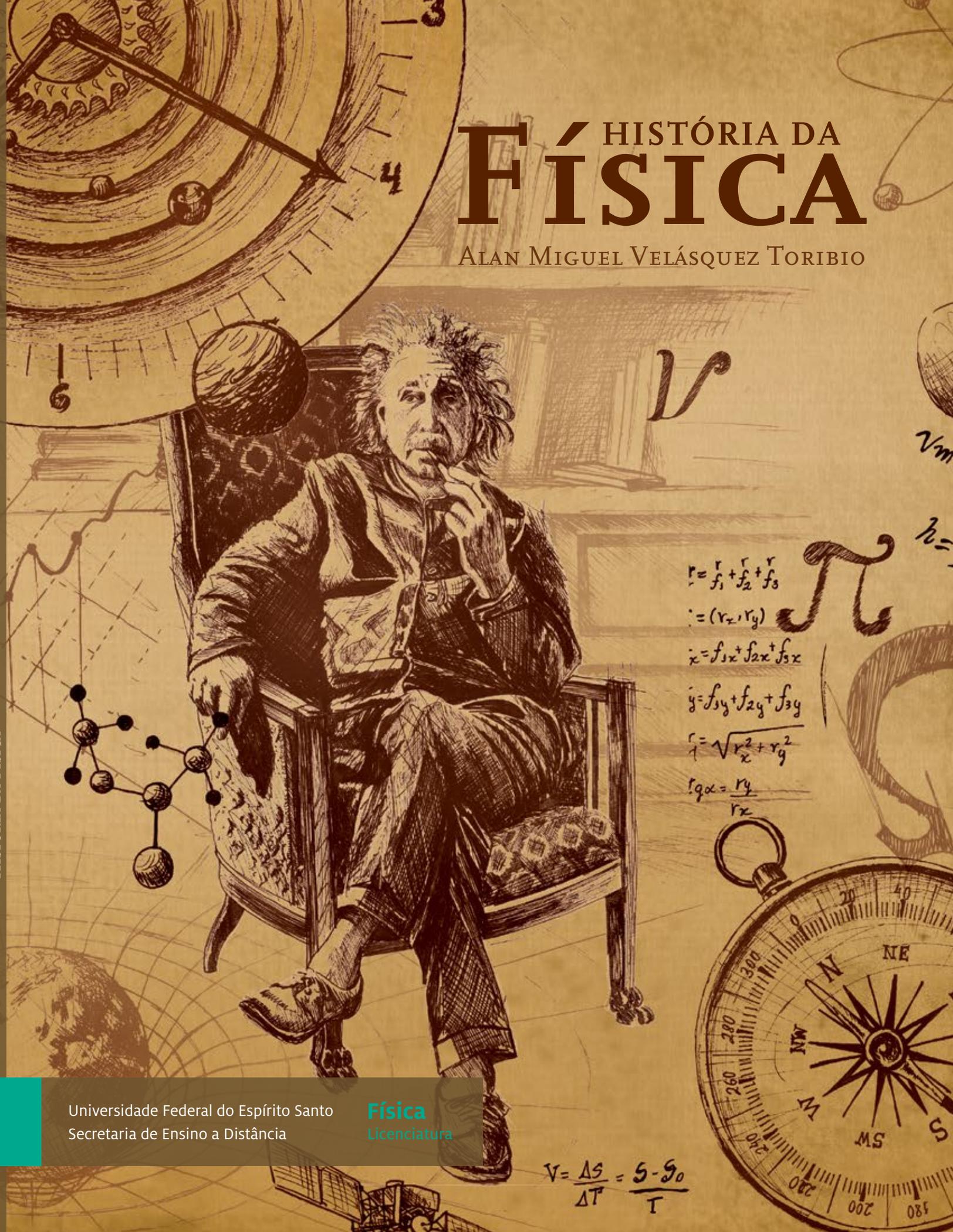


# HISTÓRIA DA FÍSICA

ALAN MIGUEL VELÁSQUEZ TORIBIO



$$\vec{r} = \vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \vec{r}_3$$

$$\vec{r} = (r_x, r_y)$$

$$\vec{x} = f_{1x} + f_{2x} + f_{3x}$$

$$\vec{y} = f_{1y} + f_{2y} + f_{3y}$$

$$r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$$

$$r \cos \alpha = \frac{r_y}{r_x}$$

Universidade Federal do Espírito Santo  
Secretaria de Ensino a Distância

Física  
Licenciatura

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta T} = \frac{5 - 90}{1}$$



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
Secretaria de Ensino a Distância

# HISTÓRIA DA FÍSICA

Alan Miguel Velásquez Toribio

Vitória  
2015

## UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

### Presidente da República

Dilma Rousseff

### Ministro da Educação

Renato Janine Ribeiro

### Diretoria de Educação a Distância DED/CAPES/MEC

Jean Marc Georges Mutzig

### Reitor

Reinaldo Centoducatte

### Secretária de Ensino a Distância – SEAD

Maria José Campos Rodrigues

### Diretor Acadêmico – SEAD

Júlio Francelino Ferreira Filho

### Coordenadora UAB

Teresa Cristina Janes Carneiro

### Coordenadora Adjunta UAB

Maria José Campos Rodrigues

### Diretor do Centro de Ciências Exatas

Armando Biondo Filho

### Coordenador do Curso de Graduação Licenciatura em Física – EAD/UFES

Giuseppi Gava Camiletti

### Revisor de Conteúdo

Carlos Augusto Cardoso Passos

### Design Gráfico

LDI – Laboratório de Design Instrucional

### SEAD

Av. Fernando Ferrari, nº 514

CEP 29075-910, Goiabeiras

Vitória – ES

(27) 4009-2208

Material produzido originalmente sob a supervisão do Coordenador do Curso de Física, Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando.

### Laboratório de Design Instrucional

#### LDI Coordenação

Heliana Pacheco

José Otávio Lobo Name

Ricardo Esteves

#### Gerência

Samira Bolonha

#### Editoração

Thiers Ferreira

#### Ilustração

Alexssandro Furtado

#### Capa

Alexssandro Furtado

Thiers Ferreira

#### Impressão 2015

Tavares & Tavares

---

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

Toribio, Alan Miguel Velásquez.  
T683h História da física / Alan Miguel Velásquez Toribio. - Vitória : Universidade Federal do Espírito Santo, Secretaria de Ensino a Distância, 2012.  
78 p. : il.

Inclui bibliografia.  
ISBN: 978-85-8087-058-9  
Reimpressão, 2015.

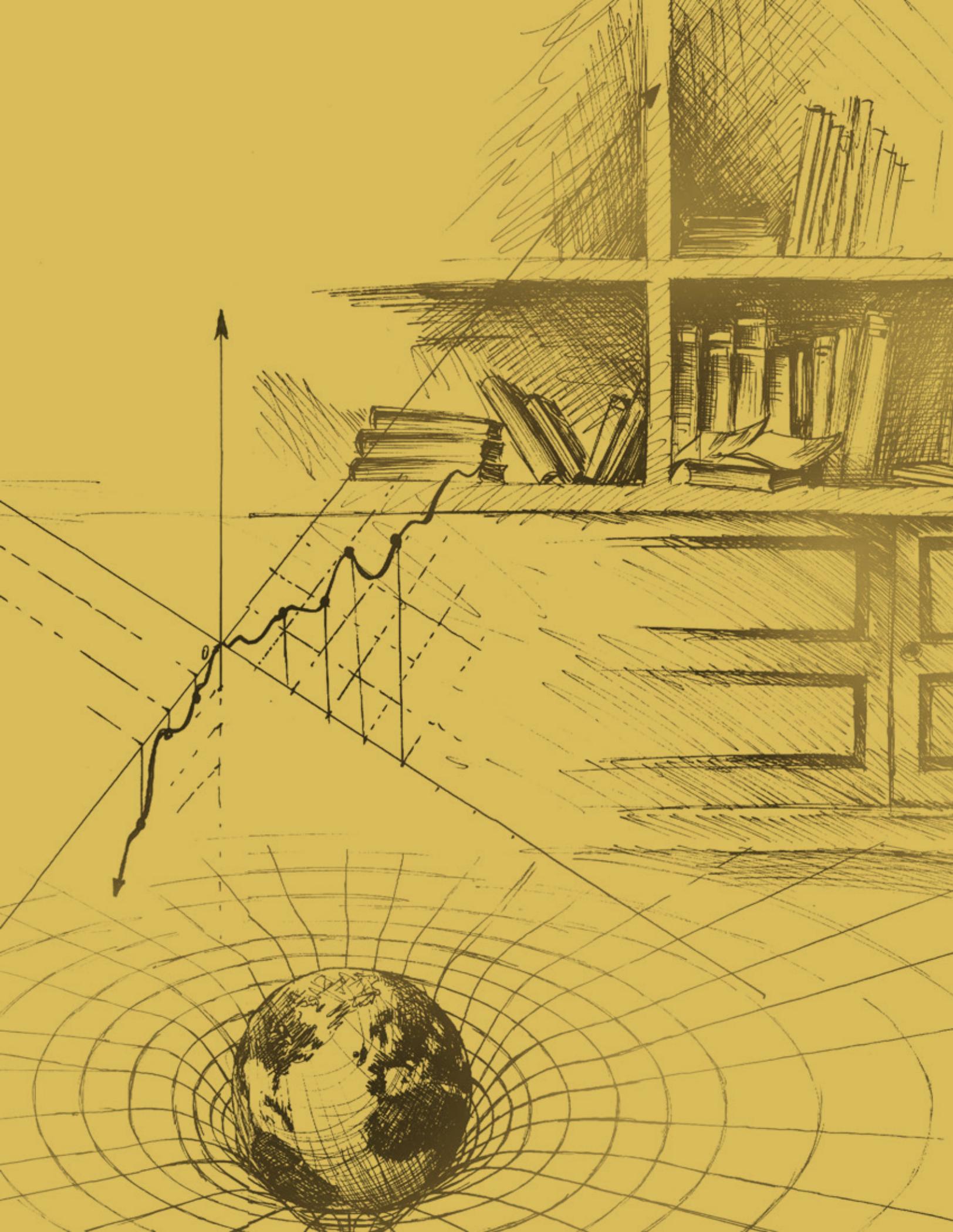
1. Física - História. I. Título.

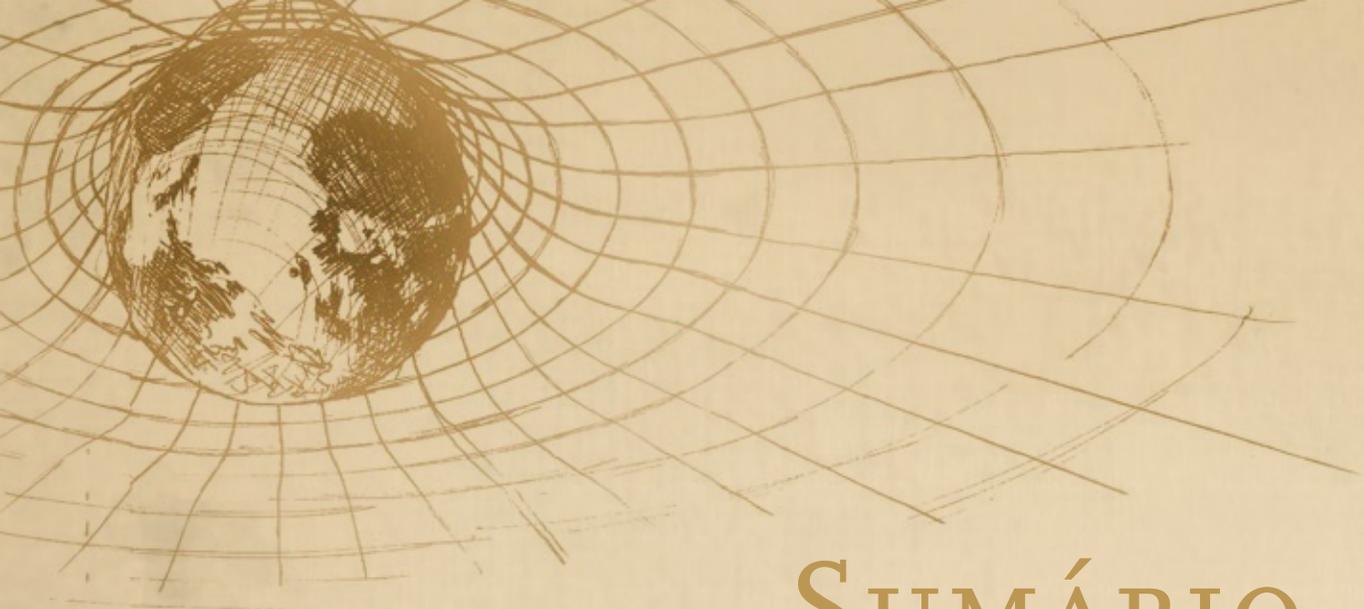
CDU: 53(091)



Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir deste trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

A reprodução de imagens nesta obra tem caráter pedagógico e científico, amparada pelos limites do direito de autor, de acordo com a lei nº 9.610/1998, art. 46, III (citação em livros, jornais, revistas ou qualquer outro meio de comunicação, de passagens de qualquer obra, para fins de estudo, crítica ou polêmica, na medida justificada para o fim a atingir, indicando-se o nome do autor e a origem da obra). Toda reprodução foi realizada com amparo legal do regime geral de direito de autor no Brasil.





# SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO 07

## CAPÍTULO I

Os primórdios da filosofia da natureza	09
Os Pré-Socráticos	12
Os Pitagóricos	13
Os Atomistas	15
Heráclito e Parmênides	15
Platão e sua academia	16
Questões sobre o Capítulo	19

## CAPÍTULO II

Física Aristotélica	21
Aristarco de Samos	24
Modelo de Ptolomeu	24
Platão e Aristóteles na Idade Média	25

## CAPÍTULO III

A renascença	30
Nicolas Copérnico	31
De Revolutionibus	31
Epículos e mais epículos	32
Tycho Brahe	33
O trabalho de Kepler	34
A órbita de Marte	35

## CAPÍTULO IV

Galileu Galilei	39
Galileu cientista moderno	40
O telescópio	41
Galileu e a Igreja	42
O princípio da Inércia	44
Newton	46
Princípio Matemáticos da Filosofia Natural	48
Alguns artifícios da mecânica Newtoniana	50
Euler	50
Lagrange	51
Laplace	52
Hamilton	53

## CAPÍTULO V

A Termodinâmica e a Eletricidade	56
Boltzmann e a Teoria Cinética	58
Eletricidade e Magnetismo	59
A síntese de Maxwell	61
A Física no Final do Século XIX	63

## CAPÍTULO VI

Crises da Física Clássica e o século XX	66
A Mecânica Quântica	69
Albert Einstein e a Teoria da Relatividade	72

## REFERÊNCIAS 77

“EL UNIVERSO (que otros llaman la Biblioteca) se compone de un número indefinido, y tal vez infinito, de galerías hexagonales, con vastos pozos de ventilación en el medio, cercados por barandas bajísimas. Desde cualquier hexágono se ven los pisos inferiores y superiores: interminablemente.....

También sabemos de otra superstición de aquel tiempo: la del Hombre del Libro. Em algún anaquel de algún hexágono (razonaron los hombres) debe existir un libro que sea la cifra y el compendio perfecto de todos los demás: algún bibliotecario lo ha recorrido y es análogo a un dios. En el lenguaje de esta zona persisten aún vestigios del culto de esse funcionario remoto. Muchos peregrinaron en busca de Él. Durante un siglo fatigaron em vano los más diversos rumbos. ¿Cómo localizar el venerado hexágono secreto que lo hospedaba? Alguien propuso un método regresivo: Para localizar el libro A, consultar previamente un libro B que indique el sitio de A; para localizar el libro B, consultar previamente un libro C, y así hasta lo infinito... En aventuras de ésas, he prodigado y consumado mis años. No me parece inverosímil que en algún anaquel del universo haya un libro total; ruego a los dioses ignorados que un hombre -¡uno solo, aunque sea, hace miles de años!- lo haya examinado y leído...”

La Biblioteca de Babel

Ficciones

Jorge Luiz Borges

# APRESENTAÇÃO

PREZADOS(AS) ALUNOS(AS),

A história da física é parte da história de nossa civilização, é de certa forma a história de como o homem tenta compreender a natureza com as armas da razão. Isto poderia ser aplicado à história da química ou da biologia, mas é na física que o homem tenta aprofundar de forma rigorosa o estudo da natureza. A física está ligada à linguagem matemática que utiliza, e é o que muitas vezes esconde o resultado do grande público; e o corpo de ideias fica restrito a um número limitado de pessoas com suficiente treinamento. Mas nos últimos anos tem aparecido uma vigorosa quantidade de publicações sobre divulgação das ciências e também da física em forma específica. É muito positivo saber que ideias abstratas, como a teoria das cordas, podem ser compreendidas na sua forma geral pelo público leigo. Livros desta natureza são: “O Universo numa Casca de Noz” e “O Universo Elegante”, de dois conceituados cientistas<sup>1</sup>.

Complementarmente, o valor de conhecer a história do que estamos estudando nos permite entender como os conceitos foram construídos na cooperação mútua de pessoas, de tentativa em tentativa, passando pela razão e pelo misticismo, misturando crenças. Foram muitas horas de cálculo antes de chegar a um dado resultado inovador. Podemos desmitificar os próprios cientistas. Os melhores pesquisadores são sempre falíveis, mesmo aqueles que estão protegidos pela distância dos séculos e parecem livres de qualquer erro. Os resultados dos gênios não são imediatos. A história também nos mostra que as revoluções não são instantâneas e só depois de um longo e suave processo ideias científicas são genericamente aceitas.

De forma mais objetiva para os nossos fins, é importante destacar que a história de uma determinada área do conhecimento, em geral, tem um valor para o futuro professor como um instrumento pedagógico, além de uma melhor compreensão dos conceitos estabelecidos como conceitos padrões. A história da física permite dirigir nossa atual e futura pesquisa, e ao mesmo tempo, nos convence que todos, de alguma forma, fazemos parte dessa história.

Em resumo, o texto é dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo, apresentamos os aportes dos babilônios, egípcios e gregos. No segundo capítulo, estudamos a física de Aristóteles, o sistema de Ptolomeu e consideramos o desenvolvimento da ciência na idade média. No terceiro capítulo, revisamos os avanços da renascença e as obras de Copérnico e Kepler. No quarto capítulo, consideramos os trabalhos de Galileu e Newton, figuras fundamentais na formação da mecânica clássica e a filosofia mecanicista. No capítulo cinco, estudamos os desenvolvimentos da termodinâmica e do eletromagnetismo e no capítulo seis, apresentamos os desenvolvimentos da mecânica quântica e da relatividade de Einstein. Finalmente, gostaria de agradecer a valiosa colaboração na revisão ortográfica e gramatical de Alexandra Velásquez que permitiu melhorar a apresentação do texto.

Alan Miguel Velásquez Toribio

---

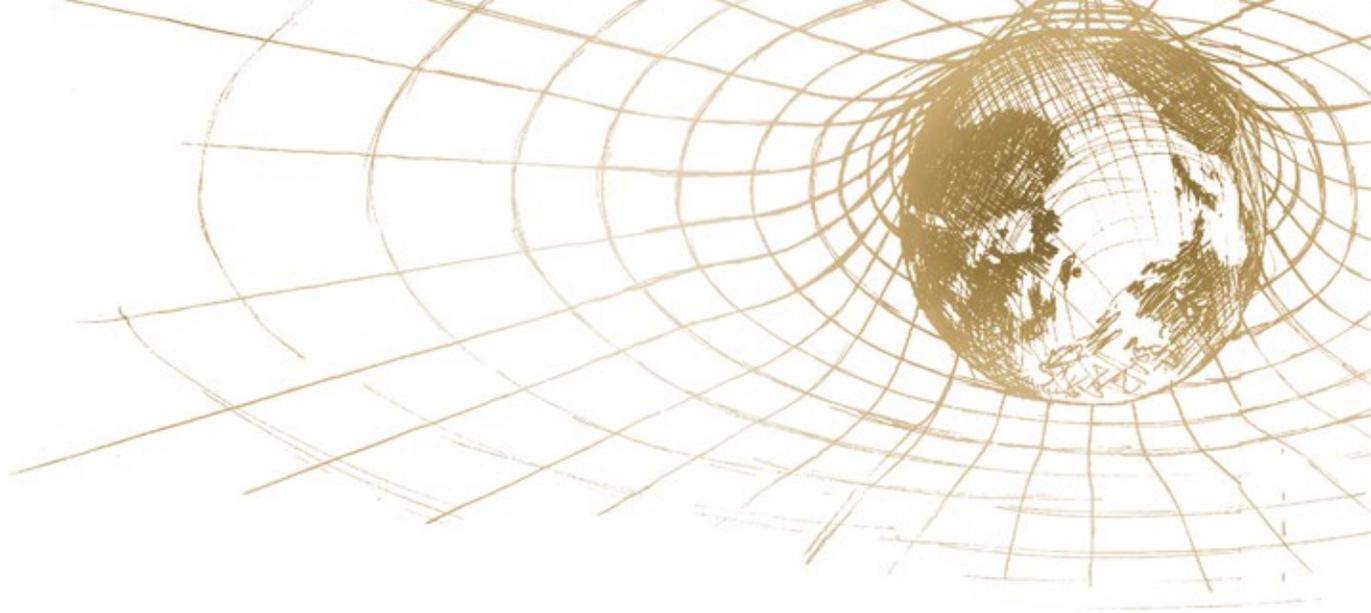
<sup>1</sup>Stephen Hawking “O Universo numa casca de Nos” Editora Arx; 4th edition 2002; B. Green, “O Universo Elegante”, Editora Companhia das Letras 2001.



$\frac{1}{2}kg$   
 $r$   
 $r$   
 $f_1, f_2, f_3$   
 $(x, y)$   
 $f_1x + f_2x + f_3x$   
 $f_1y + f_2y + f_3y$   
 $\sqrt{r_x^2 + r_y^2}$   
 $x = r_x$

$v_m = \frac{v_1 + v_2}{2}$   
 $\frac{v_1 + v_2}{2}$

# CAPÍTULO I



## OS PRIMÓRDIOS DA FILOSOFIA DA NATUREZA

O homem desde a Antiguidade procurou entender o ambiente no qual habitava. É especialmente importante lembrar neste estágio inicial as contribuições de dois povos fundamentais da Antiguidade: os babilônios e os egípcios. Uma característica de ambos os povos é o conhecimento utilitarista que procuravam, mesmo pelo ambiente agreste no qual se encontravam, onde precisavam conseguir resultados rápidos. Ambos juntaram uma grande quantidade de conhecimento em diversas áreas, tais como: aritmética, geometria, arquitetura, astronomia etc., no entanto, em termos gerais, era a religião e o mito que dominavam o pensamento destes povos, e talvez por isso, estes não tenham feito um avanço significativo com respeito à procura e sistematização do conhecimento sobre a natureza considerando as causas primordiais dos fenômenos [1].

A geometria egípcia foi desenvolvida com fins cotidianos pensando nas construções e nas terras a ser aproveitadas. Eles conseguiram determinar áreas de figuras polinomiais simples e determinar o volume de alguns sólidos. Aproximadamente em 3000 a.C., os egípcios usaram um sistema de numeração decimal, utilizando um

símbolo diferente para cada potência de dez. O papiro Rhind data de aproximadamente 1800 a.C. Neste papiro, temos registros de uma tabela de decomposição de frações da forma  $2/n$ , onde  $n$  é um inteiro positivo. A tabela proporciona a decomposição de números até  $n = 101$ , sendo que a decomposição era feita em função de frações unidade. Por exemplo,  $2/5$  era decomposta em  $1/5 + 1/15$ , na qual a causa principal do uso de frações unidade ainda é desconhecida [2]. Eles mostraram muita habilidade ao manipular números.

Na astronomia, por volta do ano 2900 a.C., começaram a utilizar um calendário solar dividido em quatro partes de três meses cada. Mas a grande contribuição foi o calendário civil que não tinha relação com alguma observação astronômica, mas era importante ao sistema econômico e social. No calendário baseado em algum dado astronômico, como o movimento da lua, o ano não começava sempre o mesmo dia, o que produzia problemas para determinar os futuros pagamentos de dívidas. O calendário civil egípcio tinha 365 dias, os quais eram divididos em doze meses mais cinco dias de festa.

Por outro lado, aproximadamente nos anos 3000 a.C., os babilônicos atingiram um nível de desenvolvimento ligeiramente superior nas matemáticas. Eles também utilizaram o sistema de numeração decimal e o sexagesimal. Os babilônios entendiam o conceito de valor dos números pela posição que ocupavam. Por exemplo, eles criaram um sinal para o número 1, uma forma, tipo uma cunha ▲, e ao número 10, outra forma do tipo ►. Para escrever o número 55 poderíamos escrever algo como ▲▲▲▲▲►►►►►, outros números podiam ser escritos assim por diante, mas isto era usado até chegar ao número 59, depois mudavam o sistema para o sexagesimal.

No que diz respeito à astronomia, os babilônios atingiram níveis mais sofisticados que os egípcios, principalmente porque aplicaram seu sistema sexagesimal para a abóbada celeste. Descobriram a eclíptica que representa a trajetória aparente do sol em torno da terra e a dividiram em 360 graus, que pela sua vez, era dividida em doze partes constituindo o que conhecemos como zodíaco.

Os babilônicos foram os primeiros a deixar por muitos anos registros de observações astronômicas de forma sistemática e organizaram esta informação para poder prever os acontecimentos futuros. Seus dados coletados permitiram construir um sistema de prognósticos de eclipses. Neste aspecto, é interessante entender o chamado ciclo de Saros (do grego: repetição) que consistia de 223 meses sín-

dicos ou 18 anos, 11 dias e 8 horas aproximadamente. Este ciclo foi conhecido nos últimos séculos a.C. por Hiparco e Ptolomeu na Antiguidade. É possível que esse ciclo tenha sido usado pelo grego Tales de Mileto para prever um eclipse no ano 585 a.C. O nome Saros foi apontado pelo astrônomo E. Halley no ano de 1691.

Para entender como funcionava o ciclo de Saros é interessante lembrar três elementos

$$223 \times 29,5305 = 6535,6211 \text{ dias}$$

fundamentais, o mês sinódico, o mês dracônico e o mês anômalo. Para que aconteça um eclipse de sol ou lua, a lua tem que estar na fase de lua nova ou cheia. Além disso, a lua deve estar perto da intersecção com a eclíptica, pontos que recebem o nome de nodos. O período

$$m29,5305 \text{ dias} = n346,6200 \text{ dias}$$

entre duas luas novas é conhecido como mês sinódico e tem o valor de 29,5305 dias. O ciclo de Saros deve ser múltiplo do mês sinódico, e podemos expressá-lo usando dois números naturais n e m da forma esta igualdade é satisfeita para  $m = 223$  e  $n = 19$ , assim, depois de ter ocorrido um eclipse, acontecerá outro eclipse no ciclo de Saros, chamado de eclipse homólogo. Além disto, temos o mês dracônico, que tem a duração de  $D=27,2123$  dias e determina um equivalente do ciclo de Saros de

$$D1 \times 27,2123 = 223 (29,5305) \text{ dias}$$

onde  $D1=242$  meses dracônicos. Adicionalmente, para que aconteça um eclipse, a terra, a lua e o sol têm que estar na mesma linha, isto deve levar em conta o ângulo entre o plano da órbita da lua e o plano da órbita da eclíptica. Este ângulo é de aproximadamente 5,2 graus como pode ser visto na Figura 1. Este efeito deve ser compensado num ciclo de Saros que se realiza como um múltiplo  $A = 27,5546$  dias do mês anômalo. Assim podemos escrever que

$$C \times 27,5546 = 223 (29,5305) \text{ dias}$$

sendo  $C=239$  os meses anômalos equivalentes aos anos sinódicos. Em geral, o período de Saros tem 19 anos eclipse, no qual acontecem aproximadamente 84 eclipses, sendo 42 do sol e 42 de lua.

Em termos gerais podemos dizer que os egípcios e babilônios constituem as primeiras civilizações de nossa espécie que registraram dados observacionais de astronomia e outras áreas, de forma a deixar um legado, que principalmente foi usado pelos gregos para passar a outro estágio do desenvolvimento do pensamento humano, sendo a base de toda a cultura ocidental.



Figura 1. Representação da linha dos nodos da lua, mostrando como essa linha percorre 360 graus em 18 anos e 10 ou 11 meses. Na figura embaixo a inclinação de 5,2 graus entre a órbita da lua e a eclíptica projetadas na esfera celeste.

## Os PRÉ-SOCRÁTICOS

A grande virada do pensamento sobre a natureza nasce na Ásia Menor, o que pelo contexto histórico é adequadamente fundamentado. Historicamente, a Ásia Menor foi o lugar onde culturas como a Micênica, após a invasão dos Persas, desembarcaram e fundaram junto com outros imigrantes a cidade de Mileto, que por volta dos séculos VII e VI a.C. era a maior e mais rica cidade grega. Neste cenário surge Tales de Mileto, dito por Aristóteles como o “fundador da filosofia”. Os filósofos dos séculos VI e V a.C. são chamados de Pré-Socráticos, pois antecedem Sócrates - o mestre de Platão. Estes filósofos não deixaram registros escritos de suas ideias, mas temos conhecimento deles unicamente pelos comentadores ou compiladores de textos antigos. Entre os principais comentadores está o próprio Aristóteles que comenta o pensamento destes filósofos chamando muitos deles de físicos. Os principais livros de Aristóteles a respeito deste tema, são: “Física” e “Metafísica”. Entre outras fontes, temos outros compiladores como Teofrasto, por exemplo, que foi sucessor de Aristóteles no Liceu e escreveu um pequeno livro chamado “Sobre as sensações”. Em geral, as fontes para o estudo dos Pré-Socráticos são encontradas no trabalho de Hermann Diels, que publicou em 1903 “Os fragmentos dos Pré-Socráticos”. (Die Fragmente der Vorsokratiker) [3].

Ainda que as ferramentas para estudar o pensamento pré-socrático sejam poucas, os estudiosos têm reconhecido que neste período o pensamento humano fez uma mudança drástica na forma de encarar as explicações sobre a natureza. Nos séculos anteriores, os gregos contavam apenas com as narrativas épicas orais. A exemplo disso, temos Homero e Hesíodo, que explicavam as origens das coisas a partir da mitologia.

Os Pré-Socráticos decidiram usar outra forma de registrar suas ideias, através da escrita. Segundo G. E. R. Lloyd [4] podemos citar duas características que marcam o pensamento dos milésios: primeiro notamos o que se pode chamar a descoberta da natureza, e segundo, o uso da razão crítica e o debate. A questão da descoberta da natureza está associada segundo Lloyd ao fato de os milésios diferenciarem entre natural e sobrenatural, sendo que nas suas explicações sobre as origens do Cosmos, mesmo mantendo elementos sobrenaturais, são os elementos naturais que aparecem como causas e não os sobrenaturais.

Tales foi o primeiro a dar uma explicação racional sobre a origem das coisas. Para ele, a origem das coisas estava num elemento simples - a “água” - e segundo F. Nietzsche, aqui temos a crisálida de um pensamento unificador: “Todo em um”. Tales parece ter sido uma pessoa que viajou muito e é possível que no Egito tenha adquirido seus conhecimentos de astronomia e matemática.

Outro pensador da mesma cidade foi Anaximandro de Mileto, e ao que parece, foi discípulo de Tales. Foi matemático, astrônomo, geógrafo e político. Segundo os relatos doxográficos escreveu o livro “Sobre a Natureza”, tido pelos gregos como a primeira obra de filosofia no seu idioma. Mas o livro deve ter se perdido na história, e só temos alguns fragmentos de escritores posteriores. Para Anaximandro, a origem das coisas está no “Apeiron”. Ele introduz na Grécia uma ideia que vai ser usada sucessivamente na história da filosofia: as mudanças surgem como intercâmbios entre contrários.

O terceiro milésio é Anaxímenes de Mileto, que foi discípulo de Anaximandro. No lugar do elemento indeterminado de seu mestre, ele voltou a Tales e considerou um elemento único da natureza como fonte dos outros - o “ar”.

Estes três filósofos são assinalados como os iniciadores de um movimento racional que dará os fundamentos da cultura científica do ocidente.

## OS PITAGÓRICOS

Os gregos colonizaram o que hoje conhecemos como Itália e Sicília, e onde no século V a.C. surgiu uma escola fortemente religiosa conhecida como os pitagóricos. Pitágoras nasceu em Samos, provavelmente entre 585 a 565 a.C., e pode ser que tenha tido Anaximandro por mestre. Foi um grande viajante, percorrendo Ásia Menor e Egito, absorvendo o conhecimento matemático também dos babilônios; se estabeleceu em Crotona e fundou uma escola onde iniciou um movimento místico e racional que influenciaria muitos gregos da época e a outros pensadores como Platão ou Kepler no futuro. De seu mestre, Pitágoras parece ter herdado a procura por um ente unificador, que foi encontrado nos números. Tudo era número. O objetivo dos pitagóricos era conseguir um estado de purificação espiritual pela contemplação abstrata dos números. Mas por que se associou o número

com a divindade? Parece que o próprio Pitágoras descobriu uma relação simples entre números e música. Se uma corda é pressionada na metade e logo é movimentada, produz um tom que é uma oitava mais alto do que o tom da corda soando livremente, se no lugar de apertar na metade apertamos  $2/3$  resulta num tom uma quinta mais alto, se apertamos  $3/4$ , temos um tom uma quarta mais alto. Com isto os pitagóricos associaram beleza e números.

Os pitagóricos consideravam o número 10 como o número sacro, pois este era obtido da soma dos primeiros quatro números:  $1+2+3+4=10$ , assim, também associaram os números como nas notas musicais ao movimento dos planetas. Os pitagóricos pensaram que a distância entre os planetas e o sol, que giravam ao redor da terra, deveria ter proporções de forma a produzir uma harmonia celeste. Curiosamente esta harmonia celeste que associaram com esferas celestes era escutada unicamente pelos mestres. Assim a necessidade de contemplação do número. Os números foram associados com formas geométricas. O número 4 era associado a um quadrado, o número 6 a um triângulo, isto é: três lados e três vértices. Desta forma, foi descoberto o chamado teorema de Pitágoras, mas, ao que parece, não foi Pitágoras que o descobriu, mas possivelmente um de seus discípulos. Mesmo com seu misticismo os pitagóricos deram um passo fundamental para a ciência ocidental, pois pela primeira vez utilizaram a matemática para explicar os fenômenos naturais. Suas contribuições a astronomia são notáveis, em particular, as contribuições de Filolau de Crotona. Ele propôs um modelo de Universo onde a Terra girava em torno de um centro no qual estava situado um fogo celeste invisível, mas que era a causa do fogo do sol e das estrelas. Também existia entre a Terra e o fogo celeste uma anti-Terra. A Terra sempre apresentava a mesma cara para o fogo celeste. Em seguida, tínhamos a esfera do Sol, da Lua, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno, todos os planetas conhecidos na época. Este modelo é um dos primeiros exemplos de cosmologias não geocêntricas e representa um grande avanço no entendimento do cosmos mesmo que seja especulativo.

## OS ATOMISTAS

A tradição grega assinala como principais atomistas: Leucipo e Demócrito. Ao que parece foi Leucipo que teve a ideia inicial do atomismo. Ele nasceu em Abdera, a cidade também de Demócrito, seu discípulo. A data exata de seu nascimento é desconhecida, mas se sabe que sua atividade foi entre os anos 450-420 a.C. Os filósofos reconhecem Leucipo como o formulador da teoria atomística, e Demócrito como seu melhor expositor fazendo contribuições originais. O objetivo dos atomistas era reconciliar o pensamento de imutabilidade de Parmênides com o pensamento do devir de Heráclito. Para eles se uma substância imutável pode construir o mundo mutável, não existe contradição entre as duas tendências de pensamento, sendo a substância imutável - o átomo. Eles acreditavam que todo o Cosmos era feito de átomos, que estes eram infinitos em número e indivisíveis. Defenderam o fato de procurar explicações racionais dentro do contexto de um sistema fechado de ideias sem sair dos limites desta. O átomo era invisível e abstrato para Leucipo, e era com este ente que queria explicar as sensações e as coisas materiais do mundo. Esta proposta apresenta o elemento unificador das propostas dos filósofos de Mileto.

## HERÁCLITO E PARMÊNIDES

Heráclito, no século V a.C., considerava o fogo como substância primordial. O principal ensinamento de Heráclito foi a mudança permanente das coisas. Uma conhecida frase associada com seu pensamento é: “*Não se pode penetrar duas vezes ao mesmo rio*” [5] No mundo existe unidade, mas isto é o resultado da combinação dos opostos: A questão dos contrários é fundamental para a harmonia do mundo. Esta ideia dos contrários é uma das contribuições mais originais de Heráclito. Unidade é indivisível de dois opostos. O elemento primordial para ele foi o fogo talvez pelo fato de ser este elemento fonte de mudanças. O fogo representa na filosofia de Heráclito a mudança contínua.

A ideia do fogo é estendida por Heráclito para construir sua cosmologia: “*um universo tem sua origem no fogo e seu destino no fogo*”

*dando origem a ciclos intermináveis, sendo talvez o primeiro exemplo de universo cíclico.”*

Parmênides de Eléa foi inicialmente um pitagórico, mas acabou por discordar dos ensinamentos e se afastou de tal filosofia. Considerou a noção do eterno ou imutável como fundamental. Ele rejeitou o postulado de Pitágoras segundo o qual do Um original provêm dois e, em seguida, vários. Eis algumas de suas premissas:

- 1. O que é, é, e não pode não ser; o que não é, não é, e não pode ser.*
- 2. O que é, pode ser pensado ou conhecido, expresso ou realmente nomeado; o que não é, não o pode.*

Segundo Parmênides, ser e ser pensado são a mesma coisa. Sobre este filósofo, o famoso físico brasileiro Leite Lopes tece seu comentário:

[...] Apenas aquilo que é pode ser pensado ou realmente nomeado; e apenas aquilo que pode ser pensado pode ser. Naturalmente, o ponto fraco do sistema de Parmênides é que seus postulados rejeitam o mundo, a variedade das coisas resultante do Um. Essa variedade, assim como nascer, tornar-se, mudança, movimento, é, segundo ele, irreal. De sua filosofia restou, entretanto o conceito de substância fundamental permanente, de uma realidade indestrutível [5].

Os seguintes continuadores modificaram as asserções de Parmênides para introduzir o conceito de pluralidade dos mundos. Empédocles introduziu os quatro elementos como fundamentos da pluralidade: ar, fogo, terra, água. A ideia foi reintroduzida por Aristóteles e usada para construir sua física que dominaria por quase dois milênios.

## PLATÃO E SUA ACADEMIA

Platão nasceu numa família aristocrática no ano 427 a.C., e pelos acontecimentos ocorridos com seu mestre Sócrates, que foi injustamente obrigado a beber cicuta pelos políticos locais, Platão observou que a necessidade de implementar mudanças morais eram necessárias. Ele foi um grande viajante, por vinte anos percorreu as Ilhas Gregas, Itália e Egito, até ser preso por uma embarcação de Esparta que na época estava em guerra com Atenas e o fez prisioneiro. Segundo os historiadores, ele só foi liberado pela ajuda de Anniceris. Depois se es-

tabeleceu em Atenas, onde no ano de 387 a.C. fundou sua academia, a qual permaneceu como centro de estudos até o ano 529 d.C., e poder ser considerada como uma das primeiras Universidades da civilização.

Platão acreditava que uma renovação do pensamento dos líderes era fundamental para atingir uma melhora moral de sua sociedade e com esse fim introduziu o conceito de rei-filósofo. Nesta busca ele tentou passar da teoria à prática. A oportunidade se deu quando Dionísio tomou o poder em Siracusa, pois Dion, tio de Dionísio, era grande amigo de Platão e o novo rei era muito jovem, capaz de ser influenciado por um filósofo. Mas quando Platão chegou a Siracusa, Dionísio viu na amizade de seu tio e o filósofo uma oposição a seu reino, portanto, decidiu banir Dion e manter Platão prisioneiro em Siracusa, mesmo assim o tirano permitiu depois de um tempo que Platão voltasse a Atenas, a sua Academia.

No ano de 361 a.C. novamente Dionísio convidou a Platão a ir a Siracusa, mas depois do acontecido, o filósofo não quis regressar. No entanto, seu amigo e discípulo Dion insistira pois sua ideia era transformar Dionísio em um rei-filósofo. Mas o rei novamente se comportou como um tirano, entre outras coisas, devido ao fato de Platão ter insistido pela volta de seu amigo Dion. E depois de certos conflitos e pela intervenção de Arquitas de Tarento, Platão conseguiu voltar a Atenas. Depois destas viagens Platão decide deixar a tentativa de formar um rei-filósofo e escreve as “Leis”, onde faz reflexões sobre questões jurídicas para a melhor cidade possível. Outra obra de sua maturidade é o “Timeu”, na qual Platão apresenta sua ideia geral de como observa o Cosmos.

Platão propõe a chamada teoria das ideias, que consiste em dividir o Universo em uma parte sensorial e outra chama de ideias. A parte sensorial é a parte obscura menos confiável e capaz de levar ao erro. Portanto, a tarefa do filósofo era descobrir meios de atingir o mundo puro das ideias. Com este objetivo, Platão descobre que a geometria é uma ferramenta ótima para atingir o mundo das ideias. Por exemplo, o círculo representava muito bem um objeto do mundo abstrato. Na academia era fundamental o estudo de geometria. Além desta matéria, se estudava medicina, botânica, astronomia, retórica e filosofia.

Devido ao pensamento de Platão acerca do mundo das idéias, que era o objeto principal de sua investigação, as experiências sensoriais, base das ciências modernas, foram descuidadas. No entanto, não foi em forma excessiva, pois nos mais de 900 anos

na Academia se impulsou o estudo de quase todas as ciências, inclusive, as experimentais [6].

Com respeito à astronomia, Platão supôs que os corpos celestes eram esféricos e que sua trajetória devia ser uma circunferência. Para este fim, propôs um desafio a seus colegas da Academia que de certa forma influenciou muito o pensamento astronômico dos séculos futuros. Ele perguntou como explicar o movimento retrógrado dos planetas com o uso do movimento circular? Uma resposta a esta pergunta foi dada pelo seu discípulo Eudóxio de Cnido que nasceu aproximadamente no ano 408 a.C. O modelo do Cosmos consistia de quatro esferas celestes para cada planeta, mais três esferas para o Sol e outras três para a Lua, e também uma outra esfera que continha as estrelas fixas. Assim, eram 27 esferas para formar o modelo planetário de Eudóxio. Neste caso teríamos aproximadamente quatro esferas que podiam girar em torno de um eixo comum. A esfera exterior era responsável pela rotação do céu, a seguinte esfera pela rotação do planeta dentro do zodíaco e cada planeta tinha sua própria velocidade. As duas esferas internas giravam entorno de eixos diferentes em sentidos contrários. Este movimento interno produzia o movimento retrógrado. Todavia, problemas como mudanças de brilho que podiam ser explicadas pela variação da distância dos planetas à Terra eram desconsiderados. Contudo, o modelo de Eudóxio mostrou ser a primeira tentativa de cosmologia usando figuras circulares, isto é, geometria.

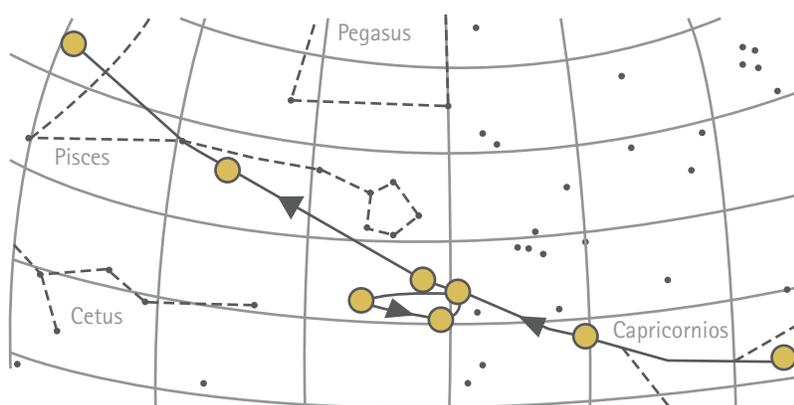


Figura 2. O movimento retrógrado é causado pela velocidade orbital diferente da velocidade da terra.



## QUESTÕES SOBRE O CAPÍTULO

1. Ciclo de Saros. Para cada ciclo seja ele sinódico, dracônico ou anômalo existem 19 anos eclipse. Determine qual é a diferença de duração entre estes três ciclos. Para que o ciclo seja válido estas diferenças não devem ser muito grandes. Avalie sua resposta encontrada.
2. Qual é a diferença entre as ideias dos Pré-Socráticos e as ideias presentes na *Íliada* e na *Teogonia*?
3. Qual é a principal característica da academia de Platão?

## AVALIAÇÃO E FÓRUM DE DISCUSSÃO

Ler o texto no enlace (paginas 11-40)

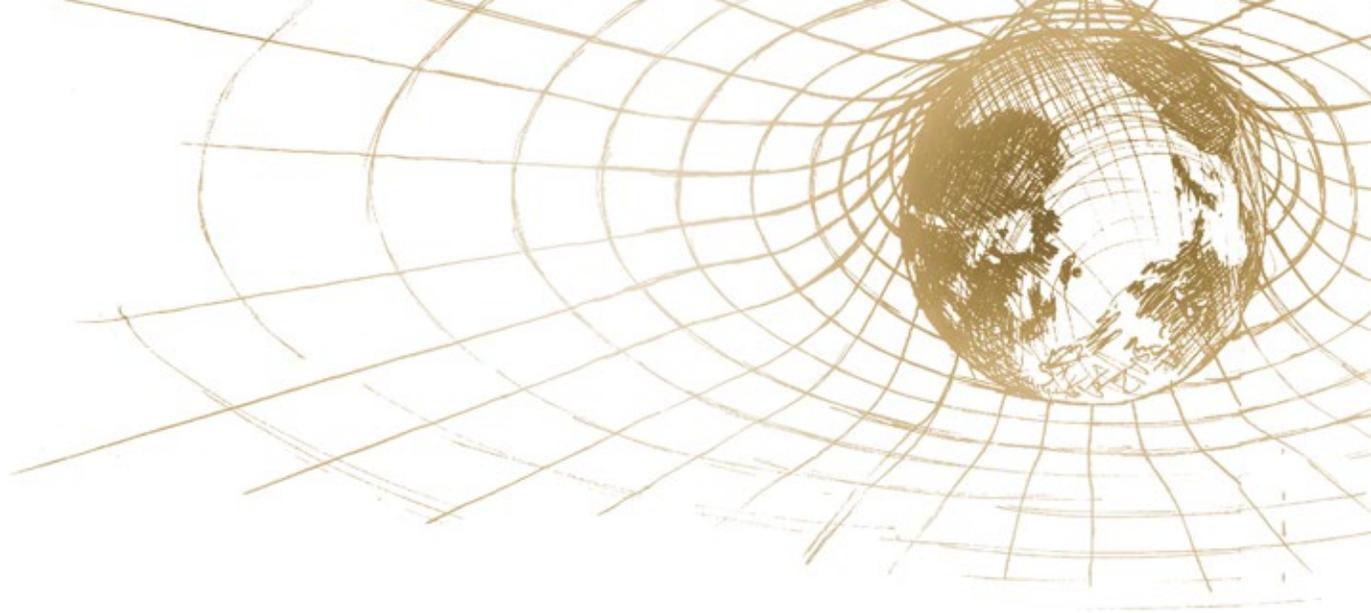
<http://www.ufpel.edu.br/isp/dissertatio/revistas/antigas/dissertatio25.pdf>

Quais são as fontes de estudo da obra de Platão?

Comente quais são as principais fontes antigas?



## CAPÍTULO II



## FÍSICA ARISTOTÉLICA

Aristóteles nasceu no ano de 384 a.C em Estagira, no reino da Macedônia, numa família rica e aristocrática. Seu pai foi o médico do rei Amyntas III e sua mãe uma pessoa muito rica do reino. Quando ele tinha 17 anos foi para Atenas estudar na academia de Platão, por vinte anos permaneceu na academia. No ano 347 a.C, ele partiu de Atenas e percorreu várias cidades da Ásia Menor. No ano de 343 a.C. recebeu o convite do rei Filipe II para ser o preceptor do filho dele, que se tornaria Alexandre - o Grande. No ano de 335 a.C. voltou a Atenas e fundou o Liceu, no qual formou uma legião de seguidores. Foi nesta época do Liceu que Aristóteles possivelmente escreveu a maioria de seus tratados.

Nas obras, “Metafísica” e “Física”, Aristóteles considerou o estudo do movimento dos corpos. Ele fez um escrutínio da questão do movimento por meio de dois conceitos: ser em potência e o ser em ato [7,8]. Para ele tem sentido falar de movimento como passagem de aquilo que é “potência” para o ato. O significado de movimento para Aristóteles é mudança. Ele especifica quatro formas de movimento ou mudança: geração e corrupção, isto é nascimento e

destruição; mudança de qualidade; de tamanho e de deslocamento. Além disto, associa a todo movimento, mudança, uma causa. Para ele as causas se subdividiam em quatro classes diferentes, mas aqui vale lembrar que para Aristóteles causa não tem o significado moderno de física, isto é, modernamente, a causa do movimento ou causa da dinâmica é a força. Para Aristóteles, a causa está associada também com um ente que determina a coisa ou o objeto em forma estrutural. As causas aristotélicas são:

**a) Causa Formal:**

Na coisa que muda existe um princípio que define o corpo que hoje é como é, e que amanhã será diferente.

**b) Causa Material:**

A coisa que muda está feita de matéria. Para corpos imutáveis ou estáticos estas duas causas são suficientes, mas se existe mudança temos que adicionar outras duas causas.

**c) Causa Eficiente:**

O agente que produz o resultado.

**d) Causa Final:**

A finalidade da mudança ou a tendência da coisa.

Discorrendo sobre a natureza, Aristóteles estabeleceu o princípio que podemos mencionar como de “horror ao vácuo”. Esta asserção era fenomenológica, pois, não conseguiu observar na natureza o vácuo. Aristóteles pensava que a natureza agia de forma a eliminar ou não permitir a existência do vácuo. Outra questão importante diz respeito ao infinito. Aristóteles acreditava na existência de um universo finito, limitado por uma esfera, na qual as estrelas estavam fixas e centradas na Terra.

Aristóteles propôs um modelo cosmológico baseado no modelo de Eudóxio de esferas cristalinas, mas ele construiu mecanicamente o modelo. A esfera da lua separava o mundo terrestre do chamado celeste que estava composto de éter ou quintessência. No mundo terrestre existia uma hierarquia começando do elemento mais denso que era a Terra até o mais leve que era o fogo. Esta região terrestre também era chamada de sublunar pelo fato da lua determinar a fronteira dos dois mundos. Os movimentos no mundo sublunar eram assim determinados pelos movimentos naturais. Segundo este princípio de movimentos naturais, os elementos tendem a voltar a seu lugar natural quando liberados a mudanças ou movimentos. A queda dos corpos é explicada dentro deste esquema. Um corpo quando mais pesado

mais tenderá ao elemento Terra e cairá. Também sua velocidade será maior quando maior seja seu peso. Aristóteles afirma que é o fato de o centro da terra ser o centro do Universo que os corpos pesados se dirigem a este. Por exemplo, se a terra é dividida e deslocada na posição da lua, no Universo aristotélico, as partes voltariam ao centro do Universo por ser o centro o lugar natural de coisas pesadas. Portanto, no Universo aristotélico, os movimentos dos corpos não dependem da correlação entre as partes, mas sim de propriedades intrínsecas do espaço absoluto. Também com esta ideia surge a imobilidade da Terra. Pois a Terra só pode ficar no centro do Universo. A ausência de rotação também é determinada pelo fato empírico de lançar uma pedra a uma altura muito alta e observar o lugar da queda. Se existisse rotação, a pedra cairia num lugar diferente do qual foi lançado. Como isto não era observado, Aristóteles concluiu que a terra não girava. A esfericidade da Terra também foi uma ideia surgida desta estrutura. Como todas as partes da terra tendem da mesma forma em todas as direções ao centro do Universo, não é possível que uma parte tenha um excesso de matéria em relação às outras, de forma que a única escolha resulta ser uma esfera.

Também Aristóteles considerou movimentos forçados. Uma causa eficiente era capaz de produzir um movimento forçado, mas quando este deixava de atuar, o movimento voltava a ser natural. O Universo de Aristóteles tinha um caráter de ordem e poderia ser chamado Cosmos.

A causa eficiente era uma forma mecânica, não existia causa de ação à distância como no caso de nossa gravidade. Assim para um projétil era o “ar” quem realizava o papel da causa eficiente. O ar realizava duas ações. A ação de aumentar a velocidade e a ação de resistência ao movimento. Quanto mais leve ou menos denso fosse o meio, a causa eficiente seria maior e a velocidade também. No caso de não ter resistência nenhuma, a velocidade seria infinita. A ausência de matéria implicava velocidade infinita ou o vácuo implicava velocidade infinita, como o vácuo era falso, segundo Aristóteles, o infinito também [8,9].

A esfera sublunar movimentava o fogo de forma circular e este movimento não era para Aristóteles natural. Portanto, assim ele explicava a aparição de cometas e meteoros. Os movimentos circulares do fogo que naturalmente tinha que ficar subindo radialmente para lugares cada vez mais distantes do centro eram fonte de novos fenômenos de natureza astronômica.

## ARISTARCO DE SAMOS

Particularmente importante resulta o nome de Aristarco de Samos, que possivelmente nasceu no ano 310 a.C. e foi o formulador de um modelo Heliocêntrico há quase 2000 anos antes de sua reintrodução pelo notável Nicolaus Copérnico na Renascença. Entre seus múltiplos estudos, Aristarco comparou a distância terra sol com a distância terra lua, mostrando que a primeira era aproximadamente umas vinte vezes a última. O método de Aristarco está ilustrado na Figura 3 onde observamos que se mede o ângulo  $\alpha$  na quadratura da lua, significa que quando a lua é iluminada na metade de seu círculo a linha A faz um ângulo perpendicular com C e podemos determinar a proporção C/B, mas este método é inconveniente por dois motivos: o ângulo é difícil de medir, e um pequeno erro leva a resultados consideráveis. Aristarco determinou um ângulo de 87 graus, sendo o atual ângulo de 89 graus e 52 minutos, mas a diferença nas proporções é de 20 vezes.

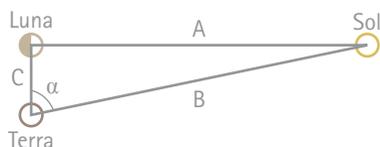


Figura 3: Método de Aristarco para comparar as distâncias entre terra-sol e terra-lua.

## MODELO DE PTOLOMEU

O modelo que dominou a astronomia por quase dois milênios foi de caráter geocêntrico e teve como maior referência o “Almagesto”, o livro composto por Ptolomeu no século II de nossa era cristã. Ptolomeu foi um compilador e reformulador dos conhecimentos astronômicos de seu tempo, ele representa uma das mentes mais aguçadas da Antiguidade.

A origem da construção do modelo reformulado por Ptolomeu está nos trabalhos de Apolônio de Perga no século III a.C., que introduziu, no nível matemático, o movimento de um círculo em torno de um círculo maior. Este último se denominou diferente e o primeiro epiciclo. Outro desenvolvimento também importante se deve a Hiparco no século II a.C., que foi o primeiro a aplicar as ideias de Apolônio para estudar o movimento do sol. Hiparco foi um genial astrônomo e matemático. Inventou a trigonometria e o astrolábio, instrumento para determinar as posições de objetos celestes.

Hiparco fez medidas astronômicas acuradas para sua época. Descobriu o fenômeno da precessão dos equinócios e foi um grande conhecedor da astronomia babilônica e observador de eclipses.

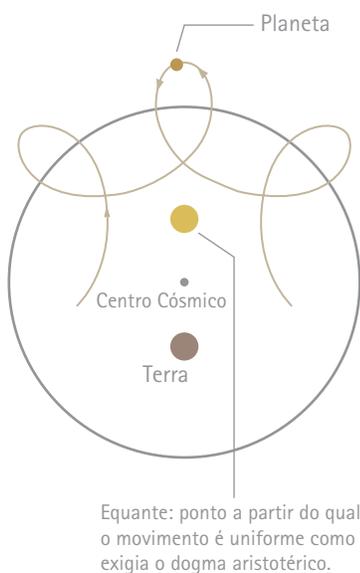


Figura 4: Modelo Ptolemaico com o epiciclo e o equante introduzido por Ptolomeu.

Usando os estudos feitos por Hiparco, Ptolomeu construiu o sistema matemático geocêntrico preditivo de maior aceitação. Para entender melhor o comportamento dos corpos celestes usando epiciclos, imaginemos um planeta em torno de uma circunferência com velocidade uniforme percorrendo áreas iguais em tempos iguais. Nestas condições, movimentos observados não podem ser reproduzidos, pois os planetas não percorrem seus trajetos com velocidade uniforme. Se deslocarmos o planeta no centro do círculo teremos um movimento com velocidade variável ao redor do planeta e uniforme ao redor do centro. Assim, quando o planeta está próximo da terra, sua velocidade é maior, e quando está longe, sua velocidade é menor.

A grande contribuição de Ptolomeu foi a introdução de um ponto equidistante à Terra, no que diz respeito ao centro do círculo deferente. Este ponto é chamado de equante. O planeta se movimenta uniformemente ao redor do epiciclo e o centro do epiciclo se movimenta também uniformemente, mas em relação ao ponto equante [7,8,9]. O movimento completo é visto desde a Terra. Dando os valores corretos de velocidade e raios de círculos, este modelo permitia explicar de forma adequada os movimentos planetários. O modelo durou até o início do século XVI e na prática até quase o início do século XVII com os trabalhos galileanos.

## PLATÃO E ARISTÓTELES NA IDADE MÉDIA

Durante a Idade Média, Platão foi conhecido principalmente pelo trabalho de Santo Agostinho, que utilizou as ideias de Platão para escrever suas obras monumentais como a “Cidade de Deus”. Um dos principais livros divulgados de Platão durante a Idade Média foi o “Timeu, que já mencionamos anteriormente. Nele, o filósofo apresenta seu modelo de Universo, separando o mundo celeste das ideias, do mundo terreno ou tangível. Esta forma de pensar parece ter tido boa acolhida pela Igreja Católica.

Por outro lado, Aristóteles começou a ser dominante no pensamento ocidental, principalmente, nos séculos XI e XII, com os trabalhos de São Tomás de Aquino, e outros notáveis, como São Alberto Magno. Os estudos de Aristóteles foram predominantes na Idade Média pelos seguintes fatos:

- a. A obra de Aristóteles cobria quase todos os campos do conhecimento desenvolvidos até o século IV a.C. e, em alguns casos, abriu novas áreas de estudo, como a botânica.
- b. Sua filosofia e discussão dos fenômenos naturais apelava ao senso comum, era objetiva, tentando explicar os fatos. Neste caso, era diferente da filosofia de Platão, na qual a abstração era predominante.
- c. A influência da Igreja Católica, que usou a filosofia e cosmologia de Aristóteles nos estudos bíblicos e fundar a Escolástica.

É comum observar a Idade Média como uma época perdida, onde a ciência literalmente parou ou não se desenvolveu, existindo uma descontinuidade em relação à Renascença. Mas essa apreciação não é adequada. Talvez seja mais justo aplicar esta observação ao primeiro estágio da Idade Média (400-900), mas não para o período tardio da Idade Média nos séculos XI-XV, no qual se funda a Escolástica, e se constroem os centros acadêmicos onde, por exemplo, Copérnico se formou. Os centros foram derivados diretamente dos pesquisadores escolásticos, e foi essa forma de estudar, que permitiu conhecer profundamente o sistema de mundo de Aristóteles e assim poder refutá-lo.

A ideia de que a Idade Média foi sem significado científico é encontrada na crítica do “Novo Organon”, de Francis Bacon, que não considerava os trabalhos dos escolásticos, pois para ele, os tratados dos escolásticos impediram o avanço das ciências. Outro filósofo, nesta linha de pensamento, foi Voltaire, que criticou o estado de simplicidade dos medievais e sua falta de compromisso com o conhecimento verdadeiro. Condorcet, por sua vez, apontou a culpa do atraso para Igreja Católica, que impôs suas ideias de forma vertical, evitando a possibilidade de diálogos e refutações.

Frente a estas ideias, o trabalho de um físico e pensador do início do século XX, Pierre Duhem, é completamente diferente. Ele estava preparando um trabalho de pesquisa sobre estática e suas origens, e no percurso, Duhem encontrou muitos avanços dos filósofos naturais da Idade Média, no entanto, este conhecimento se restringia a grupos fechados em suas escolas e não era disseminado. Segundo ele, os filósofos da Idade Média permitiram um passo gradual entre a Idade Média e a Renascença.

Discussões sobre a continuidade do pensamento entre os medievais e os modernos foram novamente instauradas com as pesquisas de Crombie, que em suas publicações defendia que:

a) A característica fundamental da ciência moderna era a metodologia e experimentação.

b) Esta metodologia e experimentação tinham sido inventadas na idade medieval.

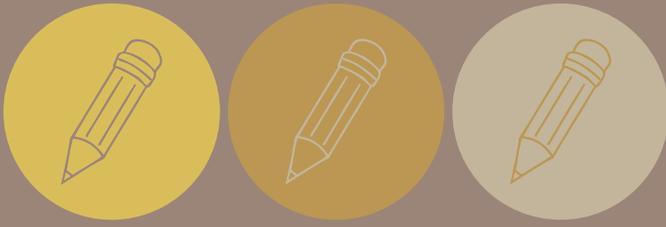
Mas isto não era do agrado de muitos como Koyré [10], que respondeu que os avanços dos medievais tinham que ser julgados de forma diferente. Se eles criaram uma metodologia e certa experimentação não necessariamente eram as formas que inspiraram a Idade Moderna. Seguindo David Lindberg [1], podemos mencionar características gerais da Idade Média a fim de resumir o dito.

1. Os filósofos da Idade Média fizeram uma síntese do pensamento clássico e Cristiano que constituía a fonte para um pensamento criativo. A filosofia de Aristóteles não foi um compêndio fechado sobre as coisas e não era seguramente a única via, mas foi a que prevaleceu depois de grandes estudos e críticas por parte dos filósofos medievais.

2. Estes estudos e sínteses encontraram um apoio e segurança nas Universidades medievais. Ser culto significava ser versado na filosofia clássica e antiga. Constitui a base para o novo pensamento da Renascença a presença de Universidade e escolas. E o apoio institucional se iniciou na Idade Média.

3. Os filósofos medievais foram inovadores ao criticar Aristóteles. Filósofos como Buridam e Oresme foram grandes inovadores críticos do pensamento aristotélico e se não o abandonaram em função de melhores resultados, eles conseguiram modificá-lo de forma a preparar o caminho para os séculos seguintes.

4. As mudanças de ordem metafísica e metodológica, que caracterizam os séculos XVI e XVII, tiveram sua base nas mudanças da metafísica e metodologia da Idade Média tardia (XI - XV).



## AVALIAÇÃO E FÓRUM DE DISCUSSÃO

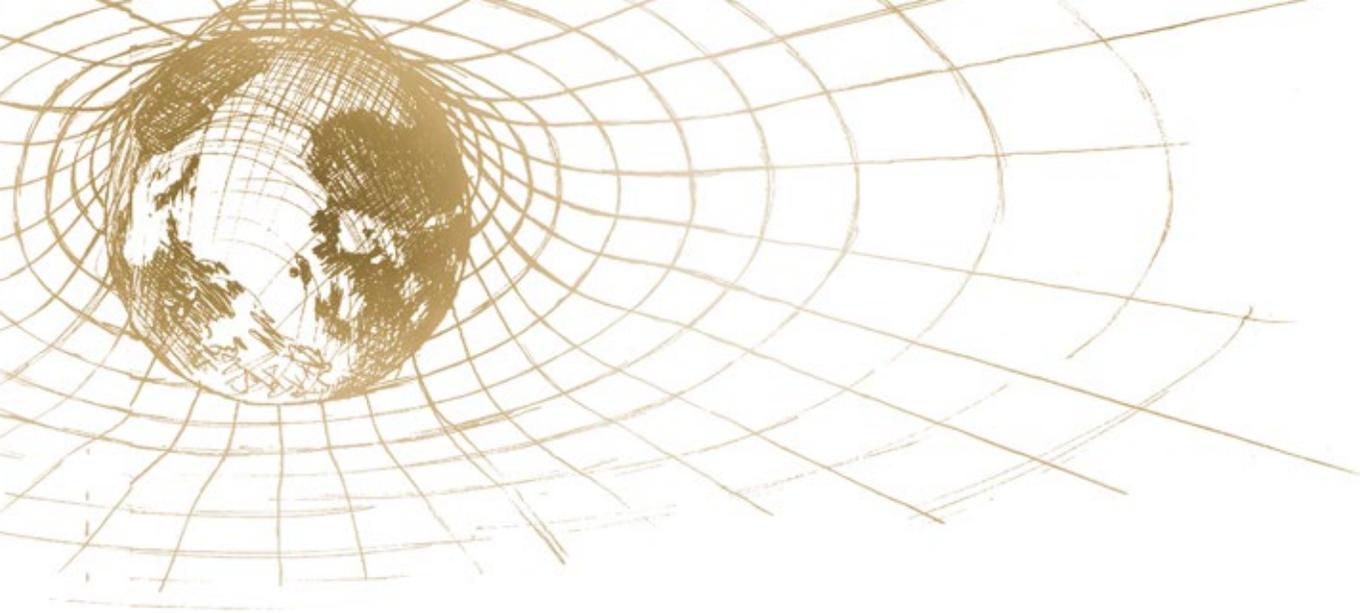
Faça uma leitura do texto:

*[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172008000400015&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172008000400015&script=sci_arttext)*

Faça um resumo da cosmologia Aristotélica?

Quais são os pontos fracos da cosmologia Aristotélica?





## A RENASCENÇA

O período da Renascença foi uma época libertadora para praticamente todo o pensamento humano do ocidente. Mas nenhuma época é de rupturas tão abruptas ou de transformações mágicas, de forma que, automaticamente se abandonam os conceitos anteriores e se usam os novos. O espírito humano não costuma funcionar de forma instantânea e demora um tempo para processar e aceitar novos fatos e conceitos. Atualmente a velocidade da inovação aumentou de forma notável, no entanto, há cinco séculos, as mudanças eram lentas.

## NICOLAS COPÉRNICO

Quando nos propomos a entender os avanços das ciências na Renascença, é de forma inequívoca que nos lembramos de Nicolas Copérnico (1473-1543), o clérigo que deu início de forma sistemática a uma grande revolução do pensamento astronômico e científico da época.

Copérnico nasceu no ano de 1473 na cidade de Torun. Seu tio Lucas Watzenrode, que se tornou bispo de Vármia em 1489,

a diocese católica no extremo norte da Polônia, conseguiu uma indicação para Copérnico e seu irmão mais velho Andrew para trabalharem como cônegos na diocese de Frauenburg. No ano de 1511, Copérnico foi trabalhar nesta diocese, onde, entre outras coisas, começou a se desempenhar como administrador das terras da assembleia, e tinha como principais funções arrecadar impostos e administrar a justiça. Foi aqui que também encontrou a tranquilidade para se dedicar a astronomia. É possível que ele tenha escrito a sua obra principal “De Revolutionibus” em Frombork, onde existe até hoje uma catedral com vários anexos. Desde o começo de 1514, logo depois que escreveu seu “Comentariolus”, Copérnico alugou um aposento em uma das torres voltada pra a fachada da catedral em que se dedicou a estudar seus manuscritos.

## DE REVOLUNTIONIBUS

O livro monumental de Copérnico foi publicado em 1543 graças aos esforços de Georg Joachim Rheticus. No ano de 1539, Rheticus viajou para o norte da Polônia, em Frauenburg, a fim de conhecer Copérnico, o astrônomo que apresentava as ideias mais inovadoras da época. Ele levava como presente para o cônego três volumes lindamente encadernados da tipografia de Johannes Petreius, em Nuremberg, que estava interessado em publicar a obra de Copérnico. Mas as encadernações dos livros não conseguiram convencer Copérnico a publicar seu livro. Rheticus precisava de outra estratégia, assim, para conseguir persuadi-lo, pediu permissão para publicar uma introdução à astronomia de Copérnico. O livro de 70 páginas foi impresso na primavera de 1540 e levou o nome de “Narratio prima” ou “Primeira narrativa”. Nesta obra, Rheticus introduziu primeiro os problemas de um Sol em movimento e uma Terra fixa para depois mostrar que com o sol fixo os problemas diminuem. Passados 28 meses, ele conseguiu uma cópia do “De Revolutionibus” para levar a Nuremberg e começar a edição. Rheticus provavelmente foi o único discípulo de Copérnico. A primeira edição foi um pouco polêmica por causa de uma nota ao leitor o “ad lectorem” devido ao teólogo Andreas Osiander, da cidade de Nuremberg, e que foi o revisor da prova tipográfica. Neste texto, Osiander declara que é dever do astrônomo procurar melhores hipóteses para realizar cálculos e obter

resultados mesmo que o esquema completo não corresponda à natureza [11]. Esta nota aborrece os amigos de Copérnico, como o bispo Tiedemann Giese, que reclama que a publicação deve ser reimpressa. Rethicus comenta que isto foi feito para evitar que as pessoas achassem que o texto era contrário as Sagradas Escrituras. Incluso, se sabe que Rethicus escreveu um livreto de forma anônima onde citava Agostinho ao explicar que as Sagradas Escrituras tomavam emprestado o estilo popular para explicar facilmente os conceitos dados.

Estes acontecimentos mostram a dificuldade na época de publicar textos onde o *status quo* dos conhecimentos era modificado. É possível que Copérnico discordasse desta nota, pois, ao que parece, ele era um realista e acreditava que seu esquema heliocêntrico era na verdade a forma do Universo e não só um método de cálculo para melhores resultados. As ideias de Copérnico não foram perseguidas pela Inquisição e seu livro não foi proibido até 1615, devido à defesa de Galileu do modelo Heliocêntrico.

## ÉPICICLOS E MAIS ÉPICICLOS

Copérnico teve como fonte de estudo o modelo geocêntrico de Ptolomeu e conhecia muito bem o uso dos epiciclos e no modelo que ele propôs não os abandonou completamente. A principal crítica de Copérnico ao modelo Ptolomaico foi o equante. Como foi dito, o equante de Ptolomeu produzia um movimento uniforme sobre um ponto imaginário do círculo que carregava o epiciclo planetário permitindo que o planeta se movimentasse mais rápido num dos lados do círculo que no outro. Existe também a ideia de que o sistema de Ptolomeu tinha-se convertido numa grande complexidade pelo aumento indiscriminado de epiciclos para explicar de forma cada vez mais precisa o movimento dos planetas. Mas, realmente agora, podemos concluir que isto era um mito, não só pelo fato mencionado de Copérnico não ter eliminado completamente os epiciclos, mas também pelos estudos recentes de historiadores da ciência como Owen Gingerich [11]. Com este objetivo, Gingerich reconstruiu as “tabelas Alfonsinas”, que tinham sido feitas por encargo do rei Alfonso X da Espanha, apelidado “o sábio”. Por volta do século XIII, o rei contratou cerca de cinquenta astrônomos para construir as tabelas. As simulações computacionais feitas por Gingerich mostraram que as tabelas Alfonsinas foram fei-

tas com astronomia Ptolemaica sem introduzir epiciclos em epiciclos. Portanto, pensar que o modelo de Copérnico tinha como objetivo melhorar a eliminação de epiciclos é falso.

Outra questão interessante do modelo do “De Revolutionibus” é sua insistência no uso da já antiga trajetória circular. Isto é um legado da física aristotélica que ainda se encontrava presente no modelo copernicano. Por outro lado, Copérnico tinha poucos dados com precisão suficiente para reconstruir a órbita de um dado planeta. Assim, o conceito de epiciclo e a trajetória circular eram realmente muito usados no século XVI e faltava a chegada de um novo século para que um Kepler e um Galileu apresentassem resultados que realmente mostrariam a efetividade lógica e observacional do modelo Heliocêntrico.

## TYCHO BRAHE

Tycho Brahe nasceu no ano de 1546 numa família nobre da Dinamarca. Quando jovem, em 1560, observou um eclipse parcial do Sol, o que o deixou maravilhado, e ao se informar que aquele acontecimento podia ser previsto ficou ainda mais envolvido pela astronomia da qual faria seu trabalho por toda sua vida. Depois de discutir com sua família, a qual queria que seguisse carreira diplomática, se dedicou completamente à astronomia. Tycho foi um astrônomo basicamente observacional e construiu instrumentos cada vez mais precisos para determinar os movimentos de objetos celestes. Em 11 de novembro de 1572, observou uma estrela nova, o que chamamos hoje de Supernova, que brilhava de forma impressionante. Depois de uns meses ela desapareceu, o que era impossível no Universo de Aristóteles de estrelas fixas. Depois, em 1577, observou um cometa, e em ambos os casos, Tycho fez medidas muito acuradas permitindo determinar que a distância dos eventos era muito superior à distância da terra-lua. Mas, uma pergunta se apresentava: *como poderia acontecer isto na região supra lunar de Aristóteles?* Isto realmente era uma contradição ao modelo aristotélico geocêntrico. Tycho não gostava muito desde modelo, mas, cria na terra como o centro do Universo. Ele apresentou um modelo híbrido, no qual a terra era o centro do Universo e o sol girava em torno da Terra e todos os planetas conhecidos giravam em torno do sol.

## O TRABALHO DE KEPLER

Nossa história se faz mais emocionante quando entra em cena Johannes Kepler, que nasceu em 27 de dezembro de 1571, na cidade de Weil, numa família altamente complicada. Mas Kepler conseguiu o benefício dos fundos dados pela Igreja Protestante para continuar seus estudos. Aos 17 anos, no ano de 1588, se transferiu para a prestigiosa Universidade Luterana de Tübingen. Ele se preparava para se converter num sacerdote luterano, no entanto, seu futuro mudou no ano de 1594, quando foi indicado por seus professores como professor de matemática de uma escola luterana em Graz, capital da província austríaca da Estíria. Esse trabalho incluía o título de matemático oficial de Estíria e, portanto, tinha que preparar um calendário oficial. Kepler teve grande sucesso, pois fez previsões de uma invasão turca e uma frente fria. Nesta época astrologia e astronomia não tinham limites completamente definidos.

Antes de iniciar seu trabalho como professor, Kepler chegou a uma de suas ideias mais importantes. A da simetria celeste. Kepler gostava da ideia do sol como centro do Universo, mas uma coisa que se revelava curiosa era como explicar o número de planetas e as distâncias entre eles. Pensando neste problema, ele reparou que existem cinco sólidos perfeitos ou platônicos: triângulo, cubo, tetraedro, octaedro e dodecaedro. As faces de todos estes sólidos são iguais e se diz que são sólidos perfeitos. Além disso, cada sólido pode ser circunscrito ou inscrito numa esfera. Assim, como na sua época existiam cinco planetas, Kepler chegou à conclusão de que cada sólido deveria ser associado a um planeta. Seu modelo foi razoavelmente bem sucedido e conseguia prever movimentos com alta precisão. Ele publicou seus resultados no ano de 1596, na sua primeira obra chamada: “Mysterium cosmographicum” [11].

Seguindo a história, no ano de 1598, saiu o decreto da contra-reforma que obrigava os professores luteranos de Graz a abandonar a cidade. Assim Kepler vai para Praga ser ajudante de Tycho Brahe. Depois de doze anos ele publica sua maior obra: “Astronomia Nova”. Kepler inclui nos seus estudos teóricos dados observacionais como se faz na ciência moderna e tenta procurar uma união entre a física e a astronomia, o que é inovador na época.

Seu mestre de astronomia, Mastlin critica esta atitude, pois na época de Kepler astronomia era a procura do cosmos com a geo-

metria e não com causas materiais ou físicas. Isto certamente pela influência de Aristóteles, que acreditava que a abóbada celeste era preenchida por éter ou quintessência e que as leis da Terra não podiam ser as mesmas que as leis celestes. Mas Kepler continuou com sua tentativa e incluso afirmou que o Sol era a fonte que causava o deslocamento dos planetas e que os planetas mais próximos se movimentavam mais rápidos porque a força era maior do que nos planetas que estavam mais afastados, a força diminuía com a distância. Uma intuição próxima da lei de Newton da Gravitação. Essa força era uma coisa misteriosa, mas mesmo assim era uma causa física completamente revolucionaria.

## A ÓRBITA DE MARTE

Quando Kepler chegou ao palácio de Tycho, o encontro entre os dois nos primeiros 18 meses foi completamente diferente do convite cordial que Tycho tinha feito a Kepler. Mesmo assim Tycho propôs que o novo ajudante estudasse a órbita de Marte, que era considerado um dos planetas com maiores mudanças de movimentos retrógrados. Kepler com sua arrogância parecida à de Tycho falou que em pouco mais de uma semana ele resolveria o problema, mas foram oito anos para chegar a uma solução.

No ano de 1600, Gilbert, na Inglaterra, escreveu um livro chamado: “Magnetismo”, onde mostrava que a Terra se comportava como um ímã, essa ideia fascinou Kepler, que pensou: por que o sol não se podia ser também como um ímã e o magnetismo ser a causa misteriosa do movimento planetário? Kepler mencionava que procurava uma causa física para o movimento dos planetas, como um peso é responsável pelo mecanismo do relógio ou uma alavanca permite movimentar um objeto.

No ano de 1609, Kepler publica a mencionada obra “Astronomia Nova”, na qual mostra seus resultados da análise dos dados de Marte. Ele exhibe na obra a grande quantidade de testes feitos para tentar explicar a órbita, ora ele usa uma forma oval, ora uma forma com epiciclos etc, mas é só com o uso da elipse que chega a uma conclusão de correspondência entre os dados e a matemática. Nesta obra, ele apresenta o que hoje conhecemos como as duas primeiras leis de Kepler. A primeira lei que é a das elipses com o

Sol num dos focos, e a segunda lei, à qual Kepler chegou depois de considerar o Sol como causa do movimento com uma força que diminuía com a distância. A segunda lei ficou: “*Um planeta percorre áreas iguais em tempos iguais*”. Claro que para esta conclusão obtida os dados de Tycho sobre velocidades planetárias foram muito importantes na pesquisa kepleriana.

O Sol para Kepler tinha três funções: O Sol era a fonte de movimento, a causa física; era o centro geométrico; e o centro metafísico, representando o poder divino. Uma questão importante é que Kepler sempre foi inspirado numa profunda religiosidade e suas ideias entre míticas e objetivas foram revolucionárias, e constituem até hoje bases para a ciência moderna.

No ano de 1619, Kepler publicou seu livro: “*Harmonice mundi*” [7,11], no qual voltava a sua ideia de simetria Universal ou a ideia dos sólidos platônicos. Mas como as órbitas não eram mais círculos, e sim elipses. Ele escolheu como ponto de harmonia a comparação das velocidades máximas e mínimas dos planetas com a escala musical. Uma ideia errada desde o ponto de vista físico moderno, mas que não deixa de ser bela. Para Kepler, Saturno correspondia a uma terça maior, Júpiter a uma terça menor, Marte a uma quinta etc, e assim, despertou de novo a ideia de Pitágoras da relação do número com a abóbada celeste. Kepler misturou a velocidade dos planetas para obter outras comparações com a escala musical de forma que os planetas pudessem, até de forma exagerada, cantar. A música celeste etérea.

Kepler pensou que alguma relação entre a distância e o tempo para percorrer a órbita deveria existir, e depois de tentativas, encontrou que a razão entre o quadrado do período de um planeta (quadrado do tempo que demora o planeta para realizar uma volta completa a sua órbita) e o cubo de sua distância média ao sol era uma constante. Esta é a terceira lei de Kepler. Será de grande utilidade para Newton derivar sua lei de gravitação universal.

Kepler ainda publicou, entre outros trabalhos, dois de grande importância. Suas “tabelas rudolfinas”, nas quais também publicou dados de estrelas de Tycho e outras que ele mesmo determinou, e também mostrou métodos para determinar a distância aos planetas. Seu outro trabalho foi um livro de didática de astronomia: “*Epítome da astronomia Copernicana*”, que se converteu num dos textos mais populares de astronomia da época [11].



## AVALIAÇÃO E FÓRUM DE DISCUSSÃO

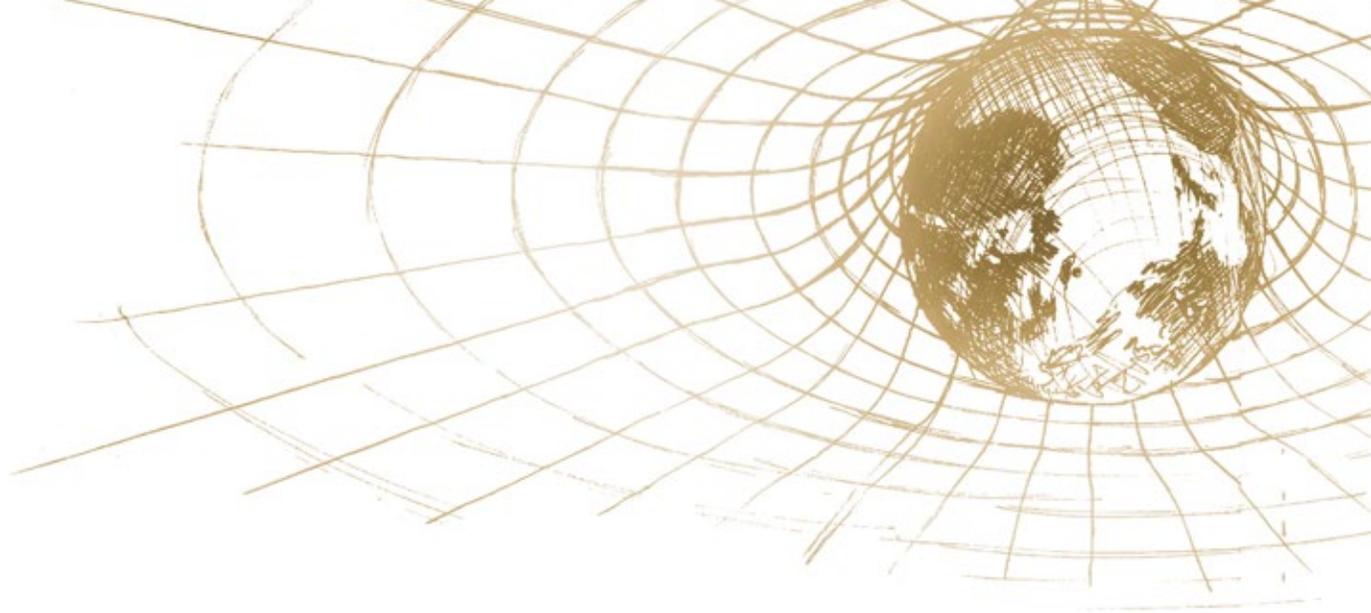
Faça leitura do texto

<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol3/Num2/a09.pdf>

Quais são as duas primeiras leis de Kepler?  
Como foram descobertas e quais suas implicações?



# CAPÍTULO IV



## GALILEU GALILEI

O cientista Galileu Galilei nasceu no ano de 1564, e constitui um ícone da ciência, ele foi realmente o primeiro cientista moderno que misturou matemáticas e experimentos para poder descrever o funcionamento da natureza de forma precisa.

Representa um ícone pelo seu aberto confronto com a filosofia aristotélica, o que causou um processo por parte da Inquisição, que só terminou no ano de 1992 pela atuação do venerável João Paulo II, isto é, 380 anos após o início do julgamento. Galileu foi contemporâneo de Kepler, mas a discussão deles se limitou a algumas cartas, nas quais Galileu contou suas grandes descobertas. Em geral, ele não gostava da atitude de como procedia Kepler ao construir seus resultados cheios de uma busca pela volta a certos cânones platônicos. Galileu nunca aceitou as órbitas elípticas de Kepler, pois preferia adotar um modelo circular.

Galileu entrou na Universidade de Pisa no ano de 1581 para estudar medicina, mas terminou não concluindo, pois sua paixão pela filosofia natural o fez desistir, e no ano de 1585, voltou a sua casa para dedicar-se por tempo completo as suas pesquisas pessoais.

Conta-se que no ano de 1582 durante uma missa em Pisa observou um candelabro se movimentar de um lado a outro o que foi um impulso para intuir que possivelmente esse movimento que parecia periódico tivesse muito a mostrar. Galileu construiu pêndulos de pesos e comprimentos diferentes e estudou o período de oscilação. Aqui encontramos já uma atitude moderna da ciência reproduzir o fenômeno de forma controlada para poder estudar detalhadamente as características das variáveis do pêndulo.

Galileu descobriu que o período de oscilação dependia dos comprimentos dos pêndulos, mas não do peso, algo realmente surpreendente, se lembrarmos que para Aristóteles o corpo mais pesado tenderia ao repouso de forma mais rápida. Isto foi um sinal que mostrava que o modelo de Aristóteles realmente não correspondia com as experiências da natureza, e só era um erro do uso e confiança excessiva do senso comum.

Outra questão que beira o mito é a questão das experiências da torre de Pisa. Conta-se que Galileu reuniu uma grande quantidade de professores aristotélicos e seus alunos e mostrou que corpos de diferentes materiais, uns pesados e outros menos densos, chegavam a terra quase no mesmo instante. O efeito do ar sobre objetos como uma folha de papel era mais acentuado que sobre uma bola de cobre. Mas se fizermos, hoje em dia, os experimentos no vácuo extraindo o ar, comprovaremos que o tempo de queda não é a função do peso e ambos os corpos atingem o solo no mesmo tempo. Este resultado também vai contra das ideias aristotélicas do movimento. Estava provado que na queda livre dos corpos a velocidade não era função do peso.



Figura 5. Capa do primeiro livro de Galileu onde apresenta suas descobertas astronômicas derivadas do uso de seu telescópio.

## GALILEU CIENTISTA MODERNO

Galileu foi um cientista moderno pelos métodos empregados, considerando as experiências como fundamentais para determinar propriedades da natureza. Um belo exemplo a respeito resulta no estudo de movimentos de projéteis. Com este objetivo, Galileu construiu um plano inclinado. Quando o corpo cai pela rampa adquire uma aceleração e pode sair do plano com uma velocidade que Galileu teve o engenho de dividir em duas componentes. Uma componente horizontal de velocidade constante e um movimento vertical de queda livre. Sendo a chamada trajetória uma curva parabólica. Galileu

mostrou como construir e entender um movimento da natureza de forma objetiva. Sua metodologia, com o uso da matemática para explicar os fenômenos resultaram complementares e úteis. A natureza está escrita na linguagem da matemática, sendo que as formas simples são as que melhor se ajustam para explicar o movimento. Com isto, segundo Koyré [10], Galileu realiza o platonismo, mas não significa aqui uma dependência aos conceitos platônicos, mas sim, um uso destes conceitos para construir uma metodologia superior que irá ser o fundamento do século XVIII - o século de Newton.

## O TELESCÓPIO

Galileu foi um hábil experimentador e sempre estava atento aos novos desenvolvimentos tecnológicos de sua época. O telescópio se converteu numa novidade da época e Galileu decidiu que esse instrumento podia ser útil não só como curiosidade cotidiana, mas como arma da ciência. Ele melhorou o telescópio e o apontou para os céus de forma a observar o que antes ninguém tinha visto. Seu sucesso foi tamanho, que no ano de 1609, Galileu convidou o senado de Veneza para observar do alto da torre de São Marcos objetos distantes frisando seu potencial como arma de defesa marítima. Com isto, ele ganhou um posto permanente na Universidade em que trabalhava em Pádua e o dobro do salário. Galileu era, pelas histórias que conhecemos, um homem com altas ambições sociais.

Com seu telescópio, Galileu observou que a lua não era perfeita, mas cheia de crateras e imperfeições. Como um corpo celeste seria imperfeito na cosmologia aristotélica medieval? Também descobriu que o planeta Vênus tinha fases, o que só era possível num Universo Heliocêntrico. Outra observação contra Aristóteles. Também descobriu as quatro luas de Júpiter, que chamou de “medicianas” para impressionar a Cosimo II de Medice, grão-duque da Toscana. No ano de 1610, publicou seu livro “Sidereus Nuncius”, ou “Mensageiro Sideral”, no qual explicava suas descobertas astronômicas. Em 1623, Galileu publicou o livro “Il Saggiatore”, no qual respondia a uma polêmica com o padre jesuíta Orazio Grassie.

**TABELA1.** CÁLCULOS DE GALILEU E CÁLCULOS MODERNOS SOBRE MEDIDAS DO PERÍODO DE ROTAÇÃO DAS LUAS DE JÚPITER.

Jupiter's moon	I (Io)	II (Europa)	III (Ganymede)	IV (Callisto)
Galileo, 1612	1d, 18h, 26m	3d, 13h, 22m	7d, 3h, 26m	16d, 12h, 21m
Galileo, 1617	1d, 18h, 28.6m	3d, 13h, 17.7m	7d, 3h, 58.2m	16d, 17h, 58.7m
Modern Values	1d, 18h, 28.6m	3d, 13h, 17.9m	7d, 3h, 59.6m	16d, 18h, 5.1m

Galileu afirmava que era o escolhido, pois era o único, na época, a ter acesso as observações astronômicas e as novas descobertas, e portanto, Orazio não podia questionar suas acuradas pesquisas. Aqui encontramos uma das atitudes que levara Galileu à Inquisição, sua excessiva autoconfiança.

Galileu tinha ganho grande prestígio, mas é curioso lembrar que este prestígio atingia as altas esferas do Vaticano. O Colégio Romano, o Papa Paulo V, Matteo Barberini, o futuro Papa Urbano VIII etc, todos celebravam e parabenizavam os trabalhos de Galileu [7].

## GALILEU E A IGREJA

Galileu pensava que suas descobertas eram suficientes para mostrar de forma categórica que a Terra se movimenta em torno do Sol e mudar a interpretação das Sagradas Escrituras, que em muito eram apoiadas pela filosofia escolástica da Idade Média. O grande Galileu insistiu na reinterpretção das Sagradas Escrituras fazendo uso das novas ideias. Isto naturalmente desagradou a Igreja, mas mesmo assim, muitos do clero, como o já mencionado cardeal Matteo Barberini tinham especial consideração pelas pesquisas galileanas. O colaborador de Barberini, Cardeal Ciampoli escreveu a Galileu que Barberini

Gostaria de Galileu que usasse de maior cautela, sem tentar ir além dos argumentos usados por Ptolomeu e Copérnico, e sem exceder as limitações da física e da matemática. Pois a explicação das Escrituras Sagradas pertence aos teólogos, e se novas ideias para sua interpretação foram sugeridas, mesmo que por uma mente admirável, nem todo mundo terá a frieza de adotá-las automaticamente. [7]

Entre os intelectuais existiu uma crescente revolta contra o sistema de Copérnico e contra as novas ideias. Isto aumentou por causa de uma publicação por parte de Foscarini, um partidário das ideias de Galileu. Nestas circunstâncias de rejeição, Galileu decidiu ir a Roma, e em no final do ano de 1615 procurou conversar com os cardeais mais influentes, mas não conseguiu. Sua estratégia seria mostrar uma prova do movimento da Terra de forma incontestável, mas sua prova estava errada e resultou muito fraca. A prova escolhida por Galileu foi explicar a origem das marés como consequência do movimento da Terra em torno do sol.

A Congregação do Índice da Santa Inquisição declarou que o livro de Foscarini devia ser proibido, assim como todas as ideias que considerassem o Sol como centro do Universo e a Terra movimentando-se em torno do Sol. O sistema de Copérnico, apoiado por Galileu, era contrário aos ensinamentos das Sagradas Escrituras.

No entanto, na declaração da Inquisição de 25 de março de 1616 não aparecia diretamente o nome de Galileu, é possível que a principal causa tenha sido a interseção do Cardeal Barberini. Mas Galileu Galilei foi advertido de não publicar mais sobre questões relacionadas ao sistema de Nicolas Copérnico. Mas isso não esgotou as contínuas polêmicas com os defensores da teoria geocêntrica, e em muitos casos, Galileu respondia mediante seus discípulos. No ano de 1623 seu amigo Barberini se converteu no Papa Urbano VIII e Galileu conseguiu publicar seu já mencionado “*Il Saggiatore*”, e também aproveitou para pedir permissão para publicar um novo livro onde compararia o modelo ptolemaico com o copernicano. O Papa cedeu ao pedido impondo fortemente se respeitasse a posição de Deus como causa primeira. O resultado foi o livro “*Diálogo sobre o fluxo e refluxo das marés*”.

Para finalizar esta publicação, Galileu tinha que conseguir a liberação da Congregação do Índice em Roma. Amavelmente, foi recebido várias vezes pelo Papa Urbano VIII em audiência e parecia tudo certo para a publicação. O Papa solicitou que o título fosse trocado para “*Diálogo sobre os dois grandes sistemas do mundo*” e que no texto não fossem mencionadas às Sagradas Escrituras, o que poderia causar controvérsias quanto a sua interpretação. A ideia era apresentar o modelo de Copérnico como uma hipótese alternativa para realizar cálculos acurados e com boas bases experimentais, mas não cair na questão metafísica de reinterpretar os conceitos aceitos da

época. Lembremos que antes de ser o Papa Urbano VIII, Matteo tinha advertido a Galileu que as mudanças não eram automáticas.

As questões burocráticas para a publicação foram superadas, e em 1632 saiu a publicação que em sínteses era um diálogo entre três amigos: Salviati, Sagredo e Simplicio. O primeiro era o porta voz de Galileu, o segundo era um amigo neutro que terminava concordando com as razões de Salviati, e o terceiro representava ao filósofo aristotélico medieval e retrogrado.

No texto, Galileu terminava com seus argumentos mofando do sistema de Simplicio, e muitos observaram nele a figura do Papa, assim o escândalo começou, e no mesmo ano a Congregação do Índice proibiu o livro. O Papa ficou muito chateado pelo texto nada amigável do servo católico e a Inquisição o condenou publicamente a rejeitar todo tipo de ideias contrárias aos ensinamentos da Igreja e não mais impulsionar essas pesquisas. A igreja decidiu que prisão seria domiciliar. Galileu aceitou rejeitar suas investigações e aceitar todo o disposto pela Igreja. Mesmo assim ele voltou a se dedicar, dentro da prisão de sua casa, às pesquisas de queda dos corpos e em 1638 publicou seu livro “Duas Novas Ciências”, no qual apresentou, de forma clara, seus argumentos do movimento parabólico como produto de combinar um movimento horizontal com velocidade constante e um movimento vertical com aceleração constante em queda livre.

## O PRINCÍPIO DA INÉRCIA

Vamos considerar algumas ideias que permitiram estabelecer o princípio da inércia na forma em que Newton propôs na sua “Principia”. Para isto, vamos nos remontar ao início do século XVII com a personalidade de Giordano Bruno, que estudou o movimento de um objeto lançado sobre a superfície da Terra e outro lançado sobre uma superfície em movimento regular sem mudanças bruscas, por exemplo, sobre um barco que se movimenta seguindo uma linha reta. Bruno notou que em ambos os casos o objeto lançado voltava à mão da pessoa, e ainda, se a experiência fosse feita numa habitação sem janela dentro do barco não poderíamos distinguir se a superfície estava em movimento ou fixa. Este argumento foi usado para apoiar a tese da Terra em movimento. Para explicar o mesmo comportamento do objeto, em ambas as situações propôs que a superfície comunica

um “impetus” sobre o objeto lançado para mantê-lo ligado mecanicamente a ele. Este fato de comunicação mecânica desvincula fortemente o caráter metafísico do movimento.

Outra experiência proposta por Giordano Bruno na qual fica claro o conceito de sistema de referência é a seguinte: imagine que temos duas pessoas, uma na beira do mar sobre um cais, e a outra em movimento sobre um navio perto do cais, de alguma forma, em um dado momento, ambas as pessoas encostam as mãos e deixam cair desde o mesmo lugar aproximadamente um objeto a uma altura dada, qual será a trajetória dos objetos em cada caso? Bom, a solução é simples, para o objeto que cai da pessoa que está fixa no cais vista por outra pessoa que está no cais, o objeto cai em linha reta vertical. Mas o objeto que cai da pessoa que está em movimento, vista desde o cais, fará um movimento horizontal e vertical, curvo (parabólico). Giordano Bruno, observando isto, propõe explicar o fato pensando que o sistema navio comunica ao objeto um *impetus* ou velocidade. Quando o contato entre os corpos cessa a velocidade do corpo começa a diminuir até adquirir o repouso na superfície da Terra (a Terra comunica este repouso). Com estas ideias, chegamos a uma nova forma de ver a natureza muito diferente da aristotélica [9].

Os conceitos e ideias de Giordano Bruno foram de suma importância para entender Descartes, que propôs o princípio de inércia de forma similar a que é usada hoje. Observemos antes algumas de suas ideias em torno da natureza. Para ele, os objetos unicamente tinham extensão e as propriedades da cor, tamanho, quente, frio etc eram propriedades subjetivas sem ser propriedades intrínsecas do objeto mesmo.

O fundo da postura de Descartes é metafísica, pois procura as propriedades da coisa em si, diferentemente de Galileu, que parte de observações para chegar às conclusões. Mas em ambos os casos terminaram libertando os conceitos do domínio de Aristóteles. Na obra do grande filósofo Descartes a natureza é representada como geométrica e mecânica. Seus estudos de geometria e óptica foram de grande importância. Parece uma contradição partir da metafísica para chegar a um conceito próprio do domínio da ciência como é o princípio da inércia, e também dizer que ele foi mecanicista, sendo que tem um fundo metafísico, mas não tem nenhuma contradição, pois o método cartesiano é da razão pura onde se impõe em primeiro lugar a lógica e a razão como fontes de conhecimento, defendendo

o fato que para produzir movimento é necessário o contato entre os corpos. Como Koyré menciona [10], a física de Descartes é a física das colisões e aqui está a grande ponte entre sua ideia metafísica inicial e seu mundo mecânico, e tipo geométrico e também mecânico. O princípio da inércia de Descartes é dado na sua obra “Geometria”:

“Como Deus não está sujeito a mudanças, agindo sempre da mesma maneira, podemos chegar ao conhecimento de certas regras a que chamo as leis da natureza, e que são as causas segundas, particulares, dos diversos movimentos que observamos em todos os corpos, e da importância dessas leis. A primeira é que cada coisa particular, enquanto simples e indivisa, se conserva o mais possível e nunca muda a não ser por causas externas. Por conseguinte, se uma parte da matéria é quadrada, ela permaneceria assim se nada vier a alterar a sua forma; e se estiver em repouso, nunca se moveria por si mesma. Mas, uma vez posta em andamento, também não podemos pensar que ela possa deixar de se mover com a mesma força enquanto não encontrar nada que atrase ou detenha o seu movimento. De modo que, se um corpo começou a mover-se, devemos concluir que continuaria sempre em movimento, e que nunca pararia por si próprio”. [9]

Notemos que dentro deste princípio de inércia o movimento infinito está incluído, um tipo de movimento que na natureza de Aristóteles não deveria existir. Assim, este princípio, realmente, é por si inovador.

## NEWTON

É possível que Newton seja o maior físico da história do pensamento humano. O trabalho desenvolvido por ele é a fundamentação da mecânica na qual já tinha alguns resultados muito importantes como os trabalhos de Galileu e Kepler alguns anos antes. Vamos considerar alguns dados biográficos para depois verificarmos historicamente sua contribuição científica.

Newton nasceu no dia de natal, em 1642, na cidade de Lincolnshire. Durante seus anos escolares não teve um aproveitamento nada impressionante, mas tampouco foi ruim. Sua família tinha alguns re-

cursos e graças à intervenção de Stokes, um diretor de escola local, Newton aprendeu geometria e foi aceito no Trinity College de Cambridge no ano de 1661. Sua educação foi basicamente o *trivium* (retórica, gramática e lógica) e o *quadrivium* (aritmética, geometria, música e astronomia) [7]. Ele estudou arduamente o trabalho matemático de Descartes nas obras publicadas por Frans Van School, mentor de Huygens, e divulgador da obra matemática de Descartes. Nas mãos de Newton, a obra de Descartes foi uma ponte para a teoria de fluxões, que hoje é conhecido como cálculo infinitesimal. Newton se decidiu pela área das ciências. No entanto, se dedicara a grandes pesquisas em alquimia e teologia. Entre 1665 até quase 1667, a Europa passou por uma crise, por causa da peste bubônica e o incêndio em Londres, o que obrigou Newton a voltar para sua casa em Woolsthorpe, e foi neste período, que a criatividade de Newton nas ciências experimentais e teóricas atingiu limites nunca vistos na nossa história.

Seu mentor em Cambridge, o primeiro professor Lucasiano Jhon Barrow mostrou-lhe alguns estudos de óptica. Durante os anos da peste, em Woolsthorpe, Newton fez experimentos com prismas. Ele sabia que a luz branca ao passar por um prisma se separava nas cores do arco-íris, mas Newton foi além de uma simples explicação qualitativa e passou a um trabalho quantitativo conseguindo mostrar que cada cor se propagava com diferente velocidade dentro do prisma, o que causa um desvio com ângulos de refração diferentes ao sair do prisma. Também mostrou que quando as cores do arco-íris se combinavam entre si, a cor resultante era a branca, o que realmente ia contra as ideias da época, onde se pensava que as cores eram o produto da luz que se espalhava ou refletia sobre as superfícies coloridas. Outra questão importante abordada por Isaac Newton foi a matemática, em especial ele inventou um método para tratar quantidades infinitesimais, método que denominou de fluxões por tratar com taxas de câmbio. Constitui o que hoje conhecemos como o cálculo infinitesimal. Newton não publicou seus resultados por muitos anos.

Outra questão foi o problema do movimento circular. Newton pensou que um corpo em movimento circular ao redor de um ponto fixo podia ser explicado pensando na existência do equilíbrio entre uma força centrífuga (para fora) e uma força de tensão para dentro, por exemplo, uma pedra atada a uma corda que gira circularmente em torno de um ponto, no qual se encontra a mão de alguém que produz uma tensão para dentro.

Mas Newton reparou que esta explicação não satisfaz o princípio de inércia já conhecido e formulado por Descartes e Galileu. Este princípio mostra, que se a corda é eliminada, a força centrífuga (se existisse) deveria atuar sobre a pedra, fazendo com que esta se movimentasse radialmente para fora e não em linha reta tangencialmente à curva circular, como realmente acontece.

Assim, Newton imaginou que uma força centrípeta (para dentro) produzida pela mão de uma pessoa e não por uma força centrífuga era o correto, e que esta força continuamente deslocava a pedra produzindo o movimento circular. Extrapolando este resultado, observamos que isto pode acontecer com a lua em torno da Terra. Se a Terra produz uma força sobre a lua, que continuamente a desvia para um movimento circular que a mantém em órbita, esta ideia pode se aplicar a outros planetas. A força misteriosa era a chave para desvendar o movimento planetário de forma mecânica. Chegamos então à questão da gravidade.

**TABELA 2.** LIVROS QUE NEWTON USOU NA DÉCADA DOS ANOS 1660 NO TRINITY COLLEGE.

René Descartes	<i>Geometria, à Renato des Cartes</i> , Amsterdam, 1659-61
François Viéte	<i>Opera Mathematica</i> , Leiden, 1646
Fran van Schooten	<i>Exercitationum Mathematicarum</i> , Leiden, 1657
William Oughtred	<i>Clavis Mathematicae</i> , 3d ed., Oxford, 1652
John Wallis	<i>Operum Mathematicarum Pars Altera</i> , Oxford, 1656
John Wallis	<i>Commercium Epistolicum</i> , Oxford, 1658

## PRINCÍPIOS MATEMÁTICOS DA FILOSOFIA NATURAL

Vamos revisar de forma rápida e concisa o conteúdo do livro, talvez, o mais importante da história da física: “Os princípios matemáticos da filosofia natural”, publicado no ano de 1687, depois de um longo período de reflexão por parte de Newton. O livro começa definindo conceitos como massa, quantidade de movimento: como o produto da massa vezes a velocidade e o princípio da inércia. Com estes conceitos Newton introduz o conceito de força, que é a ação exercida sobre um corpo de modo a mudar sua quantidade de movimento.

Newton enfatiza que para mudar a quantidade de movimento existem duas formas: mudando a magnitude ou mudando a direção. Imagine que um carro aumenta sua velocidade ao dobro numa estrada sem curvas, o que acontece é que a quantidade de movimento também dobra. Se o carro se desloca sobre uma curva mantendo a mesma velocidade, o que acontece pelo princípio da inércia é que se precisa de uma força que desvie a direção do carro para fazer a curva, esta força é o que Newton denominou de força centrípeta.

Para completar e sintetizar as características dos movimentos são necessárias certas leis gerais de onde se possa derivar um grande número de resultados e previsões. Para isto, Newton definiu espaço e tempo absolutos. O espaço é definido pela geometria euclidiana e é independente do movimento de qualquer objeto. O tempo também é independente de qualquer objeto. O tempo flui sem parar, de forma absoluta, sem ser perturbado pela velocidade ou existência de movimentos de objetos de qualquer forma e composição, seja na Terra ou na grande abóbada celeste. As três leis, hoje chamadas de leis de Newton, são:

**1. Lei da Inércia:**

*Todo corpo permanece em seu estado de repouso ou movimento uniforme em linha reta, a menos que seja obrigado a mudar seu estado por forças impressas nele.*

**2. Lei da ação e reação:**

*A mudança do movimento é proporcional à força motriz impressa; e se faz segundo a linha reta pela qual se imprime essa força.*

**3. Lei de ação e reação**

*A uma ação sempre se opõe uma reação igual, ou seja, as ações de dois corpos são iguais e se dirigem as partes contrárias.*

Com estas leis do movimento, Newton construiu seu edifício conceitual e dividiu seu trabalho em três livros. De forma resumida, o “Livro I” trata do já mencionado movimento circular com grande número de aplicações, o “Livro II” trata do movimento de objetos com atrito, e no “Livro III” é tratado o problema da gravitação universal. A grande intuição newtoniana levou a pensar que as leis que governam fenômenos terrestres devem governar fenômenos celestes. Complementarmente podemos dizer que Newton unifica conceitualmente as causas do movimento de objetos em queda

livre ou parabólicos com o movimento planetário. Isto é, Newton unifica os trabalhos de Galileu e Kepler, explicando-os pelas mesmas leis. Estas leis são as mesmas que estudamos nos cursos de Física básica e, que são repetidas inúmeras vezes nas faculdades, mesmo 300 anos após sua descoberta.

## ALGUNS ARTÍFICES DA MECÂNICA NEWTONIANA

A influência de Newton no pensamento científico e filosófico de sua época foi imensa. A síntese newtoniana revelou a natureza de forma racional e ordenada a um nível nunca antes conseguido. As formas abstratas da matemática eram representações de movimentos de objetos reais.

Em seguida, consideraremos algumas das principais contribuições de alguns dos maiores representantes das ciências físicas e matemáticas após Newton.

## EULER

Euler nasceu no ano de 1707, e sua obra mestra em mecânica foi: “Mechanica sive motus scientia Analytice exposita”, publicada no ano de 1736, e constitui o primeiro grande tratado de mecânica onde os problemas são tratados com rigorosidade matemática, dando novas aplicações às leis do movimento para vários casos de caráter altamente original.

Ele usou para a força a palavra potência e distinguiu entre potência absoluta e relativa. Um exemplo da primeira é a gravidade, que atua indiferente sobre os corpos, estejam eles em movimento ou repouso. Por outro lado, a potência relativa já dependia da velocidade do corpo. Euler citava o fato de um objeto estar na correnteza de um rio e a potência relativa cessar quando a velocidade do corpo fosse igual a da correnteza. Neste trabalho, Euler desenvolve a mecânica de uma partícula. No ano de 1744 usou o princípio dos extremos para a dinâmica de uma partícula. Euler tomou como base o trabalho de Maupertuis, que tinha usado este princípio de extremo no caso da propagação da luz [12].

Euler também fez contribuições na mecânica de corpos rígidos. No ano de 1760 publicou o livro: “Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum”. Nesta obra, ele retoma os princípios de sua *Mechanica* de 1736, e depois, define um sólido rígido como sendo aquele corpo que mantém suas partes a distâncias relativas fixas; a mesma definição que usamos hoje. Também introduz o conceito de centro de massa e distingue este conceito do centro de gravidade. Euler define o momento de inércia e determina esta quantidade para vários sólidos homogêneos. Ademais, ele trata dos eixos principais da inércia e estuda em detalhe a rotação de corpos rígidos.

Ao investigar a rotação de um corpo rígido livre, ele separa seu movimento em o movimento do centro de massa ou inércia e o movimento do corpo rígido em torno do centro de massa. Dessa forma, consegue determinar as equações gerais do movimento de um sólido rígido. Outra de suas grandes contribuições está no equilíbrio de fluidos. No texto dirigido à Academia de Berlim, no ano de 1755, estuda minuciosamente a seguinte questão: sendo dadas todas as forças que atuam sobre os elementos de um dado fluido juntamente com a relação que existem em cada ponto do fluido da densidade e da elasticidade, determinar a pressão sobre todos os elementos do fluido para manter ele em equilíbrio de forças. Em outros dois trabalhos do ano de 1755 estuda os aspectos dinâmicos nos quais propõe o método até hoje usado para determinar o movimento de fluidos, o chamado: “método de Euler da hidrodinâmica”. Ele construiu um edifício fabuloso com as leis de Newton dando fundamento matemático a uma grande quantidade de problemas aplicados.

## LAGRANGE

Louise Lagrange nasceu em Turim no ano de 1736, onde começou suas pesquisas matemáticas, mas logo depois viajou a Berlim, influenciado por Euler, e no ano de 1787 foi a Paris para organizar o ensino da análise na *Ecole Polytechnique*. Lagrange publica no ano 1788 sua obra mestra: “*Mécanique Analytique*”, onde faz uma exposição de praticamente todas as áreas da mecânica. Seu tratado é uma forte afirmação da racionalidade newtoniana. O lado matemático está muito presente em sua mecânica, o que o levou a afirmar que “Nenhum diagrama será encontrado neste trabalho... mas uni-

camente construções algébricas inerentes a processos uniformes e regulares. Aqueles que amam a análises repararam que a mecânica é uma área desta e me agradecerão por estendê-la” [12].

A obra de Lagrange contém muitas notas históricas, entre elas, no que diz respeito à estática, ele menciona que na decomposição de forças foi Roberval que usou este método antes de Stevin. Lagrange cita Arquimedes, Aristóteles e Nicomendes em relação a composição de movimento, para depois citar a Galileu Galilei com seu uso inovador para o movimento dos projéteis.

Lagrange, em seu estudo sobre a estática, formula o princípio de trabalho virtual. Justificando este princípio em grande detalhe, e propõe seu método de multiplicadores para estudar os vínculos da mecânica clássica. Uma seção notável foi a formulação de suas equações de movimento, hoje conhecidas como equações lagrangianas. Formulou o princípio do extremo, tal como hoje é usado, com a velocidade nula nos extremos como condição. Outra contribuição muito importante foi seu método alternativo para estudar fluidos, conhecido como: o método de Lagrange da hidrodinâmica.

## LAPLACE

Laplace nasceu no ano de 1749, e sua obra mais importante foi sua chamada “Mécanique Celeste” [12], publicada no ano de 1799. Uma de suas principais contribuições foi a teoria das nebulosas. Laplace seguindo um argumento proposto pelo filósofo alemão Kant, propôs que a origem de nosso sistema planetário fosse uma massa de gás, que estivesse interagindo de forma gravitacional entre si, gerando movimentos circulares em torno de seu centro de massa, e fazendo com que as camadas concêntricas se separassem do centro, logo essas partes se esfriariam e se condensariam, formando na periferia os planetas e no centro o sol.

Esta teoria tinha uma forte dose de filosofia mecanicista na época. Para Newton a descoberta das leis fundamentais do movimento natural era uma forma de entender a obra maravilhosa de Deus; já para Laplace, as leis da física eram independentes de alguma divindade. Ele insistiu em uma forma determinista das leis da natureza. Laplace pensava numa super inteligência: conhecendo as posições e velocidades de todas as componentes de um sistema num dado momento,

usando as leis da física deveria se poder conhecer a evolução do movimento de cada componente no futuro e no passado.

## HAMILTON

Hamilton nasceu no ano 1805 mostrando uma grande habilidade para as línguas. Começou estudar ciências na adolescência. Inicialmente Hamilton fez várias contribuições para a óptica. Ele estudou a refração num cristal biaxial e conseguiu prever o fenômeno de refração cônica interna e externa, que depois foi medido experimentalmente, o que constituiu um dos primeiros fenômenos físicos preditos pelas matemáticas. No ano de 1843, Hamilton inventou os *quaterniones*, estruturas matemáticas que tem muitas aplicações. Os *quaterniones* foram usados em formulações da relatividade e também serviram de base para demonstrar um teorema proposto por Lagrange sobre como um inteiro pode ser escrito como a soma de quatro quadrados perfeitos. Historicamente o primeiro trabalho apresentado por Hamilton foi “O problema dos três corpos pela minha função característica”. Neste trabalho estuda o movimento do Sol, Júpiter e Saturno [12]. Estuda a estabilidade e perturbações do sistema. Hamilton estudou a dinâmica usando o princípio de mínima ação e conseguiu escrever as equações do movimento na forma que hoje é conhecido como equações de Hamilton.

Foram muitos outros que contribuíram para o desenvolvimento da mecânica como Jacobi, Navier, Poisson, etc., nós citamos alguns cientistas, unicamente para ilustrar o desenvolvimento e a capacidade das leis newtonianas para investigar o movimento na terra e na abóbada celeste.

Portanto, com estes e outros trabalhos, a mecânica clássica estava fechando seus princípios fundamentais. Outras propriedades importantes estavam sendo pesquisadas como a invariância das equações do movimento em relação ao tempo.

E a questão que diz respeito à formulação de sistemas inerciais para estabelecer uma equivalência entre dois ou mais sistemas inerciais. Se determinou que os sistemas obedecem a um conjunto de transformações denominadas de Galileu. A partir destes desenvolvimentos, a mecânica newtoniana começou a tomar a forma que conhecemos hoje.



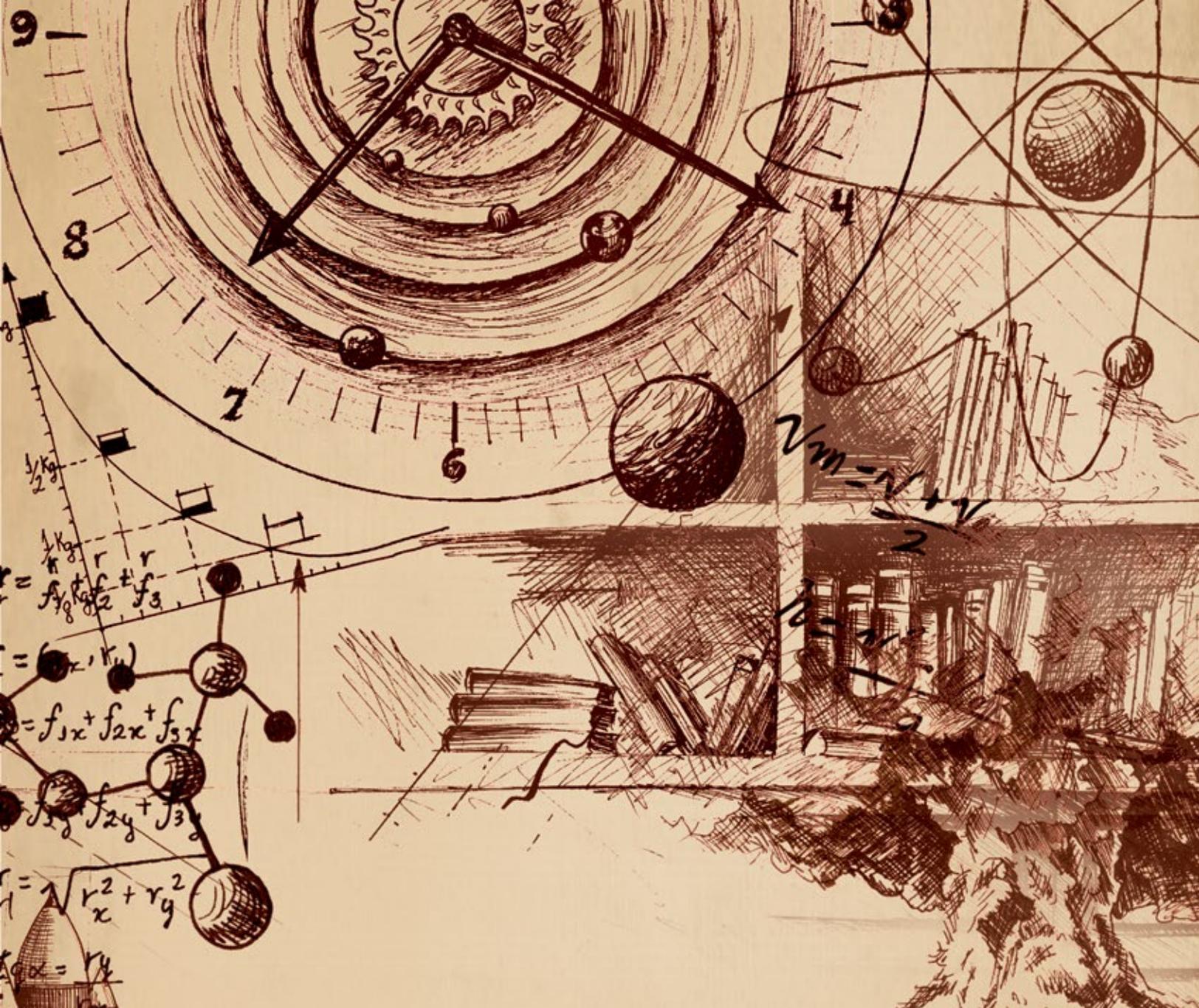
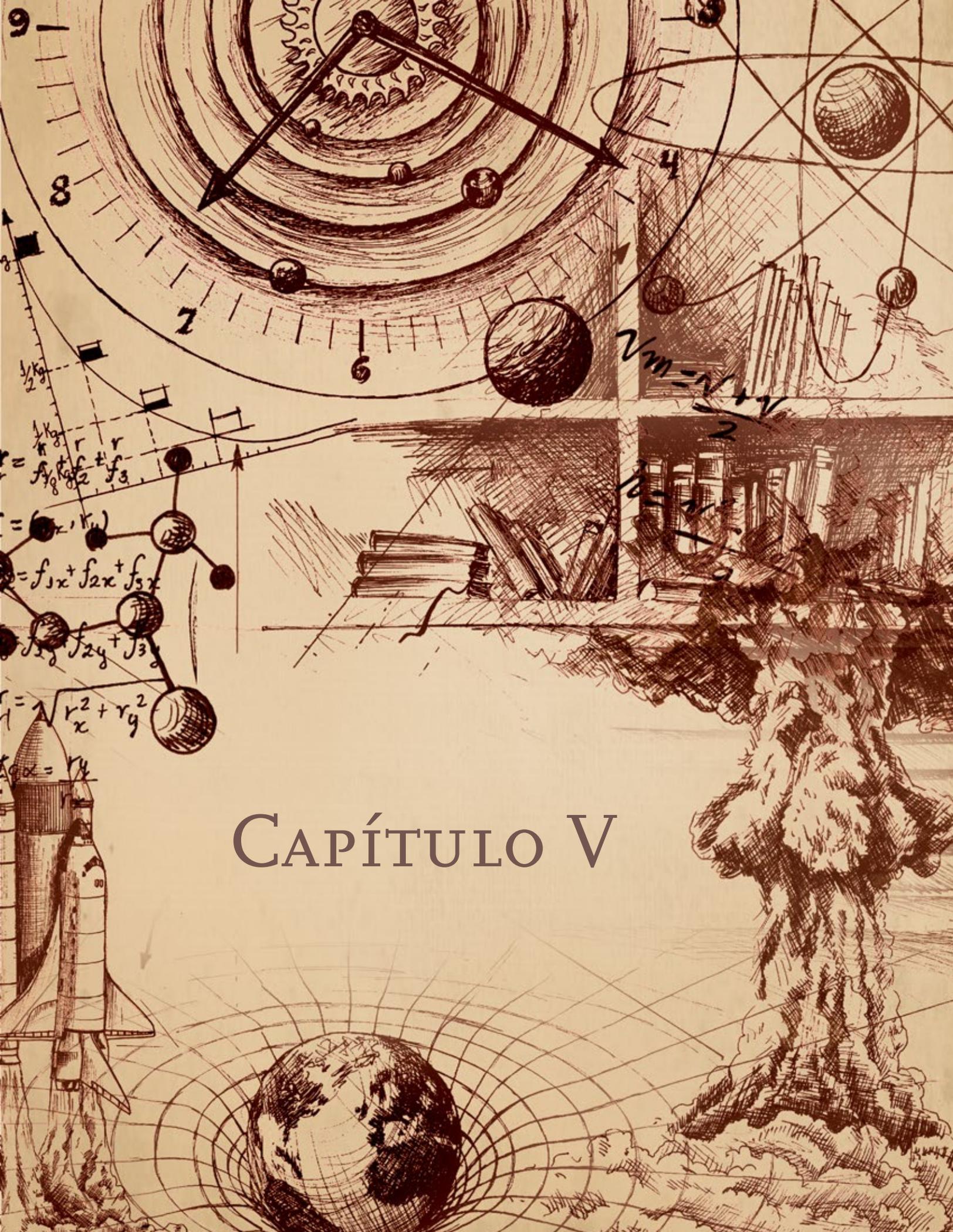
## AVALIAÇÃO E FÓRUM DE DISCUSSÃO

Lei o texto do enlace

*<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6875/6335>*

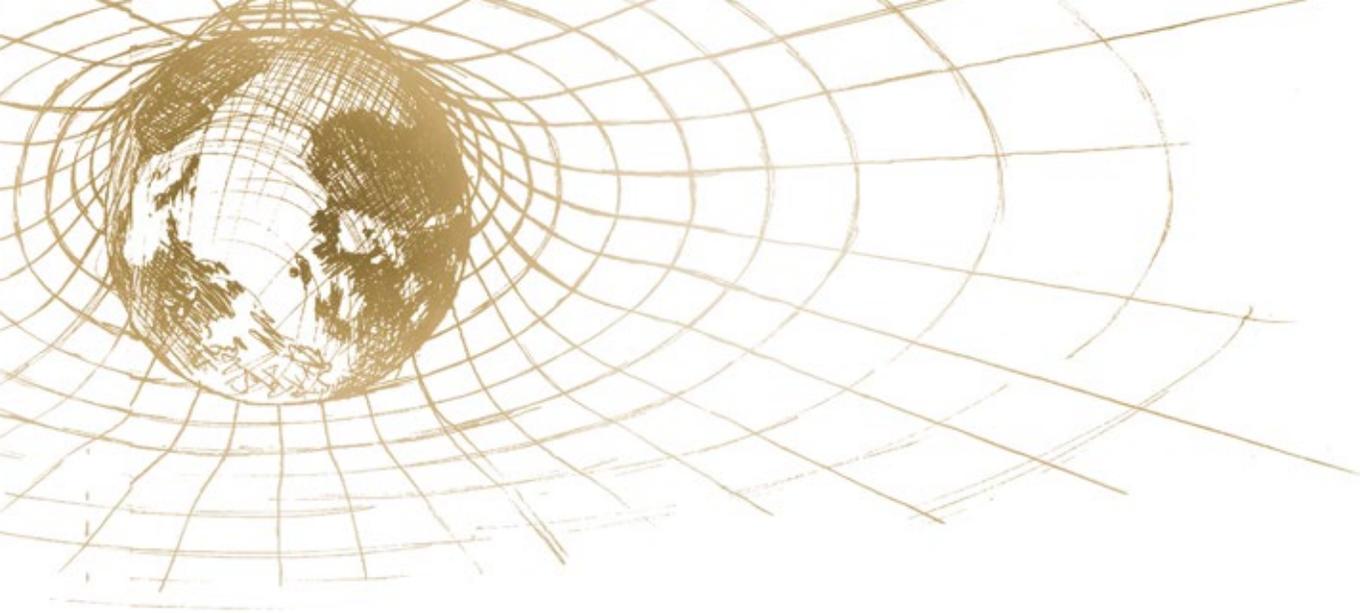
Explique a experiência do balde?

O que é a inércia segundo a física de Newton?



$$r = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}$$
$$r = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}$$
$$r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$$
$$r_x = r \cos \alpha$$
$$r_y = r \sin \alpha$$
$$r = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}$$
$$r = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}$$
$$r = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}$$

# CAPÍTULO V



## A TERMODINÂMICA E A ELETRICIDADE

### TERMODINÂMICA

A primeira teoria consistente da natureza do calor foi a de Georg Ernst Stahl (1660 - 1743), que afirmava que a combustão é produto do flogisto [7]. Para ele, toda substância era uma combinação de flogisto e o resíduo após a combustão. Mas, foi Lavoisier quem mostrou que a combustão era provocada pela combinação de um material e oxigênio. Assim, se fazemos vácuo num dado recipiente não poderemos fazer com que um dado material acenda ou produza fogo dentro do recipiente. Essa foi uma observação muito importante para a química. Lavoisier terminou por formular um **princípio de conservação de massa**.

A teoria do flogisto com a obra de Lavoisier foi abandonada, mas a natureza calórica era ainda desconhecida e o que se observava era que um corpo quente emanava calor a um corpo frio e não o contrário, sendo isto o que impulsou a pensar que alguma coisa que se passava de um corpo a outro era a responsável pelo aquecimento.

Esta substância, segundo Lavoisier, era o calórico, um fluido que devia ter propriedades completamente exóticas: como ser imponderável e também invisível. Usando a hipótese do calórico, Sadi Carnot estudou as máquinas térmicas, que tinham sido inventadas e patenteadas no ano de 1769 por James Watt, dando início a uma forte revolução tecnológica: a Revolução industrial.

Carnot publicou suas ideias no ano de 1824 num trabalho intitulado: “Réflexions sur la puissance Du feu et sur les machines propres à développer cette puissance”.

Se deixarmos cair água desde uma altura de um metro sobre as pás de um moinho se produzirá a transformação de energia potencial em energia cinética. Analogamente, uma máquina a vapor funciona porque um fluxo de calor move a máquina, e quanto maior o fluxo maior o trabalho feito, assim, podemos então dizer, que precisamos aumentar a temperatura para aumentar o fluxo. Carnot mostrou que para aumentar a eficiência temos que aumentar a temperatura.

O trabalho de Carnot proporciona uma relação entre a temperatura e o trabalho feito por qualquer máquina térmica. Seu trabalho só foi reconhecido pelos trabalhos de William Thompson (Lord Kelvin) e Rudolf Clausius. Eles compreenderam o trabalho de Carnot e conseguiram formular a segunda lei da termodinâmica. Quando uma máquina térmica recebe calor, uma parte deste calor pode ser usada para produzir trabalho e outra é perdida na vizinhança do sistema. Essa parte de calor perdida na vizinhança do sistema é impossível de ser aproveitada. Portanto, a segunda lei estabelece que é impossível construir uma máquina térmica perfeita.

Com esta formulação se começava a entender que o calor era uma forma de energia. Mas, para sermos específicos, foi Benjamin Thompson, conde Rumford, que observou enquanto fabricava canhões, que a produção dos orifícios dos canhões implicava na produção de calor capaz de fazer ferver a água. Se o atrito se mantinha o calor não parava de se incrementar. Rumford associou este comportamento ao movimento e afirmou que o calor tinha que estar de alguma maneira associado a ele.

As experiências de James Joule, na década de 1840, permitiram relacionar de forma experimental e inequívoca que o calor e o trabalho mecânico estavam associados. A medida do **equivalente mecânico do calor** foi a confirmação da natureza de energia do calor, sendo que é uma forma de energia em trânsito e não a teoria do calórico.

## BOLTZMANN E A TEORIA CINÉTICA

Ao considerar o início da teoria cinética, podemos nos remontar aos trabalhos pioneiros de Daniel Bernoulli, que no ano de 1738, propôs que se considerássemos um gás como composto por uma grande quantidade de moléculas em movimentos aleatórios, a pressão do gás seria o resultado das colisões das moléculas sobre as paredes do vaso.

Outra contribuição muito importante nesta linha de pensamento veio no ano de 1845 com John James Waterson, que enviou seu trabalho à Royal Society para poder ser lido. Mas, os revisores acharam o trabalho muito fora da realidade por afirmar que o gás era composto de moléculas. O trabalho de Waterson terminou rejeitado. Waterson tinha mostrado que a temperatura de um gás era proporcional ao quadrado da velocidade média de suas moléculas e que a pressão de um gás é produto da densidade de moléculas por sua velocidade média. Assim, quando aquecemos um gás, a velocidade média das moléculas aumenta e a temperatura também.

Outros predecessores considerados são Kronig e Clausius. O primeiro, no ano de 1856, derivou a lei dos gases ideais, e o segundo, em 1857, determinou, similarmente a Waterson, que a temperatura era dada pela energia cinética do sistema de moléculas. Mas, a maior contribuição nesta área foi a de um jovem físico escocês - James Clerk Maxwell -, que no ano de 1859, estudando efeitos de transporte em gases determinou a viscosidade e a transmissão de calor e a lei da distribuição das velocidades das moléculas de um gás contido num recipiente. Este trabalho foi completado com outro trabalho no ano de 1867.

Neste contexto, no ano de 1866, Boltzmann publicou um trabalho com o título “Acerca do significado mecânico da segunda lei do calor” e, no ano de 1868, tratou a questão de generalizar a distribuição de velocidades das moléculas de um gás para substâncias poliatômicas, e é por isso, que a distribuição de velocidades é atualmente conhecida como distribuição de Maxwell-Boltzmann.

Seguindo a cronologia, no ano de 1872, Boltzmann consegue deduzir a segunda lei do calor das propriedades de uma equação hoje conhecida como equação de Boltzmann [13], e que está associada ao teorema H, que ele mesmo propõe. Esta equação estuda as condições de equilíbrio termodinâmico e considera a influência das colisões das moléculas. Foi Boltzmann quem encontrou as re-

lações entre a segunda lei e a teoria das probabilidades abrindo o caminho para a mecânica estatística.

Boltzmann foi o grande defensor do atomismo e, por isso, foi desconsiderado muitas vezes por seus contemporâneos, em particular, pela autoridade da época, cientistas como: Mach, Ostwald e Helm [7,13]. A obra de Boltzmann foi incompreendida. A maioria das pessoas conheceu seu trabalho por releituras e foram poucos os que leram diretamente suas pesquisas. Ele não escreveu um livro para divulgar de forma sistemática suas ideias e seus artigos eram muito extensos, tornando a leitura realmente difícil.

## ELETRICIDADE E MAGNETISMO

A natureza da luz até o século XVIII era pouco compreendida e uma das pessoas que mais contribuiu para sua compreensão foi Benjamin Franklin.

Depois de notar relâmpagos e raios caindo das nuvens, Franklin, no ano de 1752, fez uma experiência na qual ele e seu filho soltaram uma pipa de seda no meio dos raios, observando que quando a pipa era conectada a terra o raio parecia ser conduzido sem produzir dano ao redor. Aqui estava a ideia dos pára-raios. Ele também observou que mudando de material na ponta da pipa podia recolher fluido elétrico das nuvens [7].

Os cientistas da época acreditavam que a eletricidade passava de um corpo a outro e devia ser fisicamente uma espécie de fluido. Nesta linha, Franklin propôs que quando um corpo era friccionado contra outro, um fluido passava de um corpo a outro. O corpo que ganhava fluido se chamava positivo e o que perdia fluido se chamava negativo.

No ano de 1756, pelos seus exitosos experimentos, Franklin foi eleito membro da Royal Society. Ele também foi diplomata e representava a Pensilvânia na Inglaterra, e numa das reuniões da Royal Society, comentou com o cientista Joseph Priestly sobre uma experiência que tinha feito com uma pequena esfera de cortiça. Ele contou que colocou dentro de uma esfera oca metálica carregada uma esfera de cortiça e observou que nada acontecia, mas quando ele colocava a esfera de cortiça perto da esfera carregada pelo lado de fora a esfera carregada atraía à esfera de cortiça. Priestly depois de escutar esta história associou os resultados com a teoria da gravita-

ção de Newton. Priestly sabia que, para esferas ocas mássicas, objetos dentro da esfera não sentiam a força gravitacional. É um dos famosos teoremas demonstrados por Newton. Esta demonstração era dependente da lei de gravitação ser inversamente proporcional ao quadrado da distância e, portanto, Priestly pensou que talvez a eletricidade funcionasse de forma semelhante à gravitação newtoniana.

Henry Cavendish seguindo estes argumentos imaginou espertamente o um determinado experimento com esferas carregadas. No centro de uma grande esfera descarregada oca era colocada uma esfera menor carregada e um fio condutor era ligado entre ambas as partes, de forma que depois de um instante, a esfera externa tinha toda a carga da esfera interna, a qual ficava sem carga. Henry Cavendish fez cálculos teóricos usando as técnicas desenvolvidas por Newton para mostrar que isto era possível no caso da força elétrica ter a característica de variar com o inverso do quadrado da distância. Mas, ele não publicou seu resultado e foi Charles Augustin de Coulomb, quem, no ano 1785, publicou seu trabalho de **inverso do quadrado da distância para a interação elétrica**.

A seguinte revolução no entendimento da natureza elétrica foi a experiência do físico dinamarquês Hans Christian Oersted no ano de 1820. Hans suspeitava que existisse uma conexão entre eletricidade e magnetismo já desde algum tempo. E durante uma demonstração de aula observou a agulha da bússola se movimentar quando estava perto de um fio que transportava corrente elétrica. Este fato foi muito surpreendente e fez uma grande revolução no pensamento da época. Amperè construiu experimentos com fios de corrente que se comportavam como magnetos e muitos outros reproduziram a experiência de Hans. Portanto, se comprovou, experimentalmente, que o fio com corrente gerava uma força magnética.

Outra grande mente foi Michael Faraday, que nasceu no ano 1791, sendo um autodidata, que por volta de 1813 se dedicava a trabalhar como encadernador. Ele fazia leitura de muitos livros, entre eles, livros de química que despertaram seu interesse por uma área chamada eletroquímica, que consiste em utilizar corrente elétrica dentro de um líquido para decompor este em seus elementos químicos. Por exemplo, água nos elementos hidrogênio e oxigênio. Faraday, com ajuda de um bondoso cliente, conseguiu assistir umas aulas dadas pelo famoso químico sir Humphry Davy na Royal Institution. Faraday enviou encadernadas as notas de aula que tinha

feito e solicitou um trabalho na Royal Institution, e depois de um tempo foi aceito como assistente no laboratório de Davy.

Faraday deslocou sua atenção da eletroquímica à física da eletricidade depois de escutar sobre as experiências de Oersted. Ele se destacou ao reproduzir as experiências de Oersted e inventar sistemas de fio de correntes que movimentavam imãs, de forma a transformar corrente elétrica em movimento. Era o primeiro motor elétrico. Por todos estes sucessos, Faraday foi eleito membro da Royal Society no ano de 1823.

Mas ele procurava o efeito inverso: se a corrente produz efeitos magnéticos por que os magnetos não podem produzir efeitos elétricos? Nos seus estudos sobre eletricidade e magnetismo, Faraday inventou uma forma de visualizar estes efeitos e teve êxito, assim, criou o conceito de campo elétrico e campo magnético. Ele imaginou que cargas e imãs atuassem sobre outras cargas ou imãs através de linhas de força invisíveis. Mas não é só uma mera invenção teórica, os campos existem de forma real. Por exemplo, Faraday sabia que um fio com corrente elétrica tem linhas de força magnéticas em forma de círculos em torno do fio, que produzem efeitos sobre uma bússola próxima.

Com estes conceitos, Faraday fez uma descoberta fundamental: a indução eletromagnética. Ele descobriu que se um campo magnético produzido por um imã é constante não produz efeitos elétricos, mas, se o campo magnético depende do tempo, então, produz um campo elétrico. Campos magnéticos em movimento produzem campos elétricos, unificando, assim, os conceitos da eletricidade e do magnetismo. Esta nova descoberta permitiu a Faraday construir dínamos, motores aperfeiçoados de eletricidade e transformadores elétricos. Ele abriu novas portas para a tecnologia.

## A SÍNTESE DE MAXWELL

James Clerk Maxwell nasceu no ano de 1831, o ano da descoberta da indução eletromagnética por Faraday. Ele pertencia a uma família rica e desde pequeno mostrou uma grande habilidade nas áreas de matemática e física. Um de seus primeiros trabalhos foi um trabalho sobre os anéis de Saturno, mostrando que os anéis só poderiam ficar em equilíbrio se eles fossem compostos de pequenas partículas. Maxwell fez grandes contribuições na teoria cinética dos gases, mas também

fez contribuições na física da cor e, sobretudo, no eletromagnetismo. Ele aceitou as ideias de campos magnéticos e elétricos de Faraday, indo contra a uma ideia da época, que acreditava que a ação elétrica era a distância. Maxwell conseguiu traduzir em matemáticas as descobertas de Faraday, fazendo uma estrutura lógica do eletromagnetismo. Originalmente, Maxwell escreveu suas sínteses das ideias eletromagnéticas em vinte equações, que Heaviside, no ano de 1884, com ajuda do físico Gibbs, escreveu em quatro equações vetoriais que são: a equação de Gauss, a equação de Gauss magnética, lei de Faraday-Henry; e a lei de Ampère-Maxwell, na qual ele introduziu a corrente de deslocamento responsável pelo fato de um campo elétrico variável produzir um campo magnético - uma questão fundamental.

Maxwell mostrou que combinando estas quatro equações (vinte, no seu caso) poderia se obter ondas de tipo eletromagnéticas. Determinando a velocidade destas ondas no vácuo, encontrou o mesmo valor que para a luz, concluindo que as ondas eletromagnéticas eram luz.

A obra de Maxwell em eletrodinâmica foi continuada pelo físico Lorentz, que usou a teoria maxwelliana para explicar fenômenos de reflexão e refração. Mas a síntese do eletromagnetismo mostrou ser uma teoria tão efetiva como a mecânica de Newton, fazendo surgir a pergunta: será que ambas as teorias são compatíveis? Para responder esta pergunta o jovem Einstein foi levado a criar a teoria restrita da relatividade.

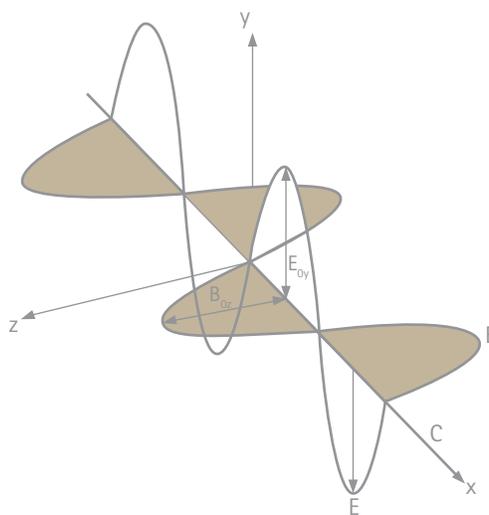


Figura 6. Campos eletromagnéticos transversais

## A FÍSICA NO FINAL DO SÉCULO XIX

Estamos na segunda metade do século XIX e o desenvolvimento da mecânica parece conceitualmente completo com as formulações de Lagrange e Hamilton. O triunfo da mecânica estabeleceu uma filosofia determinista, principalmente, defendida e melhor formulada pelo grande Laplace. O mundo parecia obedecer a um conjunto de equações de movimento chamadas equações de Newton, e com esta base, podíamos prognosticar todos os futuros movimentos.

Por outro lado, as leis da eletricidade e do magnetismo também eram conhecidas, e com a unificação de ambos os fenômenos no eletromagnetismo por Faraday e Maxwell, parecia um capítulo fechado. Esta consistência levou a explicação e descoberta de ondas eletromagnéticas. Os cientistas tinham descoberto como funcionava o mundo na Terra e nos céus. Este corpo de ideias é o que hoje chamamos de Física Clássica.

As leis da termodinâmica também pareciam completas, mas elas resistiam ainda a um esquema completamente fechado e conceitualmente estruturado como nos casos anteriormente mencionados. Mas com o desenvolvimento da teoria cinética e da mecânica estatística a natureza microscópica da matéria parecia pouco entendida. Aqui encontraremos as portas para novos experimentos e novos conceitos capazes de mudar nossa visão do mundo. Os cientistas usavam os novos desenvolvimentos tecnológicos para conseguiram realizar experimentos cada vez mais precisos. Experiências confusas começaram a sair dos laboratórios e discordâncias entre os resultados experimentais e teóricos fizeram notar que as leis da física clássica já não eram tão completas como se pensava. A interação entre fenômenos térmicos e a radiação eletromagnética constitui a base do corpo negro fundamento do início da teoria quântica.



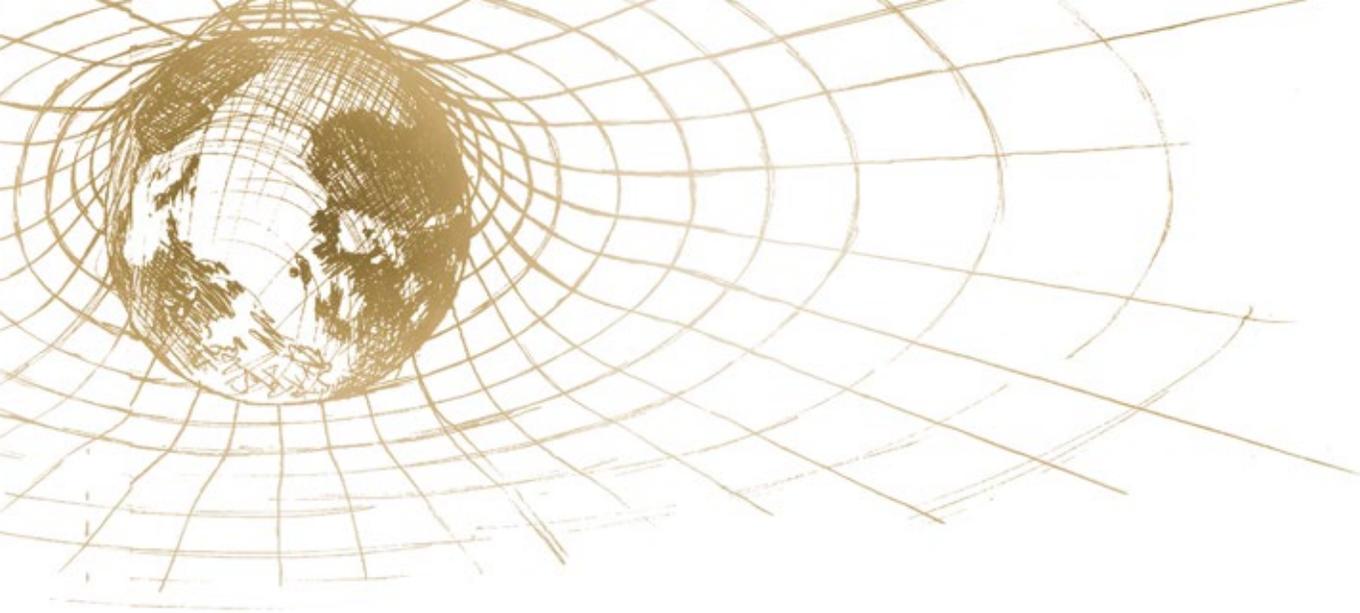
## AVALIAÇÃO E FÓRUM DE DISCUSSÃO

Faça leitura do texto

*<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/070404.pdf>*

Em que consiste a teoria de Du Fay sobre a eletricidade?





## CRISES DA FÍSICA CLÁSSICA E O SÉCULO XX

No século XX, o panorama se transformaria completamente. A tecnologia no século XIX estava aumentando e novas experiências podiam ser feitas, muitos novos instrumentos tinham sido construídos. Um destes aparelhos que revelavam novos aspectos da natureza era o espectroscópio.

O espectroscópio é um instrumento que separa a luz de uma fonte em seus componentes, de forma similar ao prisma de Newton. A luz passa através de uma fenda vertical fina colocada entre a fonte de luz e uma rede de difração que faz as vezes do prisma. Uma rede de difração é uma superfície transparente, na qual são lavradas linhas muito finas. A luz que passa pela rede pode ser projetada para uma tela onde será observado o espectro da fonte de luz estudada.

Nestas circunstâncias, surge uma pergunta: será que esta técnica pode ajudar a estudar o sol e outros corpos celestes? Isto foi o que testou o físico alemão Joseph Fraunhofer [7]. Ao estudar a luz solar com esta técnica, ele encontrou um espectro que continha várias linhas escuras entre as cores do arco-íris. Um estudo cuidadoso mostrou que onde estas linhas estavam correspondia a uma cor de-

terminada. O espectro deste tipo onde faltam algumas cores é conhecido como espectro de absorção. Fraunhofer estudou também o espectro de absorção da Lua e dos planetas mostrando que os espectros eram os mesmos que do Sol, sendo a primeira evidência precisa, que mostrava que a luz da Lua e dos planetas era a luz refletida do Sol, como já tinha sido inferido muitos anos antes por Galileu.

Seguindo as pesquisas com espectroscopia, entre os anos 1855-1863, Bunsen e Kirchhoff descobriram que um elemento químico, quando esquentado, emitia luz numa determinada cor. Esta emissão podia ser considerada como se fosse a impressão digital de uma substância. Adicionalmente, o físico Jean Bernard Foucault tinha mostrado que se uma fonte envia uma luz, que passa por um recipiente que contém uma nuvem de sódio vaporizada, a qual era mantida a baixa temperatura, o espectro de absorção mostra duas linhas escuras características, e se comparamos que cor corresponde a essas linhas, concluímos que se trata de linhas que correspondem ao sódio. A nuvem de sódio absorvia de forma seletiva as cores do espectro da luz da fonte.

Com esta técnica de identificar elementos químicos Bunsen e Kirchhoff, em 1861, analisaram o espectro de absorção do Sol e descobriram linhas de ferro, sódio, cálcio e magnésio. O Sol era composto pelos mesmos elementos terrestres e a teoria do éter de Aristóteles uma vez mais entrava em conflito com a realidade e as pesquisas. Mas, todas estas questões relacionadas com espectros de absorção e também de emissão (quando existem linhas de excesso de fótons no espectro) não se podiam explicar por nenhum método ou lei da física clássica.

A técnica dos espectros também foi usada para estudar outros corpos celestes. William Huggins, um astrônomo inglês, no ano de 1864, usou esta técnica espectroscópica para estudar as componentes nebulosas. Mas na época, uma nebulosa era uma questão mal definida e muito confusa. As deficiências na resolução dos telescópios da época não permitiam distinguir nuvens de gás de aglomerados de estrelas, galáxias ou aglomerados de galáxias, e Huggins, sem saber, tinha estudado uma nuvem de gás. Seus resultados foram um espectro sem linhas escuras para identificar elementos químicos. Huggins generalizou achando que todas as manchas difusas conhecidas como nebulosas eram gasosas.

Voltando ao contexto do final do século XIX, é fácil observar que os cientistas tinham descoberto objetos que, quando aquecidos, emitem radiação eletromagnética a uma dada temperatura  $T$ . Para estudar este fenômeno, Kirchhoff desenvolveu um sistema particularmente útil [7]. Ele propôs uma cavidade fechada que se podia aquecer até uma temperatura  $T$ . Os átomos das paredes ao serem esquentados vibram emitindo radiação eletromagnética para o interior, mas, essa radiação é reabsorvida pelas próprias paredes, de forma a manter o equilíbrio entre emissão e absorção. Kirchhoff mostrou que o espectro não deveria conter linhas espectrais, pois a emissão de alguma forma cancelava a absorção, e, portanto, mostrou que se tratava de um sistema de radiação em equilíbrio a uma temperatura  $T$ . Um sistema deste tipo se chama radiação de corpo negro, já que resulta numa superfície perfeitamente absorvente. Para estudar esta radiação, Kirchhoff fez um pequeno orifício na parede da cavidade para que a radiação saísse. Ele mostrou que o conteúdo de energia para uma determinada frequência era função da temperatura. E o resultado de Kirchhoff nos leva a fazer uma pergunta: pode existir alguma relação entre termodinâmica, a ciência da temperatura, e o eletromagnetismo, a ciência da radiação eletromagnética?

Esta questão foi a linha de pesquisa de Max Planck, que inspirado no trabalho de Kirchhoff, procurava uma resposta ao problema. Neste sentido, o espectro determinado pela física clássica do corpo negro previa que a potência de emissão sempre aumentava com a frequência. Este resultado ficou conhecido como a catástrofe do ultravioleta, e é devido ao trabalho de Lord Rayleigh e James Jeans. As medidas do laboratório mostravam que o espectro do corpo negro tinha uma potência que aumentava com a frequência, até atingir uma dada potência máxima para depois começar a diminuir.

Nas tentativas de entender ou reproduzir matematicamente os resultados do laboratório, Max Planck se viu forçado a aceitar uma ideia muito audaz: a emissão de energia de forma descontínua ou quantizada. No dia 19 de outubro de 1900, Planck comunicou seu resultado na Academia de Física de Berlim. Este resultado foi para Planck uma forma matemática de ajustar as curvas experimentais, mas não uma realidade física. Planck procurou justificar seus resultados usando a física clássica, mas, todos os seus resultados resultaram surpreendentemente sem sucesso.

Esta foi uma das primeiras pistas do comportamento do mundo atômico. O mundo atômico tem leis que não são nada parecidas com as leis da física clássica. A emissão de energia não é contínua, mas é múltipla de uma quantidade fundamental chamada de quantum ou pacotes de energia. Estes fatos não são observados por nossos sentidos, pois nossas escalas são muito grandes em comparação com as escalas atômicas, e assim, parece que a energia é emitida de forma contínua.

O efeito fotoelétrico foi descoberto por Hertz no ano de 1887 e consiste na emissão de cargas elétricas de uma superfície de metal quando uma luz de frequência alta incide. Este efeito não podia ser explicado no contexto da física clássica.

Albert Einstein, no ano de 1905, utilizou a hipótese proposta por Planck para explicar o efeito fotoelétrico. Einstein foi mais longe na proposta de quantizar a energia, ele afirmou que a luz era composta de pacotes de energia. Não somente a emissão era em pacotes, mas também, a transmissão da energia era feita em pacotes. Einstein sugeriu que a luz de uma determinada frequência acontecia em múltiplos dos pacotes de energia, o que o físico Gilbert Lewis chamou em 1926 de fótons.

Um átomo não pode absorver meio fóton ou um fóton e meio, ele pode absorver unidades inteiras de fótons. Com esta hipótese, facilmente se pode entender o efeito fotoelétrico. A grosso modo, podemos imaginar que a luz atinge a superfície do metal composta por elétrons. Os fótons se comportam como se fossem pequenas bolas, e ao colidirem com os elétrons, podem fazer com que alguns deles saiam da superfície metálica. Estes resultados foram comprovados de forma experimental pelo físico estadunidense Robert Millikan em 1915, com o qual, Einstein, depois de seis anos, recebeu o prêmio Nobel em 1921.

## A MECÂNICA QUÂNTICA

A explicação do efeito fotoelétrico dada por Einstein foi apoiada pelo fenômeno da emissão termiônica. Os cientistas experimentais tinham notado no final do século XIX que se alguns materiais, em particular os metais, fossem aquecidos, a condutividade elétrica aumentava na vizinhança, isso foi associado à emissão de elétrons,

que ganhavam energia térmica suficiente para escapar da superfície metálica. Medidas experimentais mostravam que a mesma ordem de energia do efeito fotoelétrico era necessária no caso do efeito termiônico, portanto, a explicação da luz como composta por fótons também era útil para explicar este novo fenômeno.

Mesmo com este sucesso da teoria corpuscular da luz (fótons) a natureza da luz estava muito confusa. No final do século XIX o sucesso de Maxwell tinha mostrado que a luz era um fenômeno ondulatório. Assim, como conciliar uma natureza ondulatória com uma natureza corpuscular?

No ano de 1913, Niels Bohr apresentou um modelo para explicar os espectros de átomos simples usando a hipótese de Planck. Bohr quantizou o momento angular para poder dar conta das transições discretas observadas nos espectros. Logo depois, o cientista Arnold Sommerfeld quantizou semiclassicamente o átomo de hidrogênio. Esta teoria chamada de teoria quântica antiga foi usada para explicar um número de fenômenos como rotações moleculares e fenômenos de vibração.

A natureza dual de partículas como fótons e elétrons estava sendo fundada em fortes resultados experimentais, assim, De Broglie, em 1924, propôs estender a dualidade onda-partícula a toda a matéria. Elétrons e prótons poderiam comportar-se, segundo a situação, como ondas ou partículas. Estas imagens são completamente diferentes das ideias clássicas de partículas, molas ou pêndulos. A física clássica não podia mais explicar as estranhas formas quânticas da matéria subatômica. De Broglie associou a ideia de onda estacionária à natureza do elétron. Imagine uma pessoa segurando um extremo de uma corda e outra segurando o outro extremo. Se uma delas aplica um movimento vertical este movimento se translada em forma ondulatória à outra extremidade, e se a outra pessoa faz o mesmo, pode acontecer que as duas ondas se interceptem de forma a produzir uma onda que mantém a sua forma, esta onda é chamada estacionária. As ondas estacionárias são caracterizadas pelo número de nós, e De Broglie imaginou que o elétron era uma onda estacionária em torno do núcleo. Assim, como ondas estacionárias só existem para um número inteiro de nós, os elétrons só existem para um número inteiro de nós eletrônicos. Desta forma, De Broglie explicou a natureza discreta da energia dos elétrons.

No ano de 1925, um jovem físico alemão W. Heisenberg apresentou um trabalho sobre mecânica quântica, no qual ele não considerava conceitos de órbitas ou imagens dadas pela física clássica. Neste trabalho, ele descrevia a transição de elétrons em átomos por meio de matrizes compostas unicamente por números. Heisenberg iniciou de forma consistente a liberação da física do mundo clássico. Mas sua “mecânica matricial” era complicada de ser aplicada ao mundo real. No entanto, um notável físico austríaco W. Pauli conseguiu mostrar que a mecânica matricial reproduzia os resultados do modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio. Adicionalmente, o físico Erwin Schrödinger, inspirado na proposta de De Broglie, propôs uma formulação alternativa à apresentada por Heisenberg, a chamada “Mecânica ondulatória”. Schrödinger escreveu seis artigos sobre a mecânica ondulatória, onde mostrava, que ambas as formulações, a dele e a de Heisenberg, eram equivalentes.

O resultado de solucionar a equação da mecânica ondulatória é uma função de onda que Schrödinger assumiu ser a função de onda do elétron. Mas essa interpretação estava errada ao considerar um resultado mostrado por Heisenberg: o princípio da incerteza. Em forma coloquial, podemos afirmar que é impossível conhecermos com precisão absoluta tanto a posição e a velocidade (momentum) de uma partícula. Mas, da física clássica sabemos que se conhecemos a função de onda conhecemos a posição e a velocidade. Portanto, a ideia de associar a função de onda ao elétron tem que ter algum problema.

Neste contexto, Max Born interpretou de forma diferente os resultados de Schrödinger, afirmando que era o quadrado da função de onda a variável importante, mas, não a função de onda unicamente. Esse quadrado está associado à probabilidade de encontrar o elétron em algum lugar, mas, não em um lugar determinado. Essa é a base da interpretação da mecânica quântica chamada interpretação de Copenhague. Neste esquema de teoria, o mundo determinista de Newton e dos mecanicistas não é mais válido, e a realidade é completamente diferente do que se achava que era. Na mecânica quântica as medidas são sempre associadas com os observadores, e enquanto na física clássica a realidade existia independente do observador. Na física do muito pequeno o fato de observar altera a medida a realizar. Os aspectos deterministas tinham que ser mudados. Esta interpretação não foi recebida com apreço por Schrödinger, que acreditava numa interpretação que seja determinista. Todavia, os sucessos experimentais da

teoria quântica eram muitos, e os físicos foram forçados a trabalhar com estas novas interpretações da natureza quântica.

Bohr foi o grande arquiteto da física quântica e da interpretação de Copenhague [14], sendo seu princípio de complementaridade fundamental neste aspecto. O princípio afirma que ondas e partículas são igualmente possíveis como caracterização da matéria. Bohr confere caráter real ao indeterminismo nas leis da física, o que não foi aceito por alguns físicos, entre eles, Einstein, que propôs muitos experimentos mentais para desafiar a interpretação probabilística. Einstein nunca aceitou uma física que não fosse determinista.

## ALBERT EINSTEIN E A TEORIA DA RELATIVIDADE

Assim como o som se propaga em meios materiais como o ar, os campos elétricos e magnéticos deveriam ter um meio para se propagarem na segunda metade do século XIX constituía um problema aberto nas pesquisas físicas. O que estava em jogo era que dado um sistema inercial de referência como associá-lo ao movimento de campos eletromagnéticos assim resultava esquisito que os campos dependessem do observador.

Assim se propôs um meio material, no qual os campos deveriam se propagar. O meio escolhido era chamado éter, fazendo lembrar a física aristotélica.

Hendrik Lorentz tinha proposto uma teoria que explicava o movimento de campos eletromagnéticos em referenciais inerciais. Mas, sua proposta mantinha as leis de Galileu como base, e as leis de transformação hoje conhecidas como transformações de Lorentz, eram transformações válidas para o eletromagnetismo, e faziam parte de um teorema que Lorentz denominou de estados correspondentes. Este esquema de pensamento implicava em muitos outros conceitos propostos para poder utilizar o éter como meio de propagação.

Mesmo com esta complexidade, a teoria lorentziana foi regularmente aceita. Neste contexto, o jovem Einstein começou a pensar no problema de um referencial inercial para campos eletromagnéticos em movimento. Einstein se perguntava como uma pessoa observaria uma onda eletromagnética desde outra onda eletromagnética movimentando-se na mesma velocidade de propagação da onda. Seria uma onda estacionária?

No ano de 1905, Einstein era um funcionário do escritório de patentes em Berna, e tinha obtido seu doutorado na Universidade Politécnica de Zurique. Neste ano publicou “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, trabalho que constitui o início da teoria da relatividade restrita. Albert Einstein parte então de dois princípios fundamentais:

*a) O princípio da relatividade, impondo que a forma das equações tem que ser as mesmas em todos os sistemas de referenciais inerciais.*

*b) A velocidade da luz no vácuo é a mesma em todos os referenciais.*

Usando estes dois princípios, Einstein determinou a dinâmica de corpos que se movimentam perto da velocidade da luz. Deduziu que a simultaneidade é uma característica relativa dependendo da velocidade dos observadores considerados. Se dois eventos são simultâneos para um observador que se movimenta em relação a um referencial  $O$ , não necessariamente serão eventos simultâneos para outro observador que se movimenta em outro referencial  $O'$  de velocidade constante  $v$ , com respeito ao primeiro referencial, assim as coisas resultam nada perto do senso comum.

Outra questão era a medida das distâncias. Um observador no referencial  $O$  poderia medir uma distância entre dois pontos igual a um metro, mas outro observador  $O'$  poderia medir dependendo de sua velocidade com respeito a  $O$ , uma medida que pode ser menor ou maior. Com seus dois postulados, Einstein conseguiu derivar a relação entre as coordenadas do sistema  $O$  ( $x,y,z,t$ ) e as coordenadas do sistema  $O'$  ( $x',y',z',t'$ ), sendo curioso observar que as coordenadas de  $O'$  misturam todas as coordenadas espaciais e temporais fazendo com que o tempo e o espaço fiquem ligados.

Espaço e tempo passam a formar na teoria da relatividade restrita um contínuo quadridimensional ímpar na história da física.

Mesmo tendo obtido este notável sucesso, Einstein ainda procurava generalizar sua teoria para sistemas não inerciais. Neste contexto nasce a teoria geral da relatividade.

No ano de 1907, Einstein publica o princípio de equivalência. Este princípio estabelece uma relação de equivalência entre um sistema não inercial e um sistema inercial sujeito a um campo gravitacional de intensidade adequada.

Se tivermos dois observadores submetidos a dois campos gravitacionais de intensidades diferentes Einstein nota que o tempo flui

de forma diferente para ambos os observadores, mostrando que o tempo também é alterado pelo campo gravitacional.

Em 1911 Einstein propõe que um raio de luz que passasse perto de um campo gravitacional intenso se curvaria. Esta interpretação também foi possível porque Einstein notou que a matéria pode alterar a geometria do espaço e tempo. Usando a relatividade restrita Einstein já sabia que tanto matéria como energia são fontes de campo gravitacional, e suspeitou que eram equações não lineares as equações de movimento para corpos em espaços curvos. Mas espaços curvos eram na época de Einstein pouco conhecidos, assim, ele solicitou a ajuda de seu amigo Marcel Grossman para entender matematicamente espaços curvos.

A teoria de espaços curvos tinha sido desenvolvida pelos trabalhos brilhantes de vários matemáticos do século anterior como Gauss, mas, em especial, Riemann. Einstein trabalhou muito até conseguir estabelecer todas as suas ideias de forma matemática. E no final do ano de 1915, Einstein terminou seu trabalho e apresentou as equações da “Teoria da Relatividade Geral”. Neste trabalho, ele derivou equações não lineares para o campo gravitacional, as chamadas equações de Einstein. Estas equações relacionam o conteúdo de matéria com a geometria do espaço tempo. Se todos os tipos de matéria se conhecessem, então a geometria do Universo poderia ser encontrada ao resolver as equações de Einstein. Pela primeira vez era possível abordar o problema do Universo de forma menos especulativa.

Os desenvolvimentos da física relativista e da mecânica quântica têm uma diferença intrínseca fundamental. Mesmo que a relatividade generaliza a proposta do princípio de sistemas inerciais, o caráter determinista é mantido. Na relatividade somos capazes de prever resultados de forma absoluta. Podemos conhecer a velocidade e a posição das partículas de um sistema mesmo que estas velocidades sejam próximas da luz.

Estas características são completamente diferentes da mecânica quântica, na qual a noção de determinismo é quebrada, o mundo começa a ser indeterminado e a capacidade dos físicos de determinar valores precisos é eliminada.

Todos os desenvolvimentos posteriores a décadas dos anos 20 do século XX tomam como base estas duas enormes teorias físicas. Paul Dirac conseguiu escrever uma equação para a mecânica quântica que incorpora o princípio relativista, a chamada equação de Dirac,

constituindo a base da mecânica quântica relativista. Mas, uma unificação da relatividade geral com a mecânica quântica resultou na década dos 30 e até os dias atuais um dos problemas fundamentais da física moderna. Possivelmente, o maior problema na história da física. Como juntar o formalismo da mecânica quântica com o formalismo do espaço curvo? Uma questão sem resposta.



## AVALIAÇÃO E FÓRUM DE DISCUSSÃO

Faça leitura do texto

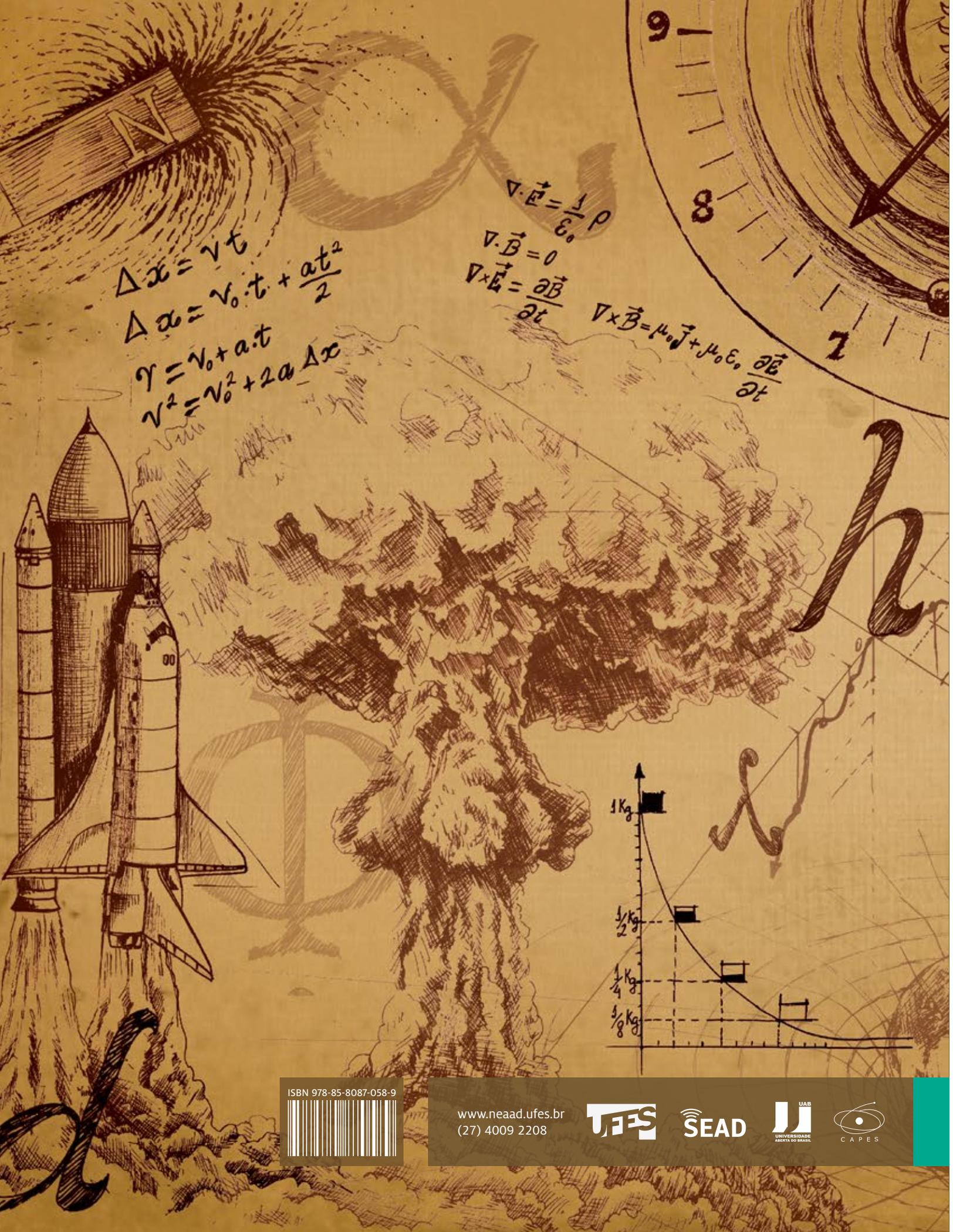
<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/301603.pdf>

O que é o princípio de Mach e como se relaciona com a gravitação de Einstein?









$$\Delta x = v t$$

$$\Delta x = v_0 \cdot t + \frac{a t^2}{2}$$

$$v = v_0 + a \cdot t$$

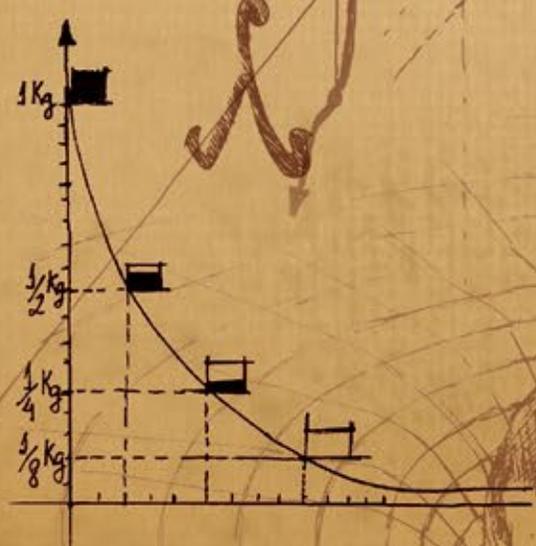
$$v^2 = v_0^2 + 2 a \Delta x$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



ISBN 978-85-8087-058-9



www.neaad.ufes.br  
(27) 4009 2208

