

Afinal: O que é massa?+*

*José Maria Filardo Bassalo*¹
Academia Paraense de Ciências
Belém – PA

Resumo

Neste artigo, discutiremos o conceito de massa, analisando sua evolução temporal desde a Idade Antiga até sua atual situação.

Palavras-chave: *Massa; Conceito; Evolução Conceitual.*

Abstract

In this article, we will discuss the concept of mass, by analysing its temporal evolution since the Ancient Age until its present situation.

Keywords: *Mass; Concept; Conceptual Evolucion.*

I. Introdução

Desde a Pré-História, o *hominídeo* (e suas várias ramificações) lidou com questões intrigantes como, por exemplo:

- *Qual a razão de coisas (vivas e inertes) “pesarem” mais do que as outras, apesar de, em alguns casos, serem “menores”?*

Este será o tema deste artigo, percorrendo a História, desde a Idade Antiga (quando ele se apresentou de maneira “filosófica”) até o presente momento, examinando como essa questão teve vários desdobramentos conceituais, divididos em vários itens.

⁺ At last: What’s Mass?

^{*} *Recebido: fevereiro de 2016.
Aceito: abril de 2016.*

¹ E-mail: jmfbassalo@gmail.com

II. Pondus (Peso)

Na Idade Antiga (IA) (época antes do nascimento de Jesus Cristo, denominada por a.C. e representada, aqui, por datas que vão do valor maior para o menor e C. representa *cerca de*), os chamados filósofos tomavam a *massa* (do latim: *moles*) e o *peso* (do latim: *pondus*) de um corpo como sendo sinônimos, pois ainda não existia uma teoria de gravitação bem estabelecida. Havia, é claro, por parte de alguns deles, uma desconfiança de que existiria alguma diferença entre eles. Assim, eles usavam também o termo *grave* (que vem da palavra latina: *gravitas*) para representar a propriedade de um corpo ter “peso”, manifestada quando em movimento. Eles, de um modo geral, tinham também a preocupação de saber os elementos primordiais da Natureza e como eles apresentavam “peso”, ou seja, como se movimentavam no hoje *campo gravitacional terrestre*.

Inicialmente, vejamos os elementos primordiais. A procura da substância primordial, do elemento comum, da matéria prima, enfim, do – *princípio* (do grego: *arché*) –, que compõe o Universo, começou há mais de 25 séculos com os gregos jônicos, os chamados *pré-socráticos*, isto é, aqueles que antecederam ao filósofo grego Sócrates de Atenas (c.470-399). Alguns deles apresentavam concepções unitárias (monistas) para a *arché*, enquanto outros, pluristas. Assim, o filósofo grego Tales de Mileto (624-546) afirmava que o elemento primordial do Universo era a *água*: - *Sobre a qual a Terra flutua e é o começo de todas as coisas*. Contudo, para o filósofo grego Anaximandro de Mileto (610-c.547) tal elemento era mais indefinido do que a *água* de Tales, pois considerava ser o *infinito* (do grego: *apeíron*). Já para o filósofo grego Anaxímenes de Mileto (c.570-c.500) seria o *ar* o tal elemento primordial de vez que o mesmo se reduziria à *água* por simples compressão. No entanto, para o filósofo grego Xenófones de Jônia (Colofonte) (c.570-c.460) era a *terra* a matéria prima do Universo. Por fim, o filósofo grego Heráclito de Éfeso (c.540-c.480) propôs ser o *fogo* essa matéria universal. Note-se que, para o filósofo grego Empédocles de Akragas (atual Agrigento) (c.490-c.430) os elementos fundamentais da natureza eram em número de quatro: *água, ar, fogo, terra*, que se combinavam de várias maneiras para formar as substâncias.

Com a tomada da Jônia (atual Turquia) pelos persas, iniciada pelo Rei Ciro II, O Grande (?-526 a.C.), em 546 a.C., surge um novo movimento filosófico que tenta explicar a *arché* não como um elemento único, em certo sentido “macroscópico” (*água, ar, fogo, terra*) mas como uma porção também única, porém subdividida “microscopicamente” da matéria. Assim é que, para o filósofo grego Anaxágoras de Clazômenas (c.500-c.428), o Universo decorria da razão de uma ação abstrata sobre as *sementes* (do grego: *spermata*) que seriam as matérias primas constituintes de todas as espécies imagináveis. Contudo, elas se comportariam como *partículas* [do grego: *homoioméreiαι (homeomerias)*] diferentes, em número infinito que, do mesmo modo, continham outras “sementes”, e assim por diante *ad infinitum*. Em contraposição a essa visão “panteísta” do Universo proposta por Anaxágoras, os filósofos gregos Leucipo de Mileto (c.460-c.370) e seu discípulo Demócrito de Abdera apresentaram uma visão “monoteísta” segundo a qual todas as coisas do Universo são formadas por um único tipo de partícula –

o *indivisível* (do grego: *atomos*) –, eterno e imperecível, que se movimentava no vazio. Entretanto, para explicar as diversas propriedades das substâncias, eles admitiam que os *átomos* se diferissem geometricamente por sua forma e posição, e que, por serem infinitamente pequenos, só poderiam ser percebidos pela razão.

A formulação da concepção material do Universo quer monista, quer plurista, continuou ainda na Antiguidade. Com efeito, a concepção quaternária foi retomada pelo filósofo grego Aristóteles de Estagira (384-322)², porém seus elementos fundamentais – os *essenciais* – eram: *frio* (do grego: *tò psychrón*), *quente* (do grego: *tò thermón*), *úmido* (do grego: *tò hydrón*) e *seco* (do grego: *tò xerón*) que, grupados, dois a dois, reproduziam os elementos de Empédocles da seguinte maneira: *seco* + *frio* = *água*, *seco* + *quente* = *fogo*, *úmido* + *frio* = *água*, e *úmido* + *quente* = *ar*. Porém, tais elementos comporiam apenas as coisas “terrenas” e “lunares”, sendo o espaço celeste formado pela *quinta essência* – o *éter* (em grego: *ar puro*).

Visto os *elementos primordiais* (que se apresentavam em três estados: sólido, líquido e gasoso), tratemos do *movimento* deles. Para Aristóteles, o *movimento* representava: - *O ato do que está em potência enquanto potência*. Assim, ele usava *pondus* para um “corpo parado” (*potência*) e *grave* para um “corpo em movimento”, indicando que ele apresentava a propriedade de “peso” (*ato*). Com relação aos atributos (*categorias*) dos seres que são afetados pelo *movimento*, Aristóteles distinguia quatro espécies de *movimento*: o *movimento* segundo a *essência* do ser é geração e corrupção; segundo a *qualidade*, é alteração; segundo a *quantidade*, é crescimento e decrescimento; segundo o *lugar*, o *movimento* de um corpo pode ser *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 exemplo, o caso de uma pedra lançada para o alto).

Na continuação de seus estudos [apresentados em seu livro *Physica* (op. cit.)] 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* (do grego: *apetitus*) (já na Era Cristã, ela foi conceituada como *inércia*), 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 uma pedra ou de uma flexa no ar e devia-se a uma força exercida pelo próprio ar ao ser empurrado para trás pela pedra ou pela flexa, força essa que impulsionava esses corpos em seus movimentos. Portanto, concluiu, só há *movimento forçado* se houver ar, conclusão que levou ao célebre apotegma: - *A Natureza tem horror ao vácuo*. Ele também afirmava que: - *DEUS é o motor do Universo*.

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*

² **Great Books of the Western World**, v. 7 (Aristotle I); v. 8 (Aristotle II), Encyclopaedia Britannica Incorporation. University of Chicago, 1993.

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.

É interessante ainda mencionar que o *pondus* (“peso”) [mais “pesado” (para baixo) ou menos “pesado” ou “leve” (para cima)] continuou ainda a ser usado na IA, porém agora com outra categoria aristotélica: a *leveza* ou a “*gravidade específica*”, como a definiu o matemático grego Arquimedes de Siracusa (287-212), em seus livros *On Floating Bodies, I e II* (“Sobre os Corpos Flutuantes, I e II”)³, nos quais usou seu famoso *Princípio da Flutuabilidade (Princípio de Arquimedes)*: *Quando um corpo flutua em um fluido, seu peso é igual ao do fluido deslocado e, quando submerso, seu peso diminui daquela quantidade.*

III. Impetus

Depois da tentativa de Aristóteles de explicar o *movimento* dos corpos no ar, na IA (como vimos no item II), outra tentativa de explicá-lo só ocorreu na Idade Média (IM), por volta de 520 d.C., quando o filósofo grego John (Ioannes) Philoponos (c.475-c.565) afirmou que o movimento de um corpo lançado no ar não se devia ao empurrão exercido pelo ar sobre o corpo, como afirmavam os aristotélicos, e sim a uma “espécie de inércia” – *impetus, impetus impressa, virtus motiva, virtus impressa* –, a qual o mantinha em movimento. Afirmou ainda que a velocidade desse mesmo corpo fosse proporcional ao excesso da força de resistência. Em vista dessas ideias, escreveu que: *Para dois corpos de pesos diferentes caindo da mesma altura, a relação entre os tempos gastos na queda não dependia da relação de seus pesos, já que a diferença entre tais tempos era muito pequena.*

É oportuno salientar que o astrônomo armeno Abu Ar-Rayan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni (973-1048) inventou dispositivos com os quais determinou, com alguma precisão, a “gravidade específica arquimediana” (hoje: peso por unidade de volume ou *peso específico*) de alguns metais.

O conceito de *impetus* foi defendido e divulgado pelo médico e filósofo persa Abu-Ali al-Husain ibn Abdullah Ibn Sina (Avicena) (980-1037), bem como pelo filósofo islâmico Abu al-Barakat Hibat Allah ibn Malka al-Baghdahi (c.1080-c.1164) e, também, pelo erudito alemão Alberto Magno (1193-1280). Contudo, seu aluno, o teólogo italiano São Tomás de Aquino (1225-1274) não aceitou essa ideia, pois, aristotelicamente, interpretava a queda dos corpos

³ **Great Books of the Western World**, v. 10, Encyclopaedia Britannica Incorporation. University of Chicago, 1993.

como sendo devido a “causas finais”, ao admitir que a proximidade do lugar “natural” aumentava o *apetitus* do movido.

Por sua vez, o filósofo e teólogo inglês William of Ockham (Guilherme de Occam) (c.1285-c.1349) – fundador da *Escola Nominalista* – rejeitou ao mesmo tempo a concepção aristotélica e o *impetus* sobre o movimento. Assim, ao usar seu *Princípio da Economia (Parcimônia)* – a famosa *Navalha de Occam*: – *As entidades não devem ser multiplicadas sem necessidade* –, afirmou que ... *o movimento como um conceito não tem realidade fora dos corpos em movimento. Ao se referir ao movimento de um projétil disse: ... a coisa que se move num tal movimento depois que o corpo movido se separou do primeiro propulsor, é a própria coisa movida, não porque haveria nela uma força qualquer, pois essa coisa que se move e a coisa movida não podem ser distinguidas.*

O conceito de *impetus* foi mais elaborado pelo filósofo francês Jean Buridan (1395-1358), ao discutir as seguintes questões:

1) *Por que razão o ar, no caso do movimento de um projétil, teria ele sozinho a faculdade de continuar a mover-se, para, por sua vez, mover o projétil?*

2) *Por que o projétil não possuiria essa mesma faculdade?*

Ao responder a essas questões, Buridan desenvolveu a sua “teoria do *impetus*”, segundo a qual, o impulsor cede ao impulsionado uma potência proporcional à velocidade e ao peso deste último, necessária a mantê-lo em movimento. E mais ainda, que o ar progressivamente reduz a impulsão, e que o peso pode aumentar ou diminuir a velocidade. Assim, usando esse conceito de impulsão, Buridan então afirmou que durante a queda de um corpo este é movido pela ação conjunta da gravidade e do ímpeto adquirido, ação essa que resulta ser o movimento do grave mais rápido a cada instante. Buridan, também, chegou a usar essa doutrina do ímpeto para explicar os movimentos perenes dos planetas observados no céu, ao admitir que DEUS talvez tenha, originalmente, saturado os planetas com ímpeto. Ele ainda fez o estudo geométrico das configurações dos crescimentos e decrescimentos das qualidades cinemáticas do movimento.

Nos Séculos 15 e 16, o *impetus* voltou a ser usado. Com efeito, o Cardeal alemão Nicolau de Cusa (1401-1464) afirmou que a sua “impressão” em um móvel é como a criação da alma em um corpo, assim como DEUS fez para iniciar o movimento das esferas celestes. O conceito de *impetus* foi também usado pelo artista, inventor e cientista italiano Leonardo da Vinci (1452-1519), como se pode ver dessas suas afirmações:

1) *O ímpeto (impetus) brota tanto do peso quanto da força;*

2) *Todo o ímpeto tende a permanecer, como mostra o modelo do movimento impresso a um móvel;*

3) *Nenhuma coisa se move por si mesma, mas seu movimento é produzido por outros;*

4) *Todo movimento espera ser mantido, ou seja, todo corpo em movimento move-se enquanto conserva a impressão da potência de seu motor.*

Creemos que em tais afirmações (nas quais está claro a distinção entre *impetus* e *pondus*) o conceito de inércia estava surgindo⁴.

Por sua vez, em sua crítica à doutrina aristotélica (segundo a qual os corpos pesados caem mais rapidamente do que os leves, na proporção de seus respectivos pesos), o físico italiano Giovanni Battista Benedetti (1530-1590), em 1553, afirmou que não é o *peso* em si, mas o *excesso de peso* do móvel sobre o *peso do meio ambiente* que determina a velocidade da queda. Isso hoje significa dizer que não é o peso individual do corpo em questão, mas somente o seu *peso específico*. Mais tarde, em 1585, Benedetti continuou com sua crítica a Aristóteles, desta vez usando o conceito de *impetus*. Assim, afirmou:

1) *A velocidade de um corpo separado de seu primeiro motor provém de certa impressão natural, de certo ímpeto recebido pelo citado móvel;*

2) *Todo corpo grave, quer se mova violentamente ou naturalmente, recebe em si mesmo um ímpeto, uma impressão do movimento, de tal modo que, separado de sua causa motriz, continua, durante certo lapso de tempo, a mover-se por si próprio.*

Ao estudar o *movimento circular* de uma funda (um corpo preso na extremidade de um fio e posto a girar, em círculo, pela mão de um experimentador), Benedetti reforçou sua ideia sobre o *caráter linear do impetus* e, portanto, não aceitando seu *caráter rotatório*, ao escrever: *A mão gira, tanto quanto possível, em círculo; esse movimento da mão, em círculo, obriga o projétil (funda) a adquirir, também ele, um movimento circular, enquanto que, por sua inclinação natural, esse corpo, desde que tenha recebido um impetus, desejaria continuar seu caminho em linha reta.* É oportuno notar que Benedetti usou essa sua ideia sobre a linearidade do ímpeto para explicar que um pião em alta rotação permanece durante certo lapso de tempo na posição vertical, porque suas partes tendem a se deslocarem tangencial e perpendicularmente ao seu eixo e, portanto, não tendem para o centro da Terra.

IV. Inércia

Muito embora da Vinci tenha intuído o conceito de *inércia*, este só foi se construindo no decorrer do Século 17. Vejamos como. O astrônomo, físico e matemático italiano Galileu Galilei (1564-1642) foi, provavelmente, o primeiro a observar, em 1583, que as oscilações pendulares de um candelabro da Catedral (Duomo) de Pisa, se tornavam cada vez menores à medida que o mesmo diminuía seu ritmo de movimento. A partir daí, começou seus estudos sistemáticos sobre o movimento dos corpos. Assim, entre 1589 e 1592, na *Universidade de Pisa*, Galileu começou seus estudos sobre o movimento dos corpos, os quais foram descritos no livro *De Motu* (“O Movimento”), no qual examinou a possibilidade de haver outro tipo de movimento que não fossem os movimentos – *natural* e *violento* – propostos por Aristóteles, o qual chamou de *neutro* (origem, em nosso entendimento, do conceito de *inércia*, muito embora ele ainda

⁴ TRUESDELL, C. A. *Essays in the History of Mechanics*. New York: Springer-Verlag, 1968; CAPRA, F. A *alma de Leonardo da Vinci*. Cultrix, 2012.

tenha usado o vocábulo *impetus*). Assim, para Galileu, dois tipos de movimento não se enquadravam nessa classificação aristotélica: o de *rotação* de um corpo em um plano vertical, já que o mesmo ora se encontra acima e ora abaixo do horizonte; e o *movimento uniforme* de um corpo em um plano horizontal liso, o qual nunca está abaixo ou acima desse mesmo horizonte. Esse novo tipo de *movimento neutro* foi por ele abordado, em 1613, no livro intitulado *Istoria e Dimostrazione Intorno alle Machie Solare* (“História e Demonstração Sobre as Manchas Solares”) no qual afirmou: - *Se todos os impedimentos internos são removidos, um corpo pesado sobre uma superfície esférica concêntrica com a Terra será indiferente ao repouso ou ao movimento para qualquer parte do horizonte. E ele permanecerá no estado em que pela primeira vez for colocado: isto é, se for colocado em movimento para oeste, por exemplo, ele se manterá nesse movimento.* É interessante observar que, antes, em 29 de novembro de 1602, Galileu escreveu uma carta para o Marquês Guidobaldo del Monte⁵ (1545-1607) relatando suas experiências com pêndulos, usando para isso, uma esfera atada à extremidade de um barbante. Nestas experiências, descobriu que, independentemente do *peso* da esfera, o período de oscilação seria o mesmo desde que fosse mantido o comprimento do barbante. E mais ainda, que o tempo de oscilação (período) do pêndulo independia de sua amplitude⁶.

Ainda em seus estudos sobre o movimento, Galileu não fazia distinção clara entre *peso* (*pondus*) e *massa* (*moles*), conforme se pode ver em seu célebre livro *Discorsi e Dimostrazione Matematiche Intorno a Due Nuove Scienze Attenenti alla Mechanica ed i Movimenti Locali* (“Discursos e Demonstração em torno de Duas Novas Ciências Atinentes à Mecânica e aos Movimentos Locais”), publicado em 1638. Aliás, neste livro, Galileu trabalha com grandezas cinemáticas: a *velocidade* (espaço/tempo) e a *aceleração* (velocidade/tempo). Esta, no entanto, era relacionada apenas com o movimento dos corpos no campo gravitacional terrestre e, portanto, seria a *aceleração da gravidade* (*g*), chegando inclusive a calcular o seu valor. Merece ainda destaque o fato de que, em 1659, o físico holandês Christian Huygens (1629-1695) demonstrou que o período (*T*) de um pêndulo de comprimento (*ℓ*), vale: $T = \pi \sqrt{\ell/g}$. Assim, tomando um pêndulo de comprimento $\ell \sim 15,7$ cm e com 4.964 oscilações duplas por hora, encontrou: $g \approx 9,806$ m/s²

Registre-se que a distinção acima referida foi apresentada pelo discípulo de Galileu, o físico italiano Giovanni Battista Baliani (1582-1666) no prefácio de seu livro *De Motu Gravium* (“Sobre o Movimento dos Graves”), também publicado em 1638, no qual falava de *peso* como agente (*agens*) e a *massa* como paciente (*patiens*), usando categorias aristotélicas.

⁵ Autor do livro **Liber Mechanicorum** (“Livro dos Engenheiros”), escrito em 1577.

⁶ KOYRÉ, A. **Estudios Galileanos**. Siglo Veintiuno Editores, S. A., 1985; Johnson, S. **Como chegamos até aqui**. (Zahar, 2015); MLODINOW, L. **De primatas a astronautas**. Zahar, 2015.

V. Quantidade de Matéria e Quantidade de Movimento

Ainda na primeira metade do Século 17, a ação de uma força (conceito ainda não bem entendido, pois era confundido com o *peso*, como fazia da Vinci, por exemplo) sobre um corpo foi investigada pelo matemático e filósofo francês René du Perron Descartes (1596-1650) em seu livro *Principia Philosophiae* (“Princípios de Filosofia”), publicado em 1644, no qual apresentou suas pesquisas sobre o movimento dos corpos, principalmente o efeito de uma força atuando em um corpo, considerando-o como a sua *quantidade de movimento*. Como resultado dessas pesquisas, afirmou que: 1) *Cada coisa persevera no estado em que está, enquanto nada muda*; 2) *Nenhuma coisa muda senão pelo encontro de outras*; 3) *Deus criou a quantidade de movimento inicial do Universo e, a partir de então, ela permanece sempre conservada, gerando dessa maneira, as leis da natureza*. Cremos que as duas primeiras afirmações cartesianas relacionam-se com a *inércia galileana*.

Os conceitos de *quantidade de matéria* e de *quantidade de movimento* foram apresentados pelo físico inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) em seu célebre tratado intitulado *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (“Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”)⁷, publicado em 1687 e composto de três livros. Ele inicia seu tratado (*Livro I*) com duas primeiras definições:

1) *Quantidade de Matéria*: - *É a medida da mesma, obtida de sua densidade e volume conjuntamente*;

2) *Quantidade de Movimento*: - *É a medida do mesmo, obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria*.

Depois de escrever essas definições, Newton apresenta ainda no *Livro I* suas três *Leis do Movimento*: 1) *Primeira Lei da Mecânica* (hoje, *Lei da Inércia*): *Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele*; 2) *Segunda Lei da Mecânica* (hoje, *Lei da Força*): *A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida*; e 3) *Terceira Lei da Mecânica* (hoje, *Lei da Ação e Reação*): *A toda ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas*.

É interessante registrar que no *Livro III*, Newton propõe sua famosa *Lei da Gravitação Universal*: *A Gravidade opera proporcionalmente à quantidade de matéria e propaga sua virtude para todos os lados a distâncias imensas, decrescendo sempre como o inverso do quadrado da distância*. Essa Lei é hoje dada por: $P = G m_1 m_2/d^2$, onde *G* é a chamada *constante*

⁷ **Great Books of the Western World 32**. Encyclopaedia Britannica, Inc., 1993. Tradução em português: Nova Stella/EDUSP, 1990.

de gravitação universal e calculada pela primeira vez pelo físico e químico inglês Lord Henry Cavendish (1731-1810), em 1798⁸.

Por sua vez, o conceito de *quantidade de movimento* também aparece no trabalho do matemático e filósofo alemão Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), em 1686⁹, quando afirmou que a mesma era calculada pelo produto da *quantidade de matéria* pelo quadrado de sua velocidade (v^2), denominando-o de *vis viva* (“força-viva”) (hoje se sabe que ele errou, pois a “força-viva” nada mais é do que o dobro da *energia cinética*). Destaque-se que Huygens chamava a *quantidade de matéria* de *quantitates solidas* (“quantidades sólidas”), por ocasião em que definiu a *força centrífuga* (relação entre a *vis viva* e a distância), conforme aparece em seu livro póstumo *Opuscula Posthuma*, publicado em 1703.

VI. Massa Gravitacional (Massa Inercial), Momento Linear e Impulso

Até aqui, vimos que o termo *massa* não aparece explicitamente em nenhum texto e nem em expressões analíticas a ela relacionadas. Isso só aconteceu quando os conceitos de *quantidade de matéria* e *quantidade de movimento* foram retomados pelo matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783), na primeira metade do Século 18. Com efeito, em seu livro intitulado *Mechanica, sive Motus Scientia Analytice Exposita* (“Mecânica, ou Ciência do Movimento Estudada Analiticamente”) publicado em 1736, as *Leis do Movimento de Newton* começam a ser desenvolvidas pela primeira vez na forma analítica. Neste livro, Euler apresentou de maneira clara e precisa os conceitos de *ponto material* (que é caracterizado por uma *massa*) e de *aceleração* (variação temporal da velocidade). Lembrar que esse conceito já havia sido tratado por Galileu apenas como *aceleração da gravidade*. Por sua vez, a *quantidade de movimento*, foi tratada por Euler em trabalho publicado em 1750, porém com o nome de *momento linear*, e no qual enunciou o *Princípio do Balanço do Momento Linear* (que já havia sido considerado por Descartes e hoje conhecido como *A Conservação do Momento Linear*: $p = mv$) como uma extensão da *Segunda Lei de Newton*, e segundo o qual a *aceleração* de cada parte infinitesimal de qualquer corpo é igual à *força* (F) por unidade de massa que atua no mesmo. Tal princípio, ainda segundo Euler, deve aplicar-se a sistemas mecânicos contínuos e discretos, uma vez que sua formulação em termos de equações diferenciais em coordenadas cartesianas retangulares permite sua aplicação a qualquer configuração de corpos no espaço tridimensional. Em vista disso, Euler apresentou a forma analítica daquela lei da seguinte maneira (em notação atual): $F = m a = m dv/dt \rightarrow F = m a = d(m v)/dt = dp/dt$, sendo a o vetor aceleração e v o vetor velocidade. Note-se que a segunda equação foi a que Newton se referiu, não como uma igualdade e sim como uma proporcionalidade.

Aliás, é oportuno salientar que, usando a expressão $F = m a$ e aplicando-a ao campo gravitacional, resulta que o *peso* de um corpo, vale: $P = m_G g$, com g representando a *aceleração*

⁸ *Transactions of the Royal Society of London*, v. 88, p. 469, 1798.

⁹ *Acta Eruditorum Lipsiensium*, 1686.

da gravidade e m_G a quantidade de matéria de newtoniana: a hoje massa gravitacional. Estava, finalmente, feita a distinção entre *pondus* e *moles*. Porém, restava ainda uma questão: como relacionar a *Lei da Inércia* com a *Lei da Força*? Newton tentou resolver essa questão analisando os movimentos pendulares (já tratados por Galileu e Huygens, como vimos antes), e mostrou que as forças envolvidas nesses movimentos, decorrentes da força gravitacional e da força de tensão atuando em um pêndulo (fio de comprimento ℓ e massa m) eram da mesma espécie. Portanto, isso significava postular que a *massa inercial* (m_I) (decorrente da tensão exercida pelo fio do pêndulo sobre m) era idêntica a *massa gravitacional* (m_G) (decorrente da ação da gravidade também sobre m), ou seja: $m_I \equiv m_G$. Mais adiante, voltaremos a essa identidade.

Ainda no Século 18, havia uma confusão (duas situações) relacionada com a ação de uma força sobre um corpo de massa m , devido ao não entendimento dos conceitos de *quantidade de movimento* (cartesiano e newtoniano) e a *vis viva* de Leibniz: 1) ação da força no tempo [como observou o físico e matemático francês Jean le Rond d'Alembert (1717-1783), em 1743]; e 2) ação da força no espaço (com valor dobrado), como veremos a seguir.

No Século 19, novos aspectos dos conceitos de *massa* e *quantidade de movimento* (*momento linear*) foram analisados. Por exemplo, em 1847, o físico francês Jean-Baptiste-Charles-Joseph Bélanger (1790-1874) publicou o livro intitulado *Cours de Mécanique* (“Curso de Mecânica”), no qual denominou de *impulso* (I) o produto do módulo da força aplicada (F) em um corpo pelo tempo (t) decorrido ao se deslocar de um espaço (s), ou seja: $I = F t$. Ainda nesse livro, ele conservou o nome *força-viva leibniziana* (*vis viva*) para $m v^2$, porém à metade dessa expressão ($m v^2/2$), deu o nome de *potência-viva* (hoje: *energia cinética*). Desse modo, o *impulso*, como ação de uma força no tempo ($F t$), representa a *quantidade de movimento* (mv) (segundo considerou d'Alembert). Com efeito, usando as expressões para a força e velocidade, podemos escrever: $F t = m a t = m (v/t) t = m v$. Por sua vez, a ação da força no espaço (Fs) (usando as expressões da cinemática e da mecânica), será dada por: $Fs = (ma)s = (ma) [a/2(t^2)] = (1/2) m (v/t) [(v/t) t^2] = mv^2/2$.

Por fim, a definição de *massa* apresentada por Newton (*inercial* ou *gravitacional*) e denotada (e também usada) por Euler, foi criticada pelo físico e filósofo austríaco Ernst Mach (1838-1916) em seu livro intitulado *Die Mechanik in Ihrer Entwicklung Historisch-Kritisch Dargestellt* [The Science of Mechanics. A Critical and Historical Account of Its Development (The Open Court Publishing Company, 1974) (“A Mecânica e uma Consideração Crítico-Histórica de seu Desenvolvimento”)], publicado em 1883. Assim, examinando a definição newtoniana de *quantidade de matéria* (*massa*): *É a medida da mesma, obtida de sua densidade e volume conjuntamente*, ele percebeu que essa definição era circular, já que não havia maneira de definir a densidade de um corpo independentemente de sua *massa*. Assim, propôs outra definição de *massa*, mais operacional e deduzida das relações dinâmicas dadas pela segunda e terceira leis de Newton, conforme segue. Estando dois corpos A e B em contato mútuo, o corpo A exerce uma aceleração (a) sobre B, e este, exerce uma aceleração (a'), também sobre A,

porém de sentido contrário à aceleração a . Considerando a massa de um desses corpos como padrão, a do corpo A (m_A), por exemplo, aquelas leis de Newton mostram que essas massas se relacionam do seguinte modo: $m_B = m_A (a/\hat{a})$. Desta maneira, concluiu Mach, sua definição de *massa* não precisa da “quantidade de matéria” envolvida na mesma¹⁰.

VII. Massa Hidrodinâmica, Eletromagnética, Renormalizada e Massa Relativística (Massa Imaginária)

A questão da dependência da *massa inercial* ($m \equiv m_I$) de um corpo com a sua velocidade (v) tem sido objeto de investigação desde o Século 19. Por exemplo, em 1842, o físico e matemático escocês Sir George Gabriel Stokes (1819-1903) mostrou que para uma esfera lisa de massa (de repouso) m_0 movendo-se com velocidade v em um fluido ideal, infinito e incompressível, sua *energia cinética* (E) e seu momento linear (p) são dados, respectivamente, por: $E = mv^2/2$ e $p = mv$, sendo $m = m_0 + \mu$. Para Stokes o parâmetro μ é uma *massa hidrodinâmica* que depende do raio (a) da esfera e da densidade do meio. Mais tarde, em 1881¹¹, o físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) chegou ao mesmo resultado, porém, desta vez, analisando o movimento de uma esfera carregada através de um espaço ilimitado cheio de um meio de capacidade indutiva K . Contudo, para Thomson, μ representava agora uma *massa eletromagnética* que aumentava indefinidamente na medida em que a velocidade da esfera se aproximava da *velocidade da luz no vácuo* (c). O caráter eletromagnético de μ também foi considerado pelo físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902), inicialmente, em 1896, com o nome de *massa renormalizada*, e em 1899¹², ao usar sua Teoria dos Elétrons, formulada em 1892, sendo esta fundamentada teoricamente no eletromagnetismo maxwelliano, com o qual havia trabalhado em sua Tese de Doutorado, defendida na *Universidade de Leiden*, em 1875¹³.

A dependência de $m(v)$ começou a ser experimentalmente observada logo no início do Século 20. Assim, em 1901¹⁴, 1902¹⁵ e 1903¹⁶, o físico alemão Walther Kaufmann (1871-1947), em suas experiências no sentido de medir a massa do elétron (m_e), usando o desvio de *raios beta* (β) [que passaram a ser conhecido como *elétrons*, depois de sua descoberta realizada por

¹⁰ SYMON, K.R. **Mechanics**. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1961; MACH, op. cit.

¹¹ **Philosophical Magazine**, v. 11, p. 229, 1881.

¹² **Physikalische Zeitschrift**, v. 1, p. 39, 1899.

¹³ WHITTAKER, E. T. **A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories**. Thomas Nelson and Sons, Ltd., 1951; OKUN, L. B. **Physics Today**, p. 11, June, 1979; PAIS, A. ‘Subtle is the Lord...’. **The Science and the Life of Albert Einstein**. Oxford University Press, 1982.

¹⁴ **Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen**, p. 143, 1901.

¹⁵ **Physikalische Zeitschrift**, v. 4, p. 54, 1902.

¹⁶ **Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen**, p. 90, 1903.

Thomson, em 1897¹⁷ ao atravessar uma região de campo elétrico (produzido por um condensador) e um campo magnético (gerado por uma bobina), observou que aqueles “raios” apresentavam uma *massa aparente* maior do que a sua *massa real*, de pelo menos três para um. Nessas experiências, Kaufmann percebeu que a *massa eletromagnética* do elétron dependia de sua velocidade.

Ainda em 1903¹⁸, o físico alemão Max Abraham (1875-1922) desenvolveu um modelo eletromagnético do elétron, considerando-o como uma esfera rígida (de raio a) e com carga elétrica (e) distribuída uniformemente em sua superfície (ideia que tivera em 1902). Desse modo, demonstrou que a “energia eletromagnética” (E_{em}) e o “momento eletromagnético” (p_{em}) do elétron (deslocando-se com velocidade v) valiam, respectivamente: $E_{em} \approx e^2/(2a) + \mu v^2 + \dots$, $p_{em} \approx \mu v + \dots$, sendo: $\mu = 2e^2/(3ac^2)$. Ainda nesse trabalho, Abraham calculou o componente transversal da *massa eletromagnética* (m_t), encontrando o seguinte resultado:

$$m_t = m_0 [1 + (2/5) \beta^2 + (3/70) \beta^4 + \dots],$$

no qual m_0 é a *massa de repouso* do elétron e $\beta = v/c$.

Merece destaque o fato de que o físico brasileiro Osvaldo Frederico Schilling Neto (n.1957) (a quem agradeço, nesta oportunidade, a leitura crítica deste artigo), do *Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Catarina (DF/UFSC)* vem trabalhando, desde 2013, em uma possível *interpretação eletromagnética da massa* das partículas, por intermédio do movimento vibracional intrínseco das mesmas, como se pode ver em seu recente trabalho, de 2015 e intitulado *The Relation between the (Hypothetical) Intrinsic Vibrational Motion of Particles and some of their Fundamental Properties (DF/UFSC – preprint)*. Neste artigo, ele, basicamente, partiu do trabalho realizado pelo físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1962; PNF, 1933), em 1930¹⁹, no qual usou *Equação de Dirac (ED)* [proposta, em 1928²⁰, pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933)] para estudar o elétron livre. Desse modo, tomando a *representação se Heisenberg* [na qual os operadores são função do tempo e não a $\psi(\vec{r},t)$, conhecida como *representação de Schrödinger*], mostrou que o elétron apresentava um movimento oscilatório de frequência rápida, o *Zitterbewegung* (“Tremedeira”), como ele próprio o denominou (de amplitude $\xi = \lambda_C/4\pi \sim 10^{-11}$ cm, onde λ_C é o *comprimento de onda Compton*), e que se superpunha ao seu movimento médio, que ocorre com uma velocidade (v) menor do que a velocidade da luz no vácuo ($v < c$). Tal movimento ondulatório, segundo Schrödinger, resultava da interferência entre os estados de energia positiva e negativa do elétron. No entanto, como por essa época o significado da energia negativa do elétron, que decorria da ED, não era bem entendido, o próprio Schrödinger tentou, entre 1931 e 1932, modificar, sem

¹⁷ *Philosophical Magazine*, v. 44, p. 295, 1897.

¹⁸ *Annalen der Physik*, v. 10, p. 105, 1903.

¹⁹ *Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften. Physikalisch-mathematische Klasse*, v. 24, p. 418, 1930.

²⁰ *Proceedings of the Royal Society*, A117; A118, p. 610; 351, 1928.

sucesso, a ED no sentido de remover a dificuldade dessa energia negativa. Porém, a descoberta do *pósitron* (e^+), em 1932²¹, pelo físico norte-americano Carl David Anderson (1905-1991; PNF, 1936), não só explicou essa energia negativa, como também explicou a não-observabilidade do *Zitterbewegung*, pois que, qualquer tentativa de observá-lo dentro de dimensões do λ_C , envolve energias tão altas, capazes de criar um *par elétron-pósitron* [esta *produção de pares* foi observada, em 1933²², pelos físicos, o inglês Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974; PNF, 1948) e o italiano Giuseppe Pablo Stanislao Occhialini (1907-1993)] e, desse modo, o estado (no caso, o *Zitterbewegung*) de uma partícula não pode ser observado. É oportuno registrar que o *modelo fenomenológico* proposto nesse artigo de Schilling admite a possibilidade de que, caso essa “Tremedeira” (do elétron ou de qualquer partícula) seja real, ela pode ser medida, aliás, conforme sugeriu o físico sino-norte-americano Kerson Huang (n.1928), em 1952²³, e cujos detalhes podem ser vistos no artigo do Professor Schilling.

Voltemos à dependência de $m(v)$. Em 1903²⁴ e 1904²⁵, os físicos irlandeses Frederick Thomas Trouton (1863-1922) e H. R. Noble tentaram demonstrar a existência do *éter luminífero cartesiano*, procurando encontrar uma possível interação entre a *massa eletromagnética* do elétron e aquele *éter*, alinhando um capacitor carregado com a direção do movimento da Terra no “mar etéreo”. Com isso, eles procuravam encontrar um torque do capacitor em consequência daquela interação, mas não o encontraram²⁶.

A dependência da *massa eletromagnética* e do *momento magnético* do elétron com a velocidade foi também objeto de um artigo por parte de Lorentz, em 1904, usando um conjunto de equações envolvendo espaço e tempo, a hoje conhecida *transformação de Lorentz*, que ele já havia encontrado, em 1899, porém com um fator de escala ε . Ao considerar $\varepsilon = 1$, nesse artigo de 1904, Lorentz encontrou que: $E_{em} \approx \mu_0 c^2 + \mu_1 v^2/2 + \dots$, além de: $p_{em} \approx \mu v + \dots$, onde: $\mu_0 = (3/4) \mu$ e $\mu_1 = (5/4) \mu$, tendo μ o mesmo valor mostrado antes. Ainda nesse artigo, Lorentz deduziu as hoje famosas *Transformações de Lorentz* (TL) [nome cunhado pelo físico, matemático e filósofo francês Jules Henri Poincaré (1854-1912)]: $x' = \gamma (x + v t)$; $y' = y$; $z' = z$; $t' = \gamma (t + v x/c^2)$, com o fator γ dado por: $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, onde (x', y', z') representam as coordenadas de uma partícula em relação a um referencial cuja origem situa-se em um observador fixo O' ; (x, y, z) são as coordenadas dessa mesma partícula em relação a um outro referencial cuja origem situa-se em um observador O que se desloca com uma velocidade V constante em relação a O' , e na direção do eixo dos x (x'), e t (t') representam os tempos marcados nesses dois referenciais.

²¹ *Science*, v. 76, p. 238; *Proceedings of the Royal Society of London*, A41, p. 405, 1932.

²² *Proceedings of the Royal Society of London*, A139, p. 699, 1933.

²³ *American Journal of Physics*, v. 20, p. 479, 1952.

²⁴ *Proceedings of the Royal Society of London*, A72, p. 132, 1903.

²⁵ *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A202, p. 165, 1904.

²⁶ CHERMAN, A.; MENDONÇA, B. R. *Por que as coisas caem? Uma breve história da gravidade*. Zahar, 2009.

Também em 1904, em uma monografia intitulada *Mathematische Einführung in die Elektronentheorie* (“Introdução Matemática da Teoria do Elétron”), o físico alemão Alfred Heinrich Bucherer (1863-1927) demonstrou que um elétron se contraía ao se deslocar com velocidade de módulo v através do *éter*, porém, mantendo seu volume constante. Segundo esse modelo, a contração do elétron transformava-o em um elipsóide, cujos eixos principais da elipse eram dados pelas expressões: $a s^{1/3}$ e $a s^{-1/6}$, sendo: $s = 1 - v^2/c^2$, e a é o raio do elétron considerado inicialmente como esférico. Note que esse modelo previa uma *massa transversal* (m_t) para o elétron em movimento, cujo valor se situava entre os encontrados por Abraham e por Lorentz, referidos acima.

Uma nova relação $m(v)$, desta vez em outra situação física, foi encontrada, em 1905²⁷, pelo físico germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), como decorrência de sua famosa *Teoria da Relatividade Restrita* (TRR), esta baseada nos seguintes postulados (em notação atual):

- 1) *As Leis da Física são invariantes por uma Transformação de Lorentz;*
- 2) *A velocidade da luz no vácuo (c) é uma constante em qualquer sistema de referência.*

De posse desses dois postulados, Einstein demonstrou que, para um elétron em movimento com velocidade de módulo v , tem-se: $m_t = \mu \gamma^2$ e $m_\ell = \mu \gamma^{3/2}$, com γ definido por Lorentz, onde m_t e m_ℓ representam, respectivamente, a massa do elétron no sentido transversal e direcional de seu movimento, e μ é a massa do elétron, enquanto o seu movimento for lento (hoje representado por m_0 que significa a *massa de repouso do elétron*). Em outro trabalho, ainda em 1905²⁸, Einstein mostrou a equivalência entre a *inércia* (hoje, *massa inercial*) e *energia*, conforme se pode ver em: Albert Einstein, Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento e A inércia de um corpo será dependente do seu conteúdo energético²⁹? Hoje, essa equivalência entre *massa (inercial)* e *energia* é traduzida pela célebre expressão: $E = m c^2 = m_0 \gamma c^2$. Registre-se que essa expressão já havia sido obtida por Poincaré, em 1900³⁰.

Note-se que a expressão da *massa inercial* (m) vista acima, pode ser escrita na seguinte forma (usando-se o valor de γ): $m = m_0 \gamma = m_0 (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$. Assim, para partículas com $v > c$, m só terá significado físico se m_0 for uma *massa imaginária* (m_i). Para um estudo mais detalhado sobre a possibilidade de existir m_i , ver: Benedito Tadeu Ferreira de Moraes, TRE x Dualidade: Uma Análise Relativística Sobre o Comportamento Dual das Partículas (Tese de Professor Titular) (Instituto Federal do Pará, 2015).

²⁷ *Annalen der Physik*, v. 17, p. 891, 1905.

²⁸ *Annalen der Physik*, v. 18, p. 639, 1905.

²⁹ In: **O Princípio da Relatividade**. Fundação Calouste Gulbenkian, 1978.

³⁰ *Archives Néerland*, v. 5, p. 252, 1900.

WHITTAKER, E. T. *A History of the Theories of Aether and Electricity - The Modern Theories: 1900-1926*. Thomas Nelson and Sons, Ltda., 1953.

VIII. Massa Gravitacional/Inercial Einsteiniana

Depois de formular a TRR, Einstein percebeu que havia duas grandes dificuldades nela. Primeira, ela se baseava em referenciais inerciais, aqueles que se movimentam sem aceleração, ou seja, com velocidade constante, e que não existem no mundo real. A segunda era a de que sua teoria não incluía a Teoria da Gravitação de Newton (TGN). Desse modo, seu próximo passo foi o de representar a gravitação newtoniana dentro da estrutura da TRR. Registre que ao comentar com seu amigo, o físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947; PNF, 1918) [o formulador da Teoria Quântica, em 1900³¹, segundo a qual a energia varia discretamente] sobre seu ambicioso projeto, Planck o advertiu: - *Como um amigo mais velho, devo aconselhá-lo negativamente, pois, primeiro, você não terá sucesso, e, ainda que tenha, ninguém acreditará em você. ... Porém, se você conseguir, será considerado um novo Copérnico*. Apesar dessa advertência, Einstein começou a pensar no ajuste da TGN com a TRR³².

O pensamento básico do ajuste da TGN com a TRR ocorreu a Einstein, em 1907, quando ele estava ainda trabalhando no *Escritório de Patentes*, em Berna, na Suíça. Segundo suas próprias palavras: *Eu estava sentado numa cadeira no escritório de patentes de Berna, quando, de repente, um pensamento me ocorreu: uma pessoa em queda livre não sentirá seu próprio peso. Fiquei surpreso. Esse pensamento simples impressionou-me profundamente. Impeliu-me para uma teoria da gravitação*. Note que o próprio Einstein afirmou que esse foi “o pensamento mais feliz da vida dele”³³.

Naquele mesmo ano de 1907³⁴, Einstein publicou um artigo no qual discutiu, pela primeira vez, a equivalência entre a *massa inercial* (m_I) e a *massa gravitacional* (m_G) [$m_I \equiv m_G$: *Princípio da Equivalência* (PE)]. Como vimos antes, em 1905, na formulação da TRR, Einstein demonstrou que a massa de um corpo cresce com a sua velocidade, razão pela qual a interpretou como m_I . Aliás, essa interpretação ele já a havia considerado quando, ainda em 1905, e um pouco antes de apresentar a TRR, partindo da *Teoria Quântica de Planck* (1900), Einstein explicou o *efeito fotoelétrico* (emissão de elétron de um átomo pela incidência de luz), considerando que a luz (de frequência ν) era um *pacote de energia quântica* ($h\nu$) dotado de massa. Com essa interpretação da luz, Einstein questionou se a gravidade influenciava a propagação da luz, tendo em vista de seu PE ($m_I \equiv m_G$). Em 1911³⁵, Einstein voltou a estudar a influência da gravidade newtoniana sobre a luz, ocasião em que fez as seguintes afirmações: 1) *Um raio de luz passando próximo de um campo gravitacional potente, tal como o Sol, deve se encurvar*; 2) *A velocidade da luz deve depender do campo gravitacional*. A partir dessas afirmações, Einstein usou a TGN para calcular o encurvamento (*bending*) (α) de um raio luminoso ao tangenciar o

³¹ *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, v. 2, p. 237, 1900.

³² KAKU, M. *O Cosmo de Einstein*. Companhia das Letras, 2005.

³³ Einstein, op. cit.; Kaku, op. cit.

³⁴ *Jahrbuch der Radioaktivität*, v. 4, p. 411; v. 5, p. 98, 1907.

³⁵ *Annales der Physik Leipzig*, v. 35, p. 898, 1911.

bordo do Sol e encontrou que: $\alpha = (2GM)/(\Delta c^2) = 0,83$, onde M é a massa do Sol, G é a constante de gravitação universal de Newton-Cavendish, e Δ é a menor distância entre o raio de luz e o disco do Sol. É interessante destacar que, em 1801³⁶, o astrônomo alemão Johann George von Soldner (1776-1833), usando a teoria corpuscular newtoniana da luz e a TGN, obteve para α o valor de 0,84, valor esse que parece haver também sido calculado pelo próprio Newton³⁷.

Em 1913, Abraham³⁸ e Einstein³⁹ voltaram a discutir uma nova Teoria da Gravitação (TG) baseada no PE. Por exemplo, Abraham propôs uma TG que usava, conjuntamente, a invariância lorentziana (TL) e um sistema de referência absoluto. Também, em 1913⁴⁰, Einstein e o físico alemão Marcel Grossmann (1878-1936) desenvolveram uma TG usando a geometria riemanniana (não-euclidiana) no contexto da teoria dos invariantes. Ainda nesse trabalho, eles discutiram pela primeira vez o resultado das experiências realizadas pelo físico húngaro Roland (Lorand), Barão Eötvös von Vásárosnamény (1848-1919), em 1890⁴¹, nas quais usou uma espécie de balança de torção e encontrou que a variação relativa (VR) entre m_I e m_G (dada pela expressão: $VR = |m_I - m_G| / m_G$) de vários materiais (latão, vidro e cortiça), era da ordem 10^{-10} . Ao analisarem essas experiências, Einstein e Grossmann concluíram que: *A identidade física entre a massa inercial e a massa gravitacional ... apresenta um alto grau de possibilidade.*

Em 1914, Einstein tentou comprovar o *bending* da luz observando o eclipse total do Sol que ocorreria em 21 de agosto de 1914, na Sibéria. Para isso, falou com o astrônomo alemão Erwin Finlay Freundlich (1885-1964) que organizasse uma expedição para comprovar o que havia previsto em seu trabalho de 1911. Muito embora Einstein estivesse disposto a financiar tal expedição, graças a sua convicção da previsão que fizera, não houve necessidade dessa proposta (cerca de 2 mil marcos), pois um rico industrial resolveu bancar a expedição. Freundlich chegou à Sibéria um mês antes do eclipse. Porém, como a Alemanha havia declarado guerra à Rússia, todos componentes da expedição foram presos e os equipamentos confiscados (Kaku, op. cit.).

Em 1915⁴², em uma série de quatro artigos, Einstein formulou a hoje famosa *Teoria da Relatividade Geral* (TRG). Vejamos como isso ocorreu. Aplicando a Teoria da Gravitação Newtoniana (TGN) ao problema da atração gravitacional entre corpos, Einstein chegou à conclusão de que essa atração não era devida a uma força que agia a distância, como afirmavam os

³⁶ **Berliner Astronomisch Jahrbuch**, p. 161, 1804.

³⁷ WHITTAKER, op. cit., 1953; PAIS, op. cit.

³⁸ **Physikalische Zeitschrift**, v. 13, p. 793, 1913.

³⁹ **Physikalische Zeitschrift**, v. 14, p. 1249, 1913.

⁴⁰ **Zeitschrift für Mathematik und Physik**, v. 62, p. 225, 1913.

⁴¹ **Mathematische und Naturwissenschaftliche Berichte aus Ungarn**, v. 8, p. 65, 1980.

⁴² **Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften**, v. 2, p. 778; 799; 831; 844, 1915.

newtonianos, e sim dada pela curvatura do espaço-tempo riemanniano [traduzido pelo *tensor geométrico de Ricci* ($R_{\mu\nu}$), que é o *tensor de Riemann* ($R_{\mu\nu\gamma\epsilon}$) contraído], provocado pela presença do *tensor energia-matéria* ($T_{\mu\nu}$). Desse modo, quando um corpo “cai” em qualquer planeta (Terra, por exemplo), ele não é puxado pela “força de atração gravitacional do planeta” e sim, ele se desloca na curva do espaço-tempo produzida pela presença da massa planetária, isto é, ele se movimenta na *geodésica da geometria riemanniana* ($g_{\mu\nu} = g^{\mu\nu} = \text{tensor métrico}$) induzida por essa massa. Para comprovar essa sua TRG, Einstein afirmou que existiam três testes cruciais:

- 1) *Precessão dos periélios dos planetas;*
- 2) *Curvatura (bending) de raios luminosos próximos a campos gravitacionais;*
- 3) *Deslocamento para o vermelho (red shift).*

Essa sua TRG (hoje, *Teoria da Gravitação de Einstein – TGE*) era baseada em uma equação, a hoje célebre *Equação de Einstein* (EE): $R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = -K T_{\mu\nu}$, onde $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$, $K = 8\pi G/c^4$ é a *constante gravitacional de Einstein*. Note-se que, em 1917⁴³, Einstein adicionou outro termo no primeiro membro de sua equação ($\Lambda g_{\mu\nu}$) – o hoje conhecido *termo cosmológico* – para tornar estáticas a solução que encontrara para a sua equação; esse termo funcionava como uma *repulsão cósmica*. Desse modo, sua equação passou para: $R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R - \Lambda g_{\mu\nu} = -K T_{\mu\nu}$, na qual $\Lambda g_{\mu\nu}$ tendo um significado “geométrico”.

Observe-se que, usando sua TRG, Einstein calculou o encurvamento (*bending*) da luz ao passar pelo disco solar, encontrando o valor de $1''{,}74$, cerca do dobro do valor que ele havia calculado em 1911, usando a TGN. Esse valor foi praticamente confirmado pelas observações do eclipse total solar que ocorreu em 29 de maio de 1919, visível em Sobral (Ceará, Brasil) e na Ilha de Príncipe (Golfo Guiné, África). Para observar esse eclipse foram organizadas duas expedições de astrônomos ingleses: Andrew Commelin (1865-1939) comandou a de Sobral, e Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) a da Ilha de Príncipe. A análise dessas duas observações só foi concluída em 06 de novembro de 1919, em uma reunião conjunta da *Royal Society of London* e da *Royal Astronomical Society*, presidida por Sir Joseph John Thomson, com os seguintes resultados⁴⁴: Sobral: $1''{,}98 \pm 0''{,}16$ e Ilha de Príncipe: $1''{,}61 \pm 0''{,}40$. Esse resultado confirmou o que se denomina de *Massa Gravitacional/Inercial Einsteiniana*.

IX. Massa Efetiva

Em 1929, os norte-americanos, o físico e químico Irving Langmuir (1881-1957; PNQ, 1932) e o físico Lewi Tonks (1879-1941) introduziram o conceito de *plasma* para representar um gás altamente ionizado, ou seja, um gás formado por íons (átomos que perdem ou recebem elétrons) e, sendo móvel, pelo menos um dos tipos de íons. Todavia, para ionizar os átomos é necessário usar alta energia, geralmente com “*fótons quentes*”. Com o desenvolvimento da

⁴³ *Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften*, v. 1, p. 142, 1917.

⁴⁴ CREASE, R. P. *As Grandes Equações*, Zahar, 2011.

Astrofísica, observou-se que as estrelas [não-girantes e girantes (*pulsares*)] são formadas de um *plasma quente*, decorrente de uma *fusão termonuclear* (descontrolada) de *prótons* (o famoso *ciclo próton-próton*), segundo foi proposto, em 1938, pelos físicos norte-americanos Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) (de origem alemã) e Charles Louis Critchfield (1910-1994). Em 1950, os físicos russos Andrey Dmitriyevich Sakharov (1921-1989; PNPaz, 1975) e Igor Yevgenyevich Tamm (1895-1971; PNF, 1958), apresentaram a ideia da construção de um reator de *fusão termonuclear* (controlada), inicialmente conhecido como *Tokomag*, uma combinação das palavras russas: *toko*, que significa corrente elétrica, e de *mag* (de *magnit*: campo magnético). Essa ideia foi desenvolvida por vários físicos russos, em experiências iniciadas no final de 1957, cujos resultados foram apresentados na *Segunda Conferência de Átomos para a Paz*, ocorrida em Genebra, em outubro de 1958, com o título de *Estabilidade e Esquentamento de Plasmas em Câmaras Toroidais*. Tais experiências foram realizadas com a máquina denominada de *Tokamak* (T-1) [*Toroidal'naya Kamera s Magnitnaymikatushkami* (“Câmara Toroidal e Bobina Magnética”)]. Nesse equipamento, o *plasma* [circulando em um anel de raio (R) e secção reta (a)] é confinado por um campo magnético (de intensidade H) produzido por uma bobina toroidal e mantido sob a pressão de algumas atmosferas. Por fim, a invenção do *laser* (*light amplification by stimulated emission radiation*), em 1960, pelo físico norte-americano Theodore Harold Maiman (1927-2007), também foi possível produzir *plasma* em laboratórios.

A existência do *plasma* (celeste e terrestre) permitiu, então, estudar a passagem de *fótons* [partículas decorrentes da vibração de uma onda eletromagnética, composta de um campo elétrico (E) e de um campo magnético (H), que vibram em planos perpendiculares] por aquele meio. Contudo, no vácuo ou em meios constituídos de átomos neutros (ar, vidro, água etc.), o *fóton* (γ) se apresenta “nu” (“massa” e “carga” nulas) e com $spin = 1$, devido ao fenômeno da *polarização* (orientação das vibrações transversais de E e H), segundo a *Eletrodinâmica Quântica* (“Quantum Electrodynamics” – QED, desenvolvida a partir de 1927, pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933)⁴⁵.

Para o caso de um *plasma* constituído de um gás de partículas carregadas (íons e elétrons livres), a oscilação dos elétrons livres relativamente aos íons fixos, define uma *frequência de plasma* (ν_P) que é função do número (n) desses elétrons, sendo estes caracterizados pela massa (m_e) e a carga (e)⁴⁶. Quando um *fóton* de uma determinada frequência (ν_F) incide em um *plasma*, ele pode ser refletido (se $\nu_F < \nu_P$) ou refratado (se $\nu_F > \nu_P$). Todavia, quando ele refrata, ou seja, penetra no *plasma*, o campo elétrico (E_F) do *fóton* faz oscilar os elétrons livres do *plasma* e, portanto, esses elétrons radiam “ondas secundárias” [devido à *radiação de Larmor*, proposta pelo físico inglês, Sir Joseph J. Larmor (1857-1942), em 1897] e que se sobrepõem à onda inicial, constituindo uma “onda de densidade de carga”, cuja quantização recebeu o nome

⁴⁵ BASSALO, J. M. F.; CARUSO, F. **Dirac**. Livraria da Física, 2013.

⁴⁶ KITTEL, C. **Introduction to Solid State Physics**. John Wiley and Sons, Incorporation, 1971.

de *plasmon* [cunhado, inicialmente, pelos físicos norte-americanos David Pines (n.1924) e David Joseph Bohm (1917-1992), em 1952]. Os “fótons” *plasmons*, contudo, são longitudinais e tem $\text{spin} = 0$ e, para explicar sua passagem no *plasma* foi-lhe atribuída uma *massa efetiva*, pois sendo sua velocidade um pouco menor do que c , ele precisa dessa “massa” para se movimentar, funcionando como uma “vestimenta” para esse tipo de “fóton” (*plasmon*), chamado então de “fóton vestido”. É interessante destacar que o *plasmon* existe também em materiais condutores e em semicondutores, que são considerados gases de “elétrons livres” (naturais e decorrentes de “dopagem”), respectivamente⁴⁷.

X. Massa Higgsiana

Para os antigos filósofos gregos, existiam quatro tipos de forças: as que atuam nos corpos nas proximidades de nosso planeta Terra; as que atuam nos corpos celestes; as exercidas pela *magnetita* ou *ímã natural* (hoje conhecida quimicamente como o óxido de ferro: Fe_3O_4); e as exercidas pelo *âmbar*, quando este é atritado com um pedaço de lã. Estas duas últimas foram mencionadas por Tales de Mileto. Durante muito tempo os fenômenos elétricos e magnéticos, por se apresentarem bastantes semelhantes, foram confundidos, até serem, pela primeira vez, diferenciados pelo matemático italiano Girolano Cardano (1501-1576). Observação semelhante foi realizada pelo médico e físico inglês William Gilbert (1544-1603), que a registrou em seu famoso tratado *De Magnete*, publicado em 1600. Aliás, foi ele quem, nesse livro, cunhou o termo *elétrico* para os corpos que se comportavam como o *âmbar* (“elektron”, em grego) quando atritado com a lã.

As duas primeiras forças relacionadas acima, terrestres e celestes, discutidas por Aristóteles em seus Livros V-VIII⁴⁸, teve sua primeira ideia de unificação considerada por al-Biruni ao afirmar que os fenômenos físicos no Sol, na Terra e na Lua obedecem às mesmas leis⁴⁹. Mais tarde, em 1602, Galileu afirmou que as leis que regem o movimento das forças terrestres e celestes são universais⁵⁰. Contudo, como vimos no item 4, foi Newton quem formalizou essa unificação por intermédio de sua célebre *Lei da Gravitação Universal*.

Por sua vez, as primeiras experiências que indicavam a unificação entre as forças elétrica e magnética foram realizadas pelo farmacêutico e físico dinamarquês Hans Christiaan Oersted (1777-1851). Vejamos como. Em 1807, Oersted procurou, sem êxito, encontrar uma relação entre aquelas forças. Ela só foi encontrada no inverno de 1819-1820, quando ministrou, na *Universidade de Copenhague*, um curso sobre *Eletricidade, Galvanismo e Magnetismo*. Durante esse curso, Oersted realizou uma série de experiências. Por exemplo, em fevereiro de 1820, observou que um condutor se esquentava quando era percorrido por uma corrente elétrica.

⁴⁷ KITTEL, op. cit.; MENDONÇA, J. T. **Uma biografia da luz**. Livraria da Física, 2015.

⁴⁸ **Física**. Les Belles Lettres, 1996.

⁴⁹ SALAM, A. **Em Busca da Unificação**. Gradiva, 1991.

⁵⁰ Lopes, J. L. **Albert Einstein e a imagem física do mundo**. CBPF-CS-011/1997.

Também, nessas experiências, Oersted procurou encontrar uma relação entre eletricidade e magnetismo, examinando o que acontecia com uma agulha magnética ao ser colocada perpendicularmente ao fio condutor do circuito galvânico utilizado. No entanto, não registrou nenhum movimento perceptível da agulha. Porém, ao término de uma aula noturna daquele curso, no começo de abril de 1820, ocorreu-lhe a ideia de colocar o fio condutor paralelamente à direção da agulha magnética; aí, então, percebeu uma razoável deflexão dessa agulha, e a procurada relação entre o magnetismo e o “Galvanismo” [estudo das “correntes elétricas” realizado pelos italianos, o fisiologista Luigi Galvani (1737-1798), em 1786, e o físico Alessandro Giuseppe Volta (1745-1827), em 1794, ocasião em que este cunhou o termo “Galvanismo”] estava então descoberta. Observe-se que essa descoberta foi relatada ao físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867), em carta escrita pelo físico e astrônomo holandês Christopher Hansteen (1784-1873), então assistente de Oersted. É oportuno destacar que a criação de um campo magnético por uma corrente elétrica foi também confirmada, ainda em 1820, em experiências realizadas pelos físicos franceses Dominique François Jean Arago (1786-1853) e André Marie Ampère (1775-1836)⁵¹.

Uma vez encontrada uma relação entre as forças elétrica e magnética, uma nova relação precisava ser pesquisada, qual seja, entre o “eletromagnetismo” (termo cunhado por Ampère) e a gravitação. Um dos primeiros a realizar experiências nesse sentido foi Faraday. Contudo, em 1849, ele escreveu em seu *Diário* de laboratório que não havia conseguido mostrar que a gravidade poderia induzir correntes elétricas em peças de metal que caíam do topo de uma sala de aula na *Royal Institution of Great Britain*. (Pais, op. cit.). Outra tentativa de encontrar aquela mesma relação, e igualmente frustrada, foi apresentada pelo matemático alemão Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866), um pouco antes de morrer⁵².

A formulação matemática da unificação entre as forças elétrica e magnética – conhecida desde então como *força eletromagnética* – foi desenvolvida pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879), em seu livro intitulado *A Treatise on Electricity and Magnetism* (“Um Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo”), publicado em 1873 (Dover, 1954). Aliás, é oportuno dizer que, nesse livro, Maxwell apresentou a unificação da Óptica com o Eletromagnetismo ao demonstrar que “a luz é uma onda eletromagnética”.

O Século 19 terminou com a ideia de que só existiam duas forças distintas na Natureza: a *gravitacional newtoniana* e a *eletromagnética maxwelliana*, em virtude das tentativas frustradas de unificá-las, conforme destacamos acima. No Século 20, houve várias tentativas de unificá-las (desta vez usando a Geometria), porém, também sem sucesso⁵³.

Na década de 1930, a unificação entre as forças da Natureza até então conhecidas (gravitacional e eletromagnética) tornou-se mais complicada com a descoberta de mais duas forças:

⁵¹ Martins, R. de A. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 10, UNICAMP, 1986. p. 87; WHITAKER, op. cit., 1951.

⁵² MISNER, C. W.; THORNE, K. S.; WHEELER, J. A. **Gravitation**. W. H. Freeman and Company, 1973.

⁵³ BASSALO, J. M. F.; CARUSO, F. **Einstein**. Livraria da Física, 2013.

a *fraca* e a *forte*. A primeira, formulada pelo físico italiano Enrico Fermi (1901-1954; PNF, 1938), em 1934, para explicar o *decaimento* β [o *nêutron* (n) transforma-se em um próton (p), com a emissão de um elétron (a partícula $\beta \equiv e^-$) e do *neutrino do elétron* (ν_e) (hoje se sabe que é o *antineutrino* $\bar{\nu}_e$)]⁵⁴. Note-se que, antes, em 1932, a descoberta do *nêutron* pelo físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935), em 1932⁵⁵, como uma das partículas constituintes do núcleo atômico rutherfordiano, juntamente com o *próton*, provocou uma grande dificuldade para os físicos, qual seja, a de explicar a razão de os prótons não se repelirem pela força coulombiana (eletromagnética) no interior do núcleo. Essa dificuldade foi resolvida pelo físico japonês Hideaki Yukawa (1907-1981; PNF, 1949), em 1935⁵⁶, ao propor que, no interior do núcleo atômico, existia uma nova força na Natureza, a *força nuclear* (mais tarde chamada de *força forte*) que era de curto alcance e mediada por uma partícula de massa intermediária entre a massa do *elétron* (m_e) e a massa do *próton* (m_p), razão pela qual a mesma ficou conhecida, inicialmente, como *yukon*, *mesotron* e, hoje, *méson* μ (*múon*). Note-se que a existência dessa partícula foi confirmada nas experiências realizadas, em 1947 (*Nature* 159, p. 694), 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, *píons*) e *secundários* (*múons*). Observe-se que, a descoberta de mais duas forças (interações) na Natureza, a *fraca* e a *forte*, elevava para quatro (4) o número das forças naturais: *gravitacional*, *eletromagnética*, *fraca* e *forte* e que são bem distintas, dada pela seguinte relação: 1 (*forte*), 10^{-2} (*eletromagnética*); 10^{-6} (*fraca*); e 10^{-39} (*gravitacional*).

Durante mais de 20 anos, essas quatro forças (interações) permaneceram independentes, pois, conforme vimos anteriormente, a tentativa de unificar (via geometrização) as duas primeiras (gravitacional e eletromagnética), foi malograda. Diferentemente dessa via geométrica, a tentativa de unificar aquelas forças começou a ser viabilizada graças ao desenvolvimento das *Teorias de "Gauge"* ("Calibre"). Vejamos como isso ocorreu. Em 1954⁵⁷, os físicos, o sino-norte-americano Chen Ning Yang (n.1925; PNF, 1957) e o norte-americano Robert Laurence Mills (n.1927), propuseram uma *Teoria de "Gauge" não-Abeliana* para estudar a *interação forte*. [Registre-se que, em 1955, o físico inglês Ronald Shaw (n.1929) defendeu sua Tese de Doutorado, sob a orientação do físico paquistanês Abdus Salam (1926-1996; PNF, 1979), na qual havia uma proposta semelhante à de Yang-Mills]. No entanto, por não ser renormalizável para *bósons* [partículas que têm spin zero ou inteiro, e que obedecem à *Estatística de*

⁵⁴ BASSALO, J. M. F.; CARUSO, F. **Fermi**. Livraria da Física, 2013.

⁵⁵ **Proceedings of the Royal Society of London**, A136, p. 696; 735, 1932.

⁵⁶ **Proceedings of the Physical Mathematics Society of Japan**, v. 17, p. 48, 1935.

⁵⁷ **Physical Review**, v. 96, p. 191, 1954.

Bose-Einstein (1924)] massivos, essa *Teoria de Yang-Mills-Shaw* (TYMS) não poderia descrever as *interações fracas*, já que essas são mediadas por partículas massivas, conforme a proposta apresentada pelo físico sueco Oskar Benjamin Klein (1897-1977), em 1938⁵⁸. Segundo essa proposta, o decaimento β seria mediado por *bósons vetoriais* (spin = 1) massivos e carregados, aos quais denominou de ω (hoje, W). Assim, para Klein, esse decaimento seria dado por: $n \rightarrow p + \omega^- \rightarrow p + e^- + \nu$.

A ideia de as *interações fracas* serem mediadas por *bósons vetoriais* aventadas por Klein, conforme vimos acima, foi retomada, em 1957⁵⁹, pelo físico norte-americano Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965) e, em 1958⁶⁰, pelos físicos norte-americanos Richard Phillips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) e Murray Gell-Mann (n.1929; PNF, 1969), em sua proposta da famosa *Teoria V-A*, que universalizou a *interação fraca*, e segundo a qual esse tipo de interação poderia ser devido à troca dos bósons kleinianos. Estimulado pela leitura do trabalho de Feynman-Gell-Mann, o físico brasileiro José Leite Lopes (1918-2006), ainda em 1958⁶¹, publicou um artigo no qual considerou que a constante de acoplamento da interação eletromagnética (*constante de estrutura fina* $\alpha \approx 1/137 \approx 10^{-2}$) com a matéria seria igual à constante de acoplamento da interação fraca (G_W) também com a matéria, isto é: $\alpha = G_W$. Desse modo, Leite Lopes propôs que a interação elétron-nêutron só poderia ser realizada por intermédio de um bóson vetorial neutro, o hoje conhecido Z^0 , chegando a estimar a sua massa em $\sim 60 m_p$ ⁶².

A unificação das forças eletromagnética e fraca especulada nos trabalhos referidos acima foi finalmente formalizada nos artigos do físico norte-americano Steven Weinberg (n.1933; PNF, 1979), em 1967⁶³ e de Salam, em 1968⁶⁴, a conhecida *Teoria Eletrofraca*. Segundo essa teoria, baseada no grupo $SU(2) \otimes U(1)$, a “força eletrofraca” é mediada por quatro *quanta*: o *fóton* (γ), partícula não-massiva e mediadora da interação eletromagnética e os bósons vetoriais (W^\pm, Z^0) (a notação de Z^0 foi sugerida por Weinberg), de massas respectivas: $\approx 87 m_p$ e $\approx 97 m_p$. Registre-se que nessa *Teoria de Salam-Weinberg* (TSW), as constantes de acoplamento das interações eletromagnética (α) e fraca (G_W) são relacionadas por: $\alpha = G_W \sin^2 \theta_W$, onde θ_W é o *ângulo de Weinberg*. E mais ainda, nessa TSW, inicialmente as partículas W^\pm, Z^0 e γ têm massa nula e estão sujeitas à simetria “gauge”.

⁵⁸ *Journal de Physique et le Radium*, v. 9, p. 1, 1938.

⁵⁹ *Annals of Physics*, NY 2, p. 407, 1957.

⁶⁰ *Physical Review*, v. 109, p.109, 1958.

⁶¹ *Nuclear Physics*, v. 8, p. 234, 1958.

⁶² BASSALO, J. M. F.; CARUSO, F. *Feynman*. Livraria da Física, 2013.

⁶³ *Physical Review Letters*, v. 19, p. 1264, 1967.

⁶⁴ *Proceedings of the Eighth Nobel Symposium*, p. 367, 1968.

A TSW voltou a ser objeto de pesquisa por parte do físico japonês Yoichiro Nambu (n.1921; PNF, 2008) ao descobrir, em 1960⁶⁵, a *quebra de espontânea de simetria* naquela teoria, usando uma analogia com a *supercondutividade* [descoberta em 1911 (*Communications from the Physical Laboratory of Leiden* 122B e 124C), pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926; PNF, 1913), em que os condutores apresentam resistência elétrica quase nula]. A descoberta de Nambu foi confirmada, em 1961, pelo físico inglês Jeffrey Goldstone (n. 1933)⁶⁶ e, também, por Nambu e G. Jona-Lasínio⁶⁷. Esses trabalhos mostravam que essa *quebra de simetria* era acompanhada de partículas não-massivas, logo denominadas de *bósons de Nambu-Goldstone* (bN-G) ou, simplesmente, *bósons de Goldstone* (bG), também conhecido como *Teorema de Goldstone* (TG). Logo em seguida, em 1962⁶⁸, Goldstone, Salam e Weinberg mostraram que a existência desses bósons era um resultado geral da *Teoria Quântica de Campos*. Em 1964, em trabalhos independentes, os físicos, o inglês Peter Ware Higgs (n.1929; PNF, 2013)⁶⁹, os belgas François Englert (n.1932; PNF, 2013) e Robert Brout (1928-2011)⁷⁰, os norte-americanos Gerald Stanford Guralnik (n.1936) e Carl Richard Hagen (n.1937) e o indiano Thomas Walter Bannerman Kibble (n.1932)⁷¹, encontraram um mecanismo que tornava massivos os bN-G. Esse mecanismo ficou conhecido como *mecanismo de Higgs*, do qual participam o *dubleto Higgs* (H^+ , H^0) e seu respectivo antidubleto (H^- , \bar{H}^0), e que apresentam a quebra espontânea da referida simetria, ocasião em que o fóton (γ) permanece com massa nula, porém W^\pm os adquirem massas por incorporação dos bósons carregados (H^\pm), ao passo que Z^0 adquire massa de uma parte dos bósons neutros ($H^0 + \bar{H}^0$), ficando a outra parte ($H^0 - \bar{H}^0$) como uma nova partícula bosônica escalar (spin 0), o referido *bóson de Higgs* (bH) [ou simplesmente, *partícula Higgs* (H)] cuja massa (m_{bH}) era dada por: $m_{bH} = 166 \text{ GeV}/c^2$ (vide Salam, op. cit.). Essa H é a que gera a *massa higgsiana* de todas as partículas elementares até então conhecidas (mas não gera sua própria massa), e que foi detectada em 2012, com a massa de $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$

⁷².

⁶⁵ **Physical Review Letters**, v. 4, p. 382, 1960.

⁶⁶ **Nuovo Cimento**, v. 19, p. 154, 1961.

⁶⁷ **Physical Review**, v. 122, p. 345; 124, p. 246, 1961.

⁶⁸ **Physical Review**, v. 127, p. 965, 1962.

⁶⁹ **Physics Letters**, v. 12, p. 132, 1964; **Physical Review Letters**, v. 13, p. 508, 1964.

⁷⁰ **Physical Review Letters**, v. 13, p. 321, 1962.

⁷¹ **Physical Review Letters**, v. 13, p. 585, 1962.

⁷² Gregorio Bernardi, Marcela Carena e Thomas R. Junk, Higgs Bosons Theory and Searches. **Physical Review**, D86, article number 010001 (2012)]; M. Della Negra, Peter Jenni e T. S. Virdee. **Journey in the Search for the Higgs Boson: The ATLAS and CMS Experiments at the Large Hadron Collider**. **Science**, v. 338, p. 1560, 21 de dezembro de 2012.

XI. Massa (Matéria) Escura

Em 1937⁷³, o astrônomo búlgaro-suíço-norte-americano Fritz Zwicky (1898-1974) fez uma descoberta espetacular, a hoje conhecida *matéria escura*. Com efeito, examinando os aglomerados (*clusters*) de galáxias, em particular o *aglomerado Coma* (que estudava desde 1933) ele observou que esses aglomerados eram mantidos juntos por uma massa invisível de valor maior do que o das massas das galáxias visíveis. Usando o *Teorema do Virial*⁷⁴, concluiu que a atração gravitacional da massa visível das galáxias era insuficiente para justificar as altas velocidades observadas desses aglomerados. Foi ainda nesse artigo que Zwicky afirmou que os aglomerados de galáxias podem ser usados como “lentes gravitacionais ou einstenianas” (que curvam a passagem da luz: ver item 7). Os resultados de suas observações de galáxias e seus aglomerados foram apresentados por Zwicky em seus dois livros: *Morphological Astronomy* (Springer-Verlag, 1957) e *Discovery, Invention, Research – Through the Morphological Approach* (Macmillan, 1969) (este, autobiográfico).

Mais tarde, em 1988, os físicos, o alemão Christof Wetterich (n.1952)⁷⁵ (autor da proposta de um *Universo Sem Expansão*)⁷⁶ e, independentemente, o norte-americano Bharat Ratra (de origem indiana) e o canadense Phillip James Edwin Peebles (n.1935)⁷⁷ anunciaram que haviam observado, nas galáxias, uma larga fração de um componente de matéria fracamente empilhada (*clustered weakly*) com *pressão negativa*, confirmando a observação realizada por Zwicky. Essa *pressão negativa* indicava uma espécie de “repulsão gravitacional” e que já havia sido introduzida por Einstein, em 1917, como o *termo cosmológico* (de origem geométrica), segundo registramos acima. Porém, para explicar a *pressão negativa* houve necessidade de re-interpretar aquele termo com outro significado físico, qual seja: $\rho_{\text{v\u00e1cuo}} g_{\mu\nu}$, sendo $\rho_{\text{v\u00e1cuo}}$ a *densidade de energia do v\u00e1cuo qu\u00e2ntico*, e acrescentada ao segundo membro da EE tornando-se, portanto, uma espécie de *mat\u00e9ria (massa) escura (estranha)* [ME ou DM (*dark matter*)].

Em 1991⁷⁸, os astrof\u00edsicos ingleses Simon David Manton White (n.1951) e Carlos Silvestre Frenk (n.1951) (de origem mexicana) escreveram um artigo no qual registraram haver observado que, no *aglomerado Coma*, a massa das gal\u00e1xias desse aglomerado (*cluster*) era constitu\u00edda de 30% de b\u00e1rions (pr\u00f3tons e n\u00e9utrons), valor esse muito maior do que o calculado pela TRG. Para explicar essa ME, em 1993⁷⁹, os astrof\u00edsicos Anatoly Klypin, J. Holtzman, Joel R.

⁷³ *Astrophysical Journal*, v. 86, p. 217, 1937.

⁷⁴ GOLDSTEIN, H. *Classical Mechanics*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1959, envolvendo valores m\u00e9dios da energia.

⁷⁵ *Nuclear Physics*, B302, p. 668, 1988.

⁷⁶ *Physical Review*, D89, article number (a.n.) 024005, 2013; *Physical Review*, D2, p. 184, 2014.

⁷⁷ *Physical Review*, D37, p. 3406, 1988.

⁷⁸ *Astrophysical Journal*, v. 379, p. 52, 1991.

⁷⁹ *Astrophysical Journal*, v. 416, p. 1, 1993.

Primack (n.1945) e E. Regös desenvolveram um modelo, segundo o qual 70% da ME são compostas de partículas que interagem fracamente (WIMP – “Weak Interacting Massive Particles”, com massa de $\sim 50 m_p$) e os 30% restantes consistem de uma espécie de “neutrinos estéreis massivos”. Observe-se que, esse modelo envolvendo “neutrinos estéreis” foi confirmado, em 1994⁸⁰, por Y. P. Jing, H. J. Mo, G. Börner e L. Z. Fang e, em 1995⁸¹, Primack, Holtzmann, Klypin e D. O. Caldwell admitiram que esses neutrinos têm massa de $\approx 2,4 \text{ eV}/c^2$. [Lembrar que na *Teoria do Modelo Padrão das Partículas Elementares* (TMPPE), o neutrino não tem massa, e são de três tipos: *eletrônico* (ν_e), *muônico* (ν_μ) e *tauônico* (ν_τ). Sobre a TMPPE, ver: Martinus Veltman, *Facts and Mysteries in Elementary Particles* (World Scientific, 2003); Maria Cristina Batoni Abdalla, *O Discreto Charme das Partículas Elementares* (EdUNESP/FAPESP, 2006)].

Sobre a massa dos neutrinos, é oportuno destacar que o *Prêmio Nobel de Física de 2015* (PNF/2015) foi concedido aos físicos: o japonês Takaaki Kajita (n.1959) e o canadense Arthur (“Art”) Bruce McDonald (n.1943) pela descoberta da *oscilação dos neutrinos*, por intermédio de experiências, envolvendo, respectivamente, os *neutrinos atmosféricos* e os *neutrinos solares*, experiências essas que indicam serem os neutrinos possuidores de massa. [Neutrino Oscillations (*Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2015, The Royal Swedish Academy of Sciences*)].

Nova evidência da ME foi encontrada em 1995, por J. Frieman, C. T. Hill, A. Stebbins e Ioav Waga⁸² e, independentemente, por Patrick Petitjean, Jan Mucket e Ronald Kates⁸³. Também em 1995⁸⁴, Adam Guy Riess (n.1967), W. H. Press e Robert P. Kirshner (n.1949) estudaram o movimento de um grupo de estrelas, o chamado *grupo local*, usando as formas das curvas de luz (*lente gravitacional*, que provoca o desvio da luz que passa próximo de uma determinada massa gravitacional) da supernova do tipo Ia (SN-Ia) (esta é resultante de uma violenta explosão de uma estrela anã-branca, estrela essa que resulta do resíduo de uma estrela que completou o ciclo de vida normal e, portanto, acabou a *fusão nuclear* que a alimentava). Em 1996⁸⁵, Reinhard Genzel, N. Thatte, A. Krabbe, H. Kroker e L. E. Tacconi-Garman estudaram uma possível concentração de ME no centro de nossa galáxia, a *Via Láctea*.

Em 1998⁸⁶, Riess, Alexei V. Filippenko, Peter Challis, Alejandro Clocchiatti, Alan Diercks, Peter M. Garnavich, Ron L. Gilliland, Craig J. Hogan, Saurabh Jha, Kirshner, B. Lei-

⁸⁰ *Astronomy and Astrophysics*, v. 284, p. 703, 1994.

⁸¹ *Physical Review Letters*, v. 74, p. 2160, 1995.

⁸² *Physical Review Letters*, v. 75, p. 2077, 1995.

⁸³ *Astronomy and Astrophysics*, v. 295, p. L8, 1995.

⁸⁴ *Astrophysical Journal Letters*, v. 438, p. L17, 1995.

⁸⁵ *Astrophysical Journal*, v. 472, p. 153, 1996.

⁸⁶ *Astronomical Journal*, v. 116, p. 1009, 1998.

bundgut, Mark M. Phillips (n.1951), David Reiss, Brian P. Schmidt (n.1967; PNF, 2011), Robert A. Schommer, R. Chris Smith, J. Spyromilio, Christopher Stubbs, Nicholas B. Suntzeff (n.1952) e John L. Tonry, componentes do projeto *High-z Supernova Search Team* (H-zSST), ao observarem uma supernova do tipo Ia (SN-Ia) (já estudada por Riess, Press e Kirshner, em 1995, conforme vimos antes), deduziram estar o Universo em expansão acelerada e, portanto, havia a necessidade de usar a *constante cosmológica einsteniana* (Λ) para explicar essa aceleração. Ainda em 1998/1999⁸⁷, Dragan Huterer e Michael S. Turner usaram, pela primeira vez, o termo *energia escura* [EE ou DE (*dark energy*)] para explicar essa aceleração inesperada do Universo, confirmada logo depois, em 1999, pelo projeto H-zSST⁸⁸ e, independentemente, pelo *Supernova Cosmology Project* (SCP) composto dos cosmólogos Saul Perlmutter (n.1959; PNF, 2011), G. Aldering, G. Goldhaber, R. A. Knop, P. Nugent, P. G. Castro, S. Deustua, S. Fabbro, A. Goodbar, D. E. Groom, I. M. Hook, A. G. Kim, M. Y. Kim, J. C. Lee, N. J. Nunes, R. Pain, C. R. Pennypacker, R. Quimby, C. Lidman, R. S. Ellis, M. Irwin, R. G. McMahon, P. Ruiz-Lapuente, N. Walton, B. Schaefer, B. J. Boyle, Filippenko, T. Matheson, A. S. Fruchter, N. Panagia, H. J. M. Newberg e W. J. Couch⁸⁹.

Com o término (em dezembro de 1993) da função do satélite *Cosmic Background Explorer* (COBE) (“Explorador de Radiação Cósmica de Fundo”) [lançado em 18 de novembro de 1989 pela *National Aeronautics Space Administration* (NASA)], esta iniciou outro projeto para explorar o Universo com uma resolução 35 vezes melhor do que a do COBE. Desse modo, em 30 de junho de 2001, ela lançou o satélite *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) (“Sonda Anisotrópica de Microondas Wilkinson”) cuja missão foi encerrada em setembro de 2003. Durante três anos a equipe desse novo satélite examinou os dados por ele enviados e, em março de 2006⁹⁰, a equipe do WMAP [David N. Spergel (n.1961), R. Bean, O. Doré, M. R.olta, Bennett, J. Dunkley, Hinshaw, N. Jarosik, E. Komatsu, L. Page, H. V. Peiris, L. Verde, M. Halpern, R. S. Hill, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, N. Odegard, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack e E. L. Wright] anunciou que o nosso Universo tem a idade de $(13,73 \pm 0,15)$ bilhões (10^9) de anos, que é composto de 23% de ME, 73% de EE e 4% de *matéria bariônica* comum conhecida (explicada pela TMPPE). Além do mais, sua velocidade de expansão é de 21,8 km/s, por milhão de anos-luz, e sua densidade de massa crítica vale $\Omega = 1,024 \pm 0,015$, o que confirma a quase “planura euclidiana” de nosso Universo

Ainda em 2006⁹¹, os astrônomos Douglas Clowe, Marusa Bradac, Anthony H. Gonzalez, Maxim Markevitch, Scott W. Randall, Christine Jones e Dennis Zaritsky estudaram o resultado da colisão entre dois aglomerados de galáxias, ocorrida há cerca de 100 milhões de

⁸⁷ arXiv:astro-ph/0108103v1, August (1988); Physical Review D60, p. 081301 (1999)]

⁸⁸ *Astronomical Journal*, v. 117, p. 707, 1999.

⁸⁹ *Astrophysical Journal*, v. 517, p. 565, 1999.

⁹⁰ *Astrophysical Journal Supplement*, v. 170, p. 377, 2007.

⁹¹ *Astrophysical Journal*, v. 648, p. L109, 2006.

anos. O resultado final dessa colisão deu origem ao aglomerado conhecido como *projétil (bullet)* – 1E0657-556, considerado como uma *prova empírica direta da existência da matéria escura*⁹².

A busca da explicação da ME continua conforme indicam os astrofísicos norte-americanos Bogdan A. Dobrescu (n.1968) (de origem romena) e Don Lincoln (n.1964), em recente artigo intitulado: *Mistérios Ocultos do Cosmos*⁹³. Segundo esses cientistas, a ME pode se apresentar de formas variadas e estranhas, podendo ser constituída de uma única partícula (p.e.: WIMP) ou de uma infinidade delas, e com propriedades estranhas ao mundo físico em que vivemos. Além do mais, ela(s) estaria(m) sujeita(s) a uma variedade de forças de interação entre elas, porém interagindo muito fracamente com a matéria comum que conhecemos [basicamente: *prótons* (p), *nêutrons* (n) e *elétrons* (e)], daí ainda não existir nenhuma comprovação experimental definitiva de sua existência. Como essa comprovação acontece em *detectores de carga elétrica*, então os estudiosos da ME admitem que ela possa transportar uma “carga escura” [positiva e negativa, porém, segundo os astrofísicos Lotty Ackerman, Mathew R. Buckley, Sean M. Carroll e Marc Kamionkowski mostraram, em 2009⁹⁴, essa “carga” era muito pequena, cerca de 1% da carga do elétron] capaz de atraí-las ou repeli-las [como acontece com a *carga elétrica* que conhecemos [p (+) e o (-)]. Assim, se elas agirem como fazem as cargas elétricas comuns, haveria então a possibilidade de criar uma QEDD (*Quantum Electrodynamics Dark*) cuja partícula responsável pela interação entre elas seria um “*fóton escuro*” (*dark photon*). Assim, quando a “matéria escura” encontrasse a “antimatéria escura”, haveria a formação de “*fótons escuros*”, devido ao “*aniquilamento escuro*”, processo semelhante ao “*aniquilamento claro*” { e^- (elétron) + e^+ [anti-elétron (pósitron)] $\rightarrow \gamma$ } da QED.

XII. Afinal: O que é Massa?

Antes de conjecturarmos uma resposta para a pergunta acima, faremos três comentários: 1) Massa Quântica; 2) Massa do nucleón (próton/nêutron); 3) Padrão da massa. O primeiro comentário decorre da aplicação da *Mecânica Quântica de de Broglie* (1926)-*Bohm* (1952), por exemplo, ao movimento de um pacote de onda gaussiano em um campo elétrico ou gravitacional, e o de um elétron estendido (com dimensões maiores do que o raio clássico do elétron: $\sim 0,5 \times 10^{-10}$ m). Tais aplicações mostram que o atributo da *massa* pode ser visto como um *efeito quântico* derivado do *potencial quântico de Bohm* (V_{QB}) [Peter R. Holland, *The Quantum Theory of Motion: An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 1993)]. É interessante ressaltar que uma possível relação

⁹² Para maiores detalhes dessa descoberta, ver: **SPACE.com** (23 de agosto de 2006) e **Ciência Hoje**, v. 39, p. 231, outubro 2006.

⁹³ **Scientific American Brasil**, v. 159, p. 35, Agosto 2015.

⁹⁴ **Physical Review**, D79, a.n. 023519, 2009.

entre as massas de partículas elementares (m) e h , foi demonstrada por Schilling, no artigo: The Precise Determination of Mass through the Oscillations of a Very High- Q Elec

Vejamos o segundo comentário. Considerando a TMPPE (Veltman, op. cit.; Abdalla, op. cit.), o *próton* (p) (cuja massa $m_p \approx 938 \text{ MeV}/c^2 \approx 938 \text{ MeV}$, pois, a partir daqui iremos considerar $c = 1$) é formado por dois *quarks* (u) e um (d) (uud) e, considerando-se as massas desses *quarks*, teremos que: $m_p = 2 m_u + m_d = 2 \times 5 \text{ MeV} + 10 \text{ MeV} = 20 \text{ MeV}$. Tomando-se o valor de m_p , resulta: $20/938 \approx 0,0213$. Por sua vez, para o *nêutron* (cuja massa $m_n \approx 939 \text{ MeV}$), constituído de um *quark* (u) e dois (d) (udd), tem-se: $m_n = m_u + 2 m_d = 5 \text{ MeV} + 2 \times 10 \text{ MeV} = 25 \text{ MeV}$. Usando-se o valor de m_n , decorre que: $25/939 \approx 0,0266$. Desse modo, os *quarks* só colaboram com aproximadamente 2% da massa do nucleón ($m_{p/n}$). Surge então a pergunta: e os $\approx 98\%$ de onde saem? A resposta seria então que ela decorre da massa dos *glúons* (g) (m_g) que ligam esses *quarks*. Mas, como $m_g = 0$, então, como sair desse impasse? Em recente artigo [A Cola Que Nos Une⁹⁵, os físicos Rolf Ent, Thomas Ullrich e Raju Venugopalan explicam esse impasse dizendo que, quando *nucleóns* (p e n) se chocam em velocidades extremas, seus *glúons* (g) se dividem em pares de novos g , cada um com energia ligeiramente menor do que a de seus antecessores e, assim, sucessivamente. Porém, segundo esses autores, essa formação não é “*ad aeternum*”, e ela estaciona (por algum aviso da Natureza?!, perguntamos!) em um “estado saturado de glúons”. Além do mais, várias formas de matéria também podem ser produzidas devido a colisões entre íons ultra-pesados em velocidades ultra-relativísticas. Dentre elas, temos: *quark-gluon plasma* (QGP) (“plasma de quark-glúon”); *color glass condensate* (“condensado de vidro de cor”), *glasma*; e *quarkyonic matter* (“matéria quarkiônica”)⁹⁶, estados esses que, basicamente, são constituídos por *quarks* e *antiquarks* imersos em uma nuvem de *glúons* com velocidades ultra-relativísticas.

Desse modo, para completar a $m_{p/n}$ (em nosso entendimento), esses *glúons* devem ser “vestidos” [e muito bem “vestidos”, à maneira das “excitações elementares” usadas na Física (p.e.: o *plasmon*, visto no item IX) com uma “*massa efetiva gluônica* – $m_{g/p}$ ” para juntarem dois *quarks* u e um *quark* d para formar o *próton*, e outra “*massa efetiva gluônica* – $m_{g/n}$ ” (ligeiramente maior do que a $m_{g/p}$) para unirem dois *quarks* d e um *quark* u e resultar no *nêutron*, justificando assim a diferença de massa ($\approx 1 \text{ MeV}$) [que será decorrente de um *quark* (p) ser carregado e o outro (n) não?, voltamos a perguntar] entre esses dois *nucleóns*. É interessante observar que Ent, Ulrich e Venugopalan (op. cit.), sugerem que um mapeamento completo da posição, velocidade e spin de *glúons* e *quarks* (realizado por um futuro “*femtoscópio*” – uma espécie de microscópio para observar *femtômetros*: $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$) possam ajudar a entender a $m_{p/n}$.

⁹⁵ **Scientific American Brasil**, v. 157, p. 48, julho de 2015.

⁹⁶ Ver Biografia do físico norte-americano Larry Dean McLerran (n.1949), na Wikipédia.

Por fim, vejamos o *padrão da massa*. Em recente entrevista⁹⁷, esse físico alemão, nascido em 1943 e *Prêmio Nobel de Física* de 1985, afirmou que, embora os dois padrões do *Sistema Internacional (SI)* [*metro(m)/qui(ki)lograma(kg)/segundo(s)*], ou seja, o *metro* e o *segundo*, já sejam conhecidos em função de grandezas quânticas envolvendo a *constante de Planck* (h), o terceiro padrão, o *quilograma* [*massa de um cilindro equilátero, de 39 mm de altura e 39 mm de diâmetro, construído de uma liga de 90% de platina (Pt) e 10% de irídio (Ir), depositado no Museu Internacional de Pesos e Medidas (MIPM), localizado em Sèvres, próximo de Paris*], é um protótipo universal, com reproduções espalhadas no mundo e, que, de vez em quando, são comparadas e reajustadas. Contudo, como não se sabe a razão dessas variações: aumento ou diminuição do valor do padrão e suas cópias, segundo von Klitzing, o padrão francês está sendo usado para obter o valor de h e, desse modo, por meio desse valor e usando uma balança de grande precisão (*balança de Watt*, que compara medidas de potências: elétrica e mecânica), o *quilograma padrão* poderá ser escrito em termos de h ⁹⁸.

Em vista do que foi exposto neste artigo, cremos que a resposta para a sua pergunta, é:

Ninguém sabe!

Será que o leitor concorda com essa resposta?

⁹⁷ Everton Lopes, Marco Moriconi e Cássio Leite Vieira, Klaus von Klitzing: O Físico Constante, **Ciência Hoje**, v. 55, p. 328, Agosto 2015.

⁹⁸ Para detalhes sobre essa expectativa (que inclui o Efeito Hall Quantizado Inteiro, descoberto por von Klitzing, em 1980), ver os seguintes artigos: José Maria Filardo Bassalo, Revisitando o Sistema MKS/SI: Metro (m), Quilograma (kg) e Segundo (s) e Efeito Hall: Clássico e Quântico e os Prêmios Nobel de Física de 1985 e 1998, que podem ser consultados no seguinte site: www.searadaciencia.ufc.br.