

Elaboração de um Curso Introdutório de Física de Plasma

Proposal and Test of an Introductory Plasma Physics Discipline

M.A.M. Santiago, M. Tavares e G.H. Cavalcanti

Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense

Av. Gal. Milton Tavares de Souza s/n, Gragoatá, 24210-340, Niterói, RJ

Recebido em 12 de julho, 2000. Aceito em 25 de outubro de 2000

Este trabalho tem como objetivo descrever a elaboração e execução de um curso introdutório de física de plasma. O curso foi elaborado com ênfase nos aspectos experimentais e de aplicação. Devido a inexistência de um texto didático com estas características, decidimos por sua elaboração a partir do resultado deste curso.

The aim of this article is to describe the elaboration and execution of an introductory course on Plasma Physics. The main purpose of this undergraduated course was to show to the students links between the experiments and theory. Due to the deficiency of a book with these characteristics, we decided to elaborate a new didactic text according to the results of this course.

I Introdução

A física de plasma e suas aplicações ganharam um grande impulso da metade do século em diante em particular no final deste século novas aplicações tecnológicas de plasma surgiram em vários campos o da tecelagem, o da micro-eletrônica e o do revestimento de materiais em geral. Um sem nù mero de processos em plasma estão sendo investigados ou implementados atualmente. Também no estudo de interações entre o Sol e a Terra uma nova ciência surgiu, a *Meteorologia Espacial*, que estudam as interações entre o plasma solar e a Terra, a eletricidade atmosférica, relâmpagos, interferência de partículas carregadas em satélites e o efeito dos cinturões de Van Allen sobre os mecanismos de satélites e foguetes. Atualmente é muito importante desenvolver esforços e recursos para a produção didática, tornando acessível essas informações aos alunos dos cursos de engenharia, física, telecomunicações, química, astronomia e astrofísica, para a formação de profissionais que possam ser empregados em diversas áreas de pesquisas e tecnologias contemporâneas. Entretanto, nota-se uma lacuna didática grande neste ramo do conhecimento humano, a experiência aqui relatada consiste em uma tentativa de reproduzir um curso e texto que abordem tanto conceitos teóricos fundamentais como experiências que revelem o caráter deste intrincado estado da matéria e ao mesmo tempo através da formulação do curso consigo mostrar temas atuais de investigação científica e modernas aplicações. O curso de introdução

à física de plasma foi estruturado com duas aulas semanais de três horas cada uma. A programação deu ênfase principalmente na parte qualitativa. Foi feito um esforço para ressaltar os aspectos que melhor caracterizem o estado de plasma. A programação teórica consistiu da descrição básica de um plasma e aplicações, descargas elétricas gasosas, teoria de órbitas, teoria MHD e ondas em plasma. A parte experimental do curso consistiu de sete experiências principais e sua descrição pode ser vista na tabela de atividades experimentais.

A parte experimental foi realizada com equipamentos simples de laboratório, como bomba primária de vácuo, tubo de descarga, osciloscópio, multímetro e fontes de energia AC e DC. As experiências foram precedidas por uma discussão teórica dos conceitos físicos envolvidos: seção de choque, processos de ionização e descrição do plasma em termos de elementos concentrados de circuito em uma abordagem sobre o chamado plasma limitado, ou plasma com fronteiras.

Atualmente estamos escrevendo um texto básico para servir de referência a futuros cursos, tendo em vista a inexistência de um texto que dê ênfase tanto à parte teórica quanto à experimental e fazendo a devida correlação entre ambas, já que os textos básicos existentes para os cursos de introdução à física de plasma são demasiadamente teóricos, com pouca descrição dos processos experimentais [1,2,3], ou existem textos com uma descrição experimental bastante intensa e sem um tratamento teórico introdutório e básico [4,5].

II Programação do curso

O curso foi realizado no primeiro semestre de 1999, com uma equipe de seis professores que apresentaram temas básicos como introdução à física de plasma (Cap. 1), descargas elétricas em gases e diagnósticos (Cap. 2), teoria de órbitas (Cap. 3), teoria MHD (Cap. 4), on-

das em plasma (Cap. 5) e descrição cinética e plasma limitado (Cap. 6).

Segue a programação do semestre, com uma carga horária semanal de 6 horas, onde se incluem experiências, consistindo de 7 aulas práticas no laboratório de plasma e também 6 tópicos temáticos sobre pesquisas atuais em física de plasma.

CALENDÁRIO DE ATIVIDADES

I - ATIVIDADES TEÓRICAS

data	descrição da atividade	data	descrição da atividade
4/5	Apresentação do curso e metodologia	6/5	Fenômenos básicos e pesquisas em plasmas.
11/5	Caracterização e produção de plasma	13/5	Revisão das Eq. de Maxwell
18/5	Funções de distribuição de energia	20/5	Parâmetros de plasma
27/5	Descarga gasosa em gases	1/6	Lei de Child-Langmuir
8/6	Lei de Paschen	15/6	Exercícios de fixação
17/6	Teoria de órbitas	22/6	Teoria de órbitas
24/6	Teoria de órbitas + exercícios	29/6	MHD
06/7	MHD	08/7	MHD + exercicios
13/7	Primeira prova	15/7	Ondas em plasma
22/7	Ondas em plasma	27/7	Ondas em plasma
29/5	Ondas em plama - exercícios	03/8	Descrição cinética de plasma
05/8	Descrição cinética de plasma	10/8	Modelo híbrido de plasma limitado
17/8	Instrumentação e medidas	19/8	Segunda Prova
09/9	Verificação suplementar		

II - ATIVIDADES EXPERIMENTAIS

25/5	Exp. 1 - Característica $V \times I$ de uma descarga DC.
10/6	Exp. 2 - Descarga AC - DC e regime em função da pressão
01/7	Exp. 3 - Amplificação paramétrica em descarga neon
20/7	Exp. 4 - Estrutura 3-D da amplificação paramétrica
12/8	Exp. 5 - Sonda de Langmuir
24/8	Exp. 6 - Copo de Faraday - função de distribuição
04/9	Exp. 7 - Theta Pinch

A parte teórica do curso foi ministrada por quatro professores, cada um desenvolvendo completamente um determinado tema por exemplo, o tema sobre magnetohidrodinâmica (MHD) foi conduzido por apenas um professor. O propósito da parte teórica é mostrar ao aluno que usamos mais de uma teoria para trabalhar em plasmas; como os alunos estão em nível de graduação, eles podem ser assim introduzidos à teoria de órbitas, à teoria MHD e algumas vezes à teoria cinética. Todas essas teorias são discutidas enfatizando as diversas utilidades que elas podem ter no estudo do plasma.

As provas tiveram um duplo caráter, o primeiro de verificar o quanto tinha sido aprendido pelo aluno e o segundo de servir de elo entre as diversas partes dos assuntos teóricos estudados. Os exercícios serviram para

a fixação dos conceitos teóricos inclusive através de observações experimentais. A verificação suplementar foi a tentativa de ajudar os alunos que não tinham ainda conseguido assimilar o conteúdo apresentado.

Todas as experiências foram realizadas no laboratório de plasma do Instituto de Física da UFF e foram conduzidas por um professor responsável pelo laboratório. Essa parte do curso tem um caráter pioneiro em física de plasmas, dando ao aluno a oportunidade de conviver com experiências que mostram o comportamento e a diversificação dos estudos em plasmas. As experiências acima tiveram como objetivo principal mostrar ao aluno o que é um plasma, como funciona no interior de uma máquina e como podemos utilizá-lo com instrumentação adequada. Essa fase consistiu

de sete experiências principais como descrito na tabela anterior. As experiências foram precedidas por uma discussão teórica dos conceitos físicos envolvidos, como seção de choque, processos de ionização e descrição do plasma em termos de elementos concentrados de circuito uma abordagem de plasma limitado.

III - TÓPICOS

29/5	Problemas numéricos em plasma
8/6	Caos em plasma
15/6	Sólitons
08/7	Aquecimento da coroa solar
22/7	Magnetosfera
27/7	Laser de elétrons livres
24/8	Filmes finos e aplicações tecnológicas de plasma
26/8	Sonoluminescencia

Os tópicos foram apresentados por seis professores, cujos temas estão relacionados com suas pesquisas. Esses tópicos tinham como principal proposta a apresentação do mundo da pesquisa aos alunos, assim o aluno entraria em contato com o que se faz atualmente em pesquisa básica ou tecnológica de plasmas. O primeiro tópico foi demonstrar ao aluno como desenvolvida toda a pesquisa teórica de plasmas. Os outros temas mostraram as mais diversas linhas desenvolvidas atualmente e como cada um poderia ou pode participar e auxiliar na descoberta de novos tópicos e utilidades para o plasma [6,7]. Pensávamos em dirigir o interesse dos alunos em direção a atividades de pesquisa. Muito da pes-

quisa tecnológica e mesmo básica está em aberto, assim algumas delas foram apresentadas aos alunos. A crítica feita ao curso foi quanto à apresentação dos tópicos correntes de pesquisa, considerada a parte mais deficiente, pois não houve a esperada adequação do mesmo para um nível mais elementar e compatível com um curso de graduação, não só devido ao grande número de expositores como à deficiência de alguns deles em preparar adequadamente seu tópico para um nível mais acessível e que despertasse o interesse desejado no aluno. Observamos que os relatórios de tópicos não foram bem apresentados pelos alunos. Este fato confirma o depoimento dos alunos, demonstrando que o interesse e aprendizado despertados pelos tópicos temáticos foram bem menores do que o inicialmente esperado.

III Avaliação do curso e metodologia

A avaliação do curso foi feita levando-se em conta duas provas escritas, três listas de exercícios, dois relatórios sobre experimentos e seis relatórios sobre os tópicos temáticos. A primeira prova foi baseada na conceituação dos parâmetros básicos de plasma e a segunda sobre a teoria de ondas e teoria MHD. Abaixo apresentamos uma tabela com as notas, conceitos e médias finais obtidas pelos alunos do curso

Nome	R1	R2	L1	L2	L3	T1	T2	T3	T4	T5	T6	P1	P2	Média
Aluno 1	9,0	5,5	8,0	7,0	6,0	10	9,0	10	10			7	6,5	7,0
Aluno 2	10	8,0	7,7	10	8,0		9,0	8,0	6,0		7,0	6,8	10	8,0
Aluno 3	10	5,5	6,4	9,0	6,0			10	10	9,0	8,0	5,7	5,5	6,3
Aluno 4	9,0	5,5	8,2	9,0	6,0		8,0	9,0	7,0	9,0	7,0	7,9	8,5	7,3
Aluno 5	10	8,0	8,2	8,0	8,0							8,4	8,0	7,0
Aluno 6	10	8,0	9,8	10	10		10	10	10	10	10	9,0	10	9,3

Legenda

R1 - relatório sobre experimento de tensão versus corrente em descarga DC

R2 - resumo sobre os experimentos de amplificação paramétrica

T1 - tópico temático sobre sólitons

T2 - tópico temático sobre magnetosfera

T3 - tópico temático sobre free electron laser (laser de elétrons livres)

T4 - tópico temático sobre coroa solar

T5 - tópico temático sobre métodos numéricos em plasma

T6 - tópico temático sobre filmes finos

P1 - primeira prova

P2 - segunda prova

Média final = peso 4 nas provas, peso 3 nos relatórios e peso 3 nas listas de exercícios e tópicos.

IV Comentários dos alunos

Foi passado um questionário final sobre a avaliação do curso e embora não fosse personalizado, nem todos os alunos o responderam. Apresentamos a seguir o questionário e um resumo dos comentários individuais.

a) O que achou da experiência de um curso do ciclo profissional em equipe?

A maioria não gostou muito da idéia do curso ministrado por diversos professores, acharam que o ideal seria um curso com poucos professores e a permanência

mais demorada de cada um.

b) O que achou da avaliação baseada em provas, relatórios e listas de exercícios?

De um modo geral acharam bom, sendo que a única restrição foi ter que fazer resumo de todos os tópicos apresentados, muitos dos quais em nível de pesquisa corrente, embora fosse apresentada uma introdução com conhecimentos básicos sobre o assunto.

c) O que achou da integração entre as aulas e conhecimentos teóricos e experimentais?

Acharam muito boa, afirmando inclusive que esse tipo de interação é essencial em um curso de conteúdo mais experimental como o de plasma. Foi sugerido ainda que mais experiências fossem introduzidas, explorando alguns conceitos teóricos que foram estudados e poderiam ter sido vistos no laboratório.

d) Achou útil ou importante a inclusão de tópicos correntes de pesquisa no curso?

Os alunos acharam que esta inclusão não foi boa, afirmando que esses tópicos deveriam ser diluídos na ementa do curso, evitando assim que para cada tópico um pesquisador no assunto o apresentasse.

e) O nível das aulas foi compatível com os pré-requisitos que você tem atualmente?

Responderam que sim

f) O nível das provas foi compatível com o que foi ensinado?

Sim, acharam as provas coerentes com o que foi ensinado nas aulas.

g) Você ficou mais motivado para continuar estudando física de plasma a nível de iniciação científica ou mais tarde em Pós-Graduação?

Os alunos que fazem iniciação científica em plasma se sentiram mais motivados, outros que fazem iniciação em outras áreas ou estão motivados para determinadas áreas ficaram indiferentes.

h) Faça, se quiser, mais alguns comentários ou sugestões que julgue relevantes.

Em geral os alunos gostaram do curso e aprenderam bastante com este curso introdutório. Os alunos de um modo geral ficaram motivados pelo curso, pelo fato de mostrar uma área da física desconhecida para eles, e também por ter sido dado ênfase nos aspectos qualitativos, tanto do ponto de vista teórico quanto experimental.

A idéia da realização do curso foi válida, pois tivemos um curso integrado entre teoria e experiência, o que é inovador um curso de introdução à física de plasmas. Quanto ao aproveitamento, os alunos saíram-se bem e o espectro de notas mostrou que alguns dedicaram-se mais e tiveram uma melhor qualificação. Achamos que

o tema tópicos deve ser desenvolvido de forma mais elementar e intuitiva, ou então ser apresentado ao aluno como uma espécie de desafio de uma forma mais elementar, criativa e motivadora para que possa captar a atenção e o interesse dos mesmos. O curso está sendo reformulado, já que foi o primeiro, e futuramente reformularemos a apresentação do ítem de tópicos e haverá redução do número de professores e aumento da atividade experimental com maior número de aulas práticas no laboratório de plasma. O livro texto que está sendo escrito servirá como referência principal para os futuros cursos.

V Resultado e conclusões

Os resultados que obtivemos após a primeira tentativa de um curso básico de plasmas foram parcialmente positivos. A interação entre teoria e laboratório mostrou-se excelente devido à proximidade do aluno com o mundo real. O objetivo de reunir teoria e laboratório é a idéia de que teoria e experimentos se complementam, assim a teoria apresenta os métodos e as formas de estudo que serão utilizados para aplicação no laboratório. O laboratório, por sua vez, requer que o aluno retenha conceitos e conhecimentos de teorias básicas, como teoria de circuitos e até mesmo um pouco de eletrônica. O que se viu foi um aluno ligeiramente pressionado a se dedicar um pouco mais para poder compreender o “mãos à obra” exigido pelo laboratório. A teoria em alguns pontos não conseguiu acompanhar completamente as experiências, como era o objetivo. Devido ao caráter pioneiro desenvolvido no curso, acreditamos que selecionando mais a teoria poderemos realizar um programa de nível excelente para os alunos.

Referências

- [1] *Plasma Dynamics*, R.O. Dendy, Oxford Science Publications (1990).
- [2] *Physics of High Temperature Plasma*, G.O. Smith, Academic Press (1966).
- [3] *Introduction to Plasma Physics*, F.F. Chen, Plenum Press (1985).
- [4] *Industrial Plasma Engineering* vol. 1, J. Reece Roth (1995).
- [5] *Descargas Eléctricas en Gases*, A.M. Howatson, Ed. Urmo, Bilbao (1970).
- [6] *Learning about the Sun*, M. Tavares, Rev. Bras. de Ens. de Física, **22**, 78 (2000).
- [7] *Meteorologia Espacial*, M. Tavares, Rev. Bras. de Ens. de Física, **22**, 4 (2000).