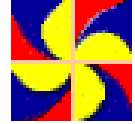




# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)



---

## “PEQUENAS FRAUDES” NA FÍSICA

Neste artigo vamos destacar “*pequenas fraudes*” cometidas por alguns físicos para contornar dificuldades que as observações experimentais apresentavam aos seus trabalhos (teóricos ou experimentais). Para isso, usaremos o contexto histórico em que elas ocorreram e seu desdobramento posterior para mostrar que não houve “dolo” em suas intenções. Assim, neste texto, vamos trabalhar com o ocorrido com quatro (4) físicos: 1) o italiano Galileu Galilei (1564-1642); 2) o alemão Johannes Kepler (1571-1630); 3) o francês Antoine Henri Becquerel (1852-1908; PNF, 1903); e 4) o norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953; PNF, 1923).

### Galileu e a Queda Livre dos Corpos.

Vejamos o contexto histórico. As primeiras observações sobre o movimento dos corpos aconteceram na Antiguidade. Com efeito, o filósofo grego Aristóteles de Estagira (384-322) em seu livro intitulado **Physis** (“Física”) apresentou suas ideias sobre o **movimento**, que o considerava como *o ato do que está em potência enquanto em potência*. Com relação aos atributos (*categorias*) dos seres que são afetados pelo **movimento**, Aristóteles distingue quatro espécies de **movimento**: 1) segundo a *essência* do ser: **geração** e **corrupção**; 2) segundo a *qualidade*: **alteração**; 3) segundo a *quantidade*: **crescimento (acelerado)** e **decréscimo (desacelerado)**; e 4) segundo o *lugar*: **natural** se ele se dirige para o seu lugar natural (por exemplo, para o alto como o *fogo* e o *ar*, e para baixo, como a *água* e a *terra*); e **forçado** ou **violento**, se afastar-se de seu lugar natural por intermédio de um agente externo (“força” ou “potência”).

Na continuação de seus estudos sobre o **movimento**, Aristóteles afirmou que existe um *princípio dinâmico no movimento*: - *Todo movido é movido por um motor*. Desse modo, no **movimento natural** um corpo se move devido a sua *apetência*, isto é, segundo a sua natureza, que é um motor interior. Já um corpo sob um **movimento forçado** o faz por intermédio de um motor que lhe é estranho e contíguo. Este, dizia Aristóteles, é o caso do movimento de um corpo no ar, pois este, ao ser

“empurrado” para os lados pelo corpo, o impulsiona em sua trajetória. Portanto, concluiu, só há **movimento forçado** se houver ar, conclusão que o levou ao célebre apotegma: - *A Natureza tem horror ao vácuo.*

Usando esses princípios, Aristóteles obteve os seguintes resultados: 1) *Sempre que uma força ou potência é exercida sobre um móvel, a relação das distâncias percorridas é igual à relação dos tempos de percurso;* 2) *A relação das forças exercidas sobre um móvel é igual à relação das distâncias percorridas num mesmo intervalo de tempo, desde que estas forças tenham uma intensidade que ultrapasse certo limite abaixo do qual elas não podem agir;* 3) *O movimento de um corpo através de um meio resistente, além de ser proporcional à força que o produziu é, também, inversamente proporcional à resistência do meio considerado;* 4) *Os corpos se movem diferentemente uns dos outros por excesso de peso ou de leveza;* 5) *Um corpo pesado cai mais rapidamente do que um leve;* 6) *A velocidade de um corpo em queda livre é proporcional ao seu peso.*

Dando continuidade ao contexto histórico, esses trabalhos de Aristóteles sobre o **movimento**, foram estudados por Galileu em seu livro **De Motu** (“O Movimento”), escrito entre 1589 e 1592, quando ensinava na *Universidade de Pisa*. Nesse livro, Galileu examinou a possibilidade de haver outro tipo de movimento que não fosse um dos dois movimentos aristotélicos - **natural** e **violento** –, o qual chamou de **neutro**. Como exemplo desse novo tipo de movimento afirmou que a **rotação** de um corpo em um plano vertical, não se enquadra nesses dois tipos de movimento aristotélicos, já que o mesmo ora se encontra acima e ora abaixo do horizonte. Contudo, a tese aristotélica (vista acima) sobre o **movimento** e, em particular, sobre a **queda livre dos corpos** foi definitivamente refutada por Galileu em seu livro **Discorsi e Dimostrazione Matematiche intorno a Due Nuove Scienze** (“Discursos e Demonstrações Matemáticas em torno de Duas Novas Ciências”) (Great Books of the Western World 26, Encyclopaedia Britannica, 1993), publicado em 1638. Neste livro, Galileu abordou geometricamente as leis do equilíbrio dos corpos – sua primeira Ciência (hoje, conhecida como *Resistência dos Materiais*) – e as leis do movimento – sua segunda Ciência (*Cinemática*). Nesta, inicialmente, ele estudou o movimento uniforme e o uniformemente acelerado para, em seguida, aplicá-los à **queda livre dos corpos**, ao movimento dos corpos em planos inclinados, ao movimento do pêndulo, e ao **movimento de projéteis**. Ao estudar a **queda livre** dos corpos, descobriu suas célebres leis:

1) *As velocidades (v) dos corpos em queda livre são proporcionais aos tempos (t) gastos na mesma ( $v \propto t$ );*

2) *Os espaços (s) percorridos pelos corpos em queda livre são proporcionais aos quadrados dos tempos gastos em descrevê-los ( $s \propto t^2$ ).*

Por outro lado, em sua investigação sobre o movimento de corpos em planos inclinados lisos (sem atrito e considerados colocados no vácuo), Galileu observou que os tempos gastos na descida de um corpo ao longo do plano inclinado em sua **queda livre** do topo do plano, são proporcionais aos valores de seu comprimento ( $\ell$ ) e de sua altura (h). Na continuação desse estudo, Galileu mostrou (em linguagem atual) que se a for a aceleração do corpo ao longo do plano (de inclinação  $\beta$  para o qual se tem:  $\sin \beta = h/\ell$ ) e g é a aceleração da gravidade de um corpo em **queda livre** (no vácuo), então:  $a = g \sin \beta$ . Dessa expressão é fácil concluir que se o plano estiver na vertical ( $\beta = 90^\circ$ ),  $a = g$ , pois  $\sin 90^\circ = 1$ . Como esta expressão não depende da massa do corpo, ela é conhecida como a célebre afirmação de Galileu: - *No vácuo, todos os corpos caem com a mesma aceleração!*

É interessante registrar que Galileu usou um artifício engenhoso para medir os tempos em suas experiências. Assim, considerando a *clepsidra* (“relógio de água”) usada na Antiguidade como modelo, ele a aperfeiçoou da seguinte maneira: tomou um recipiente de grandes dimensões transversais, fez um diminuto furo em seu fundo e colocou certa quantidade de água que fluía por esse orifício até uma balança. Ora, devido às grandes dimensões do recipiente, praticamente a altura do nível d’água permanecia invariável, de modo que o tempo gasto na vazão era proporcional ao peso d’água que chegava à balança. Porém, como Galileu queria mais precisão em suas medidas do tempo, ele então usou o período de um pêndulo, cujas primeiras leis ele próprio descobriu ao observar quando assistia à missa na Catedral de Pisa, que o período de oscilações de um candelabro (lanterna decorativa), colocado em movimento pelo vento, não dependia do fato de que tais oscilações fossem rápidas ou lentas. Ele comparou os períodos dessas oscilações contando sua própria pulsação. Estimulado ou não por essa observação [ocorrida em 1581, segundo Isaac Asimov, **Gênios da Humanidade** (Bloch Editores, 1972) ou em 1583, segundo os livros: James Reston, Jr., **Galileu: Uma Vida** (José Olympio, 1995) e Ludovico Geymonat, **Galileu Galilei** (Nova Fronteira, 1997)], o fato é que Galileu realizou experiências com pêndulos de diversos comprimentos de corda e diferentes pesos. Nelas,

percebeu que as oscilações desses pêndulos, embora de amplitudes (ângulo entre o fio na posição vertical e na da distância máxima alcançada na oscilação) diferentes, sempre levam o mesmo tempo na oscilação completa (ida e volta). Isso, contudo, não é verdade como mostrou o físico holandês Christiaan Huygens (1629-1695), em 1659 [e detalhada em seu famoso livro de 1673: **Horologium Oscillatorium, sive De Motu Pendulorum ad Horologia Aptato Demonstrationes Geometricae** (“O Relógio de Pêndulo, ou Demonstrações Geométricas Concernentes ao Movimento do Pêndulo Igualmente Aplicado aos Relógios”)], ao trabalhar com o pêndulo simples de pequenas oscilações. [Ernst Mach, **The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development** (The Open Court Publishing Company, 1974); Alexandre Koyré, **Estudios Galileanos** (Siglo Veintiuno Editores, 1980); Stillman Drake, **Galileu** (Publicações Dom Quixote, 1981); Alexandre Koyré, **Estudos da História do Pensamento Científico** (EUnB/Forense-Universitária, 1982)].

Por fim, vejamos como entram as “**pequenas fraudes de Galileu**” relacionadas com a **queda livre dos corpos**. Conforme o físico norte-americano Steve Weinberg (n.1933; PNF, 1979), em seu livro **Para Explicar o Mundo: A Descoberta da Ciência Moderna** (Companhia das Letras, 2015), foi por ocasião das medidas realizadas por Galileu relacionadas com a **queda livre dos corpos** que as mesmas aconteceram, nas quais ele tratou das oscilações pendulares, não fazendo, no entanto, distinção entre grandes e pequenos arcos, pois chegou a considerar  $\alpha$  entre  $50^\circ$  e  $60^\circ$ . Ora, segundo vimos nos trabalhos de Huyghens, os tempos de oscilação são bem menores para ângulos pequenos do que para ângulos maiores. Assim, segundo Weinberg (op. cit., p. 243), essas medidas “sugerem que ele não chegou a realizar efetivamente todos os experimentos pendulares que declarou”. Portanto, para mim, Galileu foi um “pequeno fraudador”.

### **Kepler e o Heliocentrismo.**

Vejamos o contexto histórico. É bem provável que as primeiras observações sistemáticas dos fenômenos celestes aconteceram na Babilônia e em Nineveh, duas cidades situadas na Mesopotâmia (hoje, uma parte do Iraque), cidades essas que existiram milhares de anos *antes de Cristo* (a.C.). Essas observações foram realizadas por sacerdotes dessas cidades-estados, que tinham por hábito observar os movimentos da Lua (L), do Sol (So), dos planetas [Mercúrio (Me), Vênus (V), Marte (Ma), Júpiter (J) e Saturno (Sa)] e das estrelas “fixas”. Portanto, essas observações deveriam ser explicadas por modelos matemáticos.

Inicialmente, como o Sol “aparece” no início do dia e “desaparece” em seu final, tudo indicava que ele “girasse” em torno de nosso planeta Terra (T) e, assim, foram desenvolvidos os chamados **modelos geocêntricos** (tendo a T como centro), desde a Antiguidade e cujo principal deles foi o formulado pelo astrônomo grego Cláudio Ptolomeu (85-165) e descrito em seu célebre **Hè Mathèmatikè Syntaxis** (“A Compilação Matemática”), para poder explicar o movimento dos planetas e suas irregularidades (p. ex.: movimento retrógrado; órbitas planetárias não circulares; velocidades planetárias variáveis; Me e V sempre observados próximo do So; etc.). Essa obra, composta de 13 volumes, foi traduzida pelos árabes, por volta do Século 9 *depois de Cristo* (d.C.), recebendo então o nome de **Al-Magisti** ou **Almagest** (“O Grande Tratado”). Nesse **modelo geocêntrico de Ptolomeu**, as órbitas planetárias circulares tinham como centro um ponto próximo da T: o **equante**.

Contudo, como aquelas irregularidades estavam sendo cada vez mais difíceis de explicação, foram então formulados os **modelos heliocêntricos** (sendo o So seu centro), também desde a Antiguidade, sendo seu principal representante o apresentado pelo astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543) em seu manuscrito **Commentariolus** (“Pequeno Comentário”), provavelmente escrito em 1510. É interessante registrar que esse livro circulou apenas entre seus alunos e amigos, dentre os quais se encontrava o matemático e astrônomo austríaco Georg Joachim von Lauchen (Rheticus) (1514-1576). Nesse livro, ao analisar o **modelo geocêntrico de Ptolomeu**, Copérnico criticou o conceito do **equante**, pois o mesmo entrava em conflito com “a regra do movimento absoluto” segundo a qual tudo deveria se mover em movimento uniforme de rotação em torno do centro do mundo que era perto do So. Ora, isso não acontecia no **modelo ptolomaico**, pois neste os planetas giravam também em órbitas circulares, mas a rotação era uniforme em relação a um ponto que não coincidia com o centro da circunferência.

Em 1543, estimulado por Rheticus, Copérnico publicou seu famoso livro **De Revolutionibus Orbium Coelestium** (“Das Revoluções dos Corpos Celestes”), no qual apresentou os seguintes postulados que caracterizavam seu **modelo planetário heliocêntrico** (ou **modelo heliocêntrico de Copérnico**):

- 1) *O princípio metafísico básico era o da perfeição do movimento circular;*

2) *O centro da Terra não era o centro do Universo, e sim, apenas o centro da esfera lunar;*

3) *O centro do mundo era perto do Sol;*

4) *É a Terra e não a esfera das estrelas fixas que gira em torno de seu eixo, cada 24 horas;*

5) *A distância Terra-Sol é muito menor do que a distância Sol-Estrelas Fixas*

É importante observar que foi Rheticus quem ficou encarregado da impressão desse livro, sendo o clérigo alemão Andréas Osiander (1498-1552) o responsável pela sua supervisão técnica. No Prefácio (não assinado e mais tarde descoberto ser de autoria de Osiander) era expresso o ponto de vista de que as hipóteses apresentadas no livro não eram necessariamente verdadeiras e que nem sequer se exigia que fossem provadas. Os leitores de Copérnico pensaram que o Prefácio fora escrito por ele para evitar a oposição religiosa. Talvez fosse essa a real intenção de Osiander já que, antes mesmo do livro ser publicado, o clérigo alemão Martinho Lutero (1483-1546) – idealizador da *Reforma Protestante* – afirmava: - *O louco vai virar toda a ciência da Astronomia de cabeça para baixo. Mas, como declara o Livro Sagrado, foi ao Sol e não à Terra que Josué mandou parar.* O livro de Copérnico foi às suas mãos no dia em que morreu, ou seja, 24 de maio de 1543. Ele, contudo, já havia perdido a memória e suas faculdades mentais.

O **modelo heliocêntrico de Copérnico** explicou naturalmente o **movimento retrógrado** dos planetas como sendo devido às velocidades dos mesmos em relação a T. Assim, a razão de a retrogradação de Me e de V só ocorrer quando estão em conjunção deve-se a sua maior velocidade; e a razão da retrogradação de Ma, J e Sa só ocorrer em oposição, deve-se à menor velocidade deles, também em relação a T. Além dessa explicação, Copérnico determinou a escala do sistema solar, em Unidade Astronômica (UA), ou seja, a distância Terra-Sol: Mercúrio (Me)  $\sim 0,3763$  UA; Vênus (V)  $\sim 0,7193$  UA; Marte (Ma)  $\sim 1,5198$  UA; Júpiter (J)  $\sim 5,2192$  UA; e Saturno (Sa)  $\sim 9,1743$  UA. Note-se que Copérnico teve, também, de usar 48 epiciclos para explicar as diversas observações sobre os movimentos dos planetas e da própria Terra, por haver considerado que os planetas descreviam apenas movimentos circulares uniformes em torno do So. Note-se, também, que para justificar a razão de não observação de

qualquer paralaxe (deslocamento aparente de uma estrela no céu em virtude de duas observações, da mesma, em lugares diferentes) anual das estrelas fixas, Copérnico usava seu quinto postulado, e a deficiência dos instrumentos astronômicos para medi-la.

A não observação da paralaxe estelar foi também o motivo que levou o astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601) a não aceitar o **modelo heliocêntrico de Copérnico**. Em vista disso, e por este modelo contradizer a **Bíblia**, em 1574, ele apresentou seu próprio modelo – o **modelo geo-heliocêntrico de Tycho-Brahe**:

*Terra parada e girando em torno dela estavam a esfera das estrelas fixas,  
a Lua e o Sol; este, por sua vez, carregava em torno de si os demais  
planetas.*

Desse modo, vejamos como aconteceu a **“pequena fraude”** de Kepler. Em 1595, ele procurava uma demonstração matemática para o **modelo heliocêntrico de Copérnico**, desde que o aprendera com o também astrônomo alemão Michael Maestlin (1550-1631). Assim, em 09 de julho de 1595, ao situar um triângulo entre dois círculos, percebeu que a razão entre os raios desses círculos era a mesma entre os das órbitas de Júpiter e Saturno. Em vista deste resultado, tentou inscrever outras figuras geométricas planas entre as órbitas dos planetas. Como tal modelo não se enquadrou com o de Copérnico, Kepler partiu então para os sólidos regulares pitagóricos-platônicos: tetraedro (4 faces), hexaedro (cubo: 6 faces), octaedro (8 faces), dodecaedro (12 faces) e icosaedro (20 faces). Inicialmente, inscreveu entre as esferas dos planetas apenas o cubo. No entanto, ao comparar a relação entre os raios dessas esferas e as distâncias das órbitas dos planetas dadas pelo **modelo de Copérnico**, verificou que havia uma grande discrepância. Em seguida, fez uma nova tentativa, deixando o cubo entre as esferas de Júpiter e Saturno e os cubos entre as esferas de Marte e Terra, Terra e Vênus, Vênus e Mercúrio foram substituídos, respectivamente, pelo dodecaedro, icosaedro e octaedro. Relacionando agora os raios dessas esferas com as distâncias planetárias copernicanas, verificou que a discrepância diminuía, à exceção de Mercúrio, cuja esfera tangenciando o octaedro não explicava seus movimentos. Desse modo, teve que apelar para um artifício [“recorreu francamente à fraude” (considerada por nós como **“pequena fraude”**)], segundo Arthur Koestler, **O Homem e o Universo** (IBRASA, 1989), pgs. 174; 404], qual seja, o de inscrever a esfera correspondente a Mercúrio no quadrado formado pelas quatro arestas medianas do

octaedro. Em vista desse sucesso parcial, Kepler continuou melhorando seu modelo matemático cada vez mais. Assim, substituiu cada esfera por duas, onde o raio da menor era a menor distância do planeta ao Sol e o raio maior, conseqüentemente, a maior distância orbital.

Para completar este texto sobre a **“pequena fraude” de Kepler**, é importante destacar o trabalho por ele desenvolvido para criar o famoso **modelo heliocêntrico de Kepler**. Assim, logo em 1596, ele apresentou suas primeiras ideias sobre seu modelo planetário em um livro intitulado **Mysterium Cosmographicum** (“Mistério Cosmográfico”). Ao receber esse livro das próprias mãos de Kepler, Tycho Brahe convidou-o para trabalhar em Praga, lá chegando em janeiro de 1600. Com a morte de Tycho, em 1601, Kepler foi designado, em 1602, **matemático imperial** em seu lugar. Quando ainda vivo, Tycho Brahe confiou a Kepler o cálculo da órbita de Marte, tendo em vista as observações que fizera sobre o movimento desse planeta. Ao observar que a velocidade orbital de Marte era variável (mais rápido próximo do Sol e mais lento longe do Sol), Kepler formulou, em 1602, sua famosa **Lei das Áreas**:

*O raio vetor ligando um planeta ao Sol, descreve áreas iguais em tempos iguais.*

Ao analisar atentamente as observações que Tycho Brahe fizera do planeta Marte, Kepler pensou que em poucas semanas encontraria a forma de sua órbita. Como também observou que a velocidade de Marte era variável, conforme vimos acima, e que sua órbita apresentava uma pequena excentricidade, Kepler fez cerca de setenta tentativas com o objetivo de enquadrar as observações de Tycho nos modelos de Copérnico e do próprio Tycho. Assim, inicialmente, considerou que cada esfera característica de um planeta (Marte, em particular) era na realidade uma carapaça esférica de espessura suficiente que pudesse explicar a excentricidade de Marte referida antes. Posteriormente, considerou uma série de combinações de círculos para a órbita marciana. No entanto, como encontrou uma diferença de 8 minutos de arco (8´) e achando que seu mestre Tycho não cometeria tal erro, Kepler passou a considerar órbitas ovaladas até chegar à forma elíptica. Desse modo, em 1609, Kepler propôs sua **Lei das Órbitas**:

*Os planetas se deslocam se deslocam em torno do Sol em órbitas elípticas, tendo o Sol como um dos focos.*



É interessante destacar que essa lei (assim como a lei de 1602), foi apresentada no livro, publicado em 1609, **Astronomia Nova** (“Nova Astronomia”), no Capítulo intitulado **Comentários sobre os Movimentos de Marte**. [John Desmond Bernal, **Historia Social de la Ciência I, II** (Ediciones Península, 1968)].

Havendo descoberto as leis que regem o movimento (cinemática) dos planetas, partiu Kepler para determinar a relação entre as distâncias e os períodos dos mesmos. Depois de fazer algumas tentativas relacionando potências das distâncias e dos períodos planetários, chegou finalmente à sua terceira lei, a **Lei dos Períodos**:

*A relação entre o quadrado do período de revolução dos planetas e o cubo de sua distância média ao Sol é uma constante.*

Acreditando que os planetas em suas órbitas entoam verdadeiros cantos musicais, Kepler denominou-a de **lei harmônica**, e apresentou-a em seu tratado intitulado **Harmonice Mundi** (“A Harmonia do Mundo”), composto de cinco livros e editado em 1619.

Depois de entender a **cinemática** do sistema planetário por intermédio de suas três leis (1602, 1609, 1619), Kepler tentou entender a sua **dinâmica** (força gravitacional). Assim, influenciado pelo físico inglês William Gilbert (1544-1603), que havia mostrado no livro **De Magnete**, de 1600, ser a Terra um imenso ímã (também nesse livro Gilbert defendeu a infinitude do Universo), Kepler supôs que o Sol exercia uma influência magnética sobre os planetas, a chamada **anima motrix**. Como a função dessa força magnética é mover os planetas e como estes se situam na eclíptica (trajetória aparente do Sol entre as estrelas), Kepler admitiu que a **força solar** não agia em todas as direções e sim, apenas, na direção do raio eclíptico, e que a mesma era proporcional ao inverso da distância. Essas ideias foram apresentadas por Kepler em seus livros **Epitome Astronomiae Copernicanae, Liv IV. Physica Coelestis** (“Epítome de Astronomia Copernica, Livro IV. Física Celeste”), em 1620, e **Epitome Astronomiae Copernicanae, Liv V, VI, VII. Doctrina Theorica** (“Epítome de Astronomia Copernica, Livros V, VI, VII. Doutrina Teórica”), em 1621. Para maiores detalhes sobre os modelos planetários, ver: Fátima Regina Rodrigues Évora, **A Revolução Copernicana-Galileana I, II** (UNICAMP/CLE, 1988); Roberto de Andrade Martins, **O Universo: Teoria sobre sua Origem e Evolução** (Editora Moderna, 1994); Marcelo Gleiser, **A Dança do Universo: Dos Mitos de Criação ao Big-Bang** (Companhia das Letras, 1997); Ronaldo Rogério Freitas Mourão, **Kepler: A Descoberta das Leis do**

**Movimento Planetário** (Odysseus, 2003); Alexandre Cherman e Bruno Rainho Mendonça, **Por que as coisas caem?. Uma História da Gravidade** (Zahar, 2009); Stephen Hawking, **Os Gênios da Ciência: Sobre os Ombros de Gigantes** (Campus/Elsevier, 2005); Marcelo Gleiser, **A Harmonia do Mundo** (Romance) (Companhia das Letras, 2006); e Steven Weinberg, **Para Explicar o Mundo: A Descoberta da Ciência Moderna** (Companhia das Letras, 2015).

### Becquerel e a Radioatividade.

Vejamos o contexto histórico. Em 1895, o físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923; PNF, 1901) estava interessado na luminescência que os raios catódicos provocavam em determinados produtos químicos. Assim, com o objetivo de melhor observar esse fenômeno, no dia 08 de novembro daquele ano, Roentgen escureceu sua sala de trabalho e colocou o **tubo de Hittorf** (também conhecido como **tubo de Crookes** ou **tubo de Geissler**, que é um produtor de raios catódicos), em uma caixa de papel preto. Ao ligá-lo, observou que uma folha de papel embebida com platino-cianeto de prata (Pt-AgCN), colocada a uma certa distância do tubo, estava brilhando. Ao desligar o tubo, verificou que a luminosidade da folha desaparecia, e que voltava a brilhar tão logo o tubo fosse religado. Surpreso com o inesperado fenômeno, Roentgen resolveu investigá-lo com mais detalhes. Virou a folha embebida com o composto de prata, deslocou-a, colocou certos objetos (papel grosso e finas lâminas metálicas) entre ela e o tubo, levou-a para uma sala vizinha etc. Por fim, por desconhecer a natureza do fenômeno que acabara de observar, intuiu então que deveria tratar-se de uma “nova espécie de raios”, aos quais deu o nome de **raios-X**, por ser X o símbolo matemático que representa uma variável desconhecida. Essa descoberta foi comunicada por Roentgen em um encontro da *Würzburg Physico-Medical Society*, em 28 de dezembro de 1895, e publicada no *Sitzungsberichte der Würzburger Physikalischen-Medicinischen Gesellschaft* **137**, p. 132 (1895).

Na sessão do dia 20 de janeiro de 1896 da *Academia Francesa de Ciências*, o matemático e físico francês Henri Poincaré (1854-1912) apresentou as primeiras fotografias de **raios-X** enviadas por Roentgen. Presente a essa sessão, o físico francês Antoine Henri Becquerel (1852-1908; PNF, 1903) perguntou a Poincaré de que parte do **tubo de Hittorf** que Roentgen utilizara, haviam saído esses raios - *Da parte oposta ao catodo, que se tornara fluorescente* -, respondeu Poincaré (note-se que essa resposta ficou conhecida como “conjectura de Poincaré”). Sendo especialista de **luminescência** (fluorescência e fosforescência),

especialidade que aprendera com seu avô e seu pai, respectivamente, os físicos franceses Antoine César (1788-1878) e Edmond (1820-1891), Henri Becquerel passou a realizar experiências procurando uma relação entre as substâncias fluorescentes e a emissão dos **raios-X** por parte das mesmas. Não encontrou tal relação, no entanto, descobriu um novo fenômeno físico. Com efeito, em fevereiro de 1896, Henri Becquerel observou que cristais de sulfato de urânio-potássio [contendo urânio: óxido de urânio ( $UO_2$ )] eram capazes de impressionar uma chapa fotográfica recoberta com papel escuro, estando o conjunto exposto à luz solar. Como na primeira experiência que realizou, ele havia submetido o conjunto aos raios solares, então a explicação que deu para o fato de haver sido impressionada a chapa fotográfica, foi a de que a luz solar havia provocado fluorescência nos cristais com a emissão de **raios-X** que, por sua vez, atravessaram o papel escuro que envolvia os cristais, indo, por conseguinte, impressionar a chapa fotográfica. Em outra experiência, realizada no dia 01 de maio de 1896 e, desta vez, sem uso da luz solar (provavelmente em um dia chuvoso de Paris), o fenômeno se repetiu. Henri Becquerel concluiu então que o composto emitia certos “raios” descobrindo, dessa forma, um novo fenômeno físico. Diversos trabalhos dessa descoberta foi por ele publicados em 1896 [*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l’Académie des Sciences de Paris (CRHSASP)* **122**, p. 420; 501; 559; 689; 762; 1086; **123**, p. 855] e no começo de 1897 (*CRHSASP* **127**, p. 438; 800). É interessante registrar que essa descoberta já havia sido realizada, muito antes, em 1857 (*CRHSASP* **45**, p. 811), pelo químico e militar francês Claude-Félix-Abel Niepce de Saint-Victor (1805-1870) e, também, em 1896 (*Nature* **53**, p. 437; *Report of the 66th Meeting of the British Association for the Advancement of Science* **66**, p. 713; *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **5**, p. 103), pelo físico e engenheiro elétrico Silvanus Phillips Thompson (1851-1916) {Roberto de Andrade Martins, **Becquerel e a Descoberta da Radioatividade: uma Análise Crítica** [EdUEPb/Livraria da Física (2015)]}.

Investiguemos, em sequência, as consequências dessa importante descoberta de Saint-Victor, Becquerel e Thompson. Em fins de 1897, a física e química polonesa Marie Skłodowska Curie (*Madame Curie*) (1867-1934; PNF, 1903; PNQ, 1911) folheou os *CRHSASP* em busca de um assunto para a sua Tese de Doutorado e deteve-se diante dos trabalhos de Becquerel, de 1896. Imediatamente passou a estudar os “raios de Becquerel”, expressão usada inicialmente por ela própria. Para tal estudo, utilizou a **piezoelectricidade** que havia sido descoberta por seu

marido, o físico francês Pierre Curie (1859-1906; PNF, 1903) (eles se casaram em 1895) juntamente com seu irmão, o químico francês Paul-Jacques Curie (1855-1941), em 1880. Os “raios de Becquerel” ionizavam o ar e o tornava capaz de conduzir corrente elétrica. Essa corrente era detectada por um galvanômetro, podendo, no entanto, ser neutralizada por intermédio de um potencial piezoelétrico gerado pela pressão de um cristal. O valor dessa pressão media a intensidade dos “raios de Becquerel”. Ao estudar o tório (Th), em 1898, Madame Curie observou que esse elemento químico se comportava como o urânio de Becquerel. Foi por essa ocasião que *Madame Curie* denominou de **radioatividade** a esse novo fenômeno físico.

Essa descoberta levou o físico e químico neozelandês-inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908) a medir a ionização provocada por esses raios, e apresentar as medidas decorrentes, no trabalho [*Philosophical Magazine* **42**, p. 392 (1896)] realizado como colaborador do físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) de quem Rutherford era pesquisador-estudante no *Laboratório Cavendish*, em Londres. Por outro lado, a descoberta da **radioatividade** por Henri Becquerel, em 1896, referida anteriormente, levou Rutherford a outro aspecto de suas pesquisas, qual seja, a de medir a ionização provocada pelos “raios de Becquerel” fazendo-os passar através de folhas metálicas. Neste seu trabalho, descobriu, em 1898 (*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **9**, p. 401), que os “raios de Becquerel” eram constituídos de dois tipos de partículas: **alfa** ( $\alpha$ ), carregada positivamente, e **beta** ( $\beta$ ), carregada negativamente. Em 1899, em trabalhos independentes, Becquerel (*CRHSASP* **129**, p. 996), os físicos austríacos Stefan Meyer (1872-1949) e Egon Ritter von Schweidler (1873-1948) (*Physikalische Zeitschrift* **1**, p. 113), e o físico alemão Frederick Otto Giesel (1852-1927) (*Annalen der Physik* **69**, p. 834), observaram a deflexão magnética sofrida por essas partículas. Em 1900 (*CRHSASP* **130**, p. 809), Becquerel mostrou que os **raios  $\beta$**  eram raios catódicos, isto é, **elétrons**. Ainda em 1900 (*CRHSASP* **130**, p. 1010; 1178), o físico francês Paul Villard (1860-1934) observou que a **radioatividade** possuía uma terceira parcela que não era defletida pelo campo magnético, parcela essa penetrante e semelhante aos **raios-X**, à qual Rutherford denominou de **gama** ( $\gamma$ ). Essa descoberta foi confirmada por Becquerel, também em 1900 (*CRHSASP* **130**, p. 1154).

Considerando o exposto acima, vamos tratar das “**pequenas fraudes**” de **Becquerel**. Para isso, vamos usar o livro citado de Roberto Martins no qual há a descrição (em detalhes) das experiências realizadas

para testar a **radioatividade**, com ênfase para as realizadas por Becquerel. Assim, para chegar às “**pequenas fraudes**” de Becquerel vou reproduzir os dois primeiros parágrafos do livro referido (p. 415):

*Movido por sua interpretação de que as radiações do urânio eram de natureza eletromagnética (semelhantes aos raios ultravioleta), Becquerel foi levado a cometer muitos erros experimentais (capítulo 4). Ele descreveu evidências de que os raios dos compostos de urânio podiam ser refletidos regularmente, refratados e polarizados. Afirmou que a radiação dessas substâncias diminuía sensivelmente com o passar do tempo (quando mantidas no escuro) e aumentava quando recebiam luz. Relatou também que o sulfeto de cálcio emitia radiações penetrantes do mesmo tipo.*

*Esses erros foram corrigidos gradualmente por outros pesquisadores. Posteriormente, Becquerel começou a distorcer a história, ocultando seus erros iniciais ou atribuindo a si próprio a correção desses erros. Algumas das falhas de Becquerel podem ter sido devidas à dificuldade de interpretação de manchas fotográficas, mas outros erros são grosseiros. Há também possibilidade de que tenha havido fraude, em alguns casos (grifo nosso).*

Do que foi descrito até aqui, cremos não sermos “leviano” para afirmar que Becquerel praticou “**pequenas fraudes**” em suas pesquisas sobre a **radioatividade**.

### **Millikan e a Carga do Elétron.**

Vejamos o contexto histórico. Em 1897, várias experiências conduzidas pelos físicos, os alemães Emil Johann Wiechert (1861-1928) (também geofísico), em janeiro; Walther Kaufmann (1871-1947), em abril; o inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), em agosto; e o alemão Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947; PNF, 1905) (de origem húngara), em dezembro, determinaram a relação entre a carga do elétron ( $e$ ) e sua massa ( $m$ ):  $e/m$ . Por sua vez, o físico norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953), por volta de 1906 iniciou, na *Universidade de Chicago*, suas pesquisas para determinar a **carga elétrica elementar** ( $e$ ). Inicialmente, com o físico norte-americano Louis Begeman (1882-1958) (então seu estudante) ele repetiu a experiência realizada pelo físico

inglês Harold Albert Wilson (1874-1964), em 1903 (*Philosophical Magazine* **5**, p. 429), no *Laboratório Cavendish*, na Inglaterra. Neste tipo de experiência, vapores (nuvens) de gotículas (íons) eram produzidos numa câmara de expansão de vapor entre placas paralelas horizontais de um condensador carregado. Para determinar a carga média  $q$  de cada gotícula, inicialmente eram observadas as camadas superiores das nuvens que caíam lentamente e que continham as menores gotículas. Um grupo caía sob a ação da gravidade  $g$  com a velocidade  $v_1$ , e o outro caía mais depressa com a ajuda do campo elétrico  $E$  estabelecido entre as placas do condensador e com a velocidade  $v_2$ . Usando a **fórmula de Stokes** [apresentada pelo físico e matemático Sir George Gabriel Stokes (1819-1903), em 1845], pode-se calcular o valor de  $q$  [Gerald Holton, **A Imaginação Científica** (Zahar Editores, 1979); Steven Weinberg, **The Discovery of Subatomic Particles** (Penguin Books, 1993); María del Pilar Beltrán Soria e René Gerardo Rodríguez Avendaño, *ContactoS* **74**, p. 43 (Outubro-Diciembre 2009); **75**, p. 53 (Enero-Marzo 2010)], dado por:

$$q = (4 \pi/3) (9 \mu/2 g)^{2/3} \{g / [(E \delta^{1/2})]\} (v_2 - v_1) (v_1)^{1/2} = n e ,$$

onde  $\delta$  é a densidade da gota,  $\mu$  é a viscosidade da nuvem,  $e$  é a “carga elétrica elementar” e  $n = 1, 2, 3, \dots$

Em fevereiro de 1908 (*Physical Review* **26**, p. 198), Millikan e Begeman apresentaram os resultados das experiências que realizaram sobre a determinação da carga elétrica de um íon negativo ( $q^-$ ). Nessas experiências, eles usaram o rádio (Ra), em lugar de raios-X, para ionizar o gás úmido, antes da expansão que formava a nuvem de vapor em torno dos íons. Fazendo dez (10) observações, eles encontraram para a carga elétrica de um íon negativo o valor de  $\sim 4,03 \times 10^{-10}$  esu (unidade eletrostática de carga). Note que, em 1903, Thomson (*Philosophical Magazine* **5**, p. 346) e Wilson (*Philosophical Magazine* **5**, p. 429) realizando experiências semelhantes, encontraram os valores de  $3,4 \times 10^{-10}$  esu e  $3,09 \times 10^{-10}$  esu, respectivamente.

Entre 04 de março e 10 de abril de 1909, o físico austríaco Felix Ehrenhaft (1879-1952) realizou três trabalhos publicados, ainda em 1909 (*Anzeiger der Akademie der Wissenschaften/Viena* **7**, p. 72; *Sitzungsberichte Akademie Wissenschaften Mathematisch-Naturwissenschaften Klasse/Viena* **118**, p. 321; *Physikalische Zeitschrift* **10**, p. 308), nos quais desenvolveu um novo método para medir a carga elétrica ( $e$ ) de pequenas partículas e determinar o que ele denominou de

*elektrische elementarquantum* (“quantum elementar elétrico”). O método utilizado por ele era bastante semelhante ao usado por Millikan, porém, como ele usou o campo elétrico na horizontal, ao invés da vertical, como fizera Millikan, isso o impediu de estimar o valor de  $e$  a partir da observação de uma única partícula; ele tinha de observar várias partículas e depois calcular uma média ( $\langle e \rangle$ ). Assim, nessas experiências realizadas por Ehrenhaft, ele encontrou que:  $\langle e \rangle = 4,6 \times 10^{-10}$  esu.

Na primavera-verão de 1909, Millikan e Begeman [alertados pelo físico neozelandês-inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908)] sobre o problema da evaporação, depois de ouvir a explanação de Millikan em um Congresso ocorrido na *Universidade de Chicago* [Beltrán S. e Rodriguez A. (op. cit.)] realizaram novas experiências para determinar  $e$ . Desta vez, contudo, usaram uma bateria de grande potência (10 kV) para criar um campo elétrico maior, agora em oposição ao efeito da gravidade, para imobilizar a camada superior da nuvem de gotículas. Contudo, eles tiveram uma surpresa ao ligar a bateria e observar que a nuvem se dissipou completamente, ao invés de ficar imobilizada. Observações sucessivas levaram Millikan a descobrir que, depois da “explosão” da nuvem, as minúsculas gotinhas que ali permaneceram proporcionaram, pela primeira vez, a observação de gotas individuais. Assim, com essa nova técnica, encontraram para a **carga elementar elétrica** ( $e$ ) o valor de  $4,60 \times 10^{-10}$  esu. Apesar de haver melhorado o valor de  $e$ , Millikan não ficou satisfeito, uma vez que o problema da evaporação continuava. Tentativas para contornar esse problema levaram-no ao famoso **experimento da gota de óleo**, conforme veremos a seguir.

Em setembro de 1909, o físico norte-americano Hervey Fletcher (1884-1981) procurou Millikan em busca de um assunto para a sua Tese de Doutorado. Claro que um possível assunto para a mesma seria a determinação de  $e$ . Contudo, como havia o problema da evaporação referida acima, este foi discutido entre Millikan, Begeman e o novato Fletcher. Para contornar aquele problema, foram sugeridas algumas substâncias, inclusive o óleo, pois, segundo Fletcher, seria de melhor manuseio, usando um atomizador de perfume. Em 09 de outubro, Millikan preparou uma primeira versão dessa experiência (realizada com Begeman e Fletcher) e o enviou para a *Philosophical Magazine*, que só o publicou em 1910, no volume **19**, p. 209. Logo depois, em 23 de outubro de 1909, na reunião da *American Physical Society*, em Princeton, Millikan voltou a apresentar os primeiros resultados da famosa **experiência da gota de óleo** (ver detalhes nas referências citadas acima), que foram publicados ainda em 1909 (*Physical Review* **29**, p. 560). Neste artigo, relatando a

experiência acima, Millikan apresentou o seguinte valor:  $e = 4,69 \times 10^{-10}$  esu. Sobre este artigo, é oportuno destacar alguns aspectos curiosos. Embora o mesmo haja sido realizado levando em consideração a ideia de Fletcher (borrificar gotículas de óleo diretamente na placa superior do condensador usando o atomizador), Millikan “convenceu-o” de que esse primeiro trabalho só deveria levar o nome do “chefe” da experiência, e que os nomes de Begeman e de Fletcher seriam incluídos em outros trabalhos. Registre-se que, em junho de 1982 (*Physics Today* **35**, p. 43), em uma publicação póstuma, Fletcher apresentou sua versão dessa famosa **experiência da gota de óleo**. Registre-se, também, que essa experiência foi o principal motivo que levou Millikan a ganhar o Prêmio Nobel de 1923 (PNF/1923). Aliás, em sua *Nobel Lecture* (23 de Maio de 1924), Millikan não faz nenhuma referência a Begeman, Fletcher e Ehrenhaft. Este, conforme vimos antes, trabalhou isoladamente na determinação de  $e$ , em 1909, e continuou a trabalhar nela como veremos a seguir.

Assim, em 21 de abril e 12 de maio de 1910, Ehrenhaft apresentou à *Academia de Ciência de Viena* novos resultados de experiências sobre a determinação do **elektrische elementarquantum** ( $e$ ), que foram publicados, ainda em 1910 (*Anzeiger der Akademie der Wissenschaften/Viena* **10**, p. 118; **13**, p. 815). Desta vez, usando um campo elétrico na vertical, ele realizou 300 medidas da carga elétrica em partículas de platina (Pt) e de prata (Ag). As 22 medidas de cargas reproduzidas por Ehrenhaft, se encontram no seguinte intervalo:  $(1,38 - 7,53) \times 10^{-10}$  esu. Em vista desse intervalo de valores, concluiu que as partículas carregadas não só têm uma carga elétrica simples ou dupla, mas também podem ter cargas *entre* e *abaixo* desses valores  $e$ , desse modo, propôs a existência de **subelétrons**  $e$ , mais ainda, que a carga elétrica indivisível não deveria existir na Natureza, pelo menos abaixo do valor mínimo de  $0,9 \times 10^{-10}$  esu, que corresponde a um valor fracionário ( $\sim 2/3$ ) do valor médio de  $e = 3,0 \times 10^{-10}$  esu. Aliás, esse valor médio também foi obtido por Karl Przibram, em 1910 (*Anzeiger der Akademie der Wissenschaften/Viena* **1**, p. 175), ao repetir as experiências de Millikan. Observe-se que, em 23 de abril ainda de 1910, Millikan participou da reunião da *American Physical Society*, no qual apresentou um novo valor para  $e = 4,9016 \times 10^{-10}$  esu, que foi publicado em julho de 1910 (*Physical Review* **31**, p. 92) e em setembro de 1910 (*Science* **32**, p. 439). Note-se que, neste artigo, Millikan afirma que o método do atomizador para obter gotas esféricas bem diminutas, cuja autoria foi reivindicada por Fletcher, já havia sido desenvolvido por J. Y. Lee, em janeiro de 1908, em suas



investigações sobre o movimento browniano. Seria este o motivo de Millikan não se referir a Fletcher em sua *Nobel Lecture*? Contudo, nesta *Lecture*, Millikan também não fala em Lee e nem o cita em seus artigos de 1910. Em 1911, em trabalhos independentes, Millikan (*Physikalische Zeitschrift* **12**, p. 161; *Physical Review* **32**, p. 392) e Fletcher (*Physikalische Zeitschrift* **12**, p. 202; *Physical Review* **33**, p. 107) registraram novos resultados para o valor de  $e$ . Em 1913 (*Physical Review* **2**, p. 139), Millikan, por exemplo, apresentou o valor de  $e = (4,774 \pm 0,009) \times 10^{-10}$  esu que ele considerou como definitiva. Observe-se que o atual valor do **quantum elementar de carga elétrica** ( $e$ ) vale:  $4,803206 \times 10^{-10}$  esu =  $1,602177 \times 10^{-19}$  C (C = coulombs).

Em conclusão é oportuno registrar uma possível **pequena fraude** [para alguns historiadores da ciência, por exemplo: Robert P. Crease, **Os 10 Mais Belos Experimentos Científicos** (Jorge Zahar, 2006), p. 134] de Millikan sobre suas famosas experiências. Segundo vimos acima, em suas experiências de 1910, Ehrenhaft havia encontrado valores fracionários para a carga elétrica: os seus **subelétrons**. Por sua vez, Millikan, em suas experiências realizadas entre 11 de novembro de 1911 e 16 de abril de 1912, havia trabalhado com 140 gotas. Porém, como 82 delas apresentavam valores abaixo da média, que era como vimos antes em torno de  $4,7 \times 10^{-10}$  esu, Millikan publicou, em 1913, os resultados de somente 58 gotas (omitindo as 82 restantes, daí considerarmos essa exclusão como sua **pequena fraude**), cuja carga elétrica média foi considerada por ele como definitiva, ou seja:  $e = (4,774 \pm 0,009) \times 10^{-10}$  esu. Para maiores detalhes sobre a razão de Millikan não considerar as 82 gotas, ver: Holton (op. cit.); Beltrán S. (op. cit.); Rodriguez, A. (op. cit.); e Crease (op. cit.).



**ANTERIOR**

**SEGUINTE**