



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

Produto produzido 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**

Sumário

Capítulo 1 Desenvolvimento do produto: website.....	1
1.1 HTML.....	1
1.2 Jekyll.....	3
1.3 GitHub.....	4
1.4 Elementos de Design.....	5
Capítulo 2 Arquivos de texto.....	6
2.1 Layout.....	6
2.2 Conteúdo.....	6
2.3 Demais arquivos como imagens.....	30
Capítulo 3 O site.....	31
3.1 Questionário.....	51

1. Desenvolvimento do produto: website

Neste capítulo gostaríamos de descrever como se deu o desenvolvimento do produto de conclusão de curso que acompanha a dissertação, 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.

O site deve ser usado pelo professor durante as aulas, como elemento facilitador. O estudante retém o poder de revisitar o conteúdo quantas vezes desejar fora de sala de aula. Para que o docente tenha acesso a conhecimento mais aprofundado do assunto, incluímos o texto da dissertação no link do site “Para o professor”, bastando clicá-lo para baixar o arquivo em pdf.

1.1 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/>.

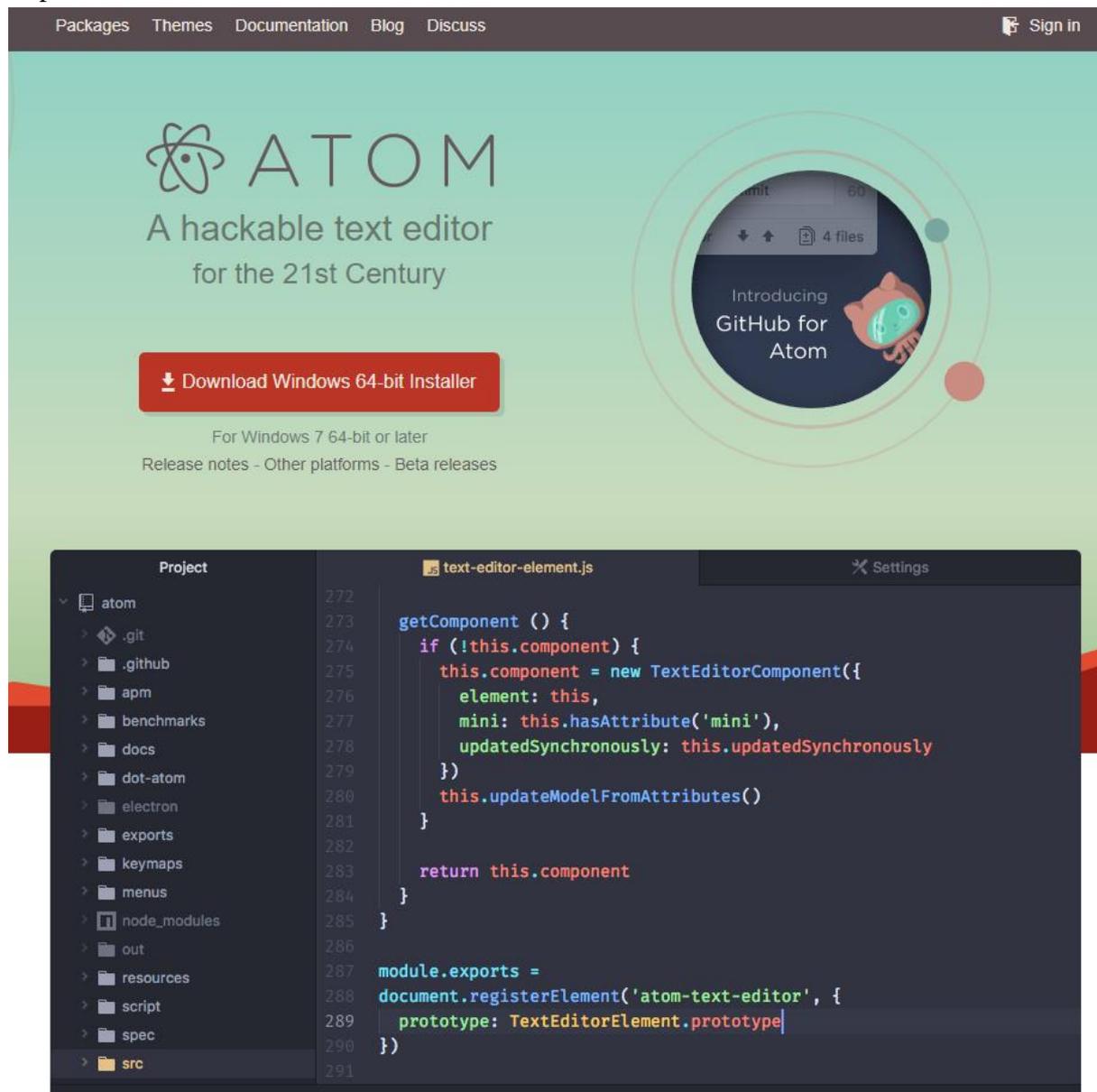


Figura : Website do editor de texto Atom¹

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/>

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

¹ Disponível em: <https://atom.io/>. Acesso 25/6/2017.

site é suficiente para poder escrever páginas estáticas como as usadas neste projeto, ele tem aproximadamente 4 horas de duração.

1.2 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/>.

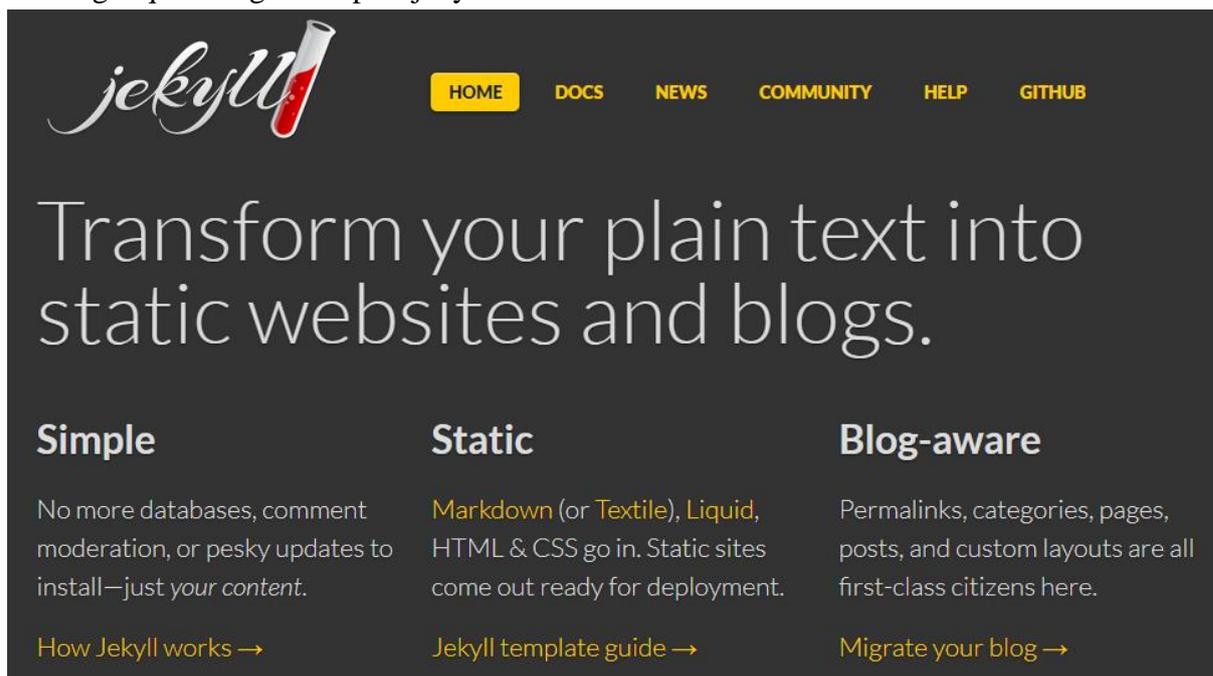


Figura : A estrutura Jekyll²

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 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.

² Disponível em: <https://jekyllrb.com/>. Acesso 25/6/2017.

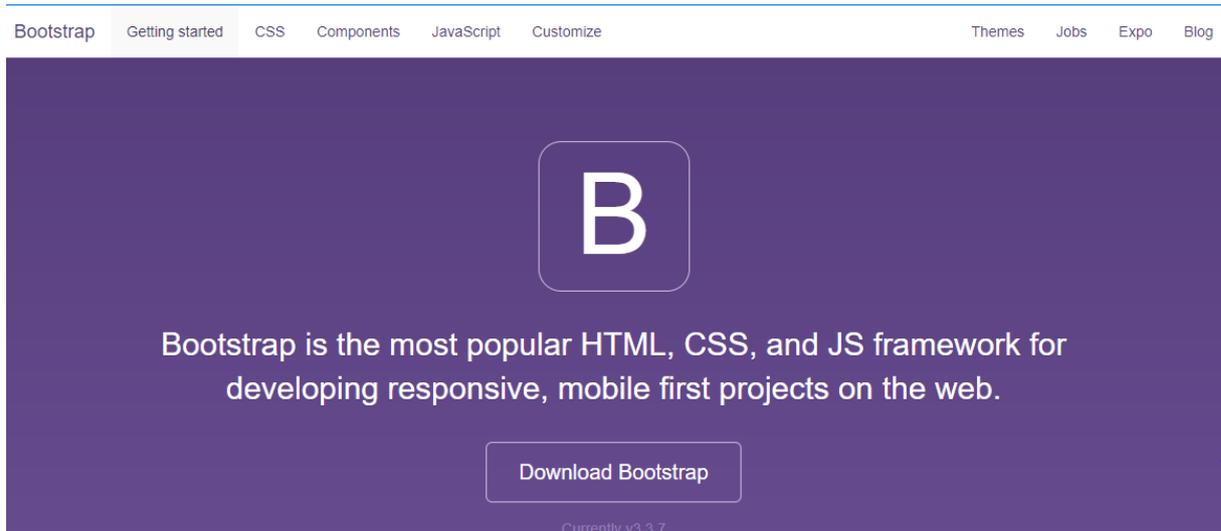


Figura : A estrutura Bootstrap³

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.

1.3 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.

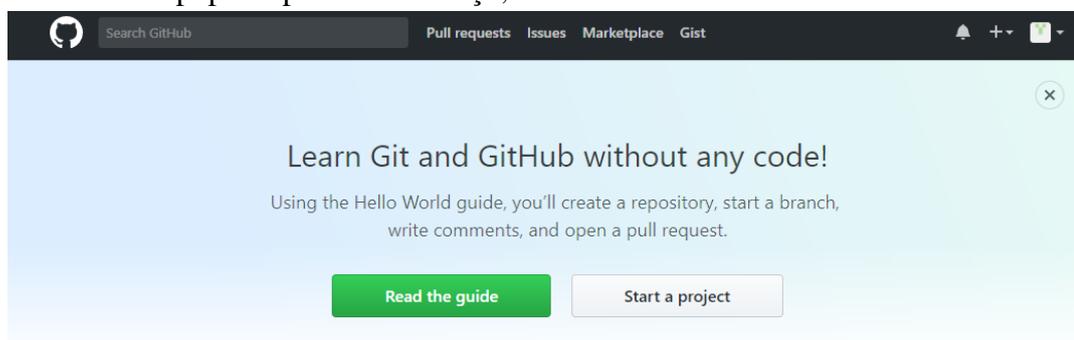


Figura : Site da plataforma GitHub⁴

³ Disponível em: <http://getbootstrap.com/>. Acesso 25/6/2017.

⁴ Disponível em: <https://github.com/>. Acesso 25/6/2017.

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.

1.4 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: a 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: links 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 grudada: 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.

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.

2. Arquivos de texto

Como já dito, sites da internet são arquivos de texto hospedados em servidores acessíveis pelo protocolo TCP/IP. Neste capítulo, adicionamos o código desenvolvido durante a elaboração da dissertação que acompanha esse produto.

2.1 Layout:

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1">
  <meta charset="utf-8">
  <title>Mr. Pacios</title>
  <script src="//ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/1.11.0/jquery.min.js"></script>
  <script src="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/3.3.7/js/bootstrap.min.js"
integrity="sha384-
Tc5IQib027qvyjSMfHjOMaLkfuWVxZxUPnCJA7l2mCWNIpG9mGCD8wGNIcPD7Txa"
crossorigin="anonymous"></script>
  <link rel="stylesheet" type="text/css" href="{{ site.baseurl }}/css/site.css">
  <link rel="stylesheet" type="text/css" href="{{ site.baseurl }}/css/plasma.css">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1">
  <script src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/3.2.1/jquery.min.js"></script>
  <script src="{{ site.baseurl }}/assets/js/fixd.js"></script>

</head>
<body>

<header>
  {% include nav.html %}
</header>

{{ content }}

</body>

<footer>
  {% include footer.html %}
</footer>

</html>
```

2.2 Conteúdo

layout: plasma

```
<div class="container">
```

```
<div class="row">
```

```
<div class="col-md-12">
```

```
<div class="jumbotron" style="background-image: url(..img/PlasmaBall.png);  
background-size: 100%; height: 850px;">
```

```
<h1 class="" style="color: white;">Introdução à Física dos Plasmas</h1>
```

```
<span style="color: white;">Fonte:  
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6c/Plasma_Ball_(short_exposure).jpg</s  
pan>
```

```
<p><a class="btn btn-primary btn-lg" href="#comeco"  
role="button">Começar</a></p>
```

```
</div>
```

```
</div>
```

```
</div>
```

```
<div class="row">
```

```
<div class="col-md-9" role="main">
```

```
<h1 id="comeco" class="page-header">Muito além do estado gasoso</h1>
```

```
<p>Na sua primeira visita, realize o pré-teste que pode ser encontrado no menu à  
direita.</p>
```

```
<hr>
```

```
<h2 id="a1">Aula 1: Descobrindo o estado plasma</h2>
```

```
<p class="text-primary">Responda: Quanto da matéria do universo observável se  
encontra no estado plasma?</p>
```

```
<p>Objetivos:</p>
```

```
<ul>
```

```
<li>Sondar o conhecimento prévio dos alunos sobre o estado  
plasma</li>
```

```
<li>Definir o estado plasma</li>
```

```
<li>Familiarizar o estudante com a ocorrência dos plasmas na natureza  
e na ciência</li>
```

```
</ul>
```

```
<div class="panel panel-primary">
  <div class="panel-heading">
    <h3 class="panel-title">Por quê estudar o estado plasma no Ensino
Médio?</h3>
  </div>
```

```
  <div class="panel-body">
    <div class="media">
      <div class="media-left"><a
href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Plasma"></a></div>
```

```
      <div class="media-body">
        <p>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).</p>
```

```
        <p>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.</p>
```

```
        <p>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)</p>
```

```
      <div class="well">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.</div>
```

```
        <p>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.</p>

</div>

</div>

</div>

</div>

<div class="panel panel-primary">

<div class="panel-heading">

<h3 class="panel-title">Definição do estado plasma</h3>

</div>

<div class="panel-body">

<div class="media">

<div class="media-body">

<p>Definimos "plasma" como um gás quasineutro 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. </p>

<p>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).</p>

<div class="media-left"></div>

<p>(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.</p>

<p>(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. </p>

<p>(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.</p>

</div>

</div>

</div>

</div>

<div class="panel panel-primary">

<div class="panel-heading">

<h3 class="panel-title">Plasmas na Natureza e na Ciência</h3>

</div>

<div class="panel-body">

<ul class="media-list">

<li class="media">

<div

class="media-left">

</div>

<li class="media">

<h4>7 direções importantes da pesquisa em plasmas:</h4>

<div class="media">

<div class="media-left"></div>

<div class="media-body">

<p>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 percorrem 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. </p>

</div>

</div>

<div class="media">

<div class="media-left"></div>

<div class="media-body">

<p>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.</p>

</div>

</div>

<div class="media">

<div class="media-left"></div>

<div class="media-body">

<p>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, po 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.</p>

</div>

</div>

<div class="media">

<div class="media-left"></div>

<div class="media-body">

<p>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.</p>

</div>

</div>

<div class="media">

<div class="media-left"></div>

<div class="media-body">

<p>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.</p>

</div>

</div>

```
<div class="media">
    <div class="media-left"><a
href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Reciclagem_de_embalagens_longa_vida#Reciclagem_do
_composto_de_polietileno_e_alum.C3.ADnio"></a></div>
```

```
<div class="media-body">
    <p>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.</p>
```

```
</div>
</div>
```

```
<div class="media">
    <div class="media-left"><a
href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Wafer_(eletr%C3%B4nica)"></a></div>
```

```
<div class="media-body">
    <p>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.</p>
```

```
</div>
</div>
```

```
</li>
</ul>
</div>
</div>
```

```
<p class="text-primary">Fixe o conteúdo assistindo em casa a palestra do prof. Luiz Fernando Ziebell, da UFRGS</p>
```

```
<iframe width="560" height="315"
src="https://www.youtube.com/embed/FV_HtkYmc-I?list=PL95B53DA359407AF6"
frameborder="0" allowfullscreen></iframe>
```

```
<hr>
```

Aula 2: História da física dos plasmas

Resposta: 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

<div class="panel panel-primary">

<div class="panel-heading">

<h3 class="panel-title">Henrich Geissler (1858)</h3>

</div>

<div class="panel-body">

<div class="media">

<div class="media-left"></div>

<div class="media-body">

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.

</div>

</div>

</div>

</div>

<div class="panel panel-primary">

<div class="panel-heading">

<h3 class="panel-title">Julius Plucker (1858)</h3>

</div>

<div class="panel-body">

```
<div class="media">
  <div class="media-left"><a
href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Julius_P1%C3%BCcker"></a></div>
```

```
<div class="media-body">
  <ul>
    <li>Físico e professor da Universidade de
Bonn.</li>
    <li>Trabalhou com os instrumentos feitos por
Geissler</li>
    <li>Descobriu que descargas elétricas em um gás
rarefeito geram brilho nas paredes do tubo de vidro.</li>
    <li>Pioneiro na área de espectroscopia.</li>
```

```
</ul>
</div>
</div>
</div>
</div>
```

```
<div class="panel panel-primary">
  <div class="panel-heading">
    <h3 class="panel-title">William Crookes (1879)</h3>
  </div>
  <div class="panel-body">
    <div class="media">
      <div class="media-left"><a
href="https://pt.wikipedia.org/wiki/William_Crookes"></a></div>
```

```
<div class="media-body">
  <ul>
    <li>Físico inglês, professor na Universidade de
Cambridge.</li>
    <li>Aprimorou os tubos de Geissler, agora
chamados tubos de Crookes.</li>
    <li>Descreveu os raios catódicos.</li>
    <li>Acreditava ter descoberto o quarto estado da
matéria.</li>
```

```
<li>Usando as técnicas da época de
espectroscopia, descobriu os elementos Tálcio, Hélio e Protactínio.</li>
</ul>
</div>
</div>
```

```
</div>
</div>
```

```
<div class="panel panel-primary">
  <div class="panel-heading">
    <h3 class="panel-title">J.J. Thomson (1897)</h3>
  </div>
  <div class="panel-body">
    <div class="media">
      <div class="media-left"><a
href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Joseph_John_Thomson"></a></div>
```

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

```
      </div>
    </div>
  </div>
</div>
```

```
<div class="panel panel-primary">
  <div class="panel-heading">
    <h3 class="panel-title">Joseph Larmor (1900)</h3>
  </div>
  <div class="panel-body">
    <div class="media">
      <div class="media-left"><a
href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Joseph_Larmor"></a></div>
```

```
      <div class="media-body">
        <ul>
```

- Físico inglês, professor na Universidade de Cambridge do departamento de matemática.

- Partículas carregadas emitem radiação.

- Raio da trajetória do elétron em um campo magnético.

</div>

</div>

</div>

</div>

<div class="panel panel-primary">

<div class="panel-heading">

<h3 class="panel-title">Irving Langmuir (1924)</h3>

</div>

<div class="panel-body">

<div class="media">

<div

class="media-left"></div>

<div class="media-body">

- 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”.

</div>

</div>

</div>

</div>

<div class="panel panel-primary">

<div class="panel-heading">

<h3 class="panel-title">Gustav Ising (1924)</h3>

</div>

<div class="panel-body">

<div class="media">

<div

class="media-left"></div>

<div class="media-body">

```

        <ul>
            <li>Físico sueco, professor na Universidade de
Estocolmo.</li>
            <li>Criador do acelerador linear de
partículas.</li>
            <li>Utilização de campos elétricos oscilantes
(ondas de rádio) para acelerar partículas.</li>
        </ul>
    </div>
</div>
</div>
</div>

```

```

<div class="panel panel-primary">
    <div class="panel-heading">
        <h3 class="panel-title">Edward V. Appleton (1929)</h3>
    </div>
    <div class="panel-body">
        <div class="media">
            <div
                class="media-left"><a
href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Edward_Appleton"></a></div>

```

```

            <div class="media-body">
                <ul>
                    <li>Físico inglês, professor em King's College,
vencedor do prêmio Nobel de Física em 1947.</li>
                    <li>Provou a existência da ionosfera através do
estudo da reflexão de ondas de rádio pela atmosfera.</li>
                    <li>Seu trabalho culminou na invenção do
radar.</li>
                </ul>
            </div>
        </div>
    </div>
</div>

```

```

<div class="panel panel-primary">
    <div class="panel-heading">
        <h3 class="panel-title">Lev Landau (1932)</h3>
    </div>
    <div class="panel-body">
        <div class="media">

```

```
<div class="media-left"><a href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Lev_Landau"></a></div>
```

```
<div class="media-body"><ul style="list-style-type: none;"><li>Físico russo, professor da Universidade de Kharkiv.</li><li>Formulador da primeira teoria de transição de fases de segunda ordem (contínuas).</li></ul></div>
```

```
</div></div></div></div>
```

```
<div class="panel panel-primary"><div class="panel-heading"><h3 class="panel-title">Ernest Lawrence (1934)</h3></div>
```

```
<div class="panel-body"><div class="media"><div class="media-left"><a href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Ernest_Lawrence"></a></div>
```

```
<div class="media-body"><ul style="list-style-type: none;"><li>Físico americano, vencedor do prêmio Nobel de 1939 pela invenção do ciclotron.</li><li>Defensor da política da “Big Science”.</li></ul></div>
```

```
</div></div></div></div>
```

```
<div class="panel panel-primary"><div class="panel-heading"><h3 class="panel-title">Hannes O. G. Alfven (1942)</h3></div><div class="panel-body"><div class="media">
```

```
<div class="media-left"><a href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Hannes_Alfv%C3%A9n"></a></div>
```

```
<div class="media-body"><ul><li>Físico americano dedicado ao estudo da física de plasma, vencedor do prêmio Nobel de 1970.</li><li>Pioneiro no estudo da magnetoidrodinâmica.</li><li>Cunhou o conceito de "Universo Plasma"</li><li>Grande popularizador do estado plasma</li></ul></div>
```

```
</div></div></div></div>
```

```
<div class="panel panel-primary"><div class="panel-heading"><h3 class="panel-title">James A. Van Allen (1958)</h3></div><div class="panel-body"><div class="media"><div class="media-left"><a href="https://pt.wikipedia.org/wiki/James_van_Allen"></a></div>
```

```
<div class="media-body"><ul><li>Físico americano, precursor da instrumentalização científica dos satélites.</li><li>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.</li></ul></div>
```

```
</div></div></div></div>
```

```
<hr>
```

Aula 3: Termodinâmica

Responda: Como fazer um plasma?

Objetivos:

-

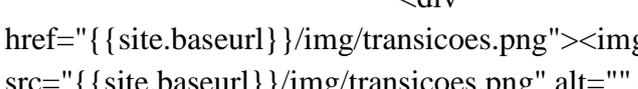
- Entender a transição de fase gás-plasma

- Descrever porque o plasma brilha

- Calcular a temperatura de um plasma

- Compreender a distribuição de velocidades de Maxwell

Transição de fase



[class="media-left"></div>](#)

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. Concluimos 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.</p>

```
<div class="media">
  <div class="media-left"><a
href="{{ site.baseurl }}/img/ionizacao.png"></a></div>
</div>
<div class="media">
  <div class="media-left"><a
href="{{ site.baseurl }}/img/ionizacao2.png"></a></div>
</div>
```

```
</div>
</div>
</div>
<div class="panel panel-primary">
  <div class="panel-heading">
    <h3 class="panel-title">Calculando a temperatura em eletrons</h3>
  </div>
  <div class="panel-body">
    <div class="media">
      <div class="media-left"><a
href="{{ site.baseurl }}/img/maxwell.png"></a></div>
</div>
      <div class="media">
        <div class="media-body">
          <p>Assumindo a aproximação de gases perfeitos:</p>
          <div class="media">
            <div class="media-left"><a
href="{{ site.baseurl }}/img/temp1.png"></a></div>
</div>
            <div class="media">
              <div class="media-left"><a
href="{{ site.baseurl }}/img/temp2.png"></a></div>
```

```
</div>
<div class="media">
  <div class="media-left"><a
href="{{ site.baseurl }}/img/temp3.png"></a></div>
</div>
<div class="media">
  <div class="media-left"><a
href="{{ site.baseurl }}/img/temp4.png"></a></div>
</div>
```

```
</div>
</div>
</div>
</div>
```

```
<hr>
```

Aula 4: Campos eletromagnéticos dentro do plasma</h2>

Responda: Como se comportam partículas carregadas dentro de campos EM?</p>

Objetivos:</p>

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

```
<div class="panel panel-primary">
  <div class="panel-heading">
    <h3 class="panel-title">Histórico do espectrômetro de massa</h3>
  </div>
  <div class="panel-body">
    <div class="media">
      <div class="media-left"><a
href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Francis_William_Aston"></a></div>
    </div>
```

<div class="media">

<div class="media-body">

<p>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.</p>

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

<div class="well">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.</div>

<p>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): </p>

<div class="well">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.</div>

<p> 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. </p>

</div>

<div class="media">

<div

class="media-left"></div>

</div>

<div class="media-body">

<p>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.</p>

<p>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.</p>

</div>

</div>

</div>

</div>

<div class="panel panel-primary">

<div class="panel-heading">

<h3 class="panel-title">Aplicações da física de plasmas: Tubos de Crookes</h3>

</div>

<div class="panel-body">

<div class="media">

```

                <div class="media-left"><a
href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Tube_de_Crookes"></a></div>
            </div>
            <div class="media">
                <div class="media-left"><a href=""></a></div>
            </div>

```

```
</div>
```

```
</div>
```

```

<div class="panel panel-primary">
    <div class="panel-heading">
        <h3 class="panel-title">Aplicações da física de plasmas: Aceleradores
de partículas</h3>
    </div>
    <div class="panel-body">
        <div class="media">
            <div class="media-left"><a
href="https://pt.wikipedia.org/wiki/C%3ADclotron"></a></div>
        </div>
    </div>

```

```

                <div class="media-left"><a href=""></a></div>
            </div>
            <div class="media">
                <div class="media-left"><a href=""></a></div>
            </div>
        </div>
    </div>

    <div class="panel panel-primary">
        <div class="panel-heading">
            <h3 class="panel-title">Aplicações da física de plasmas:
Tokamak</h3>
        </div>
        <div class="panel-body">
            <div class="media">
                <div class="media-left"><a href="https://www.euro-
fusion.org/jet/"></a></div>
            </div>
            <div class="media">
                <div class="media-left"><a href=""></a></div>
            </div>
            <div class="media">
                <div class="media-left"><a href=""></a></div>
            </div>
        </div>
    </div>

```

```

<div class="panel panel-primary">
  <div class="panel-heading">
    <h3 class="panel-title">Aplicações da física de plasmas: Espectrômetro
de massa</h3>
  </div>
  <div class="panel-body">
    <p>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.</p>
    <p>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.</p>
    <p>Dado o raio de Larmor:</p>
    <div class="media">
      <div class="media-left"><a href=""></a></div>
    </div>
    <div class="media">
      <div class="media-left"><a href=""></a></div>
    </div>
    <div class="media">
      <div class="media-left"><a href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectrometria_de_massa"></a></div>
    </div>
    <div class="media">
      <div class="media-left"><a href=""></a></div>
    </div>
    <div class="media">
      <div class="media-left"><a href=""></a></div>
    </div>
  </div>
</div>

```

<hr>

<p class="bg-primary text-white">Ao concluir o estudo do conteúdo deste site, complete o pós-teste que pode ser encontrado à direita</p>

</div>

<div id="fixed" class="col-md-3" role="complementary">

<ul class="nav nav-pills nav-stacked" >

<li role="presentation" class="active">Aula 1

<li role="presentation">Aula 2

<li role="presentation">Aula 3

<li role="presentation">Aula 4

<li role="presentation">Pré-teste

<li role="presentation">Pós-teste

<li role="presentation">Para o professor

</div>

</div>

</div>

2.3 Demais arquivos como imagens

Todos os arquivos criados para o site, incluindo imagens, podem ser acessados pelo link: <https://github.com/RodrigoPacios/mrpacios.git>

Não incluímos outros arquivos presentes no site ou por não fazerem parte do projeto, ou para evitar redundância, já que aparecem nos prints do site abaixo.

3 O site

Nesta seção, adicionamos os prints do site (produto final), que pode ser acessado em: <https://rodrigopacios.github.io/mrpacios/PlasmaPhysics>.



Muito além do estado gasoso

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

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

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 qué 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.

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

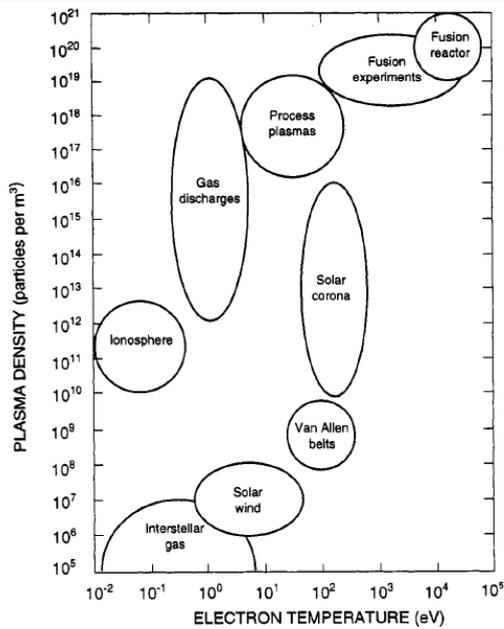
Pós-teste

Para o professor

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; consequentemente, 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).



(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.

(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](#)

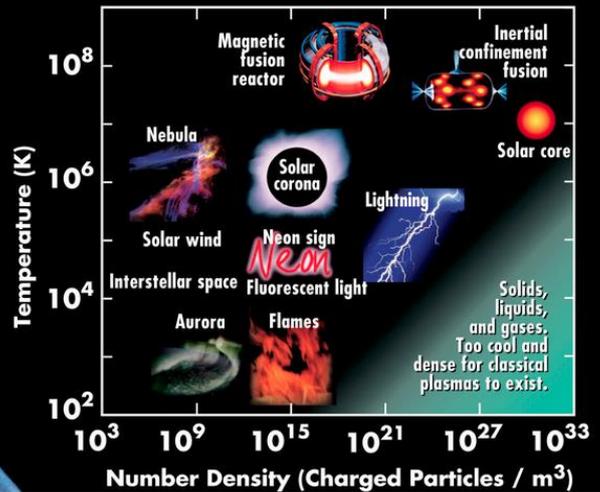
[Pós-teste](#)

[Para o professor](#)

PLASMAS – THE 4th STATE OF MATTER

CHARACTERISTICS OF TYPICAL PLASMAS

Plasmas consist of freely moving charged particles, i.e., electrons and ions. Formed at high temperatures when electrons are stripped from neutral atoms, plasmas are common in nature. For instance, stars are predominantly plasma. Plasmas are a "Fourth State of Matter" because of their unique physical properties, distinct from solids, liquids and gases. Plasma densities and temperatures vary widely.



Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

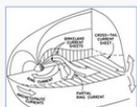
Pós-teste

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.



Schematic view of the different current systems which shape the Earth's magnetosphere.

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, por 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 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.



Ligante 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 silício 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

Resposta: 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 Tálcio, 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.

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

Para o professor

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.

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 $Q_i = mc_i$. 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:

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

Ou,

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

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:

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

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](#)

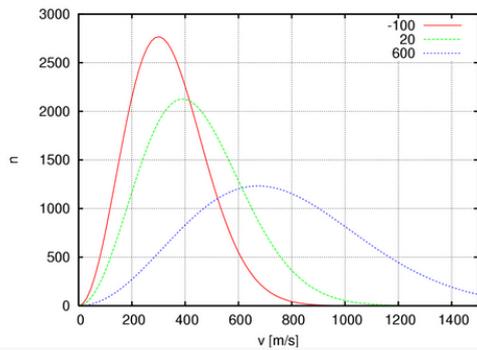
[Aula 3](#)

[Aula 4](#)

[Pré-teste](#)

[Pós-teste](#)

[Para o professor](#)



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 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, $PV = nRT$:

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

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:

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

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:

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

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](#)

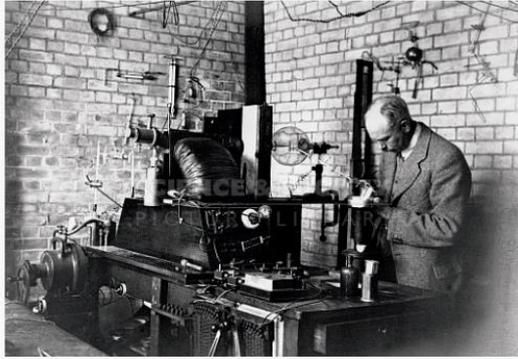
Aula 4: Campos eletromagnéticos dentro do plasma

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

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.

Aula 1

Aula 2

Aula 3

Aula 4

Pré-teste

Pós-teste

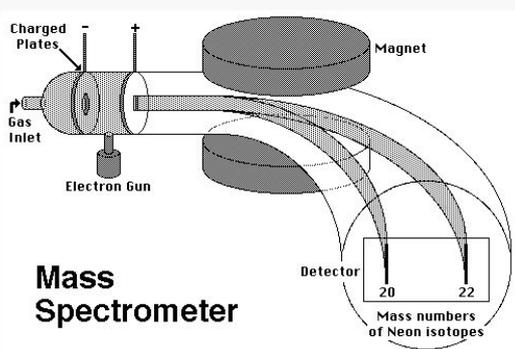
Para o professor

Pré-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 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.

Aula 1

Aula 2

Aula 3

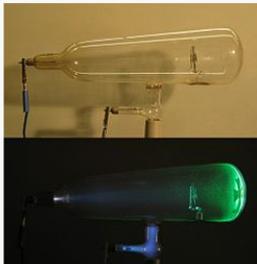
Aula 4

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.³⁹ 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,

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

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 = $1.67 * 10^{-27} kg$.

Novamente:

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

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

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

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

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

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

$v_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$
 $\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$
 $v_{rms} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$

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 = 23800 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 = $v_p = 4435.3473 m/s = 15967.250 km/hr = 9921.5894 mi/hr$
Mean speed = $\bar{v} = 5004.7535 m/s = 18017.112 km/hr = 11195.3147 mi/hr$
RMS speed = $v_{rms} = 5432.1688 m/s = 19555.808 km/hr = 12151.4157 mi/hr$

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

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

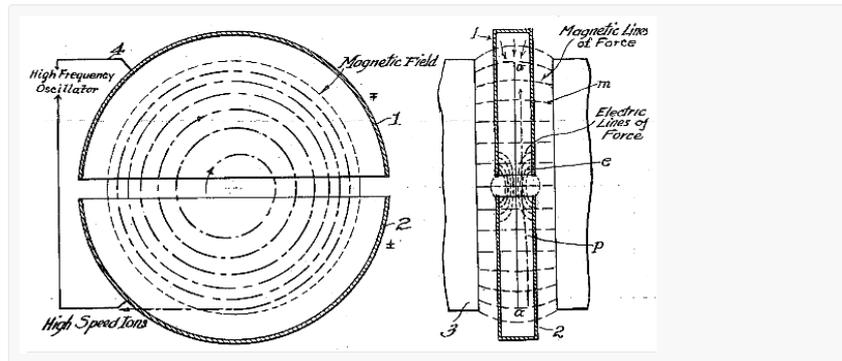
A velocidade dos elétrons pode ser calculada de forma similar para dar início a um interessante debate sobre velocidade, energia, e temperatura, como mencionado no capítulo 4, e da mesma

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, utilizaria-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, $n = 10^{15} m^{-3}$, assim $f_p \approx 3 * 10^8 Hz$.

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:

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

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

A energia cinética será então:

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

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

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

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

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.

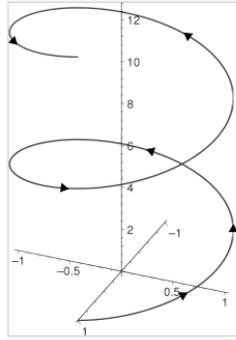


Figura: Trajetória em hélice de um íon em um campo magnético e um campo elétrico

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 10^8K , 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:

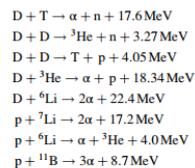


Figura : Reações termonucleares (CHEN, 2016, p. 357)

Aula 1

Aula 2

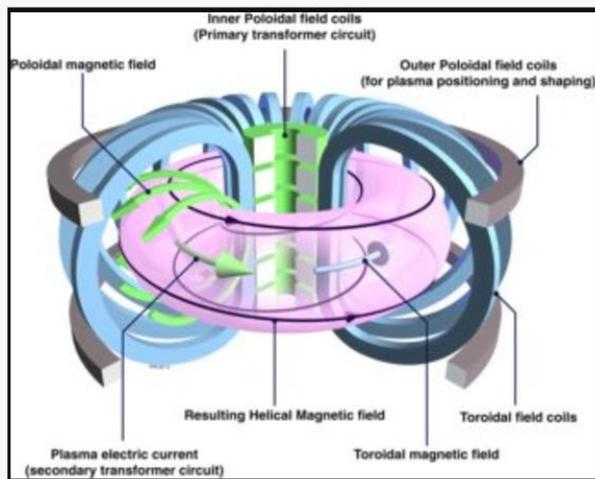
Aula 3

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:

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

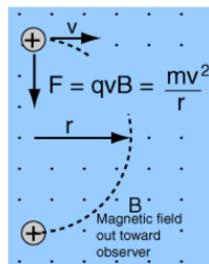


Figura : Espectrômetro de massa utilizando o raio de Larmor⁶⁵

- 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:

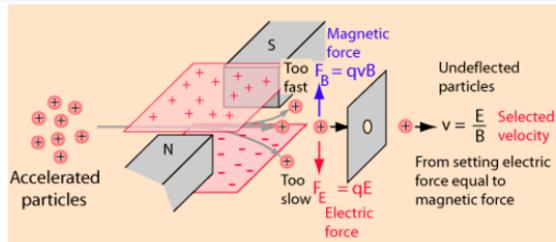


Figura: Seletor de velocidades⁶⁷

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:

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

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

- 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

Ao concluir o estudo do conteúdo deste site, complete o pós-teste que pode ser encontrado à direita

3.1 Questionário

Para contínua coleta de informações, durante todo o tempo em que o site permanecer no ar, construímos a versão em português do questionário aplicado durante o estudo de caso, em duas versões iguais a serem aplicadas antes e depois das aulas (pré e pós-testes).

Prints podem ser encontrados abaixo:

Pré-teste - Introdução à física dos plasmas

Respostas à esse questionário são anônimas. Caso não saiba responder à alguma pergunta, digite "não sei".

* Required

Qual o seu estado? *

Your answer

Qual a sua cidade? *

Your answer

Qual a sua série do Ensino Médio? *

- 1a série
- 2a série
- 3a série
- Ainda estou no ensino básico

1. No contexto da física, o que é plasma?

Your answer

2. Você já ouviu falar de fusão termonuclear? Como ela funciona?

Your answer

3. O que é um Tokamak?

Your answer

4. Como funciona um acelerador de partículas?

Your answer

5. O que é um espectrômetro de massa?

Your answer

6. É importante estudar física? Por quê?

Your answer

7. Qual a importância de se estudar eletromagnetismo?

Your answer

8. Você considera ter alguma carreira que utilize conhecimentos de física?

Your answer

9. O que você acha deste curso na sua escola?