempo, as colisões dentro do gás o levariam a uma situação de equilíbrio descrita por essa. Cinco anos mais tarde, encontrou uma nova maneira de se chegar à distribuição usando a termodinâmica estatística.

A distribuição de Maxwell-Boltzmann é dada pela função:

$$f(v) = \sqrt{\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^3} * 4\pi v^2 * e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

Onde m é a massa da molécula, kT é a constante de Boltzmann vezes a temperatura, e v é a velocidade selecionada.

A função, $f(v)$, retorna o número médio de partículas que se encontrarão na velocidade selecionada. Vale a pena mencionar duas fórmulas, a da velocidade mais provável $v_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$, e da velocidade média $v_m = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_p$.

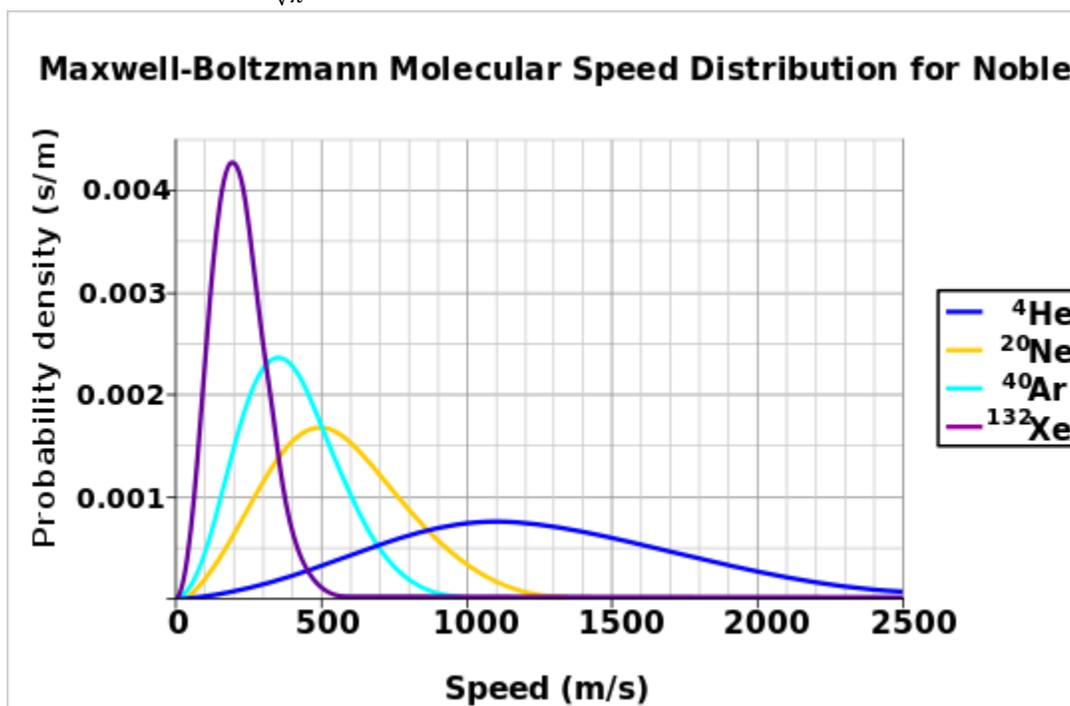


Figura 46: Distribuição de Maxwell-Boltzmann para gases nobres.