

Notas de Aula de Introdução à Física Nuclear (NHZ3026)

Prof. Dr. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira
Centro de Ciências Naturais e Humanas (CCNH)
Universidade Federal do ABC (UFABC)
Santo André - SP

AULA #1: REVISÃO HISTÓRICA

A **física nuclear** é a disciplina dedicada à investigação das estruturas, propriedades e transformações dos **núcleos atômicos**. É um dos ramos da física cujas aplicações práticas estão presentes em avançadas tecnologias da modernidade. Na arqueologia e na paleontologia, os decaimentos radioativos de isótopos do carbono-14, presentes nos materiais fósseis, são usados como técnica de datação. Na medicina, realizam-se diagnoses e tratamentos terapêuticos com radiografia, cintilografia, radioterapia, ressonância nuclear magnética, entre outras técnicas da física nuclear. Também na geração de energia elétrica, emprega-se a física nuclear tanto nos atuais reatores de fissão nuclear quanto nos futuros reatores de fusão nuclear. No entanto, ao contrário do que dita o senso comum, a energia nuclear é a que possui a menor *pegada de carbono* dentre todas as formas de geração de energia, sendo, portanto, a mais ecológica no século do aquecimento global. Entretanto, infelizmente, a física nuclear é empregada no desenvolvimento de armas extremamente potentes e danosas: bombas atômicas, de hidrogênio, de nêutrons e nas assim chamadas *bombas sujas*, que espalham materiais radioativos após suas explosões. Desta forma, dada a vasta gama de aplicações da física nuclear e o fato de que envolve o funcionamento mais profundo da matéria, para ter-se uma boa compreensão do nosso mundo na atualidade, bem como da estrutura fundamental da matéria que compõe o universo, é preciso estudar a física nuclear e suas áreas correlatas, tais como a **física atômica** e a **física de partículas elementares**.

Sabemos que a *matéria bariônica* do universo é composta por **átomos** que ligam-se para formar **moléculas**. Alguns desses átomos são radioativos, ou seja, emitem radiações (alfa, beta, gama, etc.). Apesar de terem herdado o termo grego para “indivisível”, os átomos possuem uma importante estrutura interna: o **núcleo atômico**. O núcleo contém quase toda a massa do átomo e é composto, por sua vez, por partículas denominadas **núcleons**. Os núcleons carregados (positivamente) são chamados de **prótons** e os núcleons sem carga elétrica são chamados de **nêutrons**. Em órbitas estacionárias ao redor do núcleo atômico, circundam partículas bem mais leves, carregadas negativamente, os **elétrons**. Cada vez que os elétrons alteram suas órbitas, alteram também seus níveis de energia e, por conseguinte, emitem ou absorvem *radiações eletromagnéticas*. Geralmente, tais radiações apresentam-se na forma de luz, de raios infravermelhos, ou ultravioletas. Os núcleons podem também sofrer transições energéticas, emitindo ou absorvendo radiações eletromagnéticas classificadas, nestes casos, como **raios X** ou **raios gama**.

Inspecionando-se num nível mais fundamental, os prótons e os nêutrons são formados por **quarks**, enquanto que os elétrons não possuem estrutura interna e são denominados **léptons**. Os quarks combinam-se em grupos de três para formar os **bárions** (prótons, nêutrons, etc.) ou em pares para formar os **mésons** (píons, káons, etc.). Quarks isolados nunca são encontrados. Suas ligações são consequência da **força nuclear forte**, a força responsável pela coesão dos núcleos atômicos. Alguns quarks podem decair em outros quarks, emitindo, no processo, léptons (**elétrons, múons, neutrinos**, etc.). Tais decaimentos são consequência da **força nuclear fraca**. Os bárions e os mésons são coletivamente conhecidos como **hádrons**. Dentre todas as partículas citadas, as que possuem **spin** semi-inteiro ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, ...) são denominadas **férmions**, as que possuem spin inteiro (0, 1, 2, ...) são denominadas **bósons**. Os férmions interagem pela troca de bósons virtuais, por exemplo: a atração entre um próton e um elétron (que são férmions com carga elétrica) dá-se pela troca de **fótons**, os bósons da **força eletromagnética**. Os bósons da interação forte são conhecidos como **glúons** e os bósons da interação fraca são as partículas W^+ , W^- e Z^0 . Há ainda um bóson fundamental para a teoria, o **bóson de Higgs**, responsável pelo mecanismo de geração das massas das partículas. Sua comprovação experimental foi feita em 2013 no Grande Colisor de Hádrons (LHC¹) do Centro Europeu para Pesquisas Nucleares (CERN). Cada **partícula** possui uma **antipartícula**, sua contrapartida de **antimatéria** com a carga elétrica e outros números quânticos invertidos, mas com

¹Em alguns casos, usaremos as siglas adotadas internacionalmente.

a mesma massa. Assim, já foi observado, por exemplo, o **pósitron**, partícula com massa igual à do elétron, mas com carga elétrica positiva. Caso um elétron e um pósitron venham a se colidir, aniquilam-se mutuamente emitindo dois fótons de raios gama.

De uma forma muito sucinta, este é o conhecimento que possuímos hoje (até uma escala de $\sim 10^{-19}$ m) acerca da estrutura mais fundamental da matéria. São os princípios fundamentais do **modelo padrão**, uma estrutura teórica que inclui a **teoria eletrofraca** e a **cromodinâmica quântica**, aplicadas na explicação das interações entre os quarks, léptons e bósons e, conseqüentemente, nas propriedades da matéria e das radiações e da estrutura e evolução do universo. Falta ainda uma análoga teoria quântica para a quarta interação fundamental da natureza: a **gravitacional**, que seria mediada pelo **gráviton**, o seu bóson hipotético. Não existem verificações experimentais para tais modelos, visto que suas previsões ocorrem na **escala de Planck**, isto é, na ordem de $\sim 10^{-35}$ m. Uma escala extremamente menor às acessíveis aos aceleradores de partículas que a ciência humana é ou será capaz de construir nos próximos séculos. No entanto, não incluir a gravidade não é o único problema com o modelo padrão: o modelo padrão contém muitos parâmetros (constantes de acoplamento, massas de léptons, quarks e bósons, etc.) que precisam ser tomados experimentalmente, não se sabe o porquê de existem três famílias de léptons e três de quarks, ou por que a carga elementar dos léptons é $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C e dos quarks é $\frac{1}{3}e$. Ademais, não sabe-se, nem experimentalmente, o valor exato das massas dos **neutrinos** das três famílias de léptons, nem o seu ordenamento. Não são conhecidos os processos que aceleram e, por conseguinte, a origem dos raios cósmicos às ultra-altas energias ($> 10^{18}$ eV). Finalmente, as galáxias aparentam ter muito mais massa do que infere-se a partir da matéria observável. De onde conclui-se que a maior parte de sua massa é de **matéria escura**. Na verdade, estima-se hoje que o universo contém apenas 5% de matéria ordinária (ou bariônica), cerca de 27% do seu conteúdo é de **matéria escura** e mais de 68% de **energia escura**. Há muito que ainda precisa ser aprendido e explicado.

I. DOS PRIMÓRDIOS À DESCOBERTA DO NÚCLEO ATÔMICO

No final do século XIX, o núcleo atômico não era conhecido e o átomo era supostamente a unidade básica indivisível da matéria. A hipótese do núcleo atômico ocorre a Rutherford, em 1911, após a análise dos resultados do experimento do espalhamento de partículas alfa por uma folha de ouro, feito pelos seus estudantes Geiger e Marsden, em 1909. Podemos iniciar a história da física nuclear com sua descoberta, ou com a dos raios X por Röntgen, em 1895, ou ainda com a descoberta da radioatividade por Becquerel, em 1896. De todo modo, é necessário mencionar-se o panorama da época e do que ocorrera previamente. Faremos uma breve narrativa histórica da física atômica, nuclear e de partículas elementares, retrocedendo os séculos que forem necessários, em busca das primeiras especulações sobre o princípio fundamental da matéria feitas pelos filósofos gregos.

Desde a Antiguidade, os pensadores têm se perguntado: “Qual é a natureza básica da matéria? Do que são feitas todas as coisas? Existe uma estrutura fundamental de toda a matéria?” Na Grécia antiga, vários filósofos, conhecidos como **físicos**, procuraram dar as suas respostas. Um dos primeiros foi Tales² que acreditava que a **água** fosse o elemento primordial. Deve-se a ele também a primeira observação experimental do fenômeno elétrico de atrair-se pequenos pedaços de papel com um bastão de âmbar (**elektron**, em grego) após este ser atritado com um pedaço de lã. É dele ainda o registro de que algumas pedras, descobertas pelo pastor Magnes da Tessália — região da Macedônia, posteriormente, rebatizada de Magnésia —, possuem de atrair o ferro: eram pedras de magnetita (Fe_3O_4), ou ímã natural. Posteriormente, outros pensadores apresentaram as suas hipóteses. Anaximandro³ propôs o **ápeiron** (ou “o indeterminado”, “o indefinido”) como o elemento primordial. Anaxímenes⁴ propôs o **ar**. Para Xenófanes⁵ era a **terra**. Já Heráclito⁶ acreditava ser o **fogo**. Empédocles⁷ unificou as ideias, propondo os **quatro elementos empédoclianos**: a água, o ar, a terra e o fogo; e dois princípios: o amor (**philia**), ou atração, e o ódio (**ekthos**), ou repulsão. Empédocles também foi um dos primeiros filósofos a afirmar: “a luz viaja em linha reta.” Platão⁸ associou, no diálogo intitulado *Timeu* (c 360 a.C.),

²Tales de Mileto (c 625 a.C.-c 547 a.C.), filósofo grego.

³Anaximandro de Mileto (c 611 a.C.-c 547 a.C.), filósofo grego.

⁴Anaxímenes de Mileto (c 570 a.C.-c 500 a.C.), filósofo grego.

⁵Xenófanes da Jônia (c 570 a.C.-c 480 a.C.), filósofo grego.

⁶Heráclito de Éfeso (c 540 a.C.-c 480 a.C.), filósofo grego.

⁷Empédocles de Akragas (c 490 a.C.-c 430 a.C.), filósofo grego.

⁸Platão de Atenas (c 427 a.C.-c 347 a.C.), filósofo grego.

cada um dos elementos primordiais a sólidos geométricos regulares, os **sólidos platônicos**: a terra foi associada ao cubo, o ar ao octaedro, a água ao icosaedro, o fogo ao tetraedro e o quinto sólido, o dodecaedro, estaria reservado à matéria do **cosmos**. Seu discípulo, Aristóteles⁹, que foi um dos mais influentes filósofos gregos, aproveitou os princípios e os elementos empedoclianos, acrescentando o que lhe faltava: o **éter**, uma quintessência rarefeita e imutável, etérea e eterna, responsável pela composição dos corpos celestes. Aristóteles rejeitou a hipótese do vácuo, sustentando que o éter preencheria todo o espaço. Para ele, a matéria podia ser infinitamente dividida. Em contraposição ao pensamento aristotélico, vinha o **atomismo**, formulado pelos filósofos Leucipo¹⁰ e Demócrito¹¹. Para os atomistas, a matéria poderia ser dividida até uma estrutura básica indivisível: o **átomo**. Os átomos filosóficos apresentam-se numa infinita variedade formas e tamanhos, todas imutáveis e indestrutíveis. Encontram-se em eterno movimento através do vácuo. De seus diferentes formatos e arranjos espaciais vêm as diferentes propriedades das matérias que compõem.

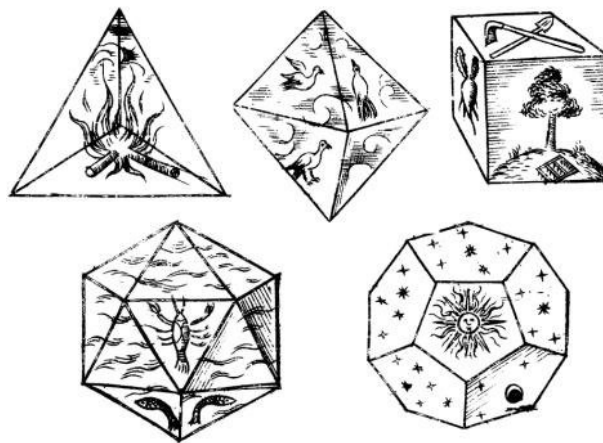


Figura 1: Ilustrações de Johannes Kepler dos cinco sólidos platônicos.

A filosofia grega influenciou por milênios o pensamento do mundo ocidental e oriental. Vários princípios aristotélicos ou atomistas podem ser encontrados na antiga visão de mundo chinesa, indiana ou árabe. Mas, sem dúvida, as ideias de Aristóteles dominaram a física e a cosmologia da Europa medieval. O Universo era geocêntrico e ptolomaico, com esferas sublunares e imperfeitas de Terra, água, ar e fogo e esferas perfeitas de éter, compondo os objetos celestes conhecidos (Lua, Sol, Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) e as estrelas. Não admira-se que tenha surgido um dogma medieval, segundo o qual “a natureza tem horror ao vácuo.” Coube a nomes como Galileu¹², Torricelli¹³ e Otto von Guericke¹⁴ a tarefa de demonstrar empiricamente que a natureza poderia, sim, dentro dos limites praticáveis, suportar o vácuo. Certamente, não é correto afirmar que a Idade Média tenha sido a “idade das trevas”. A fervente religiosidade e a grande tendência de favorecer visões metafísicas e pseudocientíficas culminam na alquimia medieval — mas, onde, inevitavelmente, encontramos as origens da química e da metalurgia modernas.

⁹Aristóteles de Estagira (384 a.C.-322 a.C.), filósofo grego.

¹⁰Leucipo de Mileto (do V século a.C.), filósofo grego.

¹¹Demócrito de Abdera (c 460 a.C.-c 370 a.C.), filósofo grego.

¹²Galileu Galilei (1564-1642), astrônomo, físico e matemático italiano.

¹³Evangelista Torricelli (1608-1647), físico e matemático italiano.

¹⁴Otto von Guericke (1602-1686), físico alemão.

Renomados filósofos naturais, como Paracelso¹⁵ ou Newton¹⁶, praticaram a alquimia. Uma das grandes buscas da alquimia era a **transmutação de elementos**, como, por exemplo, transformar chumbo em ouro. Os médicos, químicos e alquimistas alemães Becher¹⁷ e, seu discípulo, Stahl¹⁸ propuseram, no início do século XVIII, que os combustíveis continham uma substância chamada **flogisto**, que seria liberada durante o processo de combustão, mas Lavoisier¹⁹ descobriu que a combustão podia ser explicada com a introdução de um novo elemento: o **oxigênio**. No entanto, Lavoisier postulou a existência de um outro fluido hipotético para explicar as transferências de calor: o **calórico**, que seria transferido do corpo mais quente para o mais frio. Foi somente em meados do século XIX que os trabalhos de Joule²⁰ e Clausius²¹ suplantaram a teoria do calórico pelo princípio da **conservação de energia**.

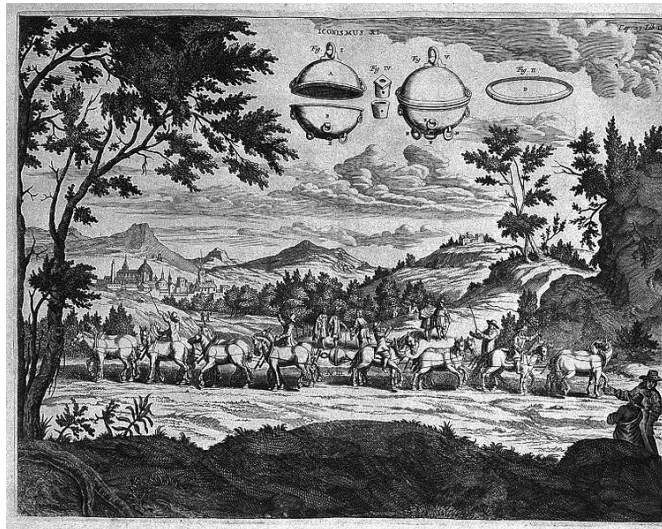


Figura 2: Os hemisférios de Magdeburgo, experimento com o vácuo feito por Otto von Guericke (1672).

O cientista mais influente dessa época foi decerto Isaac Newton. Em sua obra prima, *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* (1687), Newton estabeleceu o conjunto de leis que regem os movimentos dos corpos físicos, as **três leis de Newton**, que descrevem matematicamente como as forças atuam no movimento das partículas. Além disso, Newton apresentou a **lei da gravitação universal**: a força gravitacional entre dois corpos massivos é proporcional ao produto das massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Com ela, explicou o movimento dos corpos em queda livre, dos planetas em torno do Sol ou da Lua em torno da Terra. Newton verificou ainda que, partindo da lei da gravitação universal, demonstra-se a terceira lei de Kepler. E não menos importantes foram suas contribuições no campo da óptica. Em 1704, publicou o livro *Opticks*, onde relata seus resultados em diversos experimentos realizados com a luz. Em 1666, Newton observou que a luz solar de um orifício circular que incide sobre um prisma é refratada formando uma imagem alongada e colorida. Newton demonstrou, com a lei da refração, como a luz refratada pelo prisma desvia por ângulos diferentes cores diferentes. Em 1672, Newton realizou o **experimentum crucis**, no qual demonstrou que a luz branca decompõe-se no espectro de cores do arco-íris (vermelho, laranja, amarelo, verde,

¹⁵Paracelso, pseudônimo de Theophrastus von Hohenheim (1493-1541), físico, médico, alquimista e astrólogo suíço.

¹⁶Isaac Newton (1643-1727), físico, astrônomo, matemático, filósofo natural, teólogo e alquimista inglês.

¹⁷Johann Joachim Becher (1635-1682), médico, químico e alquimista alemão.

¹⁸Georg Ernst Stahl (1659-1734), químico, médico e metalúrgico alemão.

¹⁹Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794), químico francês.

²⁰James Prescott Joule (1818-1889), físico britânico.

²¹Rudolf Clausius (1822-1888), físico e matemático alemão.

azul, anil e violeta) e, posteriormente, pode ser recomposta na cor branca. Ele concluiu que os telescópios refratores apresentavam **aberração cromática**, como resultado do uso de lentes, e desenvolveu o telescópio refletor, ou **newtoniano**. Para Newton, a luz era composta por partículas que pulavam dos corpos iluminados e viajavam em linha reta. E com sua teoria **corpúscular** da luz, proveu explicações para os fenômenos da reflexão e da refração, assim como para a formação de sombras. Em contraposição à visão corpúscular de Newton, já havia uma teoria **ondulatória** da luz. Em 1678, Huygens²² propôs, numa comunicação à Academia de Paris, o seu princípio, segundo o qual as ondas se propagam com os pontos da sua frente servindo num dado instante como novas fontes puntuais cujas superposições originam a nova frente da onda num instante consecutivo. Huygens deu as suas explicações para os fenômenos da reflexão, da refração e da formação de sombras e também de penumbras.

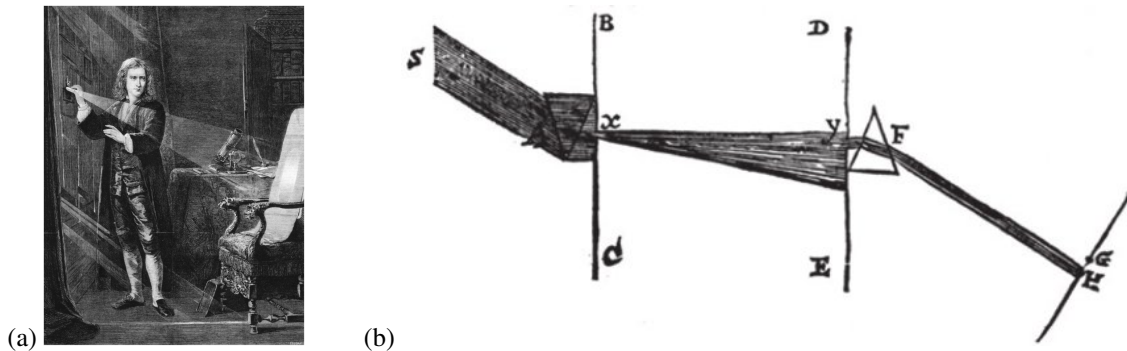


Figura 3: (a) Newton investigando a dispersão da luz; (b) o *experimentum crucis*, publicado em 1672.

Grandes progressos ocorreram no campo da eletricidade e do magnetismo entre os séculos XVI e XVIII. Em 1600, Gilbert²³ publicou *De Magnete*, um tratado sobre as suas experiências com eletricidade e magnetismo. Ele concluiu que a Terra é magnética e propôs um modelo para ela: a **terreia**. Explicou ser esta a razão pela qual as bússolas apontam para o norte, e cunhou o termo **pólo magnético**. Gilbert utilizou o âmbar (*elektron*, em grego) para realizar suas experiências, as quais decidiu chamar de **eletricidade**. Em 1670, Otto von Guericke desenvolveu a **máquina eletrostática**: uma esfera de enxofre que quando girada e atritada adquiria a capacidade de atração e de expelir centelhas. Em 1705, Hawksbee²⁴ adaptou um gerador eletrostático dentro de um de vidro evacuado contendo mercúrio que, ao ser girada a esfera de metal, podia produzir um brilho devido ao atrito da esfera com o mercúrio. O químico francês Du Fay²⁵ descobriu que os corpos eletrificados podiam atrair ou repelir um ao outro, concluindo haver dois tipos de eletricidade — a **vítrea** e a **resinosa** — e postulou que a eletricidade seria a interação entre esses dois fluidos elétricos. Inventada por acaso, a **garrafa de Leiden**, constituída por uma garrafa de vidro revestida internamente com folhas de metal e uma haste metálica passando por uma tampa de cortiça, foi o primeiro **condensador**. Ela foi aperfeiçoada por Musschenbroek²⁶, em 1746, na tentativa de reproduzir os resultados de von Kleist²⁷ que conseguira produzir, em 1745, centelhas grandes o suficiente para acender uma quantidade de álcool. E foi carregando uma garrafa dessas numa pipa que Franklin²⁸ coletou cargas elétricas durante uma tempestade, em 1750, demonstrando que os relâmpagos são fenômenos elétricos. Franklin foi também o inventor do **pára-raios** e cunhou o termo **bateria**. Ele propôs um modelo mais simples para a eletricidade: de um

²²Christiaan Huygens (1629-1695), físico, matemático, astrônomo e horologista holandês.

²³William Gilbert (1544-1603), físico e médico inglês.

²⁴Francis Hawksbee (1660-1713), físico inglês.

²⁵Charles Du Fay (1698-1739), químico francês.

²⁶Pieter van Musschenbroek (1692-1761), cientista holandês.

²⁷Ewald Georg von Kleist (1700-1748), físico alemão.

²⁸Benjamin Franklin (1706-1790), cientista, inventor, autor e diplomata americano.

único **fluido elétrico** com cargas **positiva** e **negativa**. Em 1767, Priestley²⁹ descreveu em *The History and the Present State of Electricity* o conhecimento sobre a eletricidade até então e relatou os seus próprios experimentos e descobertas, tais como, a da condutividade do carvão. Foi ele quem propôs que a força elétrica varia com o inverso do quadrado da distância entre as cargas, analogamente à lei da gravitação universal de Newton. Entretanto, coube a Coulomb³⁰ a invenção da **balança de torção** (1777) e a demonstração experimental da lei do inverso do quadrado da distância para a força elétrica (1785), ou seja, a **lei de Coulomb**. Independentemente, Michell³¹ utilizava uma balança de torção em 1783, com a qual demonstrou a lei análoga para a força magnética. O instrumento de Michell passou para as mãos de Cavendish³² que, por sua vez, o utilizou, em 1798, para a medida da intensidade da força gravitacional entre duas massas. Assim, Cavendish mediu a densidade da Terra e a constante gravitacional da fórmula de Newton. Enquanto isso, na Itália, Galvani³³ descobriu a **bioeletricidade**, em 1780, ao produzir contrações musculares em pernas de rã com descargas elétricas. Galvani cunhou o termo “eletricidade animal”, mas Volta³⁴ apelidou o fenômeno de **galvanismo**. Volta também foi o inventor da **pilha elétrica** (1799), uma pilha de discos de cobre e zinco separados por papelão úmido que produzia um fluxo contínuo de eletricidade.

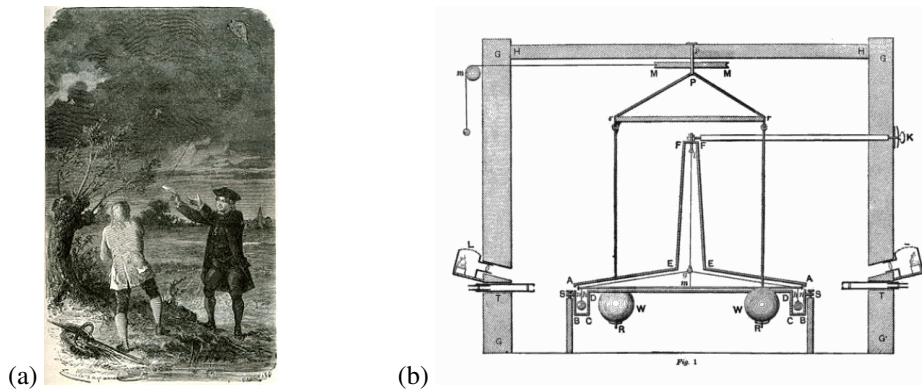


Figura 4: (a) o experimento de Franklin (1752); (b) a balança de torção de Cavendish (1798).

Cavendish deu também importantes contribuições para o campo da química. Ele isolou o gás hidrogênio, chamado por ele de “gás inflamável”. Em um trabalho de 1766, Cavendish descreveu que este gás forma água durante a reação com o “gás deflogisticado”, isto é, com o oxigênio. Posteriormente, Lavoisier repetiu o experimento de Cavendish e rebatizou também o hidrogênio com o seu nome atual. Não há dúvidas de que Cavendish sabia que a água continha duas proporções de hidrogênio em sua composição, mas foi Watt³⁵ quem publicou primeiro, em 1783, um trabalho determinando da composição da água. Posteriormente, Cavendish investigou e obteve com grande acurácia a composição atmosférica, além de conduzir experimentos para extrair nitrogênio e oxigênio da atmosfera. A propósito, o hidrogênio fora obtido anteriormente por Boyle³⁶, mas Cavendish é creditado como o seu descobridor, pois, além de produzi-lo, ele o indentificou como um elemento químico. Boyle já é mais conhecido pela lei que descreve a relação inversa entre a pressão e o volume de um gás isolado mantido a temperatura constante, a **lei de Boyle**. Ele foi um dos pioneiros da química moderna e da utilização do método científico experimental. O seu livro *The*

²⁹ Joseph Priestley (1733-1804), físico e químico britânico.

³⁰ Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), físico francês.

³¹ John Michell (1724-1793), físico e geólogo inglês.

³² Henry Cavendish (1731-1810), físico e químico britânico.

³³ Luigi Galvani (1737-1798), médico e físico italiano.

³⁴ Alessandro Volta (1745-1827), físico italiano.

³⁵ James Watt (1736-1819), inventor, engenheiro e químico escocês.

³⁶ Robert Boyle (1627-1691), químico e físico irlandês.

Sceptical Chymist (1661) é tido como um marco para o nascimento da química. Uma segunda relação fora formulada na década de 1780 por Charles³⁷, mas mantida não publicada. A **lei de Charles** estabelece a proporcionalidade entre o volume e a temperatura de um gás mantido a pressão constante. E, em 1802, Gay-Lussac³⁸ formulou a terceira lei que estabelece que a pressão de um gás aumenta linearmente com a temperatura, para o gás mantido a volume constante, a **lei de Gay-Lussac**. Ele também publicou a lei de Charles, entretanto, deu o devido crédito a Charles.

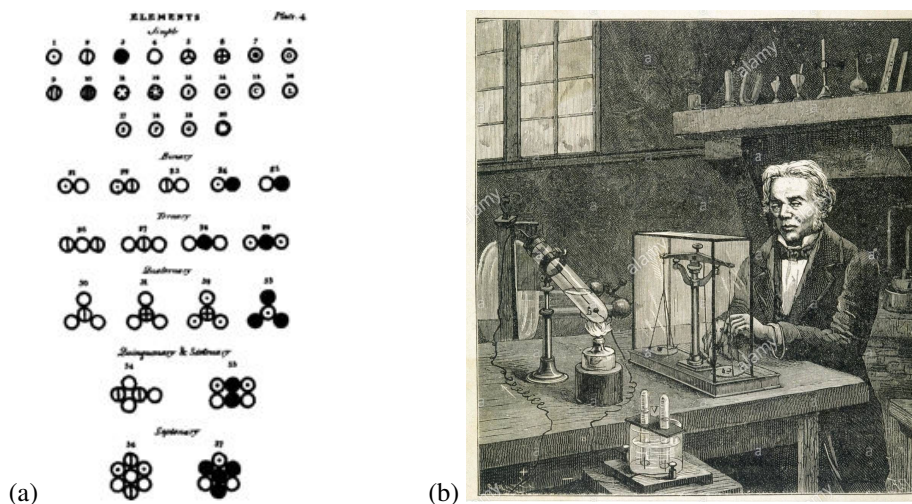


Figura 5: (a) hipótese atômica de Dalton (1803); (b) a eletrólise de Faraday (1834).

O terreno começava a ser preparado para a retomada da **hipótese atômica**, desta vez, com embasamento científico e experimental. Em 1803, Dalton³⁹, após conduzir diversos experimentos com gases, formulou a **lei da composição constante**: “dois elementos que formam uma série de componentes combinam-se em razões de pequenos números inteiros”. Isto só é possível se as substâncias químicas forem constituídas por elementos de unidades indivisíveis, os **átomos**, que combinam-se formando substâncias complexas, as **moléculas**, e que recombinaem-se em reações químicas. Em 1808, Gay-Lussac estabeleceu que o volume total dos gases numa reação deve ser conservado e que os volumes parciais dos reagentes e do produto também são representados em razões de pequenos números inteiros. Em 1811, Avogadro⁴⁰ hipotetizou que duas amostras de gases nas mesmas condições de temperatura, pressão e volume contêm a mesmo número de moléculas, posteriormente chamado de **número de Avogadro**. Avogadro não dispunha de formas de determinar esta quantidade na época, mas a simples hipótese da existência do número corroborou a hipótese atômica, já que nele estão contidas informações sobre a granularidade das massas atômicas. Em 1834, Michael Faraday⁴¹, após medir cuidadosamente a massa coletada e a corrente elétrica passando através de soluções eletrolíticas, descobriu a **lei da eletrólise**, que estabelece uma proporcionalidade entre o **equivalente químico** (razão entre a massa medida e a massa molar do elemento) e o **equivalente eletroquímico** (razão entre a carga medida e a valência do elemento). A proporcionalidade se dá através da **constante de Faraday**, cujo valor permite estimar a razão entre a carga elétrica e a massa dos íons depositados nos terminais, isto é, a **razão carga-massa** do elemento em questão. O maior valor obtido para a razão carga-massa foi para o íon hidrogênio, o mais leve dos elementos: $q/m = 9,578 \times 10^7$ C/kg. Hoje sabemos que

³⁷Jaques Alexandre César Charles (1746-1823), físico, químico, matemático e inventor francês.

³⁸Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850), físico e químico francês.

³⁹John Dalton (1766-1844), físico, químico e meteorologista inglês.

⁴⁰Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro (1776-1856) cientista italiano.

⁴¹Michael Faraday (1791-1867), físico e químico britânico.

a constante de Faraday é um produto de duas outras constantes fundamentais: $F = e \cdot N_0$, onde e é a **carga elementar** e N_0 o número de Avogadro. Mas foi somente em 1865 que chegou-se a uma primeira estimativa de uma quantidade relacionada à grandeza molecular: o **número de Loschmidt**. Utilizando-se de argumentos da **teoria cinética dos gases**, Josef Loschmidt⁴² relacionou o **livre caminho médio** das moléculas do ar com seus diâmetros, equacionando-os com o **coeficiente de condensação** (a razão entre os volumes das fases gasosa para a líquida do ar, que poderia ser obtida experimentalmente) e determinou o número de moléculas por unidade de volume de uma amostra de ar em condições normais de temperatura e pressão. As estimativas de Loschmidt levaram-no a um valor uma ordem de grandeza menor para este número que o aceito atualmente. Apesar disso, ele conseguiu chegar a uma razoável estimativa para o diâmetro molecular, em cerca de 1 nanômetro.

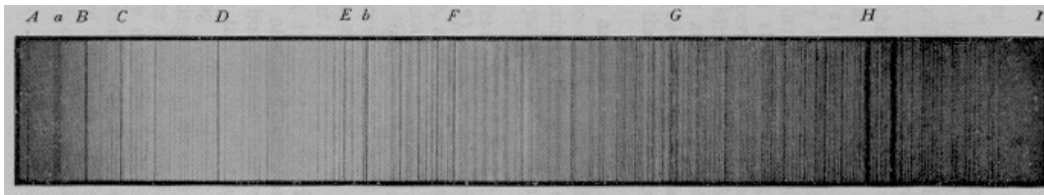


Figura 6: As linhas de Fraunhofer.

O século XIX foi a época da consolidação do **eletromagnetismo**. Em 1803, com a observação das **franjas de interferência** no **experimento da dupla fenda** de Young⁴³, a teoria ondulatória da luz foi evidenciada. A lei de Coulomb foi reescrita, em 1813, no formalismo do cálculo vetorial pelo matemático alemão Gauss⁴⁴, adquirindo a forma em que é conhecida como **lei de Gauss**. Durante uma aula, em 1820, Ørsted⁴⁵ notou que a agulha de uma bússola deflete-se na proximidade de um fio com corrente elétrica, demonstrando que fenômenos elétricos e magnéticos são correlacionados. Em 1823, foi descoberta a **lei circuital de Ampère**⁴⁶, que relaciona o campo magnético produzido em torno de um fio à corrente elétrica que passa por ele. Em 1831, Faraday demonstrou experimentalmente a **lei da indução eletromagnética**, que relaciona a força eletromotriz gerada num circuito elétrico com a variação de fluxo magnético. Após fazer uma correção na lei de circuital de Ampère para incluir variações temporais do campo elétrico e torná-la compatível com a **equação da continuidade**, Maxwell⁴⁷ publicou, em 1865, o conjunto de leis do eletromagnetismo na forma das **equações de Maxwell**; quando manipuladas, as equações de Maxwell preveem a existência de **ondas eletromagnéticas** com velocidades iguais às medidas para a luz na época. Maxwell imediatamente concluiu que a luz é uma forma de onda eletromagnética. A demonstração experimental da existência de ondas eletromagnéticas deu-se em 1887, após Hertz⁴⁸ produzir um aparelho transmissor e receptor de ondas de rádio, provando que elas viajam à velocidade da luz, além de possuírem as propriedades de reflexão e refração.

Mais evidências para serem comprovadas a existência de átomos e moléculas foram obtidas com os estudos dos **espectros atômicos**. Em 1814, Fraunhofer⁴⁹ inventou o **espectrógrafo**, um prisma associado a um telescópio, com o qual ele pôde observar **linhas de absorção** (escuras) no espectro da luz de estrelas. Ele identificou diversas linhas de absorção no espectro do Sol (as 574 **linhas de Fraunhofer**) e no de Sírius. Em 1849, Léon Foucault⁵⁰ concluiu que uma substância que emite radiação em

⁴²Johann Josef Loschmidt (1821-1895), físico e químico austríaco.

⁴³Thomas Young (1773-1829), físico e fisiologista inglês.

⁴⁴Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855), matemático e físico alemão.

⁴⁵Hans Christian Ørsted (1777-1851), físico e químico dinamarquês.

⁴⁶André-Marie Ampère (1775-1836), matemático e físico francês.

⁴⁷James Clerk Maxwell (1831-1879), físico escocês.

⁴⁸Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), físico alemão.

⁴⁹Joseph Ritter von Fraunhofer (1787-1826), físico e óptico alemão.

⁵⁰Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), físico e astrônomo francês.

determinadas frequências também absorve nas mesmas frequências. Em 1860, Kirchhoff⁵¹ e Bunsen⁵² demonstraram que as **linhas de emissão** de gases monoatômicos aquecidos, quando observadas num espectrógrafo, apresentam padrões específicos de linhas, provendo assim uma assinatura experimental para cada elemento químico. Dessa forma, é possível inferir-se a composição química das estrelas.

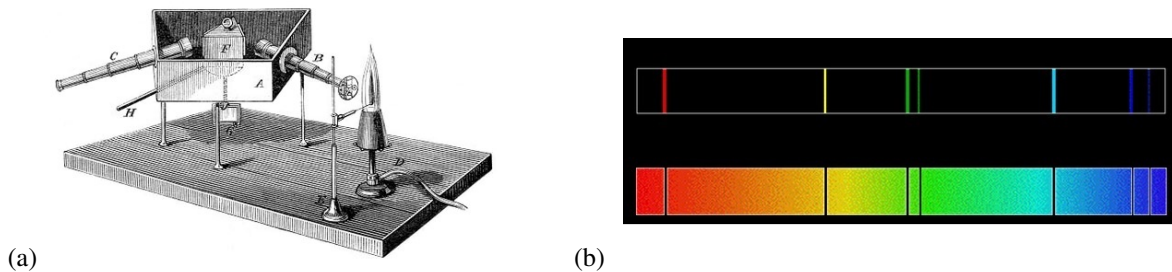


Figura 7: (a) o experimento de Kirchoff e Bunsen; (b) espectros de emissão e de absorção de elementos.

Durante uma conferência da Sociedade Química de Londres, em 1881, Helmholtz⁵³ propôs que se as substâncias são composta por átomos, então a eletricidade também deveria ser composta por “**átomos de eletricidade**”. Posteriormente, esta mesma ideia foi utilizada por Stoney⁵⁴ para dar uma explicação simples para a lei da eletrólise de Faraday, numa publicação de 1894 em que chama o átomo de eletricidade de **elétron**, transliterando a palavra grega para âmbar, *elektron*. Todavia a natureza e as características desta partícula eram muito incertas. Os progressos obtidos depois vieram com experimentos de descargas elétricas através de tubos com gases rarefeitos, sendo Crookes⁵⁵ um dos pioneiros nestes estudos. O **tubo de Crookes**, ou **tubo de raios catódicos**, foi aperfeiçoado no ano de 1875, tão logo ele notou que ao abaixar a pressão do gás no interior do tubo, raios eram emitidos a partir do terminal negativo, ou seja, do **cátodo**. Vários estudos sobre as propriedades dos **raios catódicos** foram feitos subsequentemente. Foi demonstrado que eles propagam-se em linha reta, exceto quando estão sob a ação de um campo magnético, e que causam calor e fosforescência nos objetos sobre os quais incidem. Mas Crookes acreditava que os raios catódicos seriam formados pelo próprio gás residual no interior do tubo, ionizado e repelido pelo cátodo. Entretanto, descobertas posteriores viriam a contradizê-lo.

Vimos que Hertz, em 1887, construiu um aparato para a emissão de ondas eletromagnéticas, formado por dois eletrodos que, quando submetidos a uma diferença de potencial, produzem faíscas. Para melhor observá-las, ele cobriu e levou o seu aparato para o escuro, tendo notado que as faíscas diminuía de tamanho. Ao instalar uma janela de vidro, observou que as faíscas diminuía ainda mais, mas isto não ocorria com uma janela de quartzo. Assim, Hertz concluiu que a **luz ultravioleta** favorecia a emissão das faíscas, uma vez que o quartzo não absorve no ultravioleta. O fenômeno ficou conhecido como **efeito fotoelétrico**. Seu aluno Lenard⁵⁶ realizou, em 1894, melhorias nos tubos de Crookes, instalando janelas metálicas por onde os raios eram direcionados, as *janelas de Lenard*, e conduziu, nos anos seguintes, um estudo sistemático dos raios catódicos e do efeito fotoelétrico. Uma vez que os raios eram capazes de penetrar uma folha metálica, Lenard concluiu que não poderiam ser as moléculas do gás, como supunha Crookes. Ele verificou ainda que os raios catódicos eram espalhados ao atravessarem uma camada de ar em condições normais, sugerindo que deveriam ser compostos por partículas menores que as moléculas do ar. Lenard descobriu que havia uma **frequência de corte** no efeito fotoelétrico, isto é, um limiar de frequências da luz incidente, abaixo do qual, o efeito não ocorre.

⁵¹Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), físico e químico alemão.

⁵²Robert Wilhelm Eberhard von Bunsen (1811-1899), químico alemão.

⁵³Hermann von Helmholtz (1821-1894), físico e fisiologista alemão.

⁵⁴George Johnstone Stoney (1826-1911), físico irlandês.

⁵⁵William Crookes (1832-1919), físico e químico britânico.

⁵⁶Phillipp Lenard (1862-1947), físico húngaro e alemão.

Este último resultado pôs em cheque a visão de que os raios catódicos seriam ondas eletromagnéticas, pois, de acordo com a teoria ondulatória, a energia do feixe incidente aumenta com sua intensidade que, por sua vez, é proporcional ao quadrado da amplitude da onda, portanto, não há relação ou razão física para a existir um corte na frequência, de acordo com a visão clássica.

No sul da Alemanha, em 1895, enquanto usava, no laboratório escuro, um tubo de raios catódicos, Röntgen⁵⁷ notou que uma placa de platinocianeto de bário emitia uma **luminescência** verde e que esta cessava quando o tubo era desligado. Os raios, evidentemente, atravessavam as paredes de vidro do tubo e o ar, não podendo ser moléculas do gás. Além disso, não eram defletidos por campos elétricos ou magnéticos. Röntgen concluiu que os enigmáticos raios eram ondas eletromagnéticas de comprimentos de onda muito curtos e chamou-os de “**raios-X**”. Posteriormente, Röntgen percebeu que, ao direcionar os raios-X para uma chapa fotográfica e pôr a mão no seu caminho, eles atravessavam a carne e não atravessavam os ossos, produzindo uma **radiografia** do esqueleto. A descoberta causou um enorme impacto na imprensa da época o que trouxe grande notoriedade a Röntgen. Devido à sua descoberta, Röntgen foi laureado com o primeiro prêmio Nobel de Física da história, em 1901. Ele doou o prêmio para a Universidade de Würzburg, onde trabalhava, e não quis patentear a sua descoberta, pois desejava que toda a sociedade se beneficiasse com ela. Röntgen morreu, em 1923, de câncer no intestino, muito provavelmente, causado pelas excessivas doses de radiação que recebeu ao longo de sua vida.

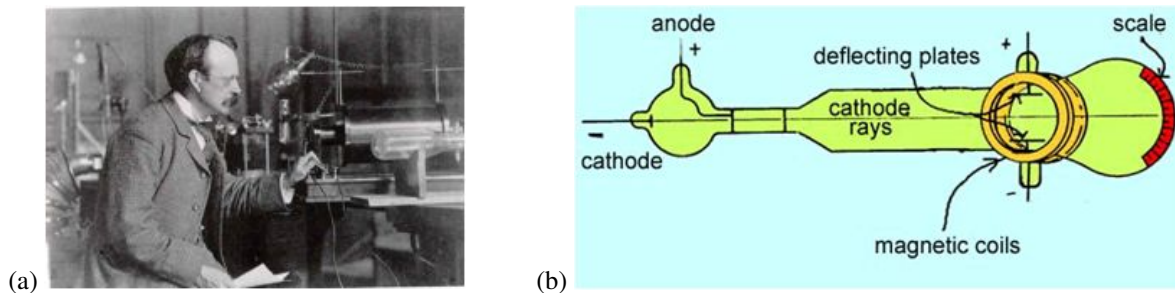


Figura 8: (a) Thomson no Laboratório Cavendish; (b) o experimento de Thomson.

Ao investigar os traços produzidos em chapas fotográficas por radiações emitidas a partir de amostras contendo sais de urânio, o físico francês Henri Becquerel⁵⁸ notou que as emissões ocorriam de forma contínua e independente das amostras terem sido expostas a uma fonte externa, como o Sol, por exemplo. Assim, em 1896, Becquerel chegou à acertada conclusão de que as radiações eram provenientes do próprio urânio. Em 1901, ele descobriu que os materiais radioativos eram capazes de produzir queimaduras na pele e que poderiam ser usados na medicina, dando origem ao ramo da **radioterapia**. Becquerel morreu aos 55 anos de idade de causa desconhecida, mas há relatos de ele que possuía graves queimaduras na pele. Após sua descoberta, seguiram-se anos de intensas atividades de pesquisa no campo das radiações.

Enquanto isso, no Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge, o professor Thomson⁵⁹ dedicava-se ao estudo dos raios catódicos. Inicialmente, Thomson pôde medir a velocidade dos raios, cujo valor era cerca de 1600 vezes menor que a velocidade da luz, resultado que o levou a abandonar a ideia de ondas eletromagnéticas e adotar o ponto de vista de que os raios catódicos eram partículas. Ainda faltava medir as suas massa e a carga. Thomson montou, então, um arranjo de campos elétricos e magnéticos no interior do tubo de Crookes, dispostos adequadamente de forma a cancelarem-se, e obteve a razão $q/m = 1,759 \times 10^{11}$ C/kg, ou seja, um valor 1836 vezes maior que o de Faraday para a mesma razão do íon hidrogênio. Como estes cientistas estavam lidando, tanto na eletrólise de Faraday, quanto no experimento de Thomson, com as menores partículas possíveis, em cada situação: o átomo de hidrogênio e o “átomo de eletricidade”, respectivamente; não havia motivos para a razão

⁵⁷ Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), físico alemão.

⁵⁸ Antoine Henri Becquerel (1852-1908) físico francês.

⁵⁹ Joseph John Thomson (1856-1940), físico inglês.

q/m dos raios catódicos ser maior devido à carga, mas somente devido à massa de seus constituintes. Por outro lado, já sabia-se que tais partículas eram bem menores que os átomos. Então, após verificar que os resultados eram os mesmos para todos os gases usados, Thomson concluiu que deveria tratar-se de uma partícula universal e estabeleceu, em 1897, a existência do **elétron**. Seus resultados o levaram a propor, em 1904, um novo modelo para o átomo, o **modelo atômico de Thomson** (em analogia a um pudim de ameixas): os átomos eram formados por esferas de eletrificação positiva uniforme (o pudim) cravejadas por corpúsculos eletrificados negativamente, os elétrons (as ameixas).

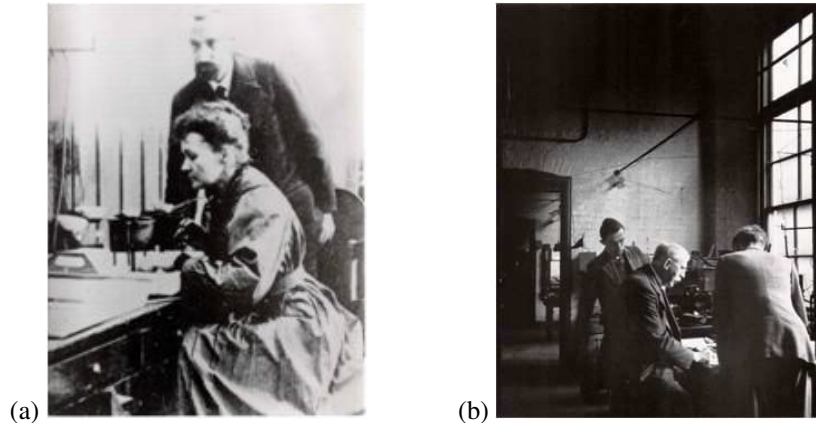


Figura 9: (a) Marie e Pierre Curie; (b) Rutherford e seus alunos, Geiger e Marsden.

Na mesma época, deu-se início ao monumental trabalho do casal Marie⁶⁰ e Pierre Curie⁶¹ na descoberta e preparação de novos materiais radioativos. Em 1898, eles descobriram a radiação da *plechblenda* mineral e depois, em condições muito precárias no laboratório da Escola de Física e Química de Paris, isolaram dela dois elementos com atividades muito maiores: um foi batizado de “polônio”, em homenagem ao país natal de Marie, e o outro de “rádio”. A “**radioatividade**”, termo cunhado pelo casal Curie, não era afetada pela série de reações químicas necessárias para suas sintetizações. De onde concluíram que a radioatividade é uma propriedade intrínseca dos átomos de cada elemento. Marie Curie tornou-se a única cientista na história a receber dois prêmios Nobel: um de física, em 1903, dividindo-o com seu marido Pierre e com Henri Becquerel, e um de química, em 1911.

Neste mesmo ano de 1898, um ex-aluno de Thomson, Ernest Rutherford⁶², mudou-se de Cambridge e foi trabalhar como professor de física na Universidade McGill, no Canadá, onde dedicou-se ao estudo das radiações. Inicialmente, ele descobriu dois tipos de raios, chamando-os de “**alfa**” e “**beta**”. Posteriormente, em colaboração com o colega Frederick Soddy⁶³, concluiu que não tratavam-se de raios, mas de partículas que defletiam-se em direções opostas quando submetidos a um campo magnético. Em 1903, os dois publicaram um trabalho demonstrando que, juntamente com as emissões radioativas, os átomos de um elemento desintegravam-se espontaneamente em outros elementos. Já em 1900, Paul Villard⁶⁴ descobriu um terceiro tipo de radiação, esta sim na forma de radiação eletromagnética e ainda mais penetrante que os raios X, que chamou de “**raios gama**”. E em 1903 Rutherford publicou um outro artigo com medidas das deflexões eletromagnéticas e absorções sofridas por estes três tipos de radiação, emitidas pelo rádio.

⁶⁰Marie Skłodowska Curie (1867-1934), física e química polonesa.

⁶¹Pierre Curie (1859-1906), físico francês.

⁶²Ernest Rutherford (1871-1937), físico e químico neozelandês.

⁶³Frederick Soddy (1877-1956), físico e químico britânico.

⁶⁴Paul Ulrich Villard (1860-1934), físico e químico francês

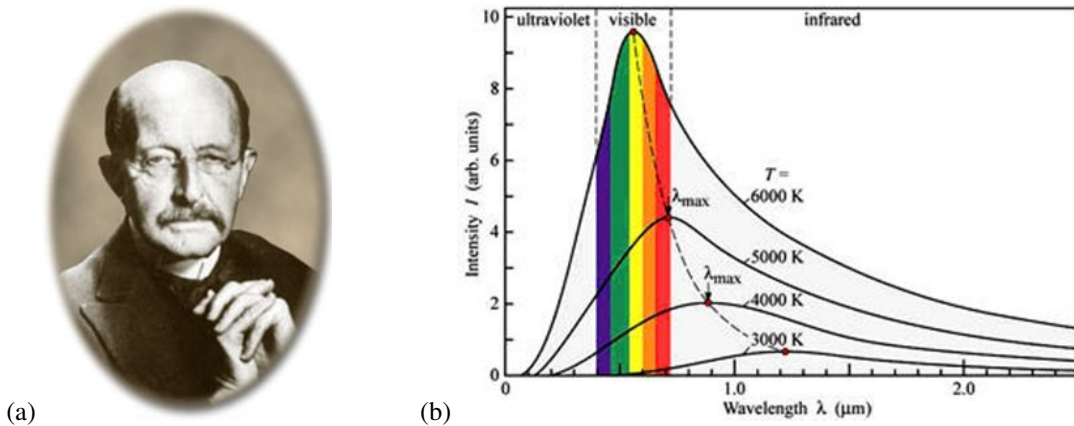


Figura 10: (a) Max Planck; (b) radiação de corpo negro.

Outra questão que intrigava os físicos da época dizia respeito à radiação térmica emitida por metais aquecidos, a *radiação térmica de corpo negro*. Um corpo negro, por definição, é um sólido perfeitamente absorvedor, toda a radiação que incide sobre ele é absorvida e nenhuma é refletida, por isso, é dito um corpo negro. Suas emissões são provenientes apenas da agitação térmica de seus átomos, por isso, radiação térmica. Por exemplo, à temperatura ambiente, o ferro emite quase toda a radiação térmica no infravermelho, que não pode ser vista, mas quando fundido num forno siderúrgico o ferro adquire um brilho avermelhado. Aumentando-se gradativamente a temperatura, ele passa a brilhar, sequencialmente, em cores alaranjadas, amareladas e branco-azuladas. Acima de 700°C , todos os metais emitem radiação visível apresentando um brilho próprio. Em 1859, Kirchhoff formulou a questão: “como a intensidade da radiação eletromagnética emitida por um corpo negro depende da frequência da radiação e da temperatura do corpo?”. A primeira *lei de distribuição* foi deduzida por Wilhelm Wien⁶⁵, em 1896, que representava bem os resultados experimentais em altas frequências, mas falhava em baixas frequências. Outra tentativa foi realizada pelo físico britânico Lord Rayleigh⁶⁶ que, no ano de 1900, derivou a partir de argumentos da física clássica a dependência da lei de distribuição com λ^{-4} e, 5 anos depois, completou, em parceria com Sir James Jeans⁶⁷, a dedução obtendo a constante de proporcionalidade. A lei de Rayleigh-Jeans, por sua vez, representava bem os resultados experimentais em baixas frequências, mas falhava miseravelmente em altas frequências, prevendo uma intensidade infinita de radiação. Tal discrepância ficou conhecida como a *catástrofe do ultravioleta*, já que para pequenos comprimentos de onda (ou altas frequências) a emissão de energia divergiria de acordo com a fórmula. Em 1900, o professor Max Planck⁶⁸ apresentou a tese de que a radiação térmica de corpo negro não é emitida num fluxo contínuo, mas em pequenos pacotes discretos, denominados **quanta** de energia. Com a hipótese dos quanta, Planck foi capaz de produzir uma fórmula para a lei de distribuição que ajustava-se perfeitamente aos dados experimentais, tanto em baixas quanto em altas frequências. Além de particionar o espectro de energias em quanta, Planck propôs que a energia de cada **quantum** é proporcional à frequência da radiação eletromagnética, de acordo com a fórmula: $E = hf$, onde h é a constante conhecida como *constante de Planck*. O seu valor foi obtido experimentalmente em 1916 após os trabalhos de Millikan⁶⁹ em suas investigações acerca do efeito fotoelétrico, tendo obtido o valor de $h = 6,57 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$. Millikan teve como motivação inicial sua desconfiança com relação à interpretação dada por Einstein⁷⁰ para o efeito fotoelétrico. Einstein utilizou-se da fórmula de Planck para atribuir um caráter corpuscular à radiação eletromagnética que, de acordo com sua interpretação, provoca colisões com os elétrons na superfície dos

⁶⁵ Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928), físico alemão.

⁶⁶ Barão Rayleigh III, John William Strutt (1842-1919), físico britânico.

⁶⁷ James Hopwood Jeans (1877-1946), físico, astrônomo e matemático britânico.

⁶⁸ Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), físico alemão.

⁶⁹ Robert Andrews Millikan (1868-1953), físico norte-americano

⁷⁰ Albert Einstein (1879-1955), físico alemão.

metais como se fossem as colisões entre bolas de bilhar, ou seja, as colisões entre partículas. Para Einstein, a energia dos elétrons no efeito fotoelétrico é dada pela diferença entre a energia do quantum de radiação eletromagnética e a energia gasta para arrancar o elétron da superfície, isto é: $E = hf - W$. No final, Millikan acabou confirmando tanto a hipótese quanto a equação de Einstein, apresentando como resultado valores cada vez mais precisos para a constante de Planck. Ambos foram laureados com o prêmio Nobel de Física por seus trabalhos com o efeito fotoelétrico: Einstein em 1921 e Millikan em 1923.

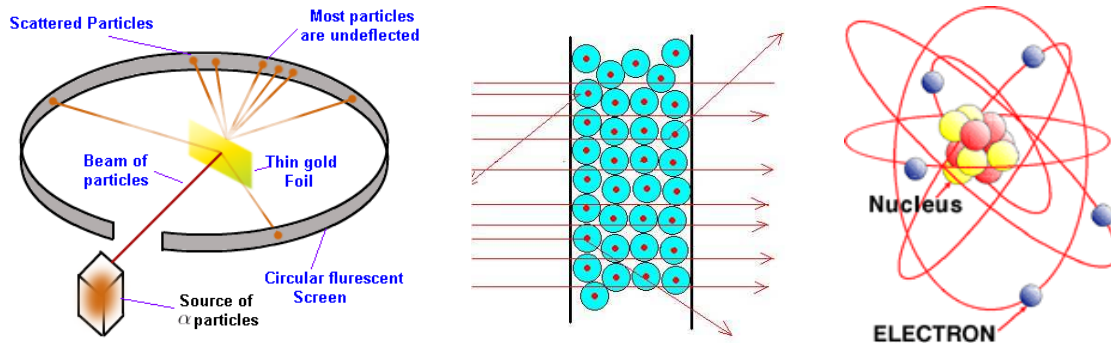


Figura 11: O experimento e o modelo de Rutherford.

Em 1907, Rutherford retornou à Inglaterra para trabalhar na Universidade de Manchester. Ele recebeu a visita do físico alemão Hans Geiger⁷¹ (famoso pelo desenvolvimento do detector Geiger) e o convidou para integrar sua equipe. Juntamente com Geiger, Rutherford descobriu que as emissões de radiação alfa, independentemente da fonte utilizada, sempre continham o espectro de linhas correspondente ao gás hélio e tinham a mesma massa atômica deste elemento. De fato, os raios alfa são núcleos de átomos de hélio. Em 1908, Geiger construiu um tubo de vidro de cerca de dois metros e posicionou uma fonte de rádio (emissor de partículas alfa) numa extremidade do tubo. Na outra extremidade, havia uma tela fosforescente com um microscópio acoplado e no meio do tubo uma fenda de 0,9 mm de largura. Geiger evacuou o tubo e registrou uma fina imagem das partículas alfa na tela. Posteriormente, ele deixou o ar entrar no tubo e mostrou que a imagem formada era mais difusa. Finalmente, Geiger evacuou novamente o tubo e posicionou uma folha de ouro na fenda, mostrando que as partículas alfa chegavam também espalhadas. Porém, com este aparato, Geiger conseguia medir pequenas deflexões, de apenas alguns graus. Rutherford estava interessado em espalhamentos maiores, de ângulos até maiores que 90° . Rutherford, chamou o então estudante Ernest Marsden⁷² e propôs o célebre experimento de bombardeamento de partículas alfa sobre uma fina folha de ouro. Ao redor da folha de ouro foi posicionada uma fita de material cintilador acoplada a um microscópio que, desta vez, podia girar a diferentes ângulos de deflexão. Geiger e Marsden realizaram o experimento no ano de 1909. Eles contaram um grande número de partículas na direção frontal e uma fração delas espalhadas a ângulos consideravelmente grandes. Contudo, $\lesssim 0,01\%$ delas eram espalhadas a ângulos maiores que 90° , o que só é possível se a maior parte da massa atômica estiver concentrada numa região muito menor que o átomo. Rutherford realizou os cálculos e, no ano de 1911, propôs o **modelo nuclear do átomo**, no qual o átomo tem dimensão de 10^{-10} m, mas a maior parte de sua massa está concentrada num núcleo central com dimensão da ordem de 10^{-14} m. Os elétrons bem mais leves e de carga negativa orbitam o núcleo massivo e de carga positiva. Este modelo por vezes é chamado de *modelo planetário de Rutherford*, em analogia a um sistema de planetas orbitando sua estrela central. O modelo de Rutherford é o precursor de toda a **física nuclear**.

⁷¹Johannes Wilhelm Geiger (1882-1945), físico alemão.

⁷²Ernest Marsden (1889-1970), físico inglês.