

*Física Moderna e Contemporânea das teorias quânticas e
relativísticas às fronteiras da física*

VOLUME 2

Jucimar Peruzzo
Walmir Eno Pottker
Thiago Gilberto do Prado

FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA
das teorias quânticas e relativísticas às fronteiras da física

VOLUME 2



Editora Livraria da Física
São Paulo – 2014

Copyright © 2014 Editora Livraria da Física

1a. Edição

Editor: JOSÉ ROBERTO MARINHO

Projeto gráfico e diagramação: CASA EDITORIAL MALUHY & Co.

Capa: ANTONIO MANUEL ALVES MORAIS

Texto em conformidade com as novas regras ortográficas do Acordo da Língua Portuguesa.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Peruzzo, Jucimar

Física moderna e contemporânea : das teorias quânticas e relativísticas às fronteiras da física : volume 2 / Jucimar Peruzzo, Walimir Eno Pottker, Thiago Gilberto do Prado. – São Paulo : Editora Livraria da Física, 2014.

Bibliografia.

ISBN 978-85-7861-277-1

1. Física 2. Física quântica I. Pottker, Walimir Eno. II. Prado, Thiago Gilberto do. III. Título.

14-09547

CDD-539

Índices para catálogo sistemático:

1. Física moderna e contemporânea 539

ISBN 978-85-7861-277-1

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora. Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei n.9.610, de 19 de fevereiro de 1998.

Impresso no Brasil

Printed in Brazil



EDITORIAL

Editora Livraria da Física

Tel./Fax: +55 11 3459-4327 / 3936-3413

www.livrariadafisica.com.br

*Quando uma mente se abre à uma nova ideia, ela
jamais volta ao seu tamanho original*

ALBERT EINSTEIN

*Não está na natureza das coisas que o homem realize
um descobrimento súbito e inesperado. A ciência
avança passo a passo e cada homem depende do
trabalho de seus predecessores*

ERNEST RUTHERFORD

*Eu não sou nem especialmente
inteligente, nem especialmente dotado.
Sou apenas curioso, muito curioso*

ALBERT EINSTEIN

Não há fatos eternos, como não há verdades absolutas

FRIEDRICH NIETZSCHE

PREFÁCIO

Era início do século XX, e a física já podia se considerar uma ciência de muito sucesso. As áreas da física clássica, que compreendem a atual mecânica, a óptica, a termodinâmica e o eletromagnetismo já haviam alcançado um notável aperfeiçoamento no século anterior.

A mecânica clássica já tinha atingido uma grande precisão, conseguindo prever e descrever de maneira muito satisfatória, desde o movimento de um peão, de líquidos e gases, até a órbita de um planeta. Na óptica e na ondulatória desenvolveu-se um aparato matemático bastante avançado, capaz de descrever os fenômenos de difração, de interferência, entre outros com grande precisão. Já conhecia-se as radiações invisíveis, já tinha sido desenvolvida a fotografia e o cinema também estava iniciando.

Muitos dos fenômenos e princípios da termodinâmica tinham sido compreendidos, o que propiciou o desenvolvimento das máquinas a vapor, dos motores a explosão, da revolução industrial. Os fenômenos elétricos e magnéticos estavam sendo domados, acabando por culminar na teoria eletromagnética de Maxwell, e levando a aplicações práticas muito importantes.

Diante do grande sucesso científico que havia ocorrido, em abril de 1900 o físico Lord Kelvin proferiu numa conferência que a física era uma ciência quase acabada, onde não mais existiam grandes descobertas para serem feitas. Era só a questão de mais algum tempo para se determinar mais precisamente algumas constantes, e pronto. Porém, apenas dois pequenos probleminhas precisavam ser resolvidos: a não detecção do vento de éter (medição da velocidade da terra em relação ao éter) e o problema da distribuição de energia na radiação de um corpo aquecido.

VIII FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

O fato é notável, pois foi justamente nestes dois problemas que tiveram origem duas grandes teorias científicas: a física quântica e a teoria da relatividade. Na época ninguém poderia imaginar, mas uma profunda revolução, não só na física, mas em toda a ciência estava por vir. Era início do século XX e nascia a física moderna.

A física quântica defendeu a propagação descontínua da energia, um mundo pregado pela incerteza e a dualidade onda-partícula da matéria, que levou mais tarde ao desenvolvimento de modernas tecnologias. A física atômica e molecular, a física nuclear, a física da matéria condensada e de toda a química moderna se fundamentam na teoria quântica. Sem ela não poderíamos explicar o comportamento dos dispositivos eletrônicos modernos, a existência dos elementos radioativos, a cor das estrelas, entre outros.

A teoria da relatividade provocou profundas rupturas com a física clássica, como por exemplo, o abandono da ideia de tempo absoluto. Além disso, mostrou a relação entre a matéria e a energia e, através da relatividade geral, fez-nos melhor compreender a estrutura e o comportamento do universo.

A teoria quântica e a teoria da relatividade nasceram no início do século XX e melhor se fundamentaram já nas primeiras décadas seguintes. Baseadas nas idéias dessas duas teorias desenvolveu-se um conhecimento físico de grandeza nunca antes existente. E deste conhecimento originou-se um aparato tecnológico, talvez nunca antes sonhado.

É o objetivo deste livro contribuir com a divulgação científica, abordando conteúdos referentes a física moderna. Tais assuntos geralmente não são fáceis de serem levados ao público em geral pois, na sua forma original, eles vêm sempre recheados com uma matemática sofisticada. No entanto, neste trabalho, foi feito um esforço para contornar esse obstáculo. Dessa forma, os temas serão abordados de uma maneira mais conceitual. Mas quando possível, será trabalhado também de maneira quantitativa, enfatizando as notações matemáticas e algumas deduções, sempre com o intuito de aproximar o leitor da verdadeira ciência física.

Optamos por utilizar uma descrição matemática, mesmo sabendo que isso pode reduzir muito o número de leitores. Como recomenda o físico matemático Roger Penrose no início de um dos seus livros, para o leitor que se assusta com uma equação ele sugere que o mesmo dê uma olhada rápida nela, sem tentar compreendê-la inicialmente e passe adiante. Depois, se tiver confiança, pode voltar a olhá-la e tentar obter mais informações importantes. No entanto, a maior parte do livro é compreensível, mesmo sem o entendimento das equações nele presentes.

O livro Física Moderna e Contemporânea está dividido em dois volumes, sendo este o volume II. A descoberta do núcleo atômico abriu as portas para um novo caminho: o caminho da física nuclear. No capítulo 12 serão abordados os principais aspectos e conceitos referentes à estrutura nuclear. O funcionamento dos reatores e das usinas nucleares será estudado no capítulo 13.

Junto com os benefícios trazidos pela energia nuclear e outras radiações energéticas, estão os problemas por elas causados. O capítulo 14 será destinado a abordagem das radiações ionizantes e como elas interagem nos organismos vivos. No capítulo 15 será apresentado os principais acidentes nucleares ocorridos no mundo até o momento, alguns dos quais trouxeram sérios problemas e abalaram a credibilidade da indústria nuclear.

A medicina foi uma das áreas que mais se beneficiou dos feitos realizados pela física. No capítulo 16 apresentamos algumas das técnicas e/ou tecnologias desenvolvidas pela física moderna, as quais produzem feitos maravilhosos no diagnóstico e na terapia médica.

No capítulo 17 apresentamos os principais tipos de explosivos nucleares, seus modos de funcionamento, poder de destruição e ameaça que causam em relação à paz no planeta terra.

Os estudos referentes à fusão nuclear controlada, uma possível fonte energética do futuro, fez com que se desenvolva uma nova área de pesquisa: a física de plasmas. Esta tornou-se muito ampla, estudando todos os tipos de plasmas existentes no universo, mas no capítulo 18 enfocaremos apenas nos processos de fusão, realizada em grandes máquinas.

X FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

O avanço nas pesquisas em física, aliado ao desenvolvimento de novas tecnologias, propiciou ao homem adentrar cada vez mais na estrutura do átomo, o qual revelou ser possuidor de um grande número de componentes, que relacionam-se de maneira complexa. Este assunto pertence à física de partículas e será tratado no capítulo 19.

As pesquisas em física de partículas são bastante dependentes dos resultados fornecidos pelos aceleradores de partículas, os quais consistem em máquinas, cada vez maiores e mais potentes, capazes de chocar partículas e fazê-las revelar suas estruturas internas. Os principais tipos de aceleradores e seus princípios de funcionamento estão no capítulo 20.

Nos capítulos 21 e 22 abordamos os principais tópicos referentes à astrofísica e a cosmologia. Estas áreas científicas desenvolveram-se muito com o advento dos telescópios para observação dos eventos cósmicos, bem como das teorias físicas modernas, como a relatividade geral e a mecânica quântica, que explicam os fenômenos e fazem uma série de previsões.

Para finalizar este trabalho expomos no capítulo 23 algumas ideias sobre as tentativas de unificação das teorias vigentes no momento, o que resultaria numa teoria de tudo. Esta teoria, se é que um dia vai existir, terá a capacidade de explicar todos os fenômenos físicos do universo. Uma das teorias candidata a se tornar uma teoria de tudo é a incrível teoria de cordas.

No decorrer do texto acompanham pequenas biografias dos principais cientistas envolvidos no desenvolvimento da física moderna e contemporânea. No apêndice será feito um tratamento matemático mais sofisticado para alguns tópicos específicos.

No decorrer do texto acompanham pequenas biografias dos principais cientistas envolvidos no desenvolvimento da física moderna e contemporânea. No apêndice será feito um tratamento matemático mais sofisticado para alguns tópicos específicos.

OS AUTORES

SUMÁRIO

12	FÍSICA NUCLEAR	1
12.1	A Descoberta da Radioatividade	1
12.2	Os Trabalhos do Casal Curie	3
12.3	Identificação dos Tipos de Radiações	5
12.4	Estrutura e Formato do Núcleo	6
12.5	Estabilidade Nuclear	12
12.6	Modelos Nucleares	18
12.7	Emissões Radioativas	21
12.8	Reações Nucleares Artificiais	33
12.9	Elementos Artificiais	38
12.10	Detectores de Partículas e Radiação	40
12.11	Aplicações da Radioatividade	44
12.12	Fissão Nuclear	59
12.13	Fusão Nuclear	69
13	REATORES NUCLEARES DE FISSÃO	75
13.1	Estrutura e Funcionamento	75
13.2	Vantagens e Desvantagens	79
13.3	Principais Tipos de Reatores	82
13.4	Teor de ^{235}U	87
13.5	Enriquecimento de U	88
13.6	Energia Nuclear no Brasil	91

XII FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

14	RADIAÇÕES IONIZANTES	99
14.1	Radiações na Natureza	99
14.2	Grandezas e Unidades das Radiações	102
14.3	Efeitos Biológicos das Radiações Ionizantes	104
14.4	Radioatividade e Alimentos	107
15	ACIDENTES NUCLEARES	111
15.1	Three Mille Island	111
15.2	Chernobyl	112
15.3	Goiânia	114
15.4	Fukushima	116
16	FÍSICA MÉDICA	119
16.1	Ultrassonografia	119
16.2	Aplicações do <i>Laser</i>	122
16.3	Raios X	123
16.4	Ressonância Magnética Nuclear (RMN)	130
16.5	Imagiologia Nuclear	138
16.6	Radioterapia	142
16.7	Preparo dos Radioisótopos	146
17	ARMAS NUCLEARES	149
17.1	Primeiras Ideias	149
17.2	Projeto Manhattan	150
17.3	Bombas no Japão	154
17.4	Bomba Atômica	155
17.5	Bomba <i>Boosted</i>	158
17.6	Bomba de Hidrogênio - Termonuclear	159
17.7	Bomba de Nêutrons	164
17.8	Bomba Suja	166
17.9	Política e Armas Nucleares	166

18	FUSÃO TERMONUCLEAR CONTROLADA	171
18.1	Características Principais do Plasma	171
18.2	Pesquisas em Física de Plasmas	174
18.3	Critérios para Ocorrência da Fusão	175
18.4	Produzindo e Confinando um Plasma	177
18.5	Reações Nucleares de Fusão	179
18.6	Máquinas de Confinamento Magnético	181
18.7	Aquecimento do Plasma	187
18.8	Confinamento Inercial - Fusão a Laser	188
18.9	Reator Nuclear de Fusão	191
18.10	Grandes Máquinas de Fusão	193
18.11	Poderio Energético	196
18.12	Fusão Nuclear: Fonte Energética do Futuro?	197
18.13	Fusão Nuclear a Frio	199
19	FÍSICA DE PARTÍCULAS	203
19.1	Interações Fundamentais	203
19.2	Pósitron e outras Antipartículas	207
19.3	Classificação das Partículas	210
19.4	Diagramas de Feynman	212
19.5	Mésons e Bósons Vetoriais	214
19.6	Leis de Conservação	220
19.7	Modelo dos <i>Quarks</i>	222
19.8	Teoria Eletrofraca	226
19.9	Cromodinâmica Quântica	227
19.10	Modelo Padrão	227
19.11	O Campo e o Bóson de Higgs	229
19.12	Raios Cósmicos	232
19.13	Observatório Pierre Auger	234
19.14	Descoberta do Neutrino	239
19.15	Detectores de Radiação Gama	245

XIV FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

20	ACELERADORES DE PARTÍCULAS	247
20.1	Introdução	247
20.2	Aceleradores Lineares	248
20.3	Aceleradores Cíclicos	253
20.4	Grandes Aceleradores	257
21	ASTROFÍSICA	267
21.1	O Sol	267
21.2	Sistema Solar	276
21.3	Asteroides no Sistema Solar	286
21.4	Vida no Sistema Solar	289
21.5	Planetas Extrassolares	291
21.6	Retenção de Atmosferas	293
21.7	Estrelas	294
21.8	Buracos Negros	306
21.9	Estrela Misteriosa	312
21.10	Constelações e Galáxias	313
21.11	Vida Extraterrestre	317
21.12	Observando o Universo	323
22	COSMOLOGIA	331
22.1	O Paradoxo de Olbers	331
22.2	Modelos Cosmológicos	333
22.3	Expansão do Universo	341
22.4	<i>Big Bang</i>	344
22.5	Eras Cosmológicas	347
22.6	Densidade Crítica do Universo	350
22.7	Decaimento do Próton	351
22.8	Radiação Cósmica de Fundo	352
22.9	Matéria e Energia Escura	355
22.10	Expansão Acelerada	356
22.11	Teorias Modernas Sobre o Universo	358
22.12	Matéria e Antimatéria no Universo	366
22.13	Buracos de Minhoca e Viagens no Tempo	373
22.14	Quantização do Espaço e do Tempo	378
22.15	Efeito Casimir e a Energia do Vácuo Quântico	378

23	TEORIA DE TUDO	383
23.1	O Sonho de Einstein	384
23.2	A Necessidade da Unificação	385
23.3	Dimensões Extras no Espaço-Tempo	388
23.4	Teoria das Cordas	390
23.5	Teoria das Supercordas	394
23.6	Teoria de Tudo: Uma Busca Sem Fim?	400

Apêndices

A	LEI DO DECAIMENTO RADIOATIVO	405
B	COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO NO DECAIMENTO ALFA ..	407
C	COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO NA FUSÃO NUCLEAR	411
D	ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO	413
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	415
	ÍNDICE REMISSIVO	431

FÍSICA NUCLEAR

12

Se você não consegue explicar um resultado em termos simples, é porque não chegou a compreendê-lo

ERNEST RUTHERFORD

A descoberta do núcleo atômico e de suas propriedades deu início à era nuclear, a qual implicou em muitas áreas do conhecimento científico e provocou grandes impactos na sociedade. Apesar de ser bem menor que o próprio átomo, foi possível conhecer as características do núcleo analisando as partículas e radiações que ele emite, ou bombardeando-o com projéteis nucleares e observando o que ocorre.

12.1 A DESCOBERTA DA RADIOATIVIDADE

Em uma das reuniões da Academia de Ciências, no início de 1896 o matemático Henri Poincaré mostrou algumas fotografias obtidas com raios X, que lhes tinham sido enviadas por Röntgen. Henri Becquerel¹ (Fig.12.1), professor de física do Museu de História Natural da França, ficou muito impressionado, cogitando a possibilidade do fenômeno

1. Antonie Henri Becquerel nasceu em Paris, França, em 1852. Estudou engenharia civil na Escola Politécnica e lecionou física nesta mesma instituição e no Museu Nacional de História Natural. Descobriu em 1896 a radioatividade dos sais de urânio. Esta importante descoberta valeu-lhe a atribuição do Nobel de Física em 1903, juntamente com o casal Curie. Faleceu em Le Croisic, em 1908 [1].

2 FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

dos raios X estar ligado à fluorescência ou fosforescência². Röntgen já tinha verificado que os raios X tornava fluorescentes ou fosforescentes certas substâncias. Becquerel interessou-se, então, em verificar se as substâncias fosforescentes ou fluorescentes emitiam raios X [3] [4].

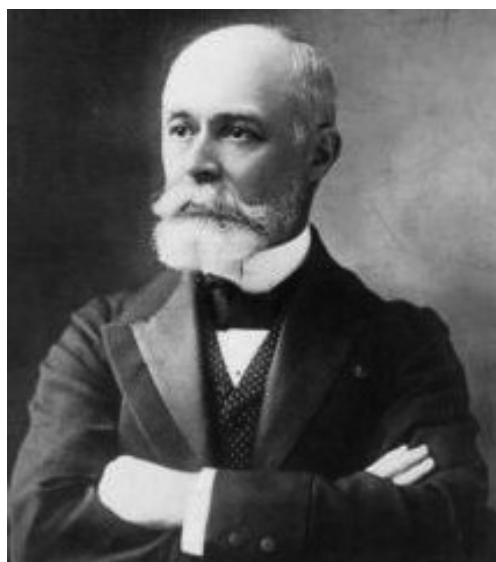


FIG. 12.1 *Henri Becquerel.*

Inicialmente Becquerel reuniu diversos cristais conhecidos por serem fosforescentes quando expostos ao sol. Estes cristais formavam um composto de urânio (U), denominado sulfato de potássio uranila. Cada amostra do sal de U foi posta sobre uma placa fotográfica envolvida por uma folha espessa de papel preto, impedindo qualquer luminosidade externa. Em seguida ele expôs o conjunto de materiais ao sol, para tornar os cristais fluorescentes, a fim de observar se a placa seria impressa por uma radiação invisível, semelhante aos raios X. Os

2. Tanto as substâncias fluorescentes como as fosforescentes emitem luz após receber energia na forma de radiação eletromagnética. Quando cessa esse fornecimento de energia, as substâncias fluorescentes param imediatamente de emitir luz, enquanto as fosforescentes continuam a emitir luz por mais tempo. Como exemplo de substância fluorescente temos os letreiros das placas de sinalização no trânsito, os quais tornam-se bem visíveis quando neles incidem a luz dos carros à noite. Já as substâncias fosforescentes estão presentes nos ponteiros de alguns relógios, por exemplo [2].

primeiros resultados foram negativos, mas logo Becquerel percebeu que o perfil da amostra de sal de U ficara nitidamente visível sobre a placa [2].

No dia seguinte preparou uma série de placas para estudar a absorção da radiação pelo sal de U , mas o mau tempo o obrigou a deixar o material no fundo de uma gaveta. Quando o sol voltou a iluminar, poucos dias depois, ele retirou as placas, desembulhando uma delas para verificar se um resíduo de fluorescência não teria sido impresso a uma camada sensível. Sua surpresa foi grande ao ver que a imagem do cristal na placa era tão nítida quanto aquela exposta ao sol. Intrigado Becquerel repetiu o experimento num local completamente escuro e, mesmo assim, a chapa fotográfica continuou a mostrar as manchas. Era o U que estava emitindo radiação, a qual pensou tratar-se de raios X [5] [6].

12.2 OS TRABALHOS DO CASAL CURIE

A partir de 1898 o casal Pierre³ e Marie Curie⁴ (Fig.12.2) pesquisou intensamente os raios de Becquerel, como foi chamado inicialmente o tipo de radiação descoberta por Becquerel. Mais tarde esse mesmo fenômeno foi chamado de radioatividade, que quer dizer atividade de emitir raios.

3. Pierre Curie nasceu em Paris, França, em 1859. Ele não frequentou a escola primária nem a ginásial, sendo educado em casa pelo seu pai. Aos 18 anos já tinha obtido o equivalente a um grau superior em ciências. Em 1880 Pierre e o seu irmão mais velho descobriram o fenômeno da piezoelectricidade, onde a compressão de um cristal acaba gerando uma corrente elétrica. Estudou também o ferromagnetismo, o paramagnetismo, e o diamagnetismo na sua tese de doutorado, e descobriu o efeito da temperatura sobre o paramagnetismo que é atualmente conhecido por lei de Curie. Junto com sua esposa Marie deu importantes contribuições no estudo da radioatividade. Morreu em 1906 ao ser atropelado por uma carruagem em Paris [7].
4. Marie Sklodowska Curie nasceu em Varsóvia, Polônia, em 1867, filha de um professor secundário de física e matemática. Foi para a França e graduou-se em física e matemática na Universidade de Sorbonne, sendo uma das melhores alunas do curso. Casou-se com o professor e físico Pierre Curie. Fez seu doutorado estudando o fenômeno da radioatividade [8]. Morreu de leucemia em 1934, provavelmente vítima das radiações a que ficara exposta durante grande parte de sua vida [4].

4 FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

Inicialmente o casal Curie constatou que a radiação emitida pelos sais de urânio U apresentava semelhança com os raios X , como por exemplo, quanto à capacidade de ionização dos gases. Purificando o U do minério chamado pechblenda, observaram que algumas pequenas porções desse minério emitia mais radiação que o U puro que estavam extraindo [9].

Após intenso trabalho conseguiram separar 1g dessa amostra radioativa desconhecida, a partir de 1t (tonelada) de pechblenda. Essa substância, cerca de 400 vezes mais radioativa que o U puro, ficou conhecida como polônio (Po), nome dado em homenagem a Marie, que era polonesa. Prosseguindo as investigações, após quatro anos ininterruptos de trabalho, o casal Curie conseguiu isolar um novo elemento químico, o rádio (Ra), cerca de 900 vezes mais radioativo que o Po [9].

Por seu trabalho, o casal Curie recebeu, junto com Becquerel, o Prêmio Nobel de Física de 1903. Após a morte de Pierre em 1906, é concedida à Marie uma cátedra na Universidade de Sorbonne, sendo a primeira mulher a ocupar esse posto na universidade. Mais tarde, em



FIG. 12.2 *Pierre e Marie Curie.*