

EVOLUÇÃO DA CIÊNCIA FÍSICA

Newton B. de Oliveira

**Instituto de Física -UFBA
Salvador, 2017**

Documento preparado com o sistema L^AT_EX.

Sumário

Apresentação	5
1 Os primórdios da Física	7
1.1 Origens do saber científico	7
1.1.1 O nascimento da cosmologia científica na Grécia antiga	8
1.1.2 Aristóteles	9
1.1.3 Ptolomeu. O auge da astronomia grega	10
1.1.4 Aristarco de Samus	11
2 A Física medieval	13
2.1 A astronomia e a ciência após Ptolomeu	13
2.1.1 A igreja e o aristotelismo	13
2.1.2 A astronomia na idade média	14
3 As Físicas pré renascentista e renascentista	15
3.1 O desenvolvimento da astronomia	17
3.1.1 Copérnico	17
3.1.2 As observações precisas de Thyco Brahe	18
3.1.3 O astrônomo Kepler	19
3.1.4 As leis de Kepler	19
3.2 A Física e a astronomia	20
3.2.1 O filósofo Giordano Bruno	20
3.2.2 Galileu e o nascimento da ciência	21
3.3 Descartes	23
3.4 Isac Newton	25
3.4.1 O desenvolvimento da óptica, do cálculo e da mecânica	25
3.4.2 O método geométrico e o problema das órbitas dos planetas	27
3.4.3 As ideias revolucionárias da Física	28
3.4.4 O cálculo e a polêmica Newton x Leibniz	30
3.5 Outros desenvolvimentos científicos	32
3.5.1 A eletricidade e o magnetismo	32
3.5.2 O estudo do calor e a termologia	32

4	A Física clássica	35
4.1	O aprimoramento da mecânica	35
4.2	Kant e Laplace. O aprofundamento da mecânica determinista	36
4.3	Desenvolvimento da termodinâmica	37
4.4	A teoria cinética dos gases	39
4.5	Evolução do eletromagnetismo	40
5	A Física moderna	45
5.1	O fim do meio etéreo	45
5.2	As limitações do eletromagnetismo	47
5.3	O átomo quântico	48

Apresentação

Esse texto versa sobre o conteúdo da disciplina Evolução da Física e é baseado nas aulas que ministrei ao longo dos anos.

Trata-se de um texto introdutório e sintético dedicado à compreensão de como evoluiu o pensamento científico na Física dos antigos gregos aos físicos contemporâneos restringindo-se aos personagens mais influentes e importantes.

Não pretendemos fazer uma revisão da história da ciência nem ser um texto crítico ou de pesquisa histórica, razão pela qual não são apresentados artigos ou livros de referência. É um texto que apresenta conhecimentos bem estabelecidos e de domínio público ordenado de modo coerente para que o estudante possa perceber a evolução das ideias e dos conceitos em um curso de 50 horas.

Todas as críticas e sugestões serão bem vindas e analisadas com a finalidade de corrigir erros e omissões para que as futuras versões possam vir melhoradas.

Salvador, fevereiro de 2017

Newton Barros de Oliveira.

Capítulo 1

Os primórdios da Física

O que é a Física?

Podemos conceituá-la como o estudo da natureza inanimada visando a procura das leis gerais da natureza e a construção de modelos matematizáveis que a represente pelo menos de maneira aproximada. Quando falamos em lei estamos nos referindo à representação de algo que ocorre com regularidade, que se repete regularmente. Por exemplo, a queda dos corpos é um fenômeno natural e a observação cuidadosa de diversos corpos em queda nos mostra que, em condições propícias, todos os corpos caem igualmente, isto é, todos levam o mesmo tempo de queda se forem soltos da mesma altura em qualquer lugar do planeta Terra ou mesmo fora dele.

É evidente que não podemos esgotar todas as experiências possíveis de se realizar com corpos em queda, mas com uma grande quantidade de corpos em queda que podemos experimentar obtemos o mesmo resultado. Passamos então a acreditar que isso é um comportamento regular e o descrevemos como uma *lei da natureza* e acreditando nessa lei, passamos a ter a possibilidade de previsão do que vai ocorrer com outros corpos em queda. Nos interessa a busca por leis gerais, leis que se apliquem a uma grande variedade de fenômenos.

É um fato intrigante a existência de regularidades, comportamentos repetitivos, na natureza. Poderia ser diferente. Também é muito interessante a nossa capacidade de percepção dessas regularidades.

Onde está a importância do conhecimento das leis da natureza? Primeiro, a nossa própria sobrevivência depende desse conhecimento, por exemplo, ninguém duvida que a velocidade de queda aumenta ao pularmos em um abismo. Segundo, esse conhecimento é importante para a destruição dos mitos e superstições, para criar a possibilidade de utilizar as “forças da natureza” a serviço do homem e de seu bem estar e de, até mesmo, ter o conforto psicológico e a satisfação em desvendar os mistérios da natureza.

1.1 Origens do saber científico

Quando falamos nas origens do saber científico normalmente nos reportamos à Grécia antiga pelo fato de ser a civilização que deixou alguma documentação ou registro das ideias dos primeiros pensadores.

Anaxágoras, um físico amante da natureza proveniente da Iônia, chega a Atenas em torno de 480 AC. A física por volta de 500 AC significava a natureza, o cosmos e ele dizia “Eu nasci para contemplar as obras da natureza...”. Credita-se a Anaxágoras a primeira explicação para a causa dos eclipses do Sol como sendo a interposição da Lua entre o Sol e a Terra.

A física dos gregos era a física das *causas finais*, as coisas aconteciam para que a harmonia, a ordenação do universo e do cosmos não fossem perturbadas.

A velha física era a física do senso comum onde as conclusões eram tiradas pelas observações superficiais dos fenômenos do dia a dia e suas interpretações baseando-se na inteligência mas não na experiência cuidadosa.

Por exemplo, a queda de dois corpos, um leve e um pesado, parece induzir que o corpo mais pesado cairia mais depressa. Na verdade esse é o resultado da observação simples da queda de uma folha e um fruto que soltam-se simultaneamente do galho de uma árvore. A utilização pura e simples da inteligência pode nos levar a concluir que esse é um comportamento comum aos objetos em queda. Não foi levado em conta os efeitos do ar atmosférico durante a queda. Uma experimentação mais cuidadosa, em um ambiente sem ar, nos mostra que os corpos caem igualmente.

1.1.1 O nascimento da cosmologia científica na Grécia antiga

Alguns fatos conhecidos:

- As primeiras observações astronômicas são muito antigas, provavelmente iniciadas com os Babilônicos 2000 AC.
- O movimento das estrelas no céu à noite descreve trajetórias circulares com um centro comum durante uma observação de uma noite. Todas as estrelas se movimentam em bloco num período de 23 horas e 56 minutos.
- O movimento do Sol e da Lua também ocorrem como arcos de círculos e ao longo do ano esses arcos mudam um pouco de posição.
- O movimento dos planetas, “estrelas errantes”, é muito mais complicado.

As tentativas para se criar uma teoria para explicar o movimento aparente dos corpos celestes iniciou-se na Grécia no quinto século AC. Era a procura por uma unidade subjacente lógica, ordenada e compreensível. Existiam duas correntes intelectuais naquela época: a filosofia grega da perfeição e da eternidade e a geometria Pitagórica. O movimento perfeito para os gregos era o movimento circular e uniforme e os modelos de movimento dos corpos celestes deveriam se encaixar nos movimentos circulares.

Platão (428 - 348 AC) na obra “Timeo” dizia que o Sol, Lua e planetas deviam ter movimentos uniformes em órbitas circulares.

Eudóxio construiu um modelo de esferas concêntricas (mais propriamente, superfícies esféricas) onde o Sol estava preso a uma esfera interna e as estrelas em uma esfera externa com a Terra no centro. Esse sistema foi melhorado por Callipus, outro astrônomo grego, e depois por Aristóteles.

Nesse sistema, os planetas, o Sol e a Lua estavam presos em superfícies esféricas concêntricas à Terra e cada superfície esférica girava ao redor de um eixo particular que

estava fixo em uma outra superfície esférica maior que girava ao redor de um outro eixo com um período diferente do anterior.

1.1.2 Aristóteles

O principal expositor da filosofia grega na antiguidade foi Aristóteles (discípulo de Platão) na Macedônia, no século IV AC. Nasceu em 384 AC na Iônia e morreu em 322 AC. Foi o fundador da biologia, introdutor do conceito da classificação dos animais e da observação controlada nas ciências biológicas quando descreve a evolução dos embriões de pintos. Pai do processo do raciocínio dedutivo explicitado no “Tratado sobre a lógica e o raciocínio”.

Sabe-se porém que Aristóteles não comprovou experimentalmente cada uma de suas afirmações, ele acreditou em muito do que seus mestres lhe disseram.

Para Aristóteles, os objetos sublunares da natureza eram compostos por quatro elementos básicos: terra, água, ar e fogo. Objetos pesados eram compostos por mais terra que os outros elementos. Objetos mais leves eram compostos por mais fogo que os outros elementos.

O movimento natural dos objetos dependia da composição. Os pesados deviam se mover naturalmente para baixo caindo em linha reta como um pedaço de ferro ou uma maçã e os leves como a fumaça moveriam-se naturalmente para cima. Movimentos de outros tipos não seriam naturais, seriam “violentos”. Por exemplo, uma pedra amarrada em uma corda girando em círculo.

Os movimentos dos corpos celestes eram naturalmente circulares. Ele admitia que os corpos celestes eram constituídos por mais um elemento, “o éter”, diferentemente dos corpos terrestres. O éter era um elemento imutável (incorruptível) enquanto que os outros elementos poderiam mudar (corruptíveis) dando origem ao nascimento e morte dos seres. Nesse contexto, não se admitia a existência do vácuo, do espaço vazio.

Para explicar os diferentes movimentos dos corpos terrestres, por exemplo, um mesmo corpo caindo no ar e na água, Aristóteles admitia a existência de uma “força motriz” e uma “resistência”. Para haver movimento a força motriz deveria ser maior que a resistência. A resistência dependia do meio. Duas bolas idênticas em queda no ar e na água mostravam que no ar a bola caía mais rápido do que na água. Dessa forma, considerando a causa do movimento como sendo a mesma força motriz, a resistência da bola na água era maior que a resistência da bola no ar.

Considere agora a queda de duas bolas de mesmo tamanho e pesos diferentes (ferro e vidro) caindo na água. A bola mais pesada cai mais rapidamente, donde se conclui que quanto maior for a força motriz maior será a velocidade de queda.

Aristóteles achava que isso ocorria sempre e parece não ter realizado experiências de queda de objetos com pesos diferentes e formas iguais no ar. Não há evidência que outra pessoa também tenha tentado fazer essa experiência nessa época.

Aristóteles admitia que a Terra era imóvel e era o centro do universo. Sua conclusão era baseada no fato de que as observações dos objetos em queda mostravam que os objetos caíam em direção ao centro da Terra em linha reta. Ele admitia que a trajetória de dois objetos em queda formavam um certo ângulo com vértice no centro da Terra e que a Terra era redonda. Em seu pensamento, se a Terra se movesse os objetos não cairiam no chão sobre o mesmo ponto abaixo dele, haveria um desvio lateral.

Sobre a curvatura da Terra, Aristóteles tem uma série de argumentos para defendê-la (384 -322 AC):

- Se a Terra fosse plana, quando um navio se afasta veríamos ele diminuir por inteiro aos poucos. Contudo, após uma grande distância vemos o casco do navio ir sumindo enquanto o mastro ainda é visível até que o próprio mastro desapareça.
- Quando se viaja para o sul, partindo da Grécia para a África, começam a aparecer estrelas que não são visíveis na Grécia. Por exemplo, o Cruzeiro do Sul não é visível na Europa.
- A Lua é eclipsada na fase de Lua cheia e quando isso ocorre, a sombra da Terra projetada sobre a Lua é sempre arredondada. Se a Terra fosse plana isso não aconteceria sempre.

Com essa nova visão do mundo terrestre como sendo redondo era possível navegar sempre pelo oceano sem nunca chegar ao “fim do mundo” pois voltaria-se ao ponto de partida após uma longa viagem.

Contudo, isso produz algumas consequências “absurdas” para aquela época: Como em qualquer lugar da Terra pode haver pessoas, muitas delas estariam de cabeça para baixo. Por que elas não caíam? Aristóteles argumentava que as coisas “pesadas” tendiam a ir para o centro do universo (a Terra) que seria o seu lugar natural, até atingir o repouso. Como toda a matéria pesada buscaria seu lugar natural, acumulando-se na região central, isso explicaria também porque a própria Terra não cai.

O fato dos astros não caírem nem se afastarem da Terra levou-o a concluir que eles não seriam formados por elementos pesados nem por elementos leves, daí a ideia que eles seriam formados pelo “éter”. Os astros seriam “condensações do éter”.

1.1.3 Ptolomeu. O auge da astronomia grega

O astrônomo Ptolomeu (século II) concentrou-se na descrição matemática do movimento dos astros baseada no movimento circular uniforme.

Fato observacional: A velocidade angular do movimento dos astros, Sol, Lua e planetas não é constante seu valor muda de um dia para o outro. Em particular, essa é a única anomalia que se observa para o movimento do Sol.

Ptolomeu descreve dois modelos possíveis e equivalentes para a órbita do Sol em torno da Terra, ainda considerada como imóvel e o centro do universo. No primeiro modelo, o Sol descreve uma órbita circular excêntrica, ou seja, a Terra não está no centro do círculo (Fig. 1.1). No segundo modelo, o deferente-epiciclo, a Terra situa-se no centro de um círculo (o

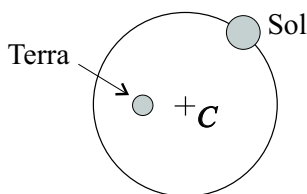


Figura 1.1: Modelo de órbita circular excêntrica para o Sol ao redor da Terra. O centro C da órbita não coincide com a posição da Terra

deferente) de mesmo raio que a excentricidade do modelo anterior. O Sol gira ao redor

de um ponto situado sobre o deferente em uma trajetória circular (o epiciclo) no sentido oposto à órbita do ponto ao redor da Terra (Fig. 1.2).

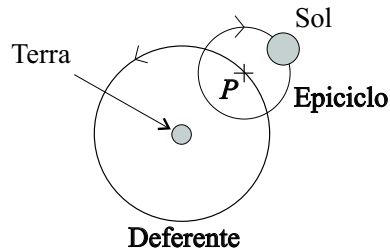


Figura 1.2: Modelo deferente-epiciclo para a órbita do Sol ao redor da Terra. O centro C da órbita é um ponto sobre o deferente e esse ponto gira ao redor do centro coincidente com a Terra

Esse sistema produz uma trajetória para o Sol idêntica à trajetória do modelo anterior quando visto da Terra. Por isso dizemos que os dois modelos são equivalentes.

Para descrever o movimento dos planetas, onde ocorre também o movimento retrógrado, o modelo deferente-epiciclo com ambos girando no mesmo sentido descreve razoavelmente bem o movimento dos planetas. Algumas anomalias do movimento dos planetas podem ser corrigidas deslocando-se o plano do epiciclo com relação ao plano do deferente e introduzindo-se mais um movimento circular excêntrico com relação a um outro ponto (o equante).

O que Ptolomeu introduziu foi uma geometrização na astronomia criando uma astronomia matemática. Enquanto isso, os filósofos e os cosmólogos continuavam a insistir no movimento circular uniforme das esferas pelas razões “naturais” de Aristóteles. Por outro lado, para os astrônomos matemáticos, o importante era elaborar modelos geométricos que pudessem prever as posições dos astros não importando a realidade desses modelos.

Aristóteles foi o último grande filósofo e cosmólogo grego e Ptolomeu foi o último grande astrônomo.

1.1.4 Aristarco de Samus

Foi o responsável por uma tentativa de um modelo heliocêntrico na Grécia antiga. Anteriormente a Ptolomeu, Aristarco de Samus propôs um modelo heliocêntrico. Ele afirmou que a Terra tinha um duplo movimento de rotação. Um movimento diurno ao redor do eixo dos polos e um movimento anual ao redor do Sol.

Para o movimento diurno das estrelas, o modelo heliocêntrico era equivalente ao modelo geocêntrico. Os gregos já conheciam a noção de movimento relativo ou “relatividade óptica” ou visual.

Esse modelo não foi bem aceito por causa dos “argumentos físicos” que na época não tinham como serem respondidos:

1. Por que os corpos caem em linha reta? Se a Terra se movesse, acreditava-se que deveria haver um deslocamento lateral do ponto onde o corpo deveria atingir o solo
2. Se a Terra girasse tanto em torno de si mesma como em torno do Sol, acreditava-se que deveriam aparecer ventos violentos, as nuvens e as aves ficariam para trás presas ao ar enquanto a Terra se movia.

3. Com o movimento rápido de rotação da Terra haveria “centrifugação” dos objetos, homens, animais e rochas.
4. Se a Terra se movesse ao redor do Sol, haveria paralaxe na observação das estrelas e isso não era observado ao longo do ano. Não se sabia nessa época que as estrelas estão tão distantes que o erro de paralaxe é desprezível quando observadas com instrumentos rudimentares.

O sistema heliocêntrico caiu no esquecimento por criar dificuldades tanto do ponto de vista metafísico como físico para aquela época.

Capítulo 2

A Física medieval

2.1 A astronomia e a ciência após Ptolomeu

Nenhum desenvolvimento do estudo do universo quer seja em física ou em astronomia ocorreu após Ptolomeu até o século XVI, ou seja, praticamente 1400 anos. Ptolomeu foi o último grande astrônomo.

A Grécia foi tomada por Roma e os romanos pouco se importavam com a ciência. Contudo o pensamento filosófico de Aristóteles permaneceu até o século V quando o império romano começa a ceder com a invasão dos Bárbaros do Norte. Em 476 Roma é tomada pelo chefe militar germânico Odoacro.

A partir do século VII os árabes começam a dominar no mediterrâneo e a conquistar a filosofia, a ciência grega e todas as obras científicas são traduzidas, comentadas e muitas vezes interpretadas e deturpadas. Isso ocorre na parte oriental da Europa enquanto a parte ocidental mergulhava nas trevas entre os séculos VI e XI.

No século XII a Europa ocidental retoma o contato com as obras da civilização helênica (grega antiga) “islamizadas” através das investidas árabes e invasões mouras. Do século XI ao século XIV a Europa ocidental começa a florescer intelectualmente e artisticamente.

As obras de Aristóteles foram traduzidas para o latim no século XII sendo divulgadas e ensinadas nas universidades mais como saber científico do que como filosofia.

2.1.1 A igreja e o aristotelismo

A atividade intelectual do fim da civilização grega à renascença científica dos séculos XVI e XVII foi comandada pela igreja com influência crescente e responsável pela educação em todos os níveis tendo, ora encorajado o espírito científico no séculos X a XVI ou mesmo contra esse espírito antes do século X e depois do início do século XVII.

A ciência havia sido condenada desde o início do cristianismo até o século X (representado pelo pensamento de Santo Agostinho no século IV) mas a influência árabe, o contato comercial com o oriente próximo e a estabilidade da igreja após o século X fez com que os membros das ordens religiosas estudassem e analisassem as traduções árabes das obras gregas.

A obra de Aristóteles na sua versão original era inaceitável para a igreja. A física e a metafísica de Aristóteles foi proibida de ser ensinada em 1210 e coube a Santo Tomás de

Aquino “cristianizá-la” no século XII. As obras foram traduzidas dos originais em grego e a igreja acabou por aceitar a cosmologia aristotélica como um modelo para o universo criado por Deus.

2.1.2 A astronomia na idade média

As obras de Ptolomeu tinham sido estudadas pelos árabes que estavam interessados em determinar com precisão a direção de Meca a partir das posições das estrelas para realizar suas orações e o modelo deferente-epiciclo de Ptolomeu ia se tornando cada vez mais complexo com a adição de novos epiciclos para aumentar a precisão.

Enquanto isso, os soberanos europeus estavam interessados na *Astrologia* e começaram a importar astrônomos do mundo islâmico para calcular as posições das constelações ascendentes nos momentos dos nascimentos das pessoas. Esses astrônomos além de operar e equipar os diversos observatórios astronômicos que foram construídos, também trouxeram os algarismos indu-arábicos e o uso da álgebra.

Capítulo 3

As Físicas pré renascentista e renascentista

Poucas coisas são relacionadas com a física até o século XIV. Podemos dizer que a física como conhecemos atualmente começa com as tentativas de definição do conceito de velocidade de um corpo.

No século XIV os físicos das universidades de Paris (fundada em 1170) e Oxford (fundada em 998) começam a se preocupar em quantificar a Física, em matematizá-la. Entre 1330 e 1340 alguns professores do Merton College em Oxford tentaram definir o conceito de velocidade instantânea de um corpo bem como a variação dessa velocidade, o que hoje chamamos de aceleração. Os movimentos foram classificados como uniformes e disformes (não uniformes). Eles tentaram matematizar o conceito sem sucesso (o cálculo diferencial só irá aparecer no século XVII).

Em Paris, um parisiense chamado Nicole d'Oresme introduz uma representação gráfica para a velocidade onde a duração temporal do movimento de um corpo era representado por um segmento de reta horizontal e a velocidade era representada por uma perpendicular a esse segmento com um certo comprimento proporcional à rapidez do movimento naquele instante (Fig. 3.1).



Figura 3.1: Representação da velocidade (rapidez) de um corpo durante um movimento em um determinado instante de tempo.

Um movimento uniforme seria representado por uma série de retas perpendiculares com a mesma altura (Fig. 3.2).

Como todas as barras tem altura constante, a figura acabaria sendo representada por um retângulo durante um certo intervalo de tempo (Fig. 3.3).

Se a velocidade estivesse variando, as perpendiculares teriam alturas diferentes. No movimento uniformemente disforme as perpendiculares cresceriam aos poucos de maneira

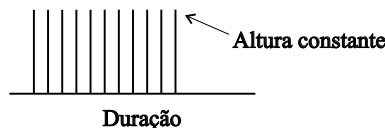


Figura 3.2: Representação da velocidade uniforme de um corpo durante um movimento para vários instantes de tempo.



Figura 3.3: Representação da velocidade uniforme de um corpo em movimento durante um intervalo de tempo.

uniforme (Fig. 3.4).

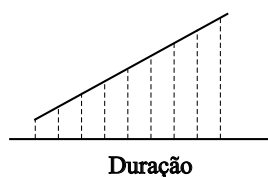


Figura 3.4: Representação do movimento uniformemente disforme de um corpo em movimento durante um intervalo de tempo.

Oresme criou um conceito confuso de “velocidade total” ou “quantidade de velocidade” que seria a soma de todas as velocidades e ele achava que a velocidade total seria o maior valor atingido pela velocidade e que as representações, as “configurações”, permitiriam chegar ao espaço percorrido!

Esses erros conceituais, no entendimento atual, se perpetuaram até Kepler e Galileu enquanto era jovem.

Vale lembrar que Aristóteles não se preocupou com a definição da velocidade e sua variação. O movimento era algo transitório e o importante era que o corpo em movimento estava procurando o seu lugar natural no cosmos. O que ele pensava era que uma força constante, a causa do movimento, produzia uma velocidade constante e esse pensamento também não foi contestado no século XIV.

Aristóteles também achava que a causa do movimento só podia ser transmitida por contato e seria uma causa externa. Ao se lançar uma pedra com a mão, o próprio ar continuaria a impulsionar a pedra depois que ela perdesse o contato com a mão! Esse era um ponto fraco na sua argumentação e sempre foi questionado desde sua época até mesmo no século XIV.

Jean Buridan (1295-1363) em Paris apresenta o conceito da impulsão (“ímpetus” em latim) transferindo para o próprio corpo a capacidade que Aristóteles atribuía ao ar. Contudo, essa impulsão seria consumida aos poucos pela resistência do ar até ser vencida por

ela.

A teoria da impulsão é considerada como sendo a maior contribuição na idade média para a Física e é a primeira causa para a quebra da estrutura aristotélica.

3.1 O desenvolvimento da astronomia

As grandes mudanças na astronomia no período renascentista ocorrem com os astrônomos Copérnico, Thyco Brahe e Kepler.

3.1.1 Copérnico

A partir de 1506, Copérnico estudou o sistema astronômico de Ptolomeu refletindo muito sobre ele. Criticou inicialmente esse sistema pelo fato do equante usado por Ptolomeu fazer com que os astros não tivessem um movimento circular uniforme, contrariando o mandamento aristotélico da perfeição do movimento. Criticou também o fato da complexidade do modelo devido à grande quantidade de epiciclos acrescentados para “salvar os fenômenos” de modo inútil pois, nem assim conseguiam fazer com que os fatos observados coincidisse com as previsões do modelo. Estudou os ensinamentos de muitos filósofos antigos: Cícero, Nicetus e Plutarco descobrindo que eles haviam pensado na possibilidade da Terra em movimento.

Copérnico propõe que o centro do Mundo seria o lugar do Sol e que as diversas esferas estavam centradas no Sol. Os planetas Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno faziam órbitas circulares ao redor do Sol e a última esfera seria a esfera fixa das estrelas. A Lua giraria ao redor da Terra.

A Terra continuava a ser o centro de atração dos graves. Em suas palavras “...devemos nos perguntar se o centro do Mundo é o centro da gravidade terrestre ou um outro. Para mim, eu acho que a gravidade nada mais é do que uma certa apetência natural... que tem as partes de encontrar-se na sua unidade e integridade, reunindo-se na forma de um globo”.

Para Copérnico, os graves iam para a Terra e não para o centro do Mundo, simplesmente porque os semelhantes tendem a unir-se.

Esse foi o modelo simplificado proposto no Livro 1 do tratado “De Revolutionibus”. O modelo completo apresentado nos outros cinco livros continha trinta e quatro deferentes, excêntricos e epiciclos e no final era tão preciso quanto o modelo de Ptolomeu. Porém utilizava movimentos circulares uniformes.

O movimento da Terra

O modelo de Copérnico para o movimento da Terra se baseava em algumas hipóteses:

- A Terra descreve uniformemente uma circunferência cujo centro é o Sol em um período de um ano. É o movimento anual ou orbital.
- A Terra gira ao redor de seu próprio eixo, o eixo dos polos, em um período de um dia ou $1/365$ do ano.
- O eixo da Terra faz um ângulo de 23,5 graus com relação à normal ao plano da órbita e esse eixo também tem uma direção fixa com relação às estrelas fixas.

- Os movimentos anual e diurno processam-se no mesmo sentido (anti-horário para um observador no polo norte).

O movimento dos planetas

Os movimentos dos planetas também se baseavam em algumas hipóteses:

- todos os planetas descrevem órbitas circulares em torno do Sol.
- Os planos das órbitas dos planetas praticamente coincidem com o plano da eclíptica, plano da órbita aparente do Sol visto da Terra.
- Os períodos dos planetas variam no mesmo sentido que o raio da órbita, maior raio, maior período.

A teoria heliocêntrica de Copérnico consegue explicar a maioria dos fenômenos celestes conhecidos naquela época com um pequeno número de hipóteses:

- Todos os planetas, incluindo a Terra, giram em torno do Sol.
- A Terra tem um movimento diurno e um movimento orbital.
- A esfera das estrelas é fixa.

A teoria de Copérnico é mais enxuta que a teoria de Ptolomeu, ela é mais coerente, mais econômica e mais compreensiva. Os astrônomos perceberam o valor da teoria de Copérnico, do ponto de vista técnico, mas o fato da Terra não ser imóvel era difícil de aceitar e acreditar.

O astrônomo inglês Thomas Blundeville, disse: “Copérnico... afirma que a Terra se movimenta e que o Sol permanece imóvel no meio dos céus; graças a essa hipótese errada, conseguiu melhor que nunca calcular os movimentos e revoluções das esferas celestes”.

No círculo popular dizia-se que o movimento da Terra infringia o senso comum e as leis do movimento, tendo sido propostos por um tolo.

A maior oposição ao modelo de Copérnico vinha das igrejas, tanto a Igreja Luterana como a Igreja Católica, não aceitavam que a Terra não fosse o centro do universo. Em 1611 a obra “De Revolutionibus” de Copérnico foi considerada proibida.

3.1.2 As observações precisas de Thyco Brahe

O astrônomo Thyco Brahe, em 1563, observou a conjunção dos planetas Marte, Júpiter e Saturno fora das datas previstas pelas tabelas astronômicas da época. Em particular, com um atraso de sete dias em relação à tabela nos dados de Copérnico. Percebeu então que as observações astronômicas necessitavam de maior precisão e investiu sua vida projetando, dirigindo a construção de novos instrumentos mais precisos e realizando novas observações. Ele levantou as posições de 777 estrelas e dos 5 planetas com precisão melhor que cinco minutos de grau.

Mesmo com precisão tão melhorada, não conseguiu observar paralaxe para as estrelas, pois isso só seria possível se a esfera das estrelas tivesse um raio centenas de vezes maior que o raio da esfera de Saturno e isso era difícil de aceitar. Isso fez com que ele retornasse ao modelo geocêntrico modificado. Ele assumiu que a Terra era imóvel, que a Lua o Sol e as estrelas giravam ao redor da Terra em órbitas circulares e que os planetas giravam ao

redor do Sol. Com seu modelo, ele consegue determinar a ordem dos planetas como fez Copérnico em seu modelo heliocêntrico simplificado. Contudo, o modelo é um misto de modelo heliocêntrico e geocêntrico.

3.1.3 O astrônomo Kepler

Kepler foi acolhido em Praga em 4 de fevereiro de 1600 pelo astrônomo Thyco Brahe em seu observatório no castelo de Banatek, mantido pelo imperador Rodolfo. Dois anos depois, Thyco Brahe morre e Kepler o sucede no posto de matemático imperial. Nesse período, ele elaborou sua obra fundamental: “A Astronomia Nova”.

Kepler achava que o mundo devia estar construído em torno de simetrias geométricas e essa ideia o guiava em todas suas obras da juventude, adaptando o modelo de Copérnico de modo que as órbitas dos planetas fossem inscritas ou circunscritas nos cinco poliedros regulares.

Em sua obra de 1596 “Mistério Cosmográfico”, Kepler já pretende explicar as diferenças nas velocidades angulares dos planetas ao longo da órbita e acreditava que o Sol possuía uma “alma-motriz” que empurrava os planetas com maior intensidade quando o planeta estava próximo ao Sol.

Do trabalho com Thyco Brahe, Kepler coletou dados precisos da órbita de Marte em dez oposições escalonadas entre 1580 e 1600 e mais outras de 1602 e 1604. Com esses dados ele tentou ajustar órbitas circulares excêntricas em relação ao Sol. Conseguiu encontrar uma órbita circular compatível com onze das doze oposições dentro da precisão de dois a três minutos de arco. Contudo, uma das oposições divergia em oito minutos entre o valor calculado e observado.

Kepler acreditava tanto nos dados de Thyco Brahe que foi obrigado a aceitar o fato de que o modelo de órbita circular estava errado e rejeitou uma teoria que não concordava com os dados. Convenceu-se então que o geocentrismo, o movimento uniforme e a órbita circular do pensamento aristotélico estavam errados.

3.1.4 As leis de Kepler

Depois de várias tentativas (e uma série de erros que acabaram se compensando), Kepler chegou a uma lei correta do movimento dos planetas ao redor do Sol, a lei das áreas ou a atual segunda lei de Kepler, em 1602. Publicada na obra “Astronomia Nova”, em 1609, que diz: “O raio vetor do Sol a um planeta varre áreas iguais em tempos iguais durante a órbita”.

Kepler também obteve em 1605 a chamada lei das órbitas (atual primeira lei de Kepler), que afirma: “As órbitas dos planetas são elipses com o Sol ocupando um dos focos”.

Em 1618, após um longo trabalho, Kepler encontrou uma relação entre o período das órbitas dos planetas e o semi-eixo maior dessa mesma órbita elíptica que é conhecida como a atual terceira lei: “A razão entre o quadrado dos períodos e o cubo do semi-eixo maior é uma constante.

$$\frac{T^2}{a^3} = cte.$$

Essa lei foi publicada em 1619 na obra “As Harmonias do Mundo”, também como consequência dos dados observacionais de Thyco para Marte.

Em sua obra seguinte, “Epitome da Astronomia Copernicana”, um tratado sobre suas descobertas, Kepler generaliza suas leis para os outros planetas descrevendo o sistema solar como é feito hoje em dia. Nessa obra, Kepler se preocupa também em encontrar uma causa para o movimento dos planetas, influenciado pelas observações de Galileu de 1610 sobre a rotação do Sol ao redor de seu eixo como consequência da observação das manchas solares feitas com um telescópio e pelo estudo do magnetismo na obra “De Magnet” de Gilbert. Kepler imaginou que a rotação do Sol criava um vórtice magnético no éter que acabaria por forçar o planeta a girar ao redor do Sol como se tivesse sendo arrastado.

Kepler tem uma importância histórica na contribuição da queda do pensamento aristotélico quando abandona o movimento circular, adotando o movimento elíptico com uma certa hesitação por ser a elipse um círculo imperfeito, deformado. Contudo, o universo de Kepler era esférico e finito.

Um ponto de destaque é que Kepler, assim como Copérnico, respeitaram os dados observacionais.

Outro fato importante é que ele expressou suas leis em uma linguagem matemática válida para todo o sistema solar e que pode ser utilizada para determinar as posições futuras dos planetas.

3.2 A Física e a astronomia

Apresentaremos agora filósofos e cientistas responsáveis pelo surgimento da física com contribuições na astronomia.

3.2.1 O filósofo Giordano Bruno

Foi um filósofo contemporâneo de Kepler, com ideias importantes na física. Afirmou que o universo era infinito e que, possivelmente, havia outros sistemas solares, apesar de não possuir nenhuma prova. Introduziu também a ideia moderna de sistema físico e do princípio da relatividade do movimento, ainda que não explicitamente.

Para refutar o argumento contra o movimento da Terra que dizia que se a Terra se movesse, um objeto não cairia ao solo na vertical do ponto em que foi largado, ele imaginou que o experimento fosse feito num navio em movimento em relação à margem.

Ele introduziu a noção de que os corpos que estão na Terra, participam de seu movimento, não pelo fato de serem da mesma natureza da Terra, como queria Aristóteles, mas porque pertencem ao mesmo sistema físico (Terra mais objeto) mesmo sistema mecânico, do mesmo modo que os objetos que estão no navio participam do movimento do navio por se tratar do mesmo sistema físico.

Quando afirmou que o objeto que cai do mastro do navio e atinge um ponto no pé do mastro, para qualquer movimento uniforme do navio, ele estava dizendo que um observador que esteja no navio vê o objeto cair da mesma forma que veria se o navio estivesse parado, ou seja, o observador não seria capaz de dizer se o navio está em movimento ou em repouso apenas pela realização de um experimento mecânico. Esse é o atual princípio da relatividade do movimento.

Por suas posições contrárias ao pensamento dominante da Igreja, Giordano Bruno foi queimado vivo, em Roma, em 1600.

3.2.2 Galileu e o nascimento da ciência

Galileu Galilei (1564 - 1642) estudou medicina e filosofia de 1581 a 1585 na universidade de Pisa, mas, em 1582, interessou-se pela geometria. Retornando para Florença em 1585, estudou as obras de Arquimedes e iniciou o estudo da determinação do centro de gravidade dos corpos. A determinação do centro de gravidade era um problema importante e relevante na época, isso acabou dando notoriedade a Galileu.

Novamente em Pisa, como professor de matemática nesta universidade, interessou-se pelo estudo da queda dos corpos entre 1590 e 1591 e publicou a obra “De Motu”.

Em 1592, na universidade Pádua, ensinou mecânica versando sobre máquinas simples como o plano inclinado, alavancas e roldanas de modo claro e racional.

Em 1597, declara a Kepler sua preferência pela cosmologia copernicana (heliocêntrica) mas não tinha provas convincentes para defendê-la.

Galileu teve a sorte de presenciar o aparecimento de uma supernova na constelação da Serpente em 1604 e, como não havia paralaxe, ele concluiu que se tratava de um astro na esfera das estrelas. Portanto, a teoria aristotélica de que os céus eram imutáveis não estava correta, o que levou-lhe a discordar dos defensores da cosmologia tradicional.

Em 1609, Galileu tomou conhecimento da existência de um novo instrumento óptico que permitia aproximar e aumentar o tamanho dos objetos distantes feito por um holandês, o telescópio. Galileu procurou informar-se, coletou todos os detalhes disponíveis e passou a pesquisar, desenvolver e a construir o aparelho, aprimorando-o.

Com o telescópio Galileu pôde observar as manchas solares em movimento em 1610 e concluiu que o Sol se movimentava (girava) em torno do seu eixo em um período de aproximadamente 28 dias. As manchas apareciam e desapareciam contrariando a doutrina aristotélica de que os astros não se transformavam (eram incorruptíveis).

Observou também a superfície da Lua, vendo os relevos, as sombras das montanhas que mudavam de tamanho de acordo com a incidência do Sol, as crateras e os “mares”. Concluiu que a Lua tinha muitas características semelhantes à Terra. Pôde até observar o reflexo do Sol na Terra iluminando a Lua.

Em janeiro de 1610, descobriu os quatro maiores satélites de Júpiter girando ao redor desse planeta como se fosse um sistema solar em escala reduzida.

Observou os planetas Mercúrio, Vênus e Marte, verificando que Marte não era um objeto pontual como aparentava a olho nu. Observou também a variação do brilho desses planetas ao longo da órbita, o que estava de acordo com a teoria heliocêntrica. Em 1613, ele estava completamente convencido dessa teoria.

De 1613 a 1633 Galileu tentou convencer os representantes da Igreja que as escrituras não devem ser seguidas ao pé da letra em questões de filosofia natural, ou seja, ele rompe com o “princípio da autoridade”.

Da observação do cosmos, Galileu concluiu por um universo ordenado, porém não hierarquizado como queria Aristóteles. A observação das estrelas na Via Láctea, comparando-as com o que era visível a olho nu e com o telescópio, que mostrava uma infinidade ainda maior, Galileu concluiu pela profundidade na esfera das estrelas por julgar que havia estrelas mais próximas e mais distantes. Contudo, por falta de provas não se pronunciou sobre se o universo era finito ou infinito, apenas concluiu que era mais extenso do que se imaginava.

A Terra deixou de ser um astro especial, a Lua tinha características semelhantes à Terra e Júpiter tinha satélites. Não havia razão para a Terra ser tratada de modo diferente dos outros astros. Não havia razão para a Terra ser o centro do universo! O conceito dos

“lugares próprios” de Aristóteles perdeu o sentido.

Outra contribuição importante de Galileu foi reconhecer que o repouso era um dos possíveis estados de movimento, aquele com velocidade zero. Ele percebeu que o repouso era um estado de extrema lentidão e não havia nada especial em um corpo estar em repouso.

Com relação à gravidade, Galileu a interpreta como sendo uma propriedade intrínseca ao corpo, uma “força” pertencente ao corpo e que o impulsiona em direção ao centro da Terra. Do estudo sobre os efeitos da gravidade sobre os corpos que deslizam em um plano inclinado, ele observa que “os graves tem inclinação (tendência) para o movimento de descida sendo realizado por eles por meio de uma força intrínseca e sem a necessidade de um motor externo”, que os corpos “tem repugnância pelo movimento de subida, de modo que nunca se movem desta maneira, a menos que sejam projetados violentamente por um motor externo ... são indiferentes em relação ao movimento horizontal pelo qual não tem inclinação ou repugnância”.

É importante notar o significado da palavra “horizontal” no pensamento de Galileu. Ele entendia o movimento horizontal como um movimento realizado sobre uma superfície esférica cujo centro coincide com o centro da Terra. Contudo, ele tinha consciência que sendo o raio da Terra muito grande, essa superfície esférica podia ser considerada como praticamente plana para todos os experimentos que pudessem ser realizados na Terra.

Vejamos o que diz Galileu na sua obra “Discursos e Demonstrações Concernentes a Duas Novas Ciências”, quando tratando do movimento de um projétil: “Suponhamos um corpo qualquer, lançado ao longo de um plano horizontal, sem atrito; sabemos ... que esse corpo se moverá indefinidamente ao longo desse mesmo plano, com um movimento perpétuo, se tal plano for ilimitado”. “... nós supomos que o plano horizontal, isto é, não ascendente nem descendente, é representado por uma linha reta, como se cada ponto dessa linha fosse igualmente distante do centro, o que não é o caso; se alguém parte do centro (centro da reta) e vai para qualquer uma das extremidades, afasta-se cada vez mais do centro (da Terra) e está portanto, subindo constantemente”. “Nossos instrumentos e as distâncias consideradas são tão pequenas em comparação com a enorme distância ao centro da Terra que podemos considerar um minuto de arco num grande círculo como uma linha reta...”.

Dessa forma, o movimento circular uniforme é tão natural quanto o movimento retilíneo para os corpos do nosso mundo e consequentemente também para a Terra e para os planetas. Assim como o Sol, o movimento de rotação da Terra em torno do seu eixo seria um movimento natural que se perpetuaria.

É importante frisar que Galileu não introduziu o princípio da inércia da maneira que conhecemos atualmente, a tendência natural dos corpos manterem o movimento em linha reta. Para Galileu existia uma conservação do movimento circular de forma natural, pois só assim os corpos não estariam nem subindo nem descendo com relação ao centro da Terra.

Outro fato importante é que o apego de Galileu às órbitas circulares para os planetas o impediu de aceitar o conceito das órbitas elípticas descobertas por Kepler em 1609, época em que Galileu começou a utilizar o telescópio para observar os astros no céu.

Por defender as ideias copernicanas e dar início ao desmonte da estrutura aristotélica, Galileu foi condenado pela Igreja como mostra a sequência de acontecimentos a seguir:

Em fevereiro de 1632 foi publicada em Florença a obra “Diálogo Sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo” tendo sido suspensa a sua venda por ordem do Papa Urbano VIII em agosto desse ano. Galileu é intimado a comparecer em Roma até outubro, o que não ocorreu, foi então ameaçado a ser levado a força em dezembro. Em 13 de fevereiro de 1633 Galileu chega a Roma e em 12 de abril começa o processo da igreja contra ele.

Galileu é condenado e, para não morrer, se vê obrigado a negar publicamente suas convicções em 22 de junho.

Em 1º de dezembro de 1633 foi transferido para Arcetri para cumprir pena em cárcere privado. Em Arcetri escreve sua obra “Discursos e Demonstrações Matemáticas Acerca de Duas Novas Ciências”, publicada em julho de 1638, ano em que ficou completamente cego. Em 8 de janeiro de 1642, morre aos 78 anos de idade.

3.3 Descartes

O filósofo, matemático e físico René Descartes (1596 - 1650) foi o criador do método, da geometria analítica e formulou a lei da refração. Foi contemporâneo de Galileu e defensor do movimento da Terra.

Em sua obra “Regras Para a Direção do Espírito”, ele expõe os passos mentais que levariam ao verdadeiro conhecimento mostrando a importância do método. Ele afirmava que “a mente não deve ser aplicada a questões cuja solução transcende suas possibilidades, como a influência dos astros na existência humana, da previsão do futuro ou da ação de forças ocultas na natureza”.

Ele pensava que a pesquisa devia ser feita de modo ordenado, “entendo por método regras fáceis e certas, que permitam a quem exatamente as respeitar nunca tomar por verdadeiro algo de falso e, sem cansar a mente com esforços inúteis, mas aumentando sempre gradualmente o saber, atingir o conhecimento verdadeiro de todas as coisas que será capaz de saber”.

Em sua concepção do mundo físico, Descartes colocou o conceito de extensão, o princípio da inércia, de partículas e conservação do movimento. Ele disse: “Por extensão entendemos tudo que tem comprimento, largura e profundidade sem inquirir se trata-se de um verdadeiro corpo ou apenas de espaço”. Em uma carta de 1630, ele enuncia o princípio inercial que é a base de sua física e cosmologia, quando disse: “Pelo fato de uma coisa haver iniciado a se mover, ela continua em seu movimento enquanto isso for possível e, se não puder continuar em linha reta, se inclina em sentido oposto sem se deter”.

Para Descartes, as partículas dos corpos eram indefinidamente subdivisíveis e preenchiam o espaço. Os movimentos das partículas iniciados desde a origem do universo permanecem constantes podendo passar de objeto para objeto. “A potência de mover a si mesmo presente em um corpo pode bem passar a outro, mas jamais poderá cessar de existir no mundo”.

Em sua concepção de princípio da conservação da quantidade de movimento, disse: “Quando um corpo impele outro, não pode imprimir-lhe nenhum movimento sem, ao mesmo tempo, perder a quantidade correspondente do seu, nem lhe subtrair sem que seu próprio movimento não seja acrescido em igual medida”.

Para ele, a diferença entre os sólidos e os líquidos é que os sólidos são constituídos por partículas próximas umas das outras e são tão lentas que não haveria choque de uma com as outras enquanto os líquidos eram compostos por partículas sutis e tão rápidas que quase não podiam se tocar.

Descartes é o criador da geometria analítica, onde os problemas geométricos são traduzidos para uma linguagem algébrica (equações) e vice-versa. O objetivo de Descartes é encontrar uma relação rigorosa entre equação algébrica e curva geométrica. Cada curva geométrica plana é representada por uma equação de duas incógnitas e cada equação desse

tipo define uma curva. Ele inaugurou a Teoria Analítica dos Lugares Geométricos.

Do seu interesse na fabricação de lentes que convergissem raios de luz paralelos em um ponto, ele acabou por descobrir o primeiro exemplo de uma curva (elipse) definida e analisada com equações paramétricas. No estudo das propriedades ópticas das curvas ovais, Descartes interessou-se pelo problema de determinar a reta perpendicular e também a tangente à curva em um determinado ponto. Ele disse: “Estarei seguro de haver fornecido tudo que é necessário para o estudo elementar das linhas curvas quando tiver estabelecido o método geral para traçar linhas retas que formam ângulo reto com este ou aquele ponto escolhido de tais curvas”. Ele percebeu que a reta tangente a uma curva em um ponto também era a reta tangente a um círculo que tocasse a curva naquele ponto.

Ele considerou que a reta tangente ao círculo podia ser obtida a partir da secante quando os dois pontos de interseção (raízes) são muito próximos, criando o método das raízes iguais que é uma das primeiras aproximações conceituais ao cálculo diferencial. Ele considerava as raízes coincidentes e não como limite de duas raízes distintas, uma vez que o conceito de limite não existia.

Ele também percebeu que o problema de encontrar a área abaixo de uma curva, o problema da quadratura de uma curva, coincidia com o inverso do problema das tangentes, que hoje sabemos ser a base do algoritmo do cálculo integral. Isso fica claro em uma carta de 20 de fevereiro de 1639, dirigida ao amigo Florimonde de Beaune, em que verifica que a quadratura de uma curva algébrica como a hipérbole, pode ser determinada com a curva logarítmica.

Outra contribuição importante está na demonstração intuitiva da afirmação que toda equação pode ser expressa como um produto de fatores $(x-a) \times (x-b) \times (x-c) \times \dots \times (x-n) = 0$ onde a, b, \dots, n são raízes da equação de grau n , hoje conhecido como Teorema Fundamental da Álgebra, formulado por Albert Girard (1590 - 1653) e finalmente demonstrado por Jean D’Alambert em 1739.

As contribuições de Descartes para a óptica encontram-se na sua obra “Dioptrica” de 1637. Nessa obra ele considera a luz como um corpo móvel, um movimento ou ação através de um “medium” (meio) que parte do corpo luminoso e chega aos nossos olhos. Ele compara a luz a uma bola arremessada por uma raquete em um jogo e acredita que a luz deva obedecer às leis do movimento enunciadas em sua obra “O Mundo”. Esse modelo foi proposto para que a maioria das pessoas pudesse compreender. Na verdade, ele pensava em uma “tendência ao movimento” transmitida de um lugar para outro por meio de numerosos corpos em contato entre si e sem interrupção.

Ele considerava que a luz era incolor e que as cores eram uma qualidade visível, potencial, quando disse: “Há corpos que refletem os raios de luz sem sofrer nenhuma mudança em sua ação, como os corpos brancos, ao passo que outros sofrem uma mudança similar àquela apresentada por uma bola que é atingida, isto é, os corpos que são vermelhos, amarelos, azuis ou de cores similares”.

Para ele, a cor deve-se à maneira distinta de como os corpos recebem a luz e reenviam para nossos olhos.

Ele descreve também a formação da imagem no fundo do olho, como numa câmara escura, tomando o cuidado de localizar corretamente o nervo óptico.

Em seu estudo sobre a refração da luz, ele desejava aprimorar as lentes utilizadas nos telescópios para que a qualidade da imagem fosse melhor que as observadas por Galileu pela utilização de lentes hiperbólicas ao invés de lentes esféricas.

Ao descrever a refração fazendo uma analogia a uma bola arremessada obliquamente

contra uma “tela sutil” ele considera a perda do componente vertical da velocidade ao atravessar a tela mantendo o componente horizontal constante, forçando a mudança na trajetória. Das experiências por ele realizadas concluiu a lei dos senos para a refração relatada em uma carta de junho de 1632, à Marin Mersenne: “Estabeleço uma relação entre os senos dos ângulos de incidência e dos ângulos de refração”. Essa mesma lei parece ter sido encontrada simultaneamente por Willebrod Snellius falecido em 1626. Vale notar que Kepler já havia tentado relacionar a refração com o seno dos ângulos sem sucesso.

Na obra “Meteoros”, Descartes apresenta uma teoria sobre a formação do arco-íris baseando-se na lei da refração. Na descrição do fenômeno, ele baseia-se no seu método em três etapas fundamentais:

- Construção do experimento.
- Observação dos fenômenos, relacionando-os com as variações de determinadas condições.
- Coleta e registro dos resultados.

Para realizar o experimento, utilizou jatos d’água produzidos por vasos cheios d’água em diversas alturas com relação ao observador observando a cor da luz quando os raios de luz entravam e saíam sob determinado ângulo nas gotículas de água do jato. Comparou suas observações com o que ocorria quando a luz atravessava um prisma de cristal. Verificou também o aparecimento de todas as cores no arco-íris.

Concluiu: “A natureza das cores consiste somente no fato de que as partes da matéria sutil que transmitem a ação da luz tendem a girar as partículas com mais força e não a se moverem em linha reta: assim, aquelas que tendem a girar com muito mais força causam a cor vermelha e aquelas que tendem a girar somente um pouco mais forte, o amarelo”.

Ele morreu em 11 de fevereiro de 1650, de pneumonia, na Suécia.

3.4 Isac Newton

Newton nasceu na zona rural, em Woolsthorpe Manor, em 25 de dezembro de 1642 no calendário juliano correspondente a 4 de janeiro no calendário gregoriano, oito anos antes da morte de Descartes. Estudou no The King’s School, em Grantham, dos doze aos dezessete anos onde aprendeu muitos conhecimentos matemáticos como aluno de Stokes.

3.4.1 O desenvolvimento da óptica, do cálculo e da mecânica

Em 1661 é admitido no Trinity College de Cambridge, como estudante ajudante, onde é influenciado pelo matemático Isac Barrow (1630 - 1677) e o filósofo Henry Moore (1614 - 1687), defensor de Descartes. Em agosto de 1665 ele deixa Cambridge fugindo da peste negra e volta para o campo, para sua cidade natal, Woolsthorpe no condado de Lincolnshire. Nesse ano, considerado como “ano das maravilhas” (annus mirabilis) na vida de Newton, encontram-se as descobertas primordiais na Matemática, na Óptica e na Teoria da Gravitação.

No início do ano ele encontrou o método da aproximação das séries e a regra para reduzir a potência de um binômio qualquer a essas séries.

$$(1 + x)^\alpha = 1 + \alpha x^{\alpha-1} + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} x^{\alpha-2} + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{3!} x^{\alpha-3} \dots$$

Ele chegou a essa expressão tateando no escuro, mas não conseguiu demonstrá-la formalmente, apesar de não ter dúvidas quanto à sua exatidão.

Com essa fórmula ele conseguiu calcular as áreas de várias curvas definidas por uma função do tipo binomial. Logo em seguida, ele aborda o problema das tangentes a uma curva e das áreas sob as curvas e descobre que um problema é o inverso do outro.

Newton considerava que uma curva era a trajetória de um ponto em movimento chamado de “fluente” e as velocidades ou taxas de crescimento eram chamadas de “fluxões”. Ele introduziu o conceito de um intervalo infinitesimal, de velocidade e de aceleração (conceito de derivação) e mostrou que o “fluxão” (derivação) da área sob a curva é a ordenada ou valor da função que descreve a curva naquele ponto onde foi calculado o fluxão (inclinação da reta tangente). Esse é o teorema fundamental do cálculo. Usando essa ideia ele constrói as primeiras tabelas relacionando as áreas sob as curvas e as funções que descrevem as curvas, hoje conhecidas como tabelas de integrais. Isso ocorreu em 1665, mas Newton só publica seus resultados em 1674.

Ele leu o livro de Descartes sobre as cores da luz e adquiriu um prisma de vidro em agosto de 1665 para refazer a experiência de decomposição da luz branca e se convence de que a teoria de Descartes para a formação das cores não era boa. Realizando a experiência com cuidado, ele percebeu que as cores não são modificações da luz branca como pensava Descartes, mas sim componentes dessa luz. Ele verificou isso separando uma das cores do espectro e fazendo com que essa cor atravessasse outro prisma observando apenas uma nova refração sem alteração da cor.

Por outro lado, ao passar todas as cores do espectro por um novo prisma (invertido) ele voltou a obter luz branca.

Ele tirou uma conclusão importante com relação à focalização das imagens por uma lente: além da aberração esférica já observada por Descartes, ele observou também a aberração cromática, ou seja, focos diferentes para as diferentes cores e concluiu que um telescópio deveria utilizar um espelho côncavo ao invés de lentes de vidro, uma vez que o processo de reflexão dos espelhos não apresenta aberração cromática.

Newton então constrói um telescópio com espelhos em 1668 e o envia para a Royal Society, sendo então eleito como “fellow” em 1672. Nesse mesmo ano, ele publica um artigo nessa mesma sociedade sobre a teoria das cores e não é bem aceito por Robert Hooke (1635 - 1703) e por Christian Huygens (1629 - 1695). Huygens defendia uma teoria ondulatória para a luz e Hooke havia realizado experiências que sugeriam que a luz tinha uma certa periodicidade enquanto Newton defendia um comportamento corpuscular para a luz.

Newton defendia que a luz branca era composta por diferentes corpúsculos que propagavam como pequenos projéteis com diferentes velocidades. Esses corpúsculos, ao chegarem na interface do ar com o vidro do prisma seriam atraídos perpendicularmente ao vidro alterando suas velocidades e produzindo a mudança de direção (a refração) de acordo com a cor (correspondente à velocidade inicial do corpúsculo).

Em 1675, ele modifica sua teoria para levar em conta o aspecto periódico da luz observado nos experimentos em lâminas finas como bolhas de sabão. Agora ele admite que todos os corpúsculos têm a mesma velocidade, mas têm formas diversas, interagem com o éter que preenche todo o espaço e que a densidade do éter é variável; que o éter refrata a luz e que ao interagir produz vibrações no éter. Essas vibrações confeririam à luz uma certa periodicidade.

Enquanto que os defensores da teoria ondulatória da luz (como Hooke) afirmavam que o caráter periódico está associado à natureza ondulatória da luz, Newton interpreta essa

periodicidade como uma vibração do éter.

A presença do éter era uma constante no pensamento de Newton, ele aplica a hipótese do éter não somente aos fenômenos ópticos, mas também aos fenômenos químicos, elétricos, magnéticos e na fisiologia da percepção em 1675. Ele até questiona se a atração gravitacional da Terra não resultaria da “condensação de outra forma de gás etéreo”. Durante muito tempo, até 1680, ele achava que a gravidade era causada pelo contato com um meio interplanetário.

3.4.2 O método geométrico e o problema das órbitas dos planetas

Em sua juventude, no final de 1660, Newton pensava que as órbitas dos planetas eram circulares e uniformes ao redor do Sol e do estudo da obra de Descartes, “Princípios da Filosofia”, ele aprendeu que um corpo em trajetória circular estava submetido à tendência (o que chamamos de força) de escapar do centro e entre 1665 e 1666 ele percebeu que essa tendência a escapar do centro é proporcional ao quadrado da velocidade dividido pelo raio da órbita, v^2/r . Essa mesma fórmula também foi descoberta, independentemente, por Huygens e publicada em 1673 na obra “Horologium Oscillatorium”. A combinação dessa expressão com a terceira lei de Kepler ($T^2/r^3 = cte$) levou Newton a descobrir que essa tendência a escapar do centro era proporcional ao inverso do quadrado da distância entre dois corpos orbitando um ao redor do outro.

É importante notar que, em seus trabalhos, Newton não adota o mecanicismo cartesiano tendo se fixado nos métodos geométricos dos matemáticos antigos. Em suas palavras: “Na verdade, o método dos antigos se reveste de mais elegância que o do senhor Descartes. Porque Descartes obteve seus resultados por meio de cálculos algébricos que, transformado em palavras (à maneira dos antigos em seus escritos) se revelaria cansativo e indigesto até à náusea, para o entendimento. Os antigos, ao contrário, chegavam a seus resultados usando umas poucas proposições simples, julgando que nada escrito de forma diferente fosse digno de ser publicado e, em consequência, dissimulavam a análise que lhes permitiam encontrar suas construções”.

Nessa época, a quantidade de pessoas que utilizavam os métodos introduzidos por Descartes, Fermat, Pascal, Cavalieri, Torricelli ou Wallis não parava de crescer enquanto que os defensores dos métodos rigorosos dos geométricos clássicos estavam em declínio. Newton dizia: “Se os homens dos últimos tempos abandonaram o método sintético dos antigos tanto pior para eles: Se a autoridade dos novos geométricos está contra nós, nem por isso a autoridade dos antigos deixa de ser maior”.

Newton lamentava de ter se dedicado, no início de sua formação, a estudar as obras de Descartes e dos outros algebristas. Apesar de ter inicialmente realizado suas primeiras descobertas matemáticas seguindo os passos de Descartes e Wallis, Newton se afastou dos métodos algébricos que ele chamava de “nova análise”.

Entre 1670 e 1690 seus trabalhos matemáticos são dedicados à geometria, mas nem por isso ele abandonou a álgebra e o cálculo dos fluxões. Por exemplo, em suas notas de aulas da cadeira lucasiana no Trinity College, publicadas com o título “Arithmética Universalis” dedicado à teoria das equações algébricas, ele diz no apêndice: “As equações são as expressões de um cálculo aritmético e, enquanto tais, não tem lugar na geometria... As multiplicações, as divisões e outras operações do gênero foram introduzidas recentemente na geometria e isso sem precaução e contra os princípios dessa ciência... Assim, essas duas ciências (aritmética e geometria) não devem ser confundidas... Os antigos, delas faziam

uma distinção tão clara que nunca introduziam termos aritméticos na geometria. E os modernos, confundindo uma com a outra, perderam a simplicidade que faz toda a elegância da geometria”.

Em seus trabalhos iniciais da juventude, o método dos fluxões era um método analítico, um método simbólico baseado no conceito dos infinitésimos. Em 1671 ele esboça o método geométrico, ou método sintético dos fluxões, onde não emprega símbolos algébricos. Ele refere-se somente à figuras geométricas que devem ser entendidas como geradas por um fluxo contínuo, ou seja, como movimentos. Esse método aparece em um manuscrito de 1680 chamado de “Geometria Curvilínea” e aparecerá no livro I da sua grande obra “Principia”. Vale notar que um dos objetivos dessa obra era atingir um grande público garantindo a continuidade da tradição geométrica clássica.

3.4.3 As ideias revolucionárias da Física

Em agosto de 1684 Newton recebe a visita do astrônomo Edmond Halley que buscava a solução para o problema de determinar o tipo de força que produz órbitas circulares e elípticas dos planetas. Esse problema tinha sido proposto pelo matemático Christopher Wren à Halley e Robert Hooke prometendo um prêmio, um livro de 40 xelins, a quem pudesse provar que uma força inversamente proporcional ao quadrado da distância seria suficiente para justificar as órbitas dos planetas. Newton disse à Halley que já havia pensado nisso alguns anos antes e que possuía a demonstração guardada em alguma gaveta e que logo lhe enviaria o manuscrito.

Em novembro de 1684 ele recebeu de Newton um manuscrito breve com a resposta. Halley apresentou essa resposta aos membros da Royal Society e pediu que Newton desenvolvesse suas ideias, o que foi feito nos três anos seguintes. Em 1687 a primeira edição dos Principia foi impressa financiada totalmente por Halley, que tinha poucos recursos financeiros. A obra foi publicada em três volumes, o primeiro volume dedicado ao movimento dos corpos no vácuo, o segundo volume dedicado ao movimento dos corpos nos meios resistentes e o terceiro volume dedicado ao movimento dos planetas no vácuo, atraídos pelo Sol por uma força central cuja intensidade é inversamente proporcional ao quadrado da distância.

A obra, que não foi bem escrita e era difícil de ler e entender, não foi bem aceita pela Royal Society apesar dos esforços de Halley.

Nessa obra encontram-se os três axiomas ou leis do movimento:

1. Todo corpo se mantém em estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme em que se encontra a menos que uma força aja sobre ele, obrigando-o a mudar de estado.
2. As mudanças que ocorrem são proporcionais à força motora e se fazem na linha reta na qual se imprimiu a força.
3. A ação é sempre igual e oposta à reação, isto é, as ações de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e em sentidos contrários.

Veja que não aparece explicitamente a definição $F = ma$ ou $F = m \Delta v / \Delta t$. Newton não utilizou o conceito dos fluxões. Mais adiante, ele explica melhor a segunda lei do movimento (livro II): “A velocidade que uma força dada pode produzir numa matéria dada, em um dado tempo, é diretamente proporcional ao tempo e à força e inversamente proporcional à quantidade de matéria. Quanto maior a força, mais longo o tempo e menor a quantidade

de matéria, maior será a velocidade produzida, o que é bem claro pela segunda lei do movimento”.

A opção de Newton em não abordar o conceito dos fluxões e utilizar a linguagem geométrica ao longo da obra também leva em conta o nível de conhecimento dos leitores da obra que não iriam compreender uma nova física expressa em uma nova matemática simbólica. A linguagem geométrica era a que satisfazia a expectativa dos filósofos da natureza da época (fins do séc XVII).

No início da obra *Principia* são definidos os conceitos básicos da dinâmica: massa, quantidade de movimento, força inercial, força impressa, força centrípeta e as noções de tempo e espaço absolutos:

“O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, sem relação com nada externo, flui uniformemente; da mesma forma, o espaço absoluto, sem relação com as coisas externas, permanece sempre o mesmo e imóvel”.

Considerando uma embarcação empurrada pelo vento ele diz: “Assim, se a Terra estivesse em repouso, um corpo que se encontra em um repouso relativo na embarcação teria um movimento verdadeiro e absoluto cuja velocidade seria igual a que carrega a embarcação na superfície da Terra; mas como a Terra se move no espaço, o movimento verdadeiro e absoluto desse corpo é composto do movimento verdadeiro da Terra no espaço imóvel e do movimento relativo da embarcação na superfície da Terra; e se o corpo tivesse um movimento relativo na embarcação, seu movimento verdadeiro e absoluto seria composto de seu movimento relativo na embarcação, do movimento relativo da embarcação na Terra e do movimento verdadeiro da Terra no espaço absoluto”.

O *Principia* traz uma ideia revolucionária quando Newton afirma que duas massas se atraem à distância, instantaneamente no espaço vazio. Essa ideia contradiz os ensinamentos dos filósofos adeptos à teoria mecanicista e cartesiana onde os fenômenos da natureza devem ser estudados em termos de ações de contato como choque entre partículas ou de propagação de ondas num meio material. Muitas objeções foram levantadas contra essa ideia e o próprio Newton parece concordar com elas em um certo sentido. Em uma carta de 1693 dele para Richard Bentley ele diz: “Que a gravidade deva ser inata, inerente e essencial à matéria para que um corpo possa agir sobre um outro corpo à distância e através do vazio sem a mediação de outra coisa (...) é um absurdo tão grande que eu acredito que nenhum homem que tenha alguma faculdade competente em pensar em matéria filosófica possa jamais aderir a isso. A gravidade deve ser causada por um agente que atua de maneira constante, segundo determinadas leis mas que esse agente seja material ou imaterial eu tenho deixado para a consideração de meus leitores”.

Christian Huygens e outros filósofos importantes se opunham à ideia da gravidade como uma ação à distância e para enfrentá-los Newton apela para as regras que é preciso seguir para filosofar apresentadas no livro III dos *Principia* (na terceira e última edição):

1. Só devem ser admitidas causas que forem necessárias para explicar o fenômeno.
2. Os efeitos do mesmo gênero devem sempre ser atribuídos, tanto quanto possível, à mesma causa.
3. As qualidades dos corpos que não são passíveis nem de aumento nem de diminuição e que pertencem a todos os corpos relativamente ao quais podem ser feitas experiências, devem ser consideradas como pertencentes a todos os corpos em geral.

4. Na filosofia experimental, as proposições obtidas por indução dos fenômenos devem ser encaradas, apesar das hipóteses contrárias, como verdadeiras, até que quaisquer outros fenômenos as confirmem inteiramente ou façam ver que são sujeitas a exceções.

Vejamos como se encaixam às regras a teoria da gravitação:

1. A lei da gravitação é deduzida das leis de Kepler e é suficiente para explicar o movimento dos planetas.
2. Essa lei justifica fenômenos idênticos por uma mesma causa como, por exemplo, a queda de uma maçã sobre o solo e a “queda” perpétua da Lua em órbita em torno da Terra.
3. Essa lei é universal, pois ela está presente em todos os fenômenos celestes e terrestres conhecidos.
4. Outras hipóteses alternativas à gravitação podem ser consideradas, como a teoria dos turbilhões, mas não tem valor a não ser que sejam derivadas das próprias observações.

Newton não mistura a lei da gravidade com a sua causa. A lei: a atração é proporcional ao produto das massas que se atraem e inversamente proporcional ao quadrado das distâncias, é deduzida dos fenômenos (representados pelas leis de Kepler) e permite explicar o movimento dos corpos celestes. Quanto à causa ele diz: “na verdade, ainda não consegui deduzir dos fenômenos a razão das propriedades da gravidade e não formulo nenhuma hipótese”.

Isto corresponde ao nascimento da metodologia científica moderna, a ciência não procura as primeiras causas, ela chega apenas nas formulações das leis matemáticas justificadas pelas generalizações indutivas.

Os Principia foram divulgados na França em grande parte devido a Voltaire que via Newton como um “herói do pensamento”. Ele ajudou na edição da tradução francesa dos Principia em 1749 e já havia publicado em 1738 em Amsterdã os “Elementos da Filosofia de Newton” para que todos tomassem conhecimento do pensamento de Newton sendo um grande defensor de suas ideias na França.

3.4.4 O cálculo e a polêmica Newton x Leibniz

Nem todos aceitavam o pensamento newtoniano, um grande opositor foi Gottfried Leibniz (nascido em 1646 na Alemanha) que defendia ideias contrárias sobre as leis da mecânica, movimento dos planetas, os conceitos de tempo e espaço e a existência do vazio. A grande polêmica, contudo, se refere sobre a “paternidade” do cálculo.

Inicialmente, os conhecimentos de Leibniz da geometria, da álgebra e da nova análise eram insuficientes até que, durante quatro anos em Paris, interagiu com Huygens que lhe indicou textos para o estudo, o que foi realizado intensamente. Ele leu as obras matemáticas de Descartes, Torricelli, Roberval, Pascal, Wallis e Barrow e rapidamente (em alguns meses) suplantou o conhecimento matemático de Huygens e de outros sábios chegando na formulação do cálculo diferencial e integral no período de 1672 à 1676, inclusive com a notação e símbolos (dx e $\int y dx$) que usamos atualmente.

Vale notar que em 1676 Newton enviou duas cartas a Leibniz através de Henry Oldenburg referindo-se, entre outras coisas, ao teorema do binômio e ao método da quadratura. Faz

menção, também, ao teorema fundamental do cálculo infinitesimal que foi informado de maneira codificada. Contudo, nesse momento Leibniz já havia criado seu próprio cálculo diferencial e integral. Leibniz era defensor da nova matemática enquanto Newton prefere os métodos geométricos clássicos. Apesar disso, Leibniz tem grande admiração pelo método das primeiras e últimas razões de Newton, mas, sempre que possível, ele convida para que se adote o novo cálculo e que o desenvolvam sem se preocupar com o rigor ou com a tradição da matemática antiga.

Em uma carta de 1691 a Huygens ele diz "... O que há de melhor e mais prático no meu novo cálculo é que apresenta verdades por meio de uma espécie de análise e sem qualquer esforço de imaginação - que muitas vezes só é bem sucedido por acaso -... e com relação à Arquimedes ele nos oferece todas as vantagens que Viète e Descartes haviam nos oferecidos com relação à Apolônio de Perga".

O que Leibniz prega é que seu cálculo permite chegar aos resultados através de um raciocínio que lida com símbolos sem a necessidade de prestar atenção às figuras geométricas. Ele fala nas vantagens de realizar o raciocínio cego sem se prender na interpretação dos símbolos. Ele diz: "Na verdade, a fim de manter a matemática pura, afastada das controvérsias filosóficas (...), não devemos nos preocupar em saber se os infinitos e os infinitamente pequenos são reais (...) e devemos empregá-los como expressões que servem para simplificar o raciocínio".

Leibniz procura divulgar o seu cálculo o mais que possível tendo adeptos como Jaques e Jean Bernoulli na Basileia, Suíça. Rapidamente essas novas ideias se espalham pela Europa tendo os discípulos de Leibniz ocupado as cátedras de matemática e as academias em ciência.

Em 1699, um dos discípulos de Newton, Nicolas Fatio de Duillier, acusa Leibniz de ter plagiado a obra de Newton em um livro pouco divulgado, mas pouco depois, John Keill acusa Leibniz de ter retomado o cálculo newtoniano trocando os nomes e as notações num artigo na *Philosophical Transactions* da Royal Society em 1710 gerando uma grande polêmica.

Uma das acusações da época feita por Bernoulli era: se Newton tinha descoberto o cálculo, por que não utilizou o método dos fluxões nos *Principia*? Newton alega duas razões para isso. A primeira se trata do público para o qual a obra foi dirigida e a segunda se refere à amplitude e a complexidade dos problemas derivados de sua cosmologia. Ele disse: "Para os matemáticos deste século, versados quase que completamente em álgebra, o estilo sintético (dos *Principia*) é menos agradável, seja porque ele parece exageradamente prolixo ou próximo demais do método dos antigos, seja porque ele parece revelar menos o método da descoberta. Eu teria certamente podido escrever em estilo analítico o que descobri com menos esforço do que me foi necessário para terminar (minhas descobertas). Escrevi para filósofos impregnados dos elementos da geometria e lancei as bases de uma nova filosofia natural em termos geométricos".

Com relação à complexidade dos problemas derivados de sua cosmologia, o método dos fluxões de Newton ainda não estava suficientemente desenvolvido para permitir seu uso em todos os casos. Somente em meados do século XVIII é que matemáticos como Euler, Clairaut, D'Alambert, Lagrange e Laplace serão capazes de traduzir as proposições geométricas dos *Principia* em termos analíticos como, por exemplo, no problema de dois corpos. Os problemas matemáticos originados por sua cosmologia são extremamente complexos.

Um fato importante para o sucesso do pensamento newtoniano frente aos leibnizianos é que Leibniz defende a teoria dos turbilhões como causa dos movimentos celestes, mas não consegue compatibilizá-la com as três leis de Kepler, fracassando, enquanto que os

newtonianos são bem sucedidos.

Leibniz morre em novembro de 1716 e Newton na primavera de 1723.

3.5 Outros desenvolvimentos científicos

Até agora nos concentramos mais nas ideias relativas à astronomia e o cosmos, às noções iniciais sobre movimento, os princípios da mecânica e da óptica até o séc XVII. Nesse mesmo intervalo de tempo, outras áreas da física também iniciaram suas evoluções: a eletricidade e o magnetismo, o estudo dos gases, a termologia e a termodinâmica.

3.5.1 A eletricidade e o magnetismo

As primeiras observações dos fenômenos elétricos parecem ter sido feitas por Tales de Mileto entre 546 e 624 relativas ao resultado de atritar o âmbar (resina natural sólida) com a lã que passava a atrair pequenos objetos.

Algumas rochas e minerais também apresentavam propriedades parecidas ao atrair pedaços de ferro e, por algum tempo, os fenômenos elétricos e magnéticos foram confundidos.

Girolando Cardano, na Itália entre 1501 e 1576, foi quem primeiro diferenciou esses fenômenos, seguido por William Gilbert, entre 1544 e 1603 na Inglaterra, que compilou na obra “De Magnete” de 1600 os fatos conhecidos a respeito dos fenômenos elétricos e magnéticos, dando o nome de elétricos aos corpos que se comportavam como o âmbar atritado. Em sua concepção, esses corpos emitiam um “efluvium”, liberado pelo calor produzido pelo atrito (fricção) em todas as direções.

Já mencionamos que Kepler foi influenciado por essa obra ao pensar que o movimento dos planetas estava associado aos vórtices (turbilhões) magnéticos.

Niccolo Cabeo (1586 - 1650) que está associado à descoberta da repulsão elétrica leu o trabalho de Gilbert, mas não conseguiu compatibilizar o fenômeno da repulsão com os “efluvium” como Gilbert imaginou. Ele associou os fenômenos elétricos à presença do ar como agente intermediário. Somente quando os experimentos foram realizados no vácuo por Robert Boyle em 1675 é que se verificou que a presença do ar não era necessária. Isso só foi possível após a invenção da bomba de vácuo por Otto von Guericke na Alemanha, que também construiu o primeiro gerador eletrostático rotativo por volta de 1603, uma bola de enxofre girada por uma manivela. Ele foi um grande defensor da ideia da existência do vácuo, contrariando a doutrina de Aristóteles de que a natureza tinha horror ao espaço vazio.

Nada mais interessante ocorre neste século em matéria de eletricidade e magnetismo.

3.5.2 O estudo do calor e a termologia

Achados arqueológicos datados pelo método do carbono 14 evidenciam que o homem dominou o fogo por volta de 40.000 AC e a sensação de calor produzida pelo fogo também ocorre devido aos esforços físicos, sendo que este pode, inclusive, ser utilizado para produzir o fogo.

A primeira máquina térmica capaz de produzir movimento parece ter sido o motor de Heron, na Grécia antiga, que utilizou um jato de vapor d’água aquecido para movimentá-lo.

Para medir o estado de aquecimento de um corpo, o quão quente ele se encontra, diversas técnicas foram utilizadas. Uma das mais antigas era utilizar o momento da fusão de certos materiais (ceras e alguns metais) como indicador. Galileu construiu, em 1592, um instrumento com essa finalidade, o termoscópio, em que o ar aquecido em um bulbo de vidro conectado a um tubo, também de vidro, empurra a água contida no tubo, sendo o precursor do termômetro. Esse aparelho foi aperfeiçoado pelo médico francês Jean Rey que o utilizava para avaliar a febre dos seus pacientes enfermos. Após Galileu, vários termômetros são produzidos, inclusive o termômetro a álcool, em 1640, pelo duque Ferdinando II (1610-1670) na Toscana, com aplicações na medicina, agricultura e meteorologia.

Nesse século ainda havia muita confusão entre os conceitos de calor e temperatura e, em 1620, o filósofo Francis Bacon (1561 - 1626) tentou distingui-los sem sucesso.

No estudo do comportamento dos gases, Robert Boyle chegou à relação empírica entre a pressão e o volume ($PV = cte$), quando não se permite que o gás aqueça ou esfrie (temperatura constante) durante a variação do volume. Boyle era um físico e químico experimental cuidadoso e trocou muitas correspondências com Newton nessa época.

No final desse século, em 1679, Denis Papin inventa o digestor a vapor (Marmita de Papin, precursor do autoclave) e em 1691, ele produz uma máquina a vapor que foi pela primeira vez utilizada em 1704 para girar as pás que moviam um barco, surgindo o primeiro barco a vapor. Essa máquina foi muito aperfeiçoada no séc XVIII.

A revolução científica iniciada no século XVII tomará um grande impulso no século seguinte, quando da revolução industrial.

Capítulo 4

A Física clássica

Consideraremos o início desse período como coincidindo com o aprimoramento da mecânica e o desenvolvimento do cálculo

4.1 O aprimoramento da mecânica

Descartes e Newton fizeram a grande síntese científico-filosófica, Descartes dando o método ao pensamento científico e Newton descobrindo as leis matemáticas precisas que regem os astros e a natureza. A primeira grande aplicação das leis de Newton foi feita por Halley que previu o retorno do cometa que leva seu nome para dezembro de 1758 com sucesso. Esse cometa já havia aparecido em 1531, 1607 e 1682. Ele provou que os cometas obedeciam às Leis de Newton como todos os outros corpos celestes, não sendo as emanações gasosas sublunares de Aristóteles nem os turbilhões errantes de Descartes.

A mecânica newtoniana foi aprimorada no século XVIII, principalmente pelos matemáticos franceses que, de início, ofereceram resistência aos novos conceitos. Novas formulações da mecânica newtoniana surgiram introduzidas por Pierre Louis Maupertuis (1699 - 1759) em 1740 com o princípio da mínima ação originalmente aplicado na propagação da luz: “Na natureza, o produto da velocidade pelo percurso seguido pela luz é o menor possível”, mais precisamente, a ação foi definida como $\int v ds$. Ele especificamente afirmou que a luz não segue as mesmas leis dos corpos materiais. Um princípio semelhante a esse, para a luz, já havia sido utilizado por Fermat, cem anos antes: o princípio do caminho óptico mínimo “quando a luz parte de um ponto e chega a outro ponto a trajetória percorrida pela luz é aquela em que o tempo gasto no percurso é o menor possível”.

Pouco tempo depois, Jean D’Alambert anuncia o princípio dos trabalhos virtuais aplicado a corpos em movimento que diz: “Se um sistema de muitos corpos se encontra em equilíbrio sob a ação de várias forças, quando se faz um pequeno deslocamento nesse sistema, o trabalho infinitesimal total produzido por todas essas forças durante o deslocamento é igual à zero”. O princípio dos trabalhos virtuais já era reconhecido por John Bernoulli no problema dos corpos estáticos como um princípio geral. D’Alambert é o responsável pela unificação da estática com a dinâmica tornando a mecânica uma ciência praticamente independente do restante da física até o fim do séc XVIII.

O matemático suíço, Leonard Euler (1707 - 1783) fez descobertas importantes na aplicação do cálculo infinitesimal nos problemas da matemática, óptica, mecânica, acústica, as-

tronomia e mecânica dos fluidos. Introduziu a adição geométrica de forças e velocidades hoje conhecida como o cálculo vetorial e aprimorou o princípio de Maupertius, dizendo que: “em todas as mudanças que ocorrem na natureza, a força que as opera, isto é, o produto da quantidade de movimento pelo percurso é sempre o menor possível”.

Considerado o mais importante físico-matemático do séc XVIII, Joseph Lagrange (1736 - 1813) foi o criador da mecânica analítica em 1788 que é um poderoso formalismo matemático da mecânica newtoniana. Foi o criador do cálculo das variações e da teoria das equações diferenciais. Aprimorou os enunciados da lei de conservação das forças vivas e o princípio de conservação do trabalho que hoje são conhecidos como o teorema da conversão do trabalho em energia cinética. Definiu a conservação do momento angular e associou a lei das áreas de Kepler à essa lei de conservação.

A formulação lagrangeana da mecânica, a mecânica analítica, foi aprimorada por William Hamilton (1788 - 1856) que a formulou em termos das energias cinética e potencial num sistema de vários corpos como sendo a função hamiltoniana (soma das duas energias) do sistema. Essas duas formulações da mecânica facilitam a determinação das equações do movimento das diversas partes (corpos) que compõem o sistema a partir das energias cinética e potencial das partes. Não se trata de mecânica nova, mas sim de um novo caminho para se chegar às equações de Newton para um sistema de corpos.

Observação: Para um sistema de N corpos, a formulação lagrangeana produz um sistema de equações diferenciais acopladas com N equações de segunda ordem enquanto que a formulação hamiltoniana produz um sistema com $2N$ equações de primeira ordem.

4.2 Kant e Laplace. O aprofundamento da mecânica determinista

Ainda nesse século, o filósofo alemão Immanuel Kant (1724 - 1804) considerado o pai da filosofia moderna, também criou um modelo cosmológico baseando-se nas descobertas de Newton. Seu modelo é compatível com as três leis do movimento, com a lei da gravitação e aparece na obra de 1755 “História Geral da Natureza e Teoria do Céu”. O universo teria sido criado por Deus, inicialmente como uma massa gasosa sem forma e a partir desse ponto as leis da natureza seriam as responsáveis pela sua evolução. Segundo ele, existiam duas forças contrárias agindo no cosmos: a força de atração gravitacional e a força de repulsão responsável pela expansão dos gases. A força gravitacional aglutinaria a matéria em pontos de maior densidade de acordo com a lei do inverso do quadrado das distâncias e a força de repulsão produziria colisões entre as partículas que acabariam fazendo com que estas adquirissem um movimento de rotação. Esse movimento de rotação acabaria por fazer com que as galáxias se achatassem por um efeito centrífugo justificando a forma achatada (disco e elipsoide) delas. No sistema solar, de modo semelhante, o Sol seria o centro de atração em torno do qual giraria um disco gasoso. Alguns pontos mais densos atrairiam maior quantidade de matéria formando os planetas sólidos mais próximos do Sol, que resistiriam ao seu calor. Os demais planetas (os gasosos) estariam mais distantes do Sol.

Pouco tempo depois, o matemático francês Pierre Simon de Laplace (1749 - 1827) um dos criadores do sistema métrico decimal juntamente com Lagrange e Lavoisier na época da revolução francesa, provou em 1786 a estabilidade do sistema solar, que a excentricidade das órbitas dos planetas era praticamente constante e que as inclinações dos planos das órbitas eram muito pequenas. Em 1796, na obra “Exposition du Systême du Monde” apresenta a

hipótese nebular e, nos 26 anos seguintes (1799-1825) escreve a obra de 5 volumes “Tratado da Mecânica Celeste”, concluindo seu pensamento sobre o sistema solar. Ele imaginou que uma nuvem em alta temperatura, que girava ao redor do Sol lentamente, foi-se contraindo devido à força gravitacional com variação da velocidade nas partes mais externas. Aos poucos se formariam anéis ao redor do Sol como os anéis de Saturno. Os anéis se quebrariam em blocos e os blocos maiores iriam capturando as massas dispersas dos anéis formando os planetas que continuariam a orbitar ao redor do Sol.

A mecânica newtoniana enriquecida com as contribuições de Lagrange, Hamilton, Kant e Laplace estabeleceu-se como a teoria correta da realidade, capaz de tudo explicar desde que fossem conhecidas as condições iniciais e fossem resolvidas as equações diferenciais que regem a evolução dos sistemas. É, então, uma mecânica determinista (pode-se prever o futuro sabendo-se o presente) que se apossou do pensamento dos cientistas do séc XVIII e XIX. Esse pensamento está expresso em uma citação de Laplace:

“Uma inteligência que em certo momento conhecesse todas as forças que atuam no universo e o estado inicial de todos os corpos que constituem a natureza, abarcaria (se essa inteligência pudesse processar todos os dados) na mesma expressão matemática os movimentos dos grandes objetos do universo bem como do mais ínfimo dos átomos: nada lhe seria duvidoso e o futuro, tal qual o passado, seria como o presente a seus olhos”.

O sucesso da mecânica determinista na previsão do comportamento dos sistemas físicos foi tão grande que muitos filósofos e pensadores do séc XVIII estenderam sua aplicação às ciências humanas e sociais estabelecendo uma corrente filosófica chamada de Iluminismo que tem como seus idealizadores John Locke na Inglaterra, Jean Jacques Rousseau, Voltaire, Denis Diderot e o Barão de Montesquieu, na França. Para eles a sociedade flui como um fluido constituído por indivíduos que deslocam-se de acordo com as leis e princípios básicos semelhantes às leis que governam os sistemas físicos.

O avanço da mecânica e dos métodos da ciência experimental promoveram as inovações tecnológicas que fizeram parte do processo da revolução industrial. Em particular, a máquina a vapor teve uma grande repercussão para o aumento da produção e realização de novos empreendimentos. Sua concepção e a busca por uma melhor eficiência tem relação direta com o estudo e o desenvolvimento da termodinâmica, que é a parte da física experimental que estuda, do ponto de vista macroscópico, as mudanças que ocorrem em um sistema físico que normalmente estão relacionadas com as trocas de calor e/ou energias e que não são abordadas nem pela mecânica nem pelo eletromagnetismo.

4.3 Desenvolvimento da termodinâmica

O grande desenvolvimento da termodinâmica inicia-se em meados do séc XVIII com o progresso na medição da temperatura pela utilização de diversos tipos de termômetros utilizando-se diversas substâncias termométricas. Outros instrumentos igualmente importantes também foram desenvolvidos nessa época como: os medidores de dilatação, os medidores de pressão, os medidores de umidade, o termógrafo e os termômetros registradores. É nessa época que surge a distinção entre o calor e temperatura, como resultado das experiências realizadas em 1770 pelo cientista britânico Joseph Black.

Jean-André Deluc (1727-1817) é conhecido pelo desenvolvimento do método da determinação da altura das montanhas utilizando o barômetro. Também realizou vários estudos e experiências relacionadas ao ponto de ebulição da água havendo muita confusão entre

calor e temperatura. Uma observação importante foi feita por ele em 1754: A temperatura do gelo não muda durante o processo de fusão. Com base nessa observação, Joseph Black deduz que a aplicação de calor no gelo durante o processo de fusão não produz aumento na temperatura mas sim na quantidade de água líquida na mistura. Observou que durante a ebulição da água a aplicação de calor não elevava a temperatura mas aumentava a quantidade de vapor na mistura. Em 1761, define o calor latente de fusão (quantidade de calor necessária para promover a fusão por unidade de massa). Em 1765, esse mesmo cientista mede o calor latente de vaporização da água.

A definição ou conceituação do calor, de início, não era clara. Uma teoria antiga desenvolvida pelo médico alemão Georg Ernst Stahl entre 1703 e 1731 associava o calor com a combustão, com o fogo, considerando o fogo como uma espécie de substância chamada flogístico liberada pela combustão. Essa teoria, apesar do sucesso inicial, foi negada por Lavoisier. Outra teoria mais fortemente aceita foi a teoria do calórico, que seria um fluido cujas partículas se repeliam e eram atraídas pelas outras substâncias. O calórico escoava de um corpo quente para um corpo frio quando os corpos eram colocados em contato térmico e, além disso, o calórico não podia ser destruído durante os processos físicos, ou seja, se conservava.

Alguns cientistas e filósofos como Francis Bacon, Isac Newton e Robert Hooke se opunham à ideia de calor como um fluido. Newton afirmava: “O calor consiste num minúsculo movimento de vibração das partículas”. Lavoisier e Laplace diziam: “Os cientistas estão divididos quanto à natureza do calor: uns pensam que se trata de um fluido que penetra mais ou menos no corpo conforme a sua temperatura e a sua disposição para o reter; (...) outros pensam que o calor não é mais que o resultado dos movimentos das moléculas da matéria”.

Um grande passo para a compreensão do que é o calor foi feito pelas observações do Conde de Rumford durante o processo de fabricação (perfuração) dos canhões: “Tendo estado ultimamente ocupado na superintendência de perfuração de canhões, nas oficinas do arsenal militar de Munique, fiquei impressionado com o grau muito considerável de calor que um canhão de bronze adquire, em um curto tempo, ao ser perfurado e com o calor ainda mais intenso (muito mais elevado que a água em ebulição, como descobri pela experimentação) das aparas metálicas dele separadas pela furadeira...”; “e meditando sobre este assunto, não devemos esquecer de considerar a mais considerável circunstância, de que a fonte de calor gerada pelo atrito nessas experiências parece ser evidentemente inexaurível. É desnecessário acrescentar que, algo que qualquer corpo ou sistema de corpos isolados possa continuar a fornecer sem limitações não poderá ser provavelmente uma substância material; e a mim me parece extremamente difícil, se não assaz impossível, formar qualquer ideia distinta de algo capaz de ser excitado e transmitido do modo como o calor o era nessas experiências, exceto se for o movimento”. O calor foi então associado à energia do movimento das partículas.

Em 1842, o médico alemão Julius Robert von Mayer (1814 - 1878) concluiu que o calor e o trabalho mecânico são manifestações da energia que podem se transformar mas não se perder e diz: “Uma vez criada, a energia não pode ser aniquilada, mas pode apenas mudar de forma”.

Coube a James Prescott Joule, em 1849, mostrar experimentalmente a equivalência entre o trabalho mecânico e o calor fazendo com que a água fosse aquecida como resultado da agitação mecânica, produzida por pesos em queda na gravidade, confirmando que o calor é uma forma de energia.

Em 1847, o físico alemão Hermann von Helmholtz formalizou essas observações como

um princípio de conservação da energia (primeira lei da Termodinâmica).

Vale notar que o engenheiro francês Sadi Carnot, que se preocupou em melhorar a eficiência das máquinas a vapor, já havia pensado na conservação da energia antes de 1832, ano da sua morte, quando diz: “O calor é o resultado do movimento”. “Quando há destruição da potência motriz, existe simultaneamente produção de calor em uma quantidade precisamente proporcional à quantidade da potência motriz destruída. Reciprocamente, quando há destruição de calor, há produção de potência motriz”.

De seus trabalhos, Carnot concluiu que para operar com grande eficiência (grande transformação útil de calor em trabalho mecânico) uma máquina térmica deve operar num ciclo fechado especial (duas etapas isotérmicas e duas adiabáticas) chamado de “ciclo de Carnot” e nenhuma outra máquina operando nas mesmas condições de temperatura consegue ser mais eficiente.

Os trabalhos de Carnot influenciaram W. Thomson e Rudolf Clausius a formularem o conceito de uma nova variável termodinâmica, a entropia, visando descrever a irreversibilidade dos processos naturais. A origem dessa variável está no fato de que não é possível transformar todo calor em trabalho mecânico, sempre sobrar calor não convertido. Em outras palavras, a eficiência de uma máquina térmica nunca alcança 100 %. Clausius mostrou que nos processos reversíveis cíclicos a entropia permanece constante e nos processos naturais (que sempre são irreversíveis) a entropia está sempre aumentando.

4.4 A teoria cinética dos gases

Desde o início do estudo do comportamento dos gases durante os séculos XVII e XVIII, a hipótese de que as propriedades macroscópicas do tipo pressão e temperatura tinham origem nos choques das moléculas do gás com as paredes do recipiente já se fazia presente. Daniel Bernoulli, em 1738, em seu livro “Hydrodinâmica” já aponta que a pressão macroscópica tem origem nos choques das moléculas com as paredes do recipiente e que a temperatura deveria estar ligada ao estado de movimento das moléculas. Esse é o início da teoria cinética dos gases em um época em que ainda não havia evidência experimental para o modelo atômico da matéria.

Um século após, John Herapath (1790 - 1868) em 1820 e John James Waterston (1811 - 1883) em 1845, conseguem derivar as leis empíricas de Boyle, $PV = cte$ de 1662, de Charles, $V \propto T$, utilizando um modelo semelhante ao de Bernoulli.

Waterston chega a derivar que $P = Nm v^2$ (com P , N , m e v representando a pressão, a concentração molecular, a massa molecular e a velocidade média molecular, respectivamente) sem muita repercussão devida a vigência da teoria do calórico.

August Karl Krönig (1822 - 1879) em 1856 e Clausius, em 1857, aperfeiçoaram a teoria cinética dos gases e esse último introduziu a ideia da distribuição de velocidades para as moléculas do gás, mas não conseguiu determiná-la, o que foi feito por James Clerk Maxwell (1831 - 1879) com a incorporação dos conceitos da teoria das probabilidades (desenvolvida por Laplace entre 1795 e 1812) na física.

Resultados importantes foram obtidos em seguida, o livre caminho médio, a dependência do coeficiente de viscosidade com a temperatura, o teorema da equipartição de energia, a expressão do calor específico dos gases, uma estimativa para o tamanho dos átomos por Joseph Loschmidt (1821 - 1895) em 1865 e o número de Avogadro. Todos esses resultados passaram a embasar a hipótese atômica à luz de resultados experimentais.

4.5 Evolução do eletromagnetismo

No início do séc XVIII, começaram a aparecer evidências de que a “virtude” elétrica (eletricidade) produzida por atrito podia ser conduzida (transportada) para outros corpos como investigado e relatado por Stephen Gray (1666 - 1736) em 1729. Poucos anos depois, em 1734, Charles du Fay (1698 - 1739) descobre que existem dois tipos de eletricidade a “vítrea” e a “resinosa” relacionadas com a natureza dos corpos que se eletrificam e verificou-se que corpos carregados com o mesmo tipo de eletricidade se repeliam e corpos carregados com eletricidades diferentes se atraíam. A influência do pensamento mecanicista, nessa época, fez com que se imaginasse que a eletricidade era um tipo de fluido que poderia entrar ou sair do corpo tendo sido proposta a teoria do fluido único em 1747 (Benjamin Franklin) e a teoria dos dois fluidos em 1759 (Robert Symer e Thorben Bergman). Nessa mesma época, em 1752, Franklin descobre que os raios produzidos durante as tempestades eram centelhas elétricas. Ele propôs um experimento para provar que os raios eram eletricidade, uma “pipa” empinada durante uma tempestade e a eletricidade seria conduzida pela linha molhada e armazenada em uma garrafa de Leiden. Em maio desse ano, Thomas-François Dalibard executa o experimento com uma haste de doze metros de altura ao invés da pipa e consegue extrair centelhas elétricas das nuvens.

De posse das observações experimentais de Franklin, Joseph Priestley (1733 - 1804) suspeita que a força elétrica deveria diminuir com o inverso do quadrado da distância, que foi verificado por Henry Cavendish em 1770 usando uma balança de torção. Pouco tempo depois, Charles Coulomb (1736 - 1806) em 1785, também utilizando uma balança de torção, chega à formulação completa da lei de atração e repulsão entre duas cargas elétricas que, na época, ele considerou como sendo “massas elétricas” por comparação com a lei da atração gravitacional. Nessa época, Coulomb não via qualquer ligação entre a eletricidade e o magnetismo.

Um grande impulso para o desenvolvimento do estudo da eletricidade se deu com a descoberta do gerador eletroquímico de eletricidade por Alessandro Volta (1745 - 1827) em 1799 a partir dos trabalhos de Luigi Galvani (1737 - 1798) em 1791 publicados em “Comentários sobre a Força Elétrica nos Movimentos Musculares”. Galvani notou contrações na musculatura de pernas de rãs dissecadas em duas situações: quando entrava em contato com dois metais diferentes e quando havia uma descarga elétrica em uma máquina eletrostática próxima e ao mesmo tempo o bisturi tocava na musculatura. Ele atribuiu esse fato à “eletricidade animal”. Ele disse: “levei o animal para um quarto fechado e coloquei-o sobre uma placa de ferro; quando toquei a placa com o fio de cobre, fixado na medula da rã, vi as suas contrações espasmódicas de antes. Tentei outros metais, com resultados mais ou menos violentos. Com os não condutores, todavia, nada se produziu. Isto era bastante surpreendente e conduziu-me a suspeitar de que a Eletricidade era inerente ao próprio animal, suspeita que foi confirmada pela observação de que uma espécie de circuito nervoso sutil (semelhante ao circuito elétrico da garrafa de Leiden*) fecha-se dos nervos aos músculos, quando as contrações se produzem”.

Volta, em 1793, reinterpreto os resultados de Galvani mostrando que o efeito tinha origem inorgânica, que a eletricidade tinha origem no contato do metal com o corpo úmido do animal. Ele mostrou experimentalmente que dois metais diferentes (zinco e prata) mergulhados em uma solução salina produziam a eletricidade observada por Galvani.

A pilha de Volta composta por vários pares de discos de metais diferentes separados por um cartão impregnado com água salgada era capaz de produzir eletricidade por um longo

tempo de maneira praticamente constante. O estudo dos efeitos desse tipo de eletricidade passou, então, a ser chamado de Galvanismo, diferenciando-o do estudo da eletricidade estática.

Com o uso da pilha de Volta, Hans Christian Oersted (1777 - 1851) descobre, em 1820, que a eletricidade galvânica é capaz de movimentar a agulha de uma bússola quando um fio condutor dessa eletricidade é colocado paralelamente à agulha da bússola. Surge então uma conexão entre a eletricidade e o magnetismo. A eletricidade galvânica produzia efeitos semelhantes a um ímã natural nas vizinhanças de uma bússola.

Nesse mesmo ano, André-Marie Ampère (1775 - 1836) mostra o efeito de atração e repulsão entre fios conduzindo a eletricidade galvânica. Em particular, experimentos feitos nos três anos seguintes mostraram que espiras de fios conduzindo a eletricidade se comportavam como ímãs. Surge então a possibilidade de utilizar as forças de atração e repulsão entre os fios como uma medida da quantidade de eletricidade galvânica que está sendo transportada pelo fio.

Biot e Savart em outubro de 1820, publicaram os resultados das medidas das forças sobre os polos magnéticos colocados próximos a um fio, mostrando que a força é perpendicular ao próprio fio e à linha que vai do polo ao fio. Mostram ainda que essa força é proporcional ao inverso da distância ao fio.

A partir de 1825, George Ohm (1789 - 1854) dedica-se a estudar a eletricidade galvânica e introduz os conceitos de intensidade de corrente elétrica, força eletromotriz e resistência elétrica. Em seu estudo, ele utilizou uma balança de torção adaptada para medir a corrente elétrica (eletricidade galvânica) que passava pelo fio a partir do torque que essa corrente exercia sobre um ímã preso na linha de torção da balança. Suas conclusões foram publicadas em seu livro em 1827.

Pouco tempo depois, em 1831, Michael Faraday (1791 - 1867) descobre a indução eletromagnética. Quando a corrente elétrica varia bruscamente em algumas espiras de fio (bobina) aparece em outra bobina de fio próxima à primeira uma corrente induzida. Descobre também que esse mesmo efeito era observado ao se movimentar uma barra imantada nas vizinhanças da segunda bobina.

O efeito descoberto por Faraday levou à construção de geradores mecânicos de eletricidade disponibilizando-a para a aplicação imediata.

Anteriormente à descoberta do fenômeno da indução, Faraday já havia realizado experimentos que mostravam que a corrente elétrica poderia ser utilizada para mover objetos e construiu um motor elétrico rudimentar conhecido como “O Rotor Eletromagnético de Faraday”. Faraday também introduz o conceito de linhas de forças e o conceito de campo baseando-se nas figuras produzidas pela limalha de ferro nas vizinhanças de uma barra magnetizada (ímã). Para ele, o magnetismo produzido pelo ímã preenchia todo o espaço criando um “campo de forças”.

Um ano após as descobertas de Faraday, Joseph Henry (1797 - 1878) em 1832, descobre o fenômeno da auto-indução em uma bobina, mostrando que uma corrente variável em uma bobina está relacionada com a força eletromotriz nessa bobina.

Dois anos depois, em 1834 na Rússia, Henrich Lenz (1804 - 1865) chega aos mesmos resultados de Faraday e Henry a partir de ações mecânicas (movimentos entre circuitos) e da utilização do princípio da ação e reação de Newton.

Coube a Franz E. Neumann (1798 - 1895) em 1845, a quantificação dos resultados experimentais de Faraday, Henry e Lenz colocando-os em termos matemáticos: “A força eletromotriz induzida é igual à taxa de variação no tempo do fluxo magnético no circuito” ($\varepsilon =$

$-d\phi_B/dt$).

Vale notar que os resultados das investigações de Faraday foram apresentados em linguagem natural rica em descrições experimentais, em intuições e como as ideias se desenvolveram, sem a utilização de equações ou fórmulas matemáticas. Essa forma de agir contrasta com o procedimento usado por Ampère, que traduz os resultados das suas investigações em forma matemática que não permite encontrar os traços do processo pelo qual ele obteve sua lei.

A grande síntese dos conhecimentos produzidos por todos esses investigadores dos fenômenos elétricos e magnéticos foi feita por James Clerk Maxwell em uma formulação matemática unificada das leis de Coulomb, Oersted, Ampère, Biot e Savart, Faraday e Lenz expressando-as em quatro equações. Além disso, Maxwell generalizou a lei de Ampère para situações de correntes não estacionárias, situações em que o campo elétrico varia no tempo. Mostrou que da mesma forma que uma variação temporal no campo de indução magnética produz um campo elétrico induzido, uma variação temporal no campo elétrico também produz um campo de indução magnética.

A partir de suas quatro equações, ele mostrou que os vetores dos campos elétrico e de indução magnética deveriam satisfazer uma equação diferencial de onda idêntica, a menos de uma constante, à equação das ondas elásticas (ondas mecânicas). O campo eletromagnético tem, então, propriedades ondulatórias e foi previsto um valor para a velocidade de propagação dessas ondas que coincide com o valor conhecido na época para a velocidade da luz no vácuo. A teoria eletromagnética de Maxwell foi publicada em forma completa em 1873.

Vale ressaltar que Maxwell concebeu a onda eletromagnética na presença de um meio hipotético quando diz: “A velocidade das ondas transversais no nosso meio hipotético, calculada a partir das experiências de eletromagnetismo efetuadas pelos Srs. Kolhraush e Weber (311000 km/s) tem um valor tão próximo do valor da velocidade da luz calculada a partir de experiências de óptica realizadas pelo Sr. Fizeau que é difícil evitar a inferência de que a luz consistirá em ondulações transversais no mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos”.

Esse meio era o éter luminífero que permaneceu presente no pensamento de Maxwell: “Em muitas partes desse tratado tentamos explicar fenômenos eletromagnéticos por meio de ação mecânica transmitida de um corpo a outro através de um meio ocupando o espaço entre eles. A teoria ondulatória da luz também supõem a existência de um meio. Agora mostraremos que as propriedades do meio eletromagnético são idênticas àquelas do meio luminífero”.

Apesar do sucesso da teoria eletromagnética, a crença na existência do éter começa a se tornar incompatível com a ciência física em 1887 a partir dos experimentos realizados por Albert Michelson e Edward Morley na tentativa frustrada de sua detecção.

Aos poucos os físicos foram aceitando a ideia da propagação da onda eletromagnética no vácuo e Rudolph Hertz em 1887 foi o primeiro a aceitar a validade das equações de Maxwell sem a necessidade do meio etéreo.

A comprovação experimental da onda eletromagnética foi feita por Hertz em 1887 gerando-a a partir de um circuito elétrico.

Hertz era um físico experimental habilidoso e com profundo conhecimento matemático tendo sido orientado por Helmholtz. Em 1880, foi oferecido um prêmio pela Academia de Ciências de Berlim para quem conseguisse produzir as ondas eletromagnéticas de Maxwell utilizando circuitos elétricos. De início, Hertz tentou produzir essas ondas mas não conse-

guiu chegar ao resultado no prazo estipulado pela Academia. Após muitos estudos sobre descargas oscilatórias na “garrafa de Layden” (um capacitor rudimentar) e da da propagação das ondas elétricas em condutores em circuito aberto, ele consegue em 1887 demonstrar experimentalmente a geração, a transmissão e a recepção dessas ondas eletromagnéticas na faixa de frequências em torno de 50 MHz.

Seu transmissor consistiu em dois capacitores planos formados cada um por duas placas metálicas quadradas, separadas a uma pequena distância e isoladas pelo ar, interligadas por dois condutores metálicos retos terminados por duas pequenas esferas metálicas separadas (centelhadores) sendo o sistema alimentado por alta tensão próximo a essas duas esferas. Veja a figura (Fig. 4.1).

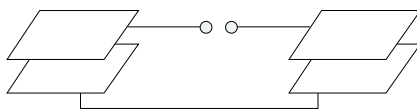


Figura 4.1: Primeiro transmissor de radiofrequência de Hertz.

Energia elétrica era armazenada nos capacitores até que a diferença de potencial entre as esferas fosse suficientemente alta para ionizar o ar e formar um arco elétrico (centelha) entre as esferas. Nesse momento, se estabelece uma oscilação na corrente elétrica cuja frequência depende dos valores das capacitâncias e da indutância formada pelos condutores retos que interligam as placas. A oscilação é uma oscilação amortecida (a amplitude da oscilação decai ao longo do tempo) em um curto intervalo de tempo.

Como receptor, foi utilizado um “loop” retangular plano de fio interrompido por duas pequenas esferas metálicas separadas, porém muito próximas, posicionado nas proximidades do transmissor (aproximadamente um metro) estando o plano do loop paralelo e equidistante às placas dos capacitores, figura (Fig. 4.2).

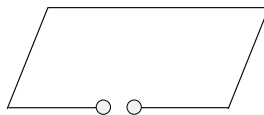


Figura 4.2: Primeiro receptor de radiofrequência de Hertz.

Hertz pode verificar o aparecimento de pequenas centelhas entre as esferas do receptor toda vez que o circuito transmissor entrava em oscilação, evidenciado pelo centelhamento no transmissor.

Posteriormente, foi construído um novo conjunto transmissor - receptor operando em frequência mais alta (menor comprimento de onda) e Hertz pode verificar que a onda eletromagnética produzida tinha todas as propriedades ópticas da luz (reflexão, refração, difração, interferência e polarização). Por ter sido uma onda com o comprimento de onda da ordem de dezenas de centímetros, (aproximadamente 30 cm) ele foi capaz de realizar esses experimentos dentro das dimensões do seu laboratório.

Em um dos seus experimentos de formação de onda estacionária, ele conseguiu medir o comprimento de onda da radiação e verificou que a velocidade de propagação coincidia com a velocidade da luz cujo valor já era conhecido nessa época.

Todas as evidências indicavam que a luz poderia ser uma onda eletromagnética. Ele escreveu: “As experiências descritas me parecem em alto grau adequadas para remover as dúvidas sobre a identidade da luz, a radiação térmica e as ondas eletromagnéticas”.

A aplicação tecnológica imediata após a produção das ondas eletromagnéticas por Hertz foi utilizá-la para mandar uma informação, um sinal telegráfico, a uma grande distância sem a utilização de fios.

O telégrafo utilizando fios havia sido inventado em 1835 por Samuel Morse para transmitir informações codificadas na forma de dois pulsos elétricos com durações diferentes. Um pulso de duração curta correspondendo a um ponto e um pulso de duração longa correspondendo a um traço. As letras do alfabeto e os números eram codificados em uma sequência de pontos e traços.

Em 1844, a primeira linha telegráfica com fios foi implantada entre Baltimore e Washington e em 1866 a Grã Bretanha foi interligada ao Canadá por um cabo transatlântico.

Após o estabelecimento do telégrafo, surge a invenção do telefone em 1876 por Alexander Gran Bell utilizando fios para transmitir sons.

Credita-se ao italiano Guglielmo Marconi a invenção do telégrafo sem fio, patenteado em 1896, utilizando ondas eletromagnéticas geradas por uma descarga elétrica (centelha) entre dois eletrodos esféricos separados em torno de um milímetro e alimentado por alta tensão. A duração da centelha codificava os pontos e os traços do código morse. A concepção inicial do transmissor de Marconi era diferente da concepção de Hertz uma vez que o transmissor de Hertz utilizava um circuito ressonante para gerar a onda eletromagnética com uma frequência razoavelmente bem definida enquanto o primeiro transmissor de Marconi gerava as ondas eletromagnéticas a partir da centelha com um espectro amplo de frequências. No receptor, um fone de ouvido permitia que uma pessoa pudesse ouvir os “clicks” com durações diferentes correspondentes às centelhas produzidas.

O alcance do conjunto transmissor-receptor de Marconi estava limitado pela potência da centelha elétrica produzida no transmissor. Os transmissores subsequentes incorporaram circuitos sintonizados (ressonantes) concentrando a energia em uma faixa estreita de frequências.

Para transmitir a voz era necessário a emissão contínua da radiação eletromagnética de modo carregar a informação de modo contínuo ao invés de modo pulsado (como no código morse) o que foi feito com o aprimoramento dos transmissores.

Em particular, a invenção da válvula eletrônica a vácuo (diodo retificador) por John Fleming e do triodo por Lee de Forest em 1907, permitiu a amplificação dos sinais transmitidos e recebidos viabilizando a comunicação via rádio a grandes distâncias.

Capítulo 5

A Física moderna

Conforme mencionamos, a teoria de Maxwell para onda eletromagnética só fazia sentido, naquela época, se houvesse um meio propício para essa propagação, o éter.

Aos poucos, os físicos foram aceitando a ideia da propagação da onda eletromagnética no vácuo e Hertz em 1887 foi o primeiro a aceitar a validade das equações de Maxwell sem a necessidade do meio etéreo.

5.1 O fim do meio etéreo

Einstein, em 1905, já não considerava a presença do éter e escreveu: “A introdução de um éter luminífero revelar-se-á supérflua visto que na teoria que vamos desenvolver não necessitaremos de introduzir um espaço em repouso absoluto”.

Uma das consequências da equação de onda eletromagnética derivada a partir das equações de Maxwell é que a velocidade de propagação da onda depende apenas das propriedades elétricas e magnéticas do meio. No caso do espaço vazio, o vácuo, essas propriedades são constantes, portanto a velocidade de propagação dessas ondas é constante.

Einstein propôs que as equações de Maxwell tenham validade em qualquer sistema de referência inercial (sistemas de referência que se movam com velocidade constante) e que a velocidade da onda eletromagnética no vácuo (luz) seja constante para qualquer observador nesses sistemas independentemente do movimento da fonte de luz com relação ao observador.

Essa hipótese tem sido sustentada por diversas evidências experimentais não havendo, até o presente, nada que a contradiga.

Para que essa hipótese seja verdadeira, é necessário que as coordenadas espaciais e temporal (x' , y' , z' , e t') de um ponto no sistema de referência em movimento, sejam transformadas nas coordenadas (x , y , z , e t) no outro sistema em repouso de acordo com as regras de transformação conhecidas como as transformações de Lorentz ao invés das transformações de Galileu usuais. Uma consequência direta dessas regras de transformação é que os comprimentos dos objetos do sistema móvel são transformados em comprimentos menores para o sistema em repouso (contração espacial) e os intervalos de tempo no sistema móvel são transformados em intervalos de tempo maiores no sistema em repouso (dilatação do tempo). Essas regras de transformação recaem nas transformações de Galileu quando as velocidades são baixas, muito menores que a velocidade da luz.

Outro efeito importante é o aumento da massa inercial à medida que a velocidade do objeto aproxima-se do valor da velocidade da luz no vácuo.

É interessante notar que as transformações de Lorentz surgiram dos seus trabalhos ainda sob a hipótese da existência do éter.

O trabalho completo sobre a relatividade restrita de Einstein foi publicado em 1905 em um artigo de trinta páginas no *Annalen der Physik*, mas pouco tempo depois, ainda nesse ano, ele publica outro artigo: “A inércia de um corpo depende de seu conteúdo energético?” mostrando que se um corpo irradia uma quantidade de energia U , sua massa reduzirá da quantidade U/v^2 onde v é a velocidade do corpo. No final de seu artigo ele diz: “Não está excluído que se possa com êxito verificar a teoria com corpos cujo conteúdo energético varie em grandes proporções”, como é o caso dos materiais altamente radioativos.

Em 1908, o matemático H. Minkowski apresenta um formalismo matemático conectando o espaço com o tempo em um sistema quadridimensional com eixos x , y , z , e ct . Nesse sistema, um evento ou um acontecimento físico é representado por um ponto nesse espaço. Ele disse: “Daqui em diante, os conceitos de espaço e de tempo, considerados como autônomos, vão se desvanecer como sombras e somente se reconhecerá existência independente a uma espécie de união entre os dois”.

A teoria da relatividade de Einstein permaneceu sem verificação experimental por um longo tempo, mas muitos cientistas de peso a apoiaram devido à sua elegância, generalidade e simplicidade. Uma consequência importante e verificada experimentalmente em 1913 foi obtida por A. Sommerfeld ao aplicar a teoria ao modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio.

A teoria da relatividade restrita se aplica a sistemas de referência inerciais e as equações de transformações só são válidas para estes sistemas. Em 1907, Einstein apresenta um artigo de revisão da relatividade onde ele se perguntava se não poderia estender o princípio da relatividade aos sistemas acelerados. Ele apresentou o princípio da equivalência aos efeitos da aceleração com os efeitos da gravidade quando disse: “Não deve haver distinção física entre efeitos de aceleração e efeitos gravitacionais” e ele exemplificou com um passageiro dentro de um elevador em queda livre. Desaparecerá seu próprio peso. Ele não saberá distinguir se o elevador cai em queda livre ou se alguém “desligou” a gravidade. Einstein considerou essa ideia como a ideia mais feliz da sua vida e batizou essa teoria de relatividade geral que foi publicada em 1916. Duas consequências de sua nova teoria poderiam ser testadas experimentalmente, o desvio da órbita de Mercúrio e o desvio da trajetória dos raios luminosos por grandes massas como o Sol que poderia ser observado durante os eclipses do Sol ao se observar a luz emitida por uma estrela. Essa última foi verificada em 1919, ano em que ocorreu um eclipse.

Tanto a relatividade restrita quanto a relatividade geral mudaram a forma de pensar a respeito do universo e do cosmos. Um dos resultados importantes da relatividade restrita é o efeito Doppler relativístico. Esse efeito é bastante conhecido no âmbito da relatividade galileana para ondas mecânicas (ondas materiais) como, por exemplo, a onda sonora. Consiste na alteração da frequência de uma onda emitida por uma fonte e detectada por um observador quando esta se aproxima ou se afasta do observador. A causa desse efeito está associada às velocidades relativas entre a fonte e o meio onde a onda propaga ou entre a velocidade relativa entre o meio e o observador.

No efeito Doppler relativístico também existe mudança na frequência da onda eletromagnética a depender do movimento relativo entre a fonte e o observador. Contudo, essa mudança de frequência não está associada com a velocidade da fonte ou do observador com

relação à frente de onda pois, para a onda eletromagnética no vácuo essa velocidade tem sempre um valor constante e igual a $c = 2,99 \times 10^8$ m/s (fato experimental colocado como hipótese na relatividade restrita). Quando a fonte afasta-se do observador, este mede uma frequência menor que a frequência emitida pela fonte.

Quando observa-se na Terra as luzes emitidas pelas estrelas em qualquer direção no espaço, verifica-se que os espectros de frequência característicos dos elementos químicos que compõem as estrelas encontram-se deslocados de suas posições quando comparados com as posições dos espectros desses mesmos elementos emitidos por fontes em repouso no laboratório. Esse deslocamento ocorre no sentido de diminuir as frequências (aumento no comprimento de onda) e é conhecido como deslocamento para o vermelho ou “red shift”. Esse fato é um indicativo de que todas as estrelas estejam se afastando uma das outras e isso só é possível em um universo em expansão. Esse fato é compatível com a ideia de uma concentração inicial de massa seguida por uma grande explosão. (Teoria do big-bang).

Num sistema de tamanha concentração de massa, as leis físicas deverão seguir as previsões da teoria da relatividade geral e os modelos cosmológicos atuais são baseados nessa teoria. Uma descoberta relativamente recente evidenciada pela observações feitas com o telescópio Hubble é que além de estar em expansão, essa expansão é acelerada e isso tem levado ao aparecimento de novas hipóteses como a presença da “energia escura” e da “matéria escura”.

5.2 As limitações do eletromagnetismo

A teoria eletromagnética estava muito bem estabelecida ao final do século XIX com aplicações práticas e tecnológicas. Os primeiros sinais de sua limitação começam a aparecer por volta de 1900 com as tentativas frustradas de diversos físicos em formular uma teoria que fosse capaz de explicar o fenômeno da emissão de radiação de um corpo aquecido. Em particular, havia o problema prático da determinação da temperatura dos altos fornos siderúrgicos a partir da radiação emitida por um pequeno orifício na parede do forno. Apesar dos esforços dos físicos em aplicar a teoria eletromagnética e a teoria estatística ao modelo do forno como um conjunto de osciladores elétricos, os resultados teóricos não reproduziam os resultados experimentais. Duas teorias se destacaram, a teoria de Rayleigh - Jeans e a teoria de Wien. A primeira reproduzia razoavelmente bem apenas a região dos maiores comprimentos de onda (infravermelho) enquanto que a segunda se aplicava bem apenas aos comprimentos de onda menores. Nenhuma das teorias conseguia reproduzir integralmente a curva da intensidade por comprimento de onda da radiação em todo o espectro observado.

Foi então que Max Planck apresentou uma hipótese ousada ao afirmar que a energia dos osciladores e da radiação por eles emitida com uma frequência f era um múltiplo de uma energia fundamental $h f$ onde h é uma constante. Ou seja, $E_n = n h f$, $n = 1, 2, \dots$. Ao discretizar a energia, o tratamento matemático para a distribuição dos osciladores com essas energias também teve que ser tratado de forma discreta ao invés de forma contínua como eram feitas as distribuições estatísticas em uso corrente. Dessa forma, Planck desenvolveu uma expressão que ajustou-se bem a todos os comprimentos de onda da curva experimental.

Apesar do sucesso de sua teoria, Planck não tinha motivos físicos ou filosóficos para afirmar que a energia deveria ser discretizada. Essa afirmação veio de uma necessidade matemática para evitar a divergência das expressões baseadas na teoria eletromagnética clássica.

Um outro fenômeno físico, o efeito foto-elétrico, que trata-se da emissão de elétrons por um metal quando iluminado pela luz, também não era explicado no âmbito da teoria eletromagnética clássica. A interação da radiação com a matéria, quando a frequência dessa radiação é maior que um certo valor conhecido como “frequência de corte”, não obedece às leis do eletromagnetismo clássico. Foi Einstein em 1905 que propôs que a troca de energia entre a radiação e o metal ocorria de forma súbita, introduzindo o conceito de quantum de energia, posteriormente chamado de fóton, como um portador de um “pacote de energia” que é trocada durante a interação.

Seguindo o raciocínio de Planck, Einstein assume que a energia transportada pelo fóton está relacionada com a frequência da radiação pela expressão $E = h f$ e que durante a interação essa energia é integralmente transferida, instantaneamente, ao metal. Parte dessa energia é utilizada para arrancar o elétron do metal e o que sobra aparece na forma de energia cinética. Baseando-se nessa hipótese, Einstein constrói a teoria do efeito foto-elétrico cujos resultados estão em excelente acordo com as observações experimentais.

A comprovação experimental da teoria do efeito foto-elétrico deve-se aos trabalhos de R. A. Millikan que investigou detalhadamente esse efeito para o sódio metálico. Em seu trabalho, ele teve que produzir finas lâminas (aparas) de sódio puro, livre de contaminações, em um ambiente de alto vácuo para realizar a experiência. Seus trabalhos foram publicados em 1916 confirmando as previsões de Einstein com grande exatidão e lhe valeu o prêmio Nobel em 1923 “...por seu trabalho sobre a carga elementar e sobre o efeito foto-elétrico”.

Einstein recebeu o prêmio Nobel de 1921 por suas contribuições à física teórica e pelo desenvolvimento da lei do efeito foto-elétrico. A teoria de Einstein foi mais um passo em direção à quantização da energia.

A teoria do fóton foi reforçada com as investigações de A. H. Compton em 1923. Compton observou que raios-x espalhados por um alvo de grafite tinham comprimentos de onda maiores que os dos raios-x incidentes e que nesse processo elétrons eram ejetados instantaneamente em altas velocidades. A teoria eletromagnética clássica não tinha como explicar a alteração no comprimento de onda. Esse efeito só pode ser explicado admitindo ser a radiação composta por corpúsculos (fótons) com energia $E = h f$ que se chocavam com os elétrons seguindo as leis da mecânica relativística com a correção relativística da massa do elétron ejetado em alta velocidade.

5.3 O átomo quântico

Dez anos antes de Compton apresentar seus trabalhos, Niels Bohr em 1913 apresenta um modelo para o átomo de hidrogênio que explicava o espectro de linhas observado por Balmer e descrito em 1885 por uma fórmula empírica para as frequências das linhas espectrais (essa fórmula foi posteriormente modificada por Rydberg). Bohr, que trabalhava com Rutherford, modificou o modelo planetário para o átomo desse último introduzindo o conceito de estados estacionários da energia e da emissão e absorção de fótons quando da mudança no estado estacionário. Em seu modelo, ele mostrou que o raio da órbita e a energia são quantizados e como consequência levou à quantização do momento angular da órbita do elétron ao redor do núcleo. O modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio foi o primeiro modelo atômico de sucesso, contudo só funcionava bem para o hidrogênio ou para o hélio ionizado (com apenas um elétron). Não funcionava para o hélio no estado natural nem para os demais elementos químicos apesar dos esforços em corrigir o modelo utilizando órbita elíptica ao

invés de circular.

Um ano após Compton anunciar o efeito que leva seu nome, Louis Raymond (Príncipe De Broglie) em 1924 na sua tese de doutorado, “Pesquisas sobre a Teoria dos Quanta” defende a possibilidade de haver um comportamento ondulatório para as partículas em movimento, isto é, um comportamento simétrico ao observado no efeito fotoelétrico. Suas ideias geraram muitas controvérsias e somente em 1927 apareceram as primeiras evidências experimentais de difração de elétrons realizadas por Davisson e Germer nos EUA, G. P. Thomson e A. Reid na Inglaterra e P. S. Tartakovski na Rússia. Os resultados experimentais eram compatíveis com a existência de um comprimento de onda associado ao elétron em movimento, mas se desconhecia a natureza desta onda. Ponto que gerou muitas discórdias em sua interpretação.

Nos dois anos que seguem, 1925 e 1926, dois físicos apresentam duas teorias aparentemente distintas relacionadas com os trabalhos de Bohr e De Broglie, Erwin Schrödinger e Werner Heisenberg. Schrödinger foi designado por seu chefe Peter Debye para estudar e apresentar um seminário sobre a polêmica “onda” de De Broglie.

Ele vai mais adiante e, baseando-se na teoria eletromagnética juntamente com a analogia óptico-mecânica de Hamilton, chega a uma equação diferencial que descreve a evolução temporal da função de estado (na época, chamada de função de onda pois ele ainda acreditava ser uma onda). Heisenberg chega a uma nova formulação matemática que possibilita determinar as frequências e as intensidades das linhas espectrais do átomo de hidrogênio (Bohr só determinou as frequências). A formulação de Heisenberg é atualmente conhecida como formulação matricial da mecânica quântica.

Em 1926, Max Born deu uma interpretação para a função de onda de Schrödinger. O quadrado do módulo dessa função complexa é a densidade volumétrica de probabilidade da partícula ser encontrada em uma certa região do espaço. Em outras palavras, o determinismo clássico não se aplica no mundo microscópico. Pode-se apenas falar em probabilidade de localizar uma partícula em um determinado volume do espaço.

No ano seguinte, 1927, Heisenberg (que era assistente de Born) anuncia o princípio da incerteza: “O produto das incertezas estatísticas (desvio padrão) na determinação simultânea da posição e da quantidade de movimento associada a esta posição é sempre maior ou igual à constante de Planck dividida por 4π , $\Delta x \times \Delta p_x \geq h/(4\pi)$ ”. Esse princípio nos diz que é impossível termos uma precisão absoluta nas determinações simultâneas da posição e da quantidade de movimento de uma partícula. Se tivermos uma grande precisão na posição teremos uma pequena precisão na determinação da quantidade de movimento e vice-versa. Apesar desses desvios poderem ser extremamente pequenos devido ao fato da constante de Planck ser muito pequena ($6,6 \times 10^{-34}$ J s) eles não podem ser simultaneamente nulos. O que está por trás desse princípio é o fato de que toda medida de posição de uma partícula, perturba o estado de movimento dessa partícula. Na natureza existe uma limitação para o quão delicadas podem ser essas medidas simultâneas. Não se trata de uma limitação tecnológica mas sim de uma propriedade da natureza.

Nessa mesma época, entre 1926 e 1928, outro físico, Paul A. M Dirac publica três grandes trabalhos: Teoria Quântica (1926) onde apresenta uma terceira formulação para a física quântica, a teoria das representações; Teoria quântica dos campos (1927) e Teoria das Partículas Elementares (1928) onde apresenta a teoria quântica relativística do elétron com a introdução do número quântico de “spin” e a previsão da existência do pósitron (elétrons positivos) em 1930. Essa previsão foi confirmada por Carl David Anderson em agosto de 1932.

A aplicação da física quântica no domínio atômico levou à construção do primeiro reator

atômico em 1942, o Chicago Pile 1 na universidade de Chicago, da primeira bomba atômica em 1945 e da bomba de hidrogenio em 1952. A mecânica quântica levou à compreensão das origens das ligações químicas e sua aplicação à física do estado sólido teve um importante resultado relacionado aos semicondutores que resultou nos modernos dispositivos eletrônicos semicondutores que utilizamos atualmente. Essa foi, talvez, a aplicação de maior relevância prática relacionada à mecânica quântica.

Apesar de todo o desenvolvimento científico e tecnológico que se seguiu após o surgimento da mecânica quântica ainda não apareceu nenhuma nova teoria fundamental que mudasse o modo de pensar sobre as leis da natureza. A descoberta do comportamento probabilístico para o resultado de uma medida física na natureza parece ter sido a última grande descoberta que revolucionou o pensamento científico até o momento.