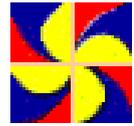




# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

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



---

## A Estatística na Física Revisitada [Massa dos Núcleons (Prótons e Nêutrons)]: Parte 1.

Em verbete desta série, mostramos que, até o presente momento (agosto de 2015), a Física só descreve quase bem (o uso do quase é necessário por causa da estatística que trataremos neste verbete, como o leitor poderá concluir) a **matéria hadrônica** ( $\sim 4\%$ ), explicada por intermédio do *Modelo Padrão da Física das Partículas Elementares* (MP/FPE), mas desconhece a parte **escura** (**matéria** e **energia**) ( $\sim 96\%$ ) do Universo, sendo esta decorrente do estudo da Cosmologia. Então, isso significa dizer que não conhecemos quase nada do que compõe o mundo em que vivemos. Neste verbete (dividido em duas partes) analisaremos outra estatística impressionante na Física e relacionada com a massa dos **núcleons: prótons** e **nêutrons** ( $m_{p/n}$ ) e ainda dentro do MP/FPE. Em outros verbetes desta série, vimos que a matéria **hadrônica** é constituída por **bárions** {**núcleons** [**prótons** (p) e **nêutrons** (n)] e **hyperons**}, que possuem spin fracionário ( $1/2$ ) (são, portanto, **férmions**) e **mésons** (**píons** e **káons**), de spin inteiro (0) (e, portanto, são **bósons**). Por sua vez, os **bárions** são constituídos de três (3) **quarks** e os **mésons** de pares de **quark-antiquark** (este representado por uma barra em cima da letra). Dessa **matéria hadrônica**, as únicas que são estáveis são os **prótons**. Note-se que existe uma especulação teórica (*Teoria da Grande Unificação*, formulada em 1972) que demonstra que o **próton** tem uma vida média em torno de  $10^{30}$  anos [lembrar que, segundo a *Teoria do Big Bang* (TBB), inicialmente proposta, em 1927, como “explosão cósmica” pelo astrônomo belga, o Abade Georges-Henri Lemaître (1894-1966), o Universo tem em torno de  $10^{10}$  anos]. Mesmo que essa especulação seja confirmada, podemos considerar que, para a atualcivilização terrestre: - Os **prótons** (p) são *eternos*. Aliás, nessa eternidade, eles fazem companhia aos **elétrons** [partículas massivas e com carga elétrica negativa ( $e^-$ ), pertencendo ao grupo dos **léptons** (que são **fermiônicas** e de spin =  $1/2$ )]; aos **fótons** ( $\gamma$ ) [partícula mediadora da

força (interação) eletromagnética, de massa e carga nulas, e **bosônica** (spin = 1)]; e aos **neutrinos** ( $\nu$ ) [partículas **leptônicas** pouco massivas e que são de três tipos: **neutrino eletrônico** ( $\nu_e$ ), **neutrino muônico** ( $\nu_\mu$ ) e **neutrino tauônico** ( $\nu_\tau$ )], segundo o vigente MP/FPE (ver verbetes nesta série).

Vejamos como ocorre a estatística que estamos investigando. Em 1855, o físico alemão (Johann) Heinrich (Wilhelm) Geissler (1815-1879) inventou uma **bomba de vácuo** sem partes móveis. Com efeito, movendo uma coluna de mercúrio (Hg) para cima e para baixo, o vácuo acima da coluna poderia ser usado para aspirar o ar de dentro de um recipiente, pouco a pouco, até que o vácuo obtido no mesmo se aproximasse do vácuo existente sobre a coluna de Hg. Com essa bomba, Geissler construiu **tubos rarefeitos** (contendo dois eletrodos: catodo e anodo), denominados por seu colaborador, o físico e matemático alemão Julius Plücker (1801-1868), de **tubos de Geissler**, em 1857. De posse de um desses **tubos**, Plücker realizou, entre 1857 e 1859, uma série de experiências sobre a descarga elétrica dos gases, nas quais mostrou que essa “descarga” se desviava quando um magneto se aproximava do tubo que estava utilizando. Essas experiências de Plücker foram repetidas por seu aluno, o físico e químico alemão Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914) usando **tubos de Geissler** mais rarefeitos e, com eles, em 1869, confirmou as observações de seu mestre, assim como observou a sombra projetada de um objeto colocado em frente ao catodo do **tubo** que usava. Essa sombra, segundo Hittorf, devia-se aos *Glimmstrahlen* (“raios avermelhados”) que eram provenientes do catodo. Em 1876, o físico alemão Eugen Goldstein (1850-1931) fez observações semelhantes a essas de Hittorf, ocasião em que denominou de *Kathodenstrahlen* (**raios catódicos**) àqueles “raios”. Entre 1876 e 1877, o físico alemão William Crookes (1832-1919), realizou experiências com um **tubo de Geissler-Hittorf** mais rarefeito que construiu e depois conhecido como “ovo elétrico” ou **ampola de Crookes**. Em 1886, Goldstein realizou experiências com esses novos **tubos de Geissler-Hittorf-Crookes**, na tentativa de entender a intensa luminosidade junto ao catodo desses tubos. Desse modo, acreditando ser ela devida ao impacto de algum agente nesse eletrodo, abriu nestes uns buracos (canais) e verificou que havia, também, certa luminosidade por detrás desse mesmo eletrodo

(catodo), devido a certos raios que se dirigiam em sentido contrário aos **raios catódicos** (raios estes que se dirigiam para o anodo). Em vista disso, ele deu a esses “novos raios” o nome de *Kanalstrahlen* (**raios canais**). Em 1895, o físico francês Jean Baptiste Perrin (1870-1942; PNF, 1926) mostrou que os **raios catódicos** eram partículas eletrizadas negativamente, enquanto que os **raios canais** eram também partículas eletrizadas, porém, positivamente. Por fim, em 1897 e, em trabalhos independentes, o geofísico alemão Emil Johann Wiechert (1861-1928), e os físicos, o alemão Walther Kaufmann (1871-1947) e o inglês Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) demonstraram que os **raios catódicos** eram compostos de uma corrente de **elétrons**, nome que já havia sido cunhado pelo físico irlandês George Johnstone Stoney (1826-1911), em 1891, para representar o valor mínimo que deveria possuir a carga elétrica de uma partícula eletrizada.

É interessante registrar que, em sua experiência, Thomson estudou o desvio sofrido por um feixe de **elétrons** ao atravessar uma região onde existia um campo elétrico (de intensidade  $E$ ) produzido por um condensador, e um campo magnético (de intensidade  $H$ ) devido a um ímã, campos esses ortogonais entre si. Então, igualando os desvios, Thomson determinou a relação entre a massa ( $m_e$ ) e a carga ( $e$ ) ( $m_e/e$ ) do **elétron**. Observe-se que, também em 1897, o físico alemão Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928; PNF, 1911), realizou esse mesmo tipo de experiência, porém com **raios canais** (carregadas positivamente e de massa  $m$ ), obtendo uma relação ( $m/e$ ) que era milhares de vezes maiores do que a relação de Thomson.

Continuemos com nossa história sobre a  $m_{p/n}$ . Em 1909, o físico norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953; PNF, 1923), apresentou o primeiro resultado para a medida da “carga elétrica elementar” ( $e$ ). Em 1911, o físico neozelandês-inglês Lord Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ, 1908), propôs seu famoso modelo planetário atômico, segundo qual o **átomo** era constituído por uma nuvem de **elétrons** (“eletrosfera”) em torno de um caroço central (**núcleo**), positivamente carregado, o que, portanto, tornava o **átomo** neutro. Por sua vez, Thomson, em 1913, voltou a obter um resultado

espetacular, ao observar que os **raios canais** formados em um gás de neônio (Ne) caíam em dois lugares distintos quando desviados por um campo elétrico, como se o gás de Ne que utilizara, fosse constituído de uma mistura de dois **raios canais** com massas diferentes. Note-se que, nesse mesmo ano de 1913, o químico inglês Frederick Soddy (1877-1956; PNU, 1921) introduziu o conceito de **isótopo**, para representar o elemento químico com **pesos atômicos** (pa) diferentes. Mais tarde, em 1919, o aluno de Thomson, o químico e físico inglês Francis William Aston (1877-1945; PNU, 1922) inventou o **espectrógrafo de massa** para medir a relação (m/e) dos **isótopos**.

Para prosseguir com a nossa história, é necessário entender o pa. [Steven Weinberg, **The Discovery of Subatomic Particles** (Penguin Books, 1993)]. Entre 1802 e 1804, o químico inglês John Dalton (1776-1844) começou a realizar suas experiências para determinar o “peso atômico” (na realidade tratava-se da **massa atômica**) dos elementos químicos que formam um dado composto químico. Por exemplo, ele considerava que para formar a água [oxigênio (O) + hidrogênio (H)], eram necessários 5,5 g de O para cada 1 g de H. Portanto, se o H fosse considerado como padrão [pa = 1 uam (**unidade atômica de massa**)], então o O teria pa = 5,5. Note-se que em seu famoso livro **New System of Chemical Philosophy** (“Novo Sistema de Filosofia Química”), publicado em 1808, ele representava os elementos químicos por símbolos. Enquanto o O era representado por um círculo, o H era um círculo com um ponto em seu centro. Melhorando suas técnicas experimentais, Dalton, nesse livro, ele assumiu o pa do O como sendo sete (7). Essa confusão acontecia porque ainda não se fazia a distinção entre átomo e uma reunião deles, apesar de o matemático e filósofo francês Pierre Gassendi (1592-1655) haver afirmado, em livro publicado em 1647, que em “cada corpo os átomos se reúnem em pequenos grupos, as **moléculas**, isto é, em “massas pequenas”, uma vez que, **moles** significa “massas”, em latim. A distinção entre **átomo** e **molécula** voltou a ser apresentada, em 1811, pelo físico italiano Amadeo Avogadro (Conde de Quaregna e de Cerreto) (1776-1856) ao observar que duas (2) **moléculas** de H se combinam com uma (1) **molécula** de O para formar duas (2) **moléculas** de vapor d’água (em notação atual:  $2\text{H}_2 + 1\text{O}_2 = 2 \text{H}_2\text{O}$ ). Para que essa reação ocorresse, era

necessário que o pa do O fosse 16, conforme demonstrou o químico sueco Jöns Jakob Berzelius (1779-1848) (autor da atual nomenclatura química), em experiências realizadas em 1814, 1818 e 1826. Por sua vez, em 1815, o químico inglês William Prout (1785-1850) formulou a hipótese de que os pa dos elementos químicos eram múltiplos inteiros do pa do H.

Destaque-se que, somente em 04 de setembro de 1860, por ocasião do *Congresso Internacional de Química*, realizado em Karlsruhe, na Alemanha, o químico italiano Stanislao Canizzaro (1826-1910) apresentou a distinção entre **átomo** e **molécula**, definindo esta como uma reunião dos **átomos**. Muito embora os físicos e químicos no Século 19 não acreditassem na existência dos **átomos**, mesmo assim eles preparavam tabelas de pa. Por exemplo, em 1886, Crookes admitia que os pa dos elementos químicos representassem uma média dos pesos dos diferentes **átomos** que compunham o mesmo elemento químico. Era o conceito de **isótopos** que estava implícito e que só foi formalizado por Soddy, em 1913, como já descrevemos.

O significado do pa só começou a se compreender, em 1919, quando Rutherford realizou uma experiência na qual uma **partícula alfa** ( $\alpha$ ) [núcleo do hélio ( ${}_2\text{He}^4$ ), conforme ele e o químico inglês Thomas Royds (1884-1955), mostraram em 1909] transmutava o nitrogênio ( ${}_7\text{N}^{14}$ ) em oxigênio ( ${}_8\text{O}^{17}$ ) e produzia uma partícula carregada positivamente, denominada por ele, em 1920, de **próton** ( $p \equiv {}_1\text{H}^1$ ), e que deveria ter a mesma carga elétrica do elétron, porém de sinal contrário, para manter o átomo neutro, por causa da *Lei da Conservação da Carga Elétrica*. Em notação atual, essa reação é escrita na forma:  ${}_2\text{He}^4 + {}_7\text{N}^{14} \rightarrow {}_8\text{O}^{17} + {}_1\text{H}^1$ . Para justificar a presença do  ${}_8\text{O}^{17}$  nessa reação, ainda em 1920, Rutherford sugeriu que esse isótopo seria o  ${}_8\text{O}^{16}$ , acrescido de uma partícula neutra com massa aproximadamente igual à do **próton** ( $m_p$ ). Um passo a mais nessa história ocorreu com as experiências realizadas no final da década de 1920 e durante a década de 1930, envolvendo **raios cósmicos** {descobertos pelo físico austro-norte-americano Victor Franz Hess (1883-1964; PNF, 1936), em 1910-1911, e confirmados por Millikan, em 1925 [Alfredo Marques, **O que são os raios cósmicos?**, *IN*: Francisco Caruso, Vitor Oguri e Alberto Santoro (Editores), **O que são quarks, glúons, bósons**

**de Higgs, buracos negros e outras coisas estranhas?**, (Livraria da Física, 2012)]} e as conduzidas em laboratório, tipo às de Rutherford, levaram à descoberta do **nêutron**, em 1932, pelo físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935) (aluno de Rutherford), na reação do tipo (em linguagem de hoje):  ${}_2\text{He}^4 + {}_2\text{B}^{11} \rightarrow {}_7\text{N}^{14} + {}_0\text{n}^1$ . Ainda em 1932, em experiências distintas, os químicos norte-americanos Harold Clayton Urey (1893-1981; PNQ, 1934), Ferdinand Graft Brickwedde (1903-1989) e Moseley Murphy (1903-1969) anunciaram a descoberta do então **deuteron/diplon** [hoje, **deutêron** ( $D \equiv {}_1\text{H}^2$ )], um isótopo do H. Também em 1932, os físicos, o alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932), o russo Dimitrij Iwanenko (1904-1994), e o italiano Ettore Majorana (1906-1938), em trabalhos independentes, propuseram a hipótese de que os **prótons** e os **nêutrons** enquanto partículas constituintes do núcleo atômico se comportavam como partículas únicas – os **núcleons** – que interagiam por intermédio de uma “força atrativa” capaz de superar a repulsão coulombiana entre **prótons**. Desse modo, o pa seria a soma das massas dos **núcleons** (p e n) e representada por A.

Registre-se que em notação atual, um elemento químico (X) é representado por:  ${}_Z\text{X}^A$ , sendo Z o número de p e A, constituída por p + n. A unidade de A é o atual **Dalton** (Da) [antiga uam]:  $1 \text{ Da} \approx 1,660 \times 10^{-27} \text{ kg} \approx 931,1 \text{ MeV}/c^2$ . Lembrar que:  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ , sendo 1 eV a energia potencial de um elétron (e) sob a diferença de potencial de 1 Volt (1 V) e essa unidade deriva da famosa expressão da **massa relativística einsteiniana** -  $E = mc^2$  -, sendo c a velocidade da luz no vácuo, dada por:  $c \approx 300.000 \text{ km/s}$ ; note-se que, a partir daqui, vamos considerar  $c = 1$ ]. Vale ressaltar que, em 1881, Thomson já havia observado que uma esfera carregada eletricamente tinha sua massa aumentada na medida em que sua velocidade se aproximava de c, aumento esse que denominou de “massa eletromagnética”.

Assim, usando-se os valores atuais de ( $m_e/e$ ) (Thomson) e de e (Millikan), obtém-se que:  $m_e \approx 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg} \approx 0,5 \text{ MeV}$ . Por outro lado, utilizando-se os resultados obtidos por Aston, com seu **espectrógrafo de massa**, inventado em 1919, como anotamos antes, pode-se escrever que:  $m_p \approx 1840 m_e \approx 938 \text{ MeV}$ . Por sua vez, a experiência de Chadwick nos diz

que:  $m_n \approx 939 \text{ MeV}$ . Assim, terminamos a história da  $m_{p/n}$ , o que nos permite continuar este verbete, no qual se procura explicar a surpreendente estatística relacionada com a  $m_{p/n}$ . Para isso, voltemos ao problema da “força” que une os **núcleons**. Essa “força” (hoje conhecida como **força forte**) foi conceituada pelo físico japonês Hideaki Yukawa (1907-1981; PNF, 1949), em 1935, ao propor que a mesma decorria da troca entre eles da **partícula U** (como a denominou Yukawa), que seria uma partícula de massa intermediária entre  $m_e$  e  $m_{p/n}$  ( $\approx 200 m_e$ ), razão pela qual a mesma ficou conhecida, inicialmente, como **yukon, mesotron** e, hoje, **méson**. É oportuno registrar que a existência dessa partícula foi confirmada nas experiências realizadas, em 1947, pelos físicos, o brasileiro Cesare (César) Mansueto Giulio Lattes (1924-2005), os ingleses Hugh Muirhead (1925-2007) e Sir Cecil Frank Powell (1903-1969; PNF, 1950), e o italiano Giuseppe Paolo Stanislao Occhialini (1907-1993), nas quais observaram que a incidência de **raios cósmicos** em emulsões nucleares colocadas nos Alpes (Suíça) e em Chacaltaya (Bolívia) produzia dois tipos de mésons: **primários** (hoje, **múons** -  $\mu$ ) e **secundários** (hoje, **píons** -  $\pi$ ). Merece ser destacado que, ainda no final da década de 1940 e durante a década de 1950, novas partículas foram descobertas, agora usando aceleradores de partículas, sendo o primeiro deles, um acelerador circular (**ciclotron**), foi construído pelos físicos norte-americanos Ernest Orlando Lawrence (1901-1958; PNF, 1939) e Milton Stanley Livingston (1905-1986), em 1931 (vide verbetes nesta série).

Pois bem, no começo da década de 1960, eram conhecidas muitas partículas (carregadas e neutras) e, por isso, havia necessidade de classificá-las, tomando como *mote* o que fizera o químico russo Dmitri Ivanovich Mendeleiev (1834-1907), em 1869, ao criar a *Tabela Periódica dos Elementos*. Contudo, desta vez a classificação não foi tão simples como a que foi realizada por Mendeleiev, pois foi necessário o uso do formalismo matemático da Teoria de Grupos. Assim, em 1964, em trabalhos independentes realizados pelos físicos, o norte-americano Murray Gell-Mann (n.1929; PNF, 1969) e o russo-norte-americano George Zweig (n.1937) descobriram que a **matéria nucleônica** era constituída de três **quarks** [nome cunhado por Gell-Mann (Zweig chamou-os de **aces**) e denominados por ele de [**up** (u), **down** (d), **strange** (s)], com a seguinte

distribuição nucleônica:  $p = uud$  e  $n = udd$ . Contudo, como a carga elétrica do  $p$  vale  $+1e$  e o  $n$  tem carga nula (0), além de serem **férmions** (spin =  $\frac{1}{2}$ , e que representava um **número quântico**), havia então necessidade de assumir que esses **quarks** fossem também **fermiônicos** e que deveriam possuir carga elétrica fracionária, tais como:  $u = +\frac{2e}{3}$  e  $d = -\frac{e}{3}$ . Além disso, essa Teoria de Quarks previa a existência de partículas que eram constituídas de três **quarks** iguais como, por exemplo:  $\Delta^{++}$  ( $uuu$ ),  $\Delta^{-}$  ( $ddd$ ) e  $\Omega^{-}$  ( $sss$ ) (esta última foi descoberta ainda em 1964). Essa previsão, no entanto, violava o Princípio da Exclusão de Pauli, formulada pelo físico austríaco Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945), em 1925, segundo o qual (na linguagem atual): - *Duas partículas de mesmo número quântico não podem estar no mesmo estado de energia*. Assim, para contornar esse problema, o físico norte-americano Oscar Wallace Greenberg (n.1932) propôs, em 1964, que o **quark** possuía um novo número quântico: a **cor** [**vermelho** (“red”), **azul** (“blue”) e **verde** (“green”)]. Essa previsão foi confirmada, em 1965, pelos físicos, o coreano Moo-Young Han (n.1934) e o japonês Yoichiro Nambu (n.1921; PNF, 2008). Note-se que, ainda em 1964, foi proposto um novo **quark** [**charme** (c)] pelos físicos norte-americanos James Daniel Bjorken (n.1934) e Sheldon Lee Glashow (n.1932; PNF, 1979), e sua teoria desenvolvida, em 1970, por Glashow, e os físicos norte-americanos John Iliopoulos (n.1940) (de origem grega) e Luciano Maiani (n.1941) (de origem italiana), a famosa Teoria GIM. Mais tarde, em 1973, os físicos norte-americanos David Jonathan Gross (n.1941; PNF, 2004) e Frank Anthony Wilczek (n.1951; PNF, 2004) e, independentemente, Hugh David Politzer (n.1949; PNF, 2004) desenvolveram a *Cromodinâmica Quântica* (“Quantum Chromodynamics” – QCD), segundo a qual a **força** (interação) **forte** entre os **quarks** era consequência da troca entre si de partículas denominadas de **glúon** (“glue”) [**bosônica** (spin = 1)], de massa nula, em número de oito (8) e responsáveis pela **cor** dos **quarks** ( $q_r, q_b, q_g$ ) (uma espécie de “carga elétrica”). Ainda segundo a QCD, não existem “quarks livres”, pois a **força forte** entre eles (mediada pelo  $g$ ) aumenta com a distância, porém, sua interação, em pequenas distâncias, se torna muito pequena (a definida **liberdade assintótica**) e eles podem se separar, momentaneamente, mas depois voltam logo a se unir, isto é, a se confinar (o conhecido

**confinamento de quarks**). Isto é parecido com fato de que, dado um imã, quando se corta um deles em dois pedaços, estes voltam a ser imãs. Além do mais, embora os quarks sejam “coloridos”, quando eles se juntam para formar os **hádrons**, a “cor” (“carga”) resultante é nula, analogamente ao que acontece com os átomos neutros: a carga elétrica é nula. Merece ainda ser registrado que os **glúons** foram detectados (indiretamente, como “jatos”), em 1979, pelas *Colaborações Experimentais*: PETRA, TASSO, MARK-J e PLUTO.

Em 1974, foi confirmado o  $\psi$  [com a descoberta da ressonância mesônica **psi/jota** ( $\psi / J = c\bar{c}$ )] e, em 1977, o físico norte-americano Leon Max Lederman (n.1922; PNF, 1988) propôs mais dois **quarks**: b (**bottom**) e t (**top**) e que foram confirmados, respectivamente, em 1977, com a ressonância mesônica **upsilon (bottonium)** ( $Y = b\bar{b}$ ) e, em 1995, com a ressonância mesônica **toponium** ( $T = t\bar{t}$ ). É oportuno registrar que as massas dos seis **quarks** até agora conhecidos, são assim estimadas:  $m_u = 5$  MeV ( $\approx 10 m_e$ );  $m_d = 10$  MeV ( $\approx 20 m_e$ );  $m_s = 200$  MeV ( $\approx 400 m_e$ );  $m_c = 1.300$  MeV ( $\approx 650 m_e$ );  $m_b = 4.500$  MeV ( $\approx 2.250 m_e$ ); e  $m_t = 175.000$  MeV ( $\approx 87.500 m_e$ ). [Martinus Veltman, **Fact and Mysteries in Elementary Particles** (World Scientific, 2003); Maria Cristina Batoni Abdalla, **O Discreto Charme das Partículas Elementares** (EdUNESP, 2006); Mauro Anselmino, Francisco Caruso, José Roberto Mahon e Vitor Oguri, **Introdução à QCD Perturbativa** (GEN/LTC, 2013); Ronald Cintra Shellard, **No CERN, IV**: Nilson Marcos Dias Garcia (Organizador), **Nós, professores brasileiros de Física do Ensino Médio, estivemos no CERN** (SBF/Livraria da Física, 2015)].

É oportuno registrar que, em 1977 (*Nuclear Physics* **B128**, p. 275), os físicos dinamarqueses Henrik Georg Bohr e Holger Bech Nielsen apresentaram um **modelo termodinâmico de quark**, segundo o qual uma colisão de hádrons em altas energias ( $\sim 170$  MeV) produz uma “sopa” de **quarks** e **antiquarks**.



**ANTERIOR**

**SEGUINTE**