

Os princípios fundamentais ao longo da História da Física

(*The fundamental principles of physics and the History of Physics*)

José Plínio Baptista¹

Departamento de Física, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil

Recebido em 23/2/2006; Aceito em 29/5/2006

Ressaltamos a natureza empírica dos princípios da Física, enfatizando sua independência quanto à sua aplicabilidade, característica que os acompanham ao longo da história da própria Física. Fazemos também uma revisão das diferentes roupagens destes princípios no desenvolvimento de algumas teorias físicas.

Palavras-chave: história da ciência, história da física, mecânica clássica.

We point out the empirical nature of the fundamental principles of physics and emphasize the independence of this principles from theories and its formalization. We give also different expressions for these principles associated to different formulations of some physical theories.

Keywords: history of science, history of physics, classical mechanics.

1. Introdução

As ciências naturais, a Física principalmente, têm suas estruturas construídas sobre bases sólidas recobertas por uma malha teórica que liga todos os elementos ao complexo total. É uma ciência empírica que, naturalmente se apóia nos dados da observação e constrói sua estrutura teórica por meio do método indutivo.

Estas bases sólidas são constituídas pelos *Princípios*. Estes princípios revelam o que há de mais objetivo em toda construção científica, e a posse do seu conhecimento traz ao seu possuidor a noção clara e segura dos fundamentos da ciência. A Física é o exemplo mais claro desta afirmativa.

Todo discurso científico sobre fatos ou fenômenos descritos ou interpretados teoricamente se faz acompanhar, praticamente em todas as etapas do discurso ou dedução teórica, da inevitável presença de algum princípio. Por exemplo:

Dois corpos distintos não podem ocupar o mesmo lugar no espaço e ao mesmo tempo.

É o princípio da impenetrabilidade da matéria. Ou, do mesmo gênero, se diz que:

Um corpo não pode ocupar ao mesmo tempo dois lugares distintos no espaço.

Estas são afirmativas elementares que estão impregnadas na nossa mente e que dispensam quaisquer co-

mentários ou justificativas sobre a sua presença nos discursos. Entretanto são princípios, de igual natureza que as mais sofisticadas afirmativas do mesmo gênero.

Um princípio em Física, decorre na maior parte dos casos, da observação direta do que ocorre na natureza, ditado pelo encadeamento dos fenômenos e não é consequência de nenhuma dedução lógica, o que significa que um princípio não se explica, não se interpreta. O filósofo positivista Ernst Mach, em seu estudo da mecânica deixa claro o *status* do conceito quando afirma [1]:

Quando em todos os fatos observados nós encontramos sempre, e de uma maneira perfeitamente clara e certa, um princípio que não é demonstrado mas tal que podemos constatar a existência, nós penetramos muito mais profundamente na concepção lógica da natureza reconhecendo a existência deste princípio do que nos deixando levar por um arremedo de demonstração.

Um exemplo ilustrativo desta sentença nos é fornecido por Einstein no ato da fundação da teoria da relatividade, que, após meditar nos resultados de certas experiências, afirmou que:

A velocidade da luz é uma constante universal.

¹E-mail: pliniobaptista@terra.com.br.

A aceitação desta afirmativa como um princípio da Física, possibilitou Einstein compreender todos os fenômenos decorrentes da comparação entre medidas feitas por observadores distintos e situados em referenciais em movimentos relativos e a conseqüente generalização da mecânica newtoniana, criando uma mecânica relativística.

Dependendo do aprimoramento do edifício científico de uma teoria onde um determinado princípio se aplica, é possível expressar matematicamente este princípio, ou seja, encontrar uma maneira de apresentá-lo sob forma compacta e elegante. Muitas vezes a roupagem dada ao princípio é tão bem apresentada que um leitor desavisado pode facilmente ser levado à idéia de que tal princípio decorre logicamente da teoria, o que é incorreto. Por outro lado, encontramos exemplos de princípios que perdem seu status por serem obtidos como conseqüência direta de uma teoria mais geral. É o caso do *princípio de Arquimedes*, cuja expressão pode ser deduzida por aplicação da teoria newtoniana dos meios contínuos. É um teorema, que explica e interpreta este antigo princípio. Além do mais e como veremos em inúmeras ocasiões, as teorias elaboradas e fundamentadas em princípios são construídas em perfeita conformidade com os princípios que as precedem. Porém, como o dissemos mais acima, um princípio não pode ser nem explicado nem interpretado. Se o for, deixa de ser um princípio.

Vamos examinar, nos capítulos seguintes, os diferentes princípios, seus conteúdos e suas expressões formais.

2. Os princípios ao longo da história da Física

Apesar da carência de instrumentos e meios observacionais, os antigos filósofos se valiam de princípios que os guiavam na elaboração de suas teorias sobre o mundo, principalmente o mundo físico.

Do ponto de vista prático estes princípios funcionam como um critério que permite identificar o modo como a natureza funciona, como um critério de separabilidade visando isolar, entre os processos imagináveis que possam ocorrer na natureza, aqueles considerados como cientificamente viáveis. São, poderíamos dizer, condições restritivas.

A construção do saber ao longo da História proporcionou várias ocasiões onde o homem tomou contacto com condições restritivas que disciplinam seu esboço da estrutura teórica da natureza. Estas condições restritivas têm origem em épocas bastante remotas da história do pensamento científico, como exprime o aforisma formulado na aurora daqueles tempos,

Do nada, nada se tira.

e a sua validade perdura no espírito humano, mesmo nos tempos atuais em que a ciência atinge um alto grau de sofisticação.

Na cosmogonia religiosa ocidental, existem duas grandes correntes conflitantes e tais que, uma confirma o aforisma, enquanto que a outra o rejeita.

A cosmogonia que rejeita esta proposição é a cosmogonia originária do pensamento judaico-cristão. Sob esta perspectiva, o universo foi criado do nada. E assim, do nada se tirou tudo! Do nada fez-se a luz, as águas, as terras, as estrelas e todos os astros do universo. O próprio tempo, segundo Santo Agostinho, foi criado nessa ocasião.

A outra corrente é formada por todas as seitas que derivam, direta ou indiretamente, do neo-platonismo. Nestas, coerentemente com a filosofia de Platão, Deus, partindo da matéria primordial, *já existente*, deu-lhe forma e função, e construiu o universo. O próprio tempo já existia segundo esta filosofia, porém Deus criou os astros para que seus movimentos em torno do centro do mundo pudessem servir para preservar o *número do tempo*. (Timeu de Platão, [2]).

Nesta filosofia de Platão o universo é eterno, incorruptível, e todo seu conteúdo material corresponde exatamente à medida da quantidade total da matéria primordial usada na sua formação. A idéia central é a transformação, onde se exclui a criação e a destruição de matéria

Uma teoria, não religiosa e com estas características, apareceu na formulação da cosmogonia de Anaximandro de Mileto (séc.VI a.C.), [3]. A substância primordial de sua teoria, o *Ápeiron*, sofrendo a ação de algum processo, gera, a partir dele próprio, toda a matéria do universo bem como sua organização. Com o passar do tempo este universo se corrompe, e recompõe a matéria primordial, reintegrando o *Ápeiron*. Em outras palavras “tudo provém do *Ápeiron* e tudo retorna ao *Ápeiron*”. Nada é destruído, mas transformado.

Esta restrição, imposta às transformações que ocorrem envolvendo a matéria do universo, gerou um dispositivo teórico de valor essencial para a ciência moderna, em especial para a Física. Trata-se das Leis ou Princípios de Conservação, como veremos mais adiante.

Podemos constatar que todos os filósofos que elaboraram teorias cosmogônicas propondo a descrição da formação do universo respeitaram rigorosamente ao princípio de que *do nada, nada se tira*. Encontramos explicitamente nas teorias de Tales, Anaxímenes, Demócrito, Empédocles, Anaxágoras, para mencionar só os chamados pré-socráticos [3].

Destes, Anaxágoras teve um papel especial por que queria adotar como matéria primordial um corpo infinito formado pelas sementes que continham todas as propriedades da matéria que hoje encontramos no mundo. E para isso ele teria que comprovar a inexistência do vácuo, este grande vazio que existe entre as coisas, entre o Sol, a Lua e a Terra etc., que se acreditava ser ar, na concepção então vigente. Anaxágoras tomou uma vasilha, um vaso e mergulhou na água com a boca para baixo e notou que a água não preenchia

tudo o espaço do interior da vasilha. Fez um orifício no fundo do vaso e quando o mesmo foi emborcado na água retirou a tampa do orifício e a água tomou todo o interior do vaso. E com isto ele provou que o ar é *corpóreo* e que a água antes não penetrava porque corpos diferentes *não podem ocupar o mesmo lugar no espaço ao mesmo tempo*.

Ou seja, a aplicação de um singelo princípio da Física permitiu ao filósofo descobrir o importantíssimo fato revelando a natureza do ar.

3. Princípios de conservação

Entre os princípios da Física já descobertos e formulados em termos teóricos se destacam os chamados Princípios de Conservação que estabelecem a preservação de grandezas independentes do ponto de vista do observador ou da maneira de representar estas grandezas. Estes princípios são fundamentais para a construção da teoria da ciência.

Por outro lado, o enunciado de um princípio mesmo sendo ele de natureza totalmente empírica pressupõe o uso mínimo de teoria na expressão formal das grandezas envolvidas no texto do princípio. É o caso clássico da velocidade ou da quantidade de movimento de uma partícula. Entretanto, isto não significa que o princípio seja uma consequência de alguma teoria.

Os enunciados modernos, expressando os princípios de conservação, ganharam seus aspectos formais a partir do renascimento, surgindo sobretudo nas ciências de fundamentos empíricos, como a Física, Química, ou a Biologia. No que concerne à Física o domínio de aplicabilidade dos seus princípios se estende à mecânica celeste, à astrofísica e até à cosmologia.

Vários princípios de conservação foram descobertos e expressos formalmente ao curso da evolução histórica das ciências, e, na Física, estes princípios ganharam roupagem e linguagem matemática cuja forma evidentemente depende do estágio da evolução da teoria Física. De um modo geral na mecânica estes princípios se apresentam formalmente como:

1. Princípio da conservação da massa.
2. Princípio da conservação do momento total.
3. Princípio da conservação da energia.

Como veremos mais adiante, estes princípios à luz das teorias modernas, se relacionam em seus fundamentos de forma a comporem um princípio teórico geral de conservação. As ciências de bases empíricas encontraram, ao curso de sua evolução, os mais variados princípios de conservação, cujas validades, porém, se

restringem à natureza das interações que eles estão envolvidos. Os princípios explicitamente indicados acima têm a característica fundamental de se revelarem de aplicação universal, independente da natureza das interações.

3.1. A conservação da massa na Química²

O primeiro princípio envolvendo a matéria e suas transformações foi descoberto pelo químico francês A.L. Lavoisier (1743-1794)³. Lavoisier é considerado o pai da Química moderna e as suas pesquisas contribuíram fundamentalmente para emancipar a Química dos resquícios ainda medievais que tolhiam o seu desabrochar como ciência moderna. Além de uma volumosa produção científica, Lavoisier confirmou experimentalmente alguns resultados anteriores, como por exemplo, dos trabalhos de J. Priestley (1733-1804) e H. Cavendish (1731-1810)⁴. Lavoisier repetiu suas experiências sobre a composição da água e, confirmando seus resultados, deu nomes modernos a seus componentes - para o ar inflamável: hidrogênio, gerador de água - e para o ar deflogisticado: oxigênio, gerador de ácidos.

Porém a mais famosa conquista de Lavoisier foi a descoberta *experimental* de que:

a massa total dos componentes em uma reação química é invariável, sempre se conserva, qualquer que seja a reação química realizada⁵.

É a famosa *lei da conservação da matéria*.

Verificou-se mais tarde que esta descoberta não é apenas uma lei restrita à Química, mas que ela está contida num dos princípios mais importantes de toda a Física, pois, como será mostrado, ela é o fundamento de um princípio de conservação formulado um século e meio mais tarde, no contexto da teoria da relatividade, por Albert Einstein (1879-1955).

3.2. Conservação do momento linear

René Descartes (1596-1642), considerado o pai da filosofia moderna, produziu inúmeras contribuições à ciência, além de exibir ao mundo seu sistema filosófico baseado na famosa *dúvida cartesiana*.

A sua maior descoberta na Física foi o Princípio de Inércia e na mesma oportunidade em que enuncia este princípio ele introduz, simultaneamente, o Princípio da Conservação do momento linear ou da quantidade de movimento. Vamos transcrever os enunciados cartesianos [4]:

²Apesar de estarmos concentrados no estudo dos princípios em Física, inserimos este exemplo em Química por que este princípio de conservação posteriormente estará contido na expressão mais geral da conservação da energia em Física.

³Lavoisier, por ter sido coletor de impostos durante a monarquia, foi condenado à morte pelo tribunal da revolução francesa. Foram feitas muitas petições em seu favor, alegando seu prestígio científico e os serviços prestados à ciência. O juiz, alegando que "a república não necessita de sábios" mandou que se cumprisse a lei.

⁴Descobrem o *ar fixo* e o *ar inflamável*, bióxido de carbono e o hidrogênio respectivamente.

⁵Nos manuais escolares é sempre expressa na frase: 'na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma'.

1. Deus, quando criou o universo de extensão infinita lhe conferiu também um movimento. A quantidade de movimento total criada é imutável, não podendo aumentar nem diminuir; porém, localmente, o movimento de um corpo pode ser alterado pela troca com outro e enquanto um deles perde movimento o outro ganha a mesma quantidade.
2. Cada corpo permanece em seu estado de movimento retilíneo – que é a forma geométrica mais simples criada por Deus ao dar partida ao movimento geral – permanecendo neste estado até que o corpo seja afetado por uma força externa.

Esta última sentença é *cientificamente* conhecida como Princípio de Inércia e pode ser representada explicitamente pela primeira lei do movimento enunciada por Newton na sua obra *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*.

Exercendo um abuso de liberdade didática poderíamos dizer que a sentença número 2 traduz também uma lei de conservação que poderia ser enunciada como: *Princípio da Conservação do estado de movimento de uma partícula isolada*.

Já a primeira sentença declara que nas condições pré-estabelecidas, isto é, num sistema isolado, a quantidade de movimento total é uma constante, ou seja, se esta quantidade tiver a magnitude \mathbf{P} num dado instante o seu valor será \mathbf{P} em qualquer instante posterior⁶.

O momento linear, ou quantidade de movimento, de um corpo de massa m e velocidade \mathbf{v} , é definido por Descartes como $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$. Consideremos então um conjunto isolado de n partículas de massas e velocidades iguais a $m_1, m_2, \dots, e \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots$, então o momento linear total deste sistema isolado de partículas será dado por [6]

$$\mathbf{P} = m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 + \dots + m_n\mathbf{v}_n = C.$$

Por outro lado, se, durante a evolução do sistema, as partículas tiverem suas velocidades alteradas, como por exemplo, $\mathbf{v}_1 \rightarrow \mathbf{v}'_1, \mathbf{v}_2 \rightarrow \mathbf{v}'_2$, etc., a soma dos momentos lineares será ainda constante, ou seja,

$$m_1\mathbf{v}'_1 + m_2\mathbf{v}'_2 + m_3\mathbf{v}'_3 + \dots + m_n\mathbf{v}'_n = \mathbf{P}' = C.$$

Estas mudanças de velocidades das partículas podem ser causadas por colisões entre elas próprias, ou pelo fato de que o observador saiu do referencial onde este sistema era observado e passou para um outro referencial animado de um movimento retilíneo e uniforme em relação ao primeiro.

Esta última observação destaca o fato de que o momento linear total de um sistema de partículas isoladas é constante e será também constante *em qualquer*

referencial que se desloque com velocidade retilínea e uniforme em relação ao primeiro. Este é um aspecto importante e reflete explicitamente a contribuição das idéias científicas de Galileu Galilei sobre a relatividade do movimento.

Veremos mais adiante que a aplicação formal deste princípio permite conhecer o estado de um sistema resultante das interações ocorridas entre algumas partículas pertencentes ao sistema, sendo conhecido seus estados iniciais. O Princípio de Conservação se revela, deste modo, um instrumento seguro para a pesquisa teórica.

3.3. Conservação do momento angular

A lei de conservação associada ao movimento de um sistema isolado de partículas assume uma expressão particular se o movimento for de rotação instantânea em torno de um centro. Neste caso ela exprime que a quantidade total de momento angular do sistema isolado é constante, ou seja, se \mathbf{L} for a magnitude do momento angular total do sistema, então este valor será constante no tempo.

O momento angular, ou quantidade de movimento rotacional de uma partícula em relação a um ponto fixo qualquer é, por definição, $\mathbf{l} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ onde \mathbf{r} é o vetor de posição instantânea da partícula em relação ao ponto. Então se $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2 \dots \mathbf{p}_n$ e $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots \mathbf{r}_n$ forem os momentos lineares das partículas com suas posições instantâneas em um sistema isolado, o momento angular total será escrito como $\mathbf{L} = \mathbf{l}_1 + \mathbf{l}_2 \dots \mathbf{l}_n$ que será constante no referencial considerado ou em qualquer referencial animado de um movimento retilíneo e uniforme em relação ao primeiro.

Vemos claramente que estas expressões da lei de conservação envolvendo o momento linear ou o momento angular podem ser obtidas a partir da segunda lei do movimento da mecânica newtoniana, supondo que a soma das forças que atuam na partícula, ou nas partículas, é nula. Porém deve ser bastante esclarecido que isto não significa que a lei da inércia e da conservação do momento são conseqüências das leis de Newton, mas sim que as leis de Newton são *compatíveis* com os princípios cartesianos, os quais, como já foi dito, foram descobertos independentemente das leis newtonianas do movimento. A lei da inércia é um *Princípio* da mecânica, isto é, é uma proposição que exprime um comportamento básico e fundamental de um conjunto de partículas isoladas, independentemente das leis de movimento que as mesmas estão sujeitas.

René Descartes descobriu este princípio antes que Newton formulasse a sua teoria da mecânica. É um dos princípios básicos da Física.

⁶Descartes não tinha uma noção clara do conceito de *massa* de um corpo, o que lhe acarretou dificuldades de interpretação nos exemplos que ele próprio propõe para ilustrar a conservação do momento linear (M. Tonnelat, [5]).

3.4. Conservação das forças vivas

As primeiras relações formais envolvendo o que hoje se conhece como *Energia* foram descobertas por C. Huyghens (1629-1695). Depois de meditar muito sobre a descoberta de Galileu de que todo corpo de peso p deixado cair de uma altura H e ao longo de um plano inclinado atinge a mesma altura H no seu retorno, Huyghens descobriu que o trabalho realizado pelo peso sobre o corpo em queda é igual à metade da *força viva* adquirida pelo mesmo ao longo da queda.

$$pH = \frac{1}{2} m v^2.$$

Esta importante expressão⁷ da relação trabalho-energia foi também descoberta independentemente por outros pesquisadores, em particular por G.W. Leibniz⁸ (1646-1716) que, na ocasião, deu o nome de *Força Viva*, à expressão mv^2 . Mais tarde, Lord Kelvin, W. Thomson (1824-1907), mudou-lhe o nome para *Energia*. Neste caso esta energia recebe o nome de *energia cinética*, energia do movimento.

A expressão escrita mais acima ficou conhecida como o Teorema das Forças Vivas. A generalização desta expressão, estendida às forças variáveis, foi deduzida por Daniel Bernoulli (1700-1782).

O emprego de forças variáveis resulta na expressão que relaciona o trabalho desenvolvido pela força aplicada a uma partícula com a variação total da sua energia cinética ao longo da duração da ação da força.

No caso de um conjunto de n partículas o trabalho de todas as forças atuantes nas partículas produz a variação da energia cinética total do sistema dada por

$$E_f - E_i = W,$$

onde E_i e E_f são as energias cinéticas totais, antes e depois da realização do trabalho. No caso em que o trabalho seja nulo temos que

$$E_i = E_f = Const.$$

Em outras palavras a energia cinética total de um sistema isolado de n partículas é constante. Se, por outro lado, as partículas do sistema se interagirem de maneira que a energia total do conjunto seja a soma da energia cinética total com a energia potencial total, então segue que

$$U - U_O = W,$$

onde U , que é a soma da energia cinética total com a energia potencial total, é a energia interna do sistema de partículas. Em outras palavras se o sistema formado por n partículas for isolado sua energia interna é constante, isto é

$$U = U_O = Const.,$$

onde

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots U_n = \sum_n U_i.$$

Do ponto de vista formal esta relação deverá sofrer uma modificação se o sistema for formado por um número muito grande de partículas. Nestas circunstâncias teremos que tratar de valores médios e, neste caso, a representação da ação do meio exterior sobre o sistema deverá ser composta por uma parte dada pela expressão tradicional do trabalho de uma força e por outra parte por uma grandeza chamada de *Calor*. Veremos este caso especificamente no parágrafo seguinte.

3.5. Primeira lei da termodinâmica

Em 1824, um jovem engenheiro francês, N.L. Sadi Carnot (1796-1831)⁹ publicou os resultados parciais de suas pesquisas sob o título *Reflexões sobre a Potência Motriz do Fogo*, onde, estudando o desempenho das máquinas térmicas, ele concluiu pela existência de uma equivalência constante entre o calor absorvido ou cedido pela máquina e o trabalho gerado ou absorvido no processo. Pouco tempo depois foi a vez de J.P. Joule (1818-1889) comunicar os resultados de suas experiências afirmando que quando uma quantidade de *força viva* é aparentemente destruída, é produzida uma quantidade equivalente de calor, e, além do mais, a relação permanece válida para o processo inverso. É a conhecida Equivalência Térmica do Trabalho ou Equivalência mecânica do Calor¹⁰.

Com a força viva recém batizada com o nome de energia, a lei de equivalência confirma a interpretação dada mais acima de que o calor como sendo uma forma de energia, a energia térmica, considerada como uma energia em trânsito.

Num sistema de muitas partículas e nos processos de trocas de calor e trabalho com o meio exterior, conforme já foi visto, um elemento envolvido no processo e que deve ser levado em conta é a sua energia interna U que agora é expressa em valores médios. Pode-se

⁷Huyghens também não dispunha de uma boa definição de massa de um corpo de maneira que no segundo membro da expressão figurou a relação entre o peso do corpo e a aceleração da gravidade, em lugar da massa [1].

⁸Leibniz publicou um trabalho tentando mostrar que, ao contrário do que foi dito por Descartes, não é o momento linear que se conserva no movimento livre de um corpo, mas a sua "força viva" mv^2 (ver E. Mach, [1], p. 270).

⁹Carnot tinha a idade de 28 anos quando publicou suas reflexões que serviram de base para esta importante disciplina da Física que é a termodinâmica. Faleceu com a idade de 35 anos, colhido por um surto de cólera que assolou a França.

¹⁰Em um artigo publicado nos Cadernos de Hist. e Filos. da Ciência sobre a contribuição de J.R. Mayer à construção do Princípio de Conservação da Energia, R.A. Martins apresenta uma clara situação do empenho e desencontros de Mayer e de vários cientistas na busca desta lei fundamental da natureza [7].

constatar experimentalmente a existência desta energia interna, martelando-se uma peça metálica. O metal produz uma quantidade de calor que é correspondente à variação da energia interna do corpo provocada pela ação do martelo.

O balanço energético destes processos é representado pela equação abaixo. Se o sistema for observado entre dois instantes, fazendo U_i a energia interna total inicial do corpo e U_f a energia interna final, e W o trabalho produzido e Q o calor gerado¹¹, então,

$$U_f - U_i = W + Q.$$

Se chamarmos de ΔU a variação da energia interna, escrevemos [8]

$$\Delta U = W + Q.$$

Esta expressão é a representação formal do Princípio da Conservação da Energia, escrita na forma usual, e é chamada de *Primeira Lei da Termodinâmica*. Novamente estamos em face de um Princípio da Física, um dos princípios mais importantes, representado pela expressão acima que é apenas o registro simples do balanço existente entre as quantidades envolvidas no processo. É uma expressão geral, independente de toda teoria usada para descrever o processo e tem validade universal e que descreve a relação entre todas as formas de energia envolvidas no processo.

Em uma segunda leitura a expressão acima poderia ser escrita do modo semelhante ao que já foi feito para os princípios de conservação vistos anteriormente. As trocas energéticas e interações dos sistemas descritos pela primeira lei da termodinâmica, envolve o sistema e sua vizinhança, que é fornecedor ou receptor de trabalho ou de calor envolvidos no processo. Se definirmos o sistema total S_T formado pelo sistema acima definido e também pela vizinhança

$$S_T = \text{Sistema } S + \text{Vizinhança},$$

podemos considerar o sistema S_T um sistema isolado. Então será possível escrever

A soma total das energias envolvidas num processo qualquer em um sistema isolado é constante e igual a zero,

ou seja

$$\sum E_i = E_1 + E_2 + E_3 = \Delta U + W + Q = Cte. = 0,$$

onde os sinais convencionados anteriormente estão embutidos nos termos da expressão. É preciso sublinhar, repetimos, que as quantidades de energias envolvidas

¹¹O trabalho e o calor envolvidos nesta equação obedecem a uma convenção de sinais: o calor é negativo se o sistema perde calor; o trabalho é negativo se o meio exterior realiza trabalho sobre o sistema.

¹²É exatamente a circunstância descrita por Mach, mencionada mais atrás.

nos processos são conhecidas em valores médios e não são valores instantâneos e por essa razão a constante, diferentemente das expressões da página anterior, tem o valor zero. A expressão acima é apenas uma maneira de apresentar a lei da conservação da energia formalmente semelhante às expressões dos outros princípios já estudados. Porém para uso prático desta lei de conservação, a primeira expressão é mais adequada.

Devemos observar que este balanço energético surge diretamente da experiência, ou seja, não é deduzido de nenhuma teoria¹². É o que se pode denominar essencialmente de uma Lei Empírica. É fácil também verificar que a sua validade é universal e engloba todas as transformações dos sistemas físicos, envolvendo ou não produção de calor. É o que foi chamado por Helmholtz de *Princípio Universal da Natureza*.

Podemos agora notar que na época em que Helmholtz escreveu seu artigo sobre a universalidade do princípio a energia ainda era chamada de *Força* (quando a energia estiver associada ao movimento era chamada de *Força Viva*).

Finalmente devemos lembrar que existe uma coleção imensa de transformações que satisfazem a Primeira Lei da Termodinâmica escrita mais acima. Vamos ilustrar esta situação com dois exemplos simples que nos permitirão tomar uma decisão a respeito destas transformações.

Consideremos um sistema rígido, isolado das vizinhanças, isto é $S_T = S$, formado por dois blocos de mesmo material e em contacto. O bloco (1) está à temperatura T_1 e tem energia interna $U(T_1)$. O bloco (2) apresenta temperatura e energia interna: T_2 e $U(T_2)$ e tais que $U(T_1) > U(T_2)$ com $T_1 > T_2$. Vamos imaginar duas transformações decorrentes do contacto dos dois blocos e que satisfazem, cada uma delas, à equação da primeira lei da termodinâmica.

1ª Transformação:

Imaginemos a transferência de calor Q do bloco (2) de temperatura mais baixa para o bloco (1) de temperatura mais elevada. A primeira lei da termodinâmica diz que

$$Q = \Delta U,$$

respeitados os sinais. Então, teremos para o bloco (1),

$$U(T'_1) = U(T_1) + \Delta U,$$

e para o bloco (2),

$$U(T'_2) = U(T_2) - \Delta U.$$

Adicionando as duas equações vemos que o resultado final mostra que

$$U(T_1) + U(T_2) = U(T'_1) + U(T'_2),$$

ou seja, a energia interna total é constante. É um resultado que condiz com a situação física: num sistema isolado, rígido, a sua energia interna é constante.

2ª Transformação:

Nos mesmos blocos e temperaturas consideremos a transferência de energia térmica no outro sentido, de forma que o bloco (1) perde energia interna e o outro ganha energia interna.

Considerando que a transformação é ainda de uma transferência de energia térmica teremos, pela primeira lei,

$$U(T'_1) = U(T_1) - \Delta U,$$

e para o outro bloco,

$$U(T'_2) = U(T_2) + \Delta U.$$

Novamente adicionando membro a membro, temos

$$U(T'_1) + U(T'_2) = U(T_1) + U(T_2).$$

Vemos que, novamente, a energia interna é constante. Ainda neste caso, identificamos uma temperatura onde as energias internas dos dois blocos se igualam. Temos

$$U(T) = U(T_1) - \Delta U,$$

$$U(T) = U(T_2) + \Delta U,$$

ou seja,

$$2U(T) = U(T_1) + U(T_2).$$

O resultado final mostra que, neste último caso, a energia interna total ainda se mantém constante e igual a duas vezes a energia interna à temperatura média T .

Conclusão: temos duas transformações que satisfazem cada uma em separado à primeira lei da termodinâmica, porém são fundamentalmente diferentes.

Nunca foi experimentalmente observado que um corpo frio aquecesse *naturalmente* um corpo mais quente. Pelo contrário, o que se observa na natureza é o corpo frio ser aquecido pelo corpo mais quente. Em outras palavras, a energia térmica é sempre transferida naturalmente do corpo de temperatura mais elevada para o corpo de temperatura mais baixa. É uma transformação se realizando no sentido natural, e que indica, ao mesmo tempo, o sentido da evolução natural dos estados do sistema, na sua tendência ao equilíbrio.

Com estes dois exemplos podemos imaginar que há uma infinidade de transformações satisfazendo a primeira lei, mas nem todas são fisicamente viáveis. É esta a razão de que tenha se imaginado uma espécie

de lei seletiva que pudesse distinguir a transformação que é fisicamente realizável da que não é. Este critério chama-se *Segunda Lei da Termodinâmica* e foi formulado de diversas formas pelos estudiosos do assunto.

A proposta feita por J.R.E. Clausius (1822-1888) é baseada justamente no fato observado de que

Nenhum corpo pode, naturalmente, aquecer outro corpo de temperatura mais elevada.

Em outras palavras, tomada esta afirmativa como critério para separar os processos fisicamente possíveis, podemos analisar qualquer processo que envolve troca de calor, trabalho e energia interna e concluir que o mesmo será fisicamente inviável se o resultado final do processo implicar na transferência *natural* de calor de um corpo mais frio para outro mais quente.

4. Princípios de conservação relativísticos

Os princípios de conservação têm a propriedade de revelar o que é permanente e imutável na realidade cambiante da natureza. É neste aspecto que reside a qualidade essencial desta importante descoberta científica.

O advento da teoria da relatividade em 1905 introduziu modificações conceituais na Física e exibiu uma nova visão dos princípios de conservação revelando sua significação mais profunda e destacando seu papel fundamental na descrição dos fenômenos da natureza.

4.1. Conservação do momento relativístico

Nesta nova visão, os conceitos básicos, como tempo, espaço, massa e energia, adquiriram novas roupagens e significação que, obrigatoriamente, provocaram importantes modificações nos princípios de conservação e nas suas representações formais.

A nova visão relativística do mundo dos fenômenos físicos trouxe uma mudança radical de modo que o contexto geométrico tridimensional antigo foi substituído pelo espaço quadridimensional: o espaço-tempo. Einstein mostrou que é o evento físico - um ponto no espaço-tempo - que tem uma existência objetiva, sendo portanto convenientemente descrito no tempo e no espaço dentro de uma realidade geométrica a quatro dimensões. Desta forma, como os fenômenos físicos são constituídos de eventos que se sucedem e se harmonizam no espaço-tempo, as leis básicas que descrevem o comportamento essencial das transformações da natureza devem, necessariamente, ser expressas em linguagem quadridimensional para que seu significado formal alcance sua maior generalidade.

Para que se possa exprimir a soma dos momentos lineares de um sistema de partículas, devemos inicialmente escrever as expressões relativísticas do momento e da energia. Tendo em conta que a massa de uma

partícula depende da velocidade, a expressão do momento tridimensional relativístico pode ser escrita como

$$p^i = m v^i \quad (i = 1, 2, 3) \quad \rightarrow \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

onde m_0 é a massa de repouso da partícula.

Esta partícula transporta uma quantidade de energia total dada por

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m c^2.$$

O momento linear (quadridimensional) de uma partícula se apresenta agora como um vetor a quatro componentes e se escreve como

$$P^\alpha = (p^1, p^2, p^3, p^4 = \frac{E}{c}),$$

que engloba na mesma expressão matemática as componentes do momento linear definido mais acima e a energia carregada pela partícula. É o chamado quadri-vetor *impulso-energia*.

Por outro lado a energia total de uma partícula pode ainda ser escrita sob a forma

$$E = c \sqrt{p^2 + m_0^2 c^2},$$

e, sendo E_k a sua energia cinética, a sua energia total também poderá ser escrita como

$$E = E_k + m_0 c^2.$$

Consideremos agora um sistema isolado formado por partículas de momentos lineares $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$, etc., e de energias $E_1 = m_1 c^2, E_2 = m_2 c^2$, etc., então, desprezando as energias das interações, as leis de conservação do momento e da energia se escrevem como

$$\sum_i P_i^\alpha = P_1^\alpha + P_2^\alpha + \dots + P_n^\alpha = K^\alpha,$$

onde K^α são quatro constantes ($\alpha = 1, 2, 3, 4$) e P_i^α são as quatro componentes do vetor *Impulso-energia* da i -ésima partícula, cujas componentes como vimos mais acima são as componentes espaciais dos momentos lineares relativísticos e a componente temporal é a energia total da i -ésima partícula dividida por c .

Embora a expressão formal da lei de conservação se escreva no espaço-tempo de forma compacta, englobando simultaneamente a conservação do momento, da energia e da massa, a sua aplicação prática envolvendo as medidas efetivas das grandezas envolvidas requer a escolha de um referencial onde estas medidas são tomadas. Neste caso, neste referencial a expressão quadridimensional se decompõe em três expressões espaciais e uma temporal.

Para $\alpha = 1, 2, 3$, teremos a conservação dos momentos lineares (relativísticos), e para $\alpha = 4$ temos a expressão da conservação da energia total do sistema

$$P^f = \sum_i p_i^f = K^f \quad e \quad P^4 = \sum_i p_i^4 = K^4,$$

onde K^j e K^4 são quatro constantes. Os índices $f = 1, 2, 3$ caracterizam as três componentes espaciais dos momentos lineares. A segunda relação representa a soma das energias das partículas do conjunto

$$P^4 = \frac{E}{c} = \sum_i \frac{E_i}{c} \quad \rightarrow \quad E = m_1 c^2 + m_2 c^2 + \dots + m_n c^2 = K'.$$

Estas relações valem para o observador próprio e para todos os observadores em translação uniforme em relação ao primeiro, ligados por transformações de Lorentz.

Devemos observar que a aplicação do princípio de conservação é feita *num referencial escolhido*, enquanto que a sua *forma* é invariante para *todos os referenciais inerciais*. São duas situações distintas. Em particular, se as relações forem escritas num referencial em movimento relativo com respeito ao referencial mais acima, a soma dos momentos e a soma das energias serão expressas com os termos modificados pelas transformações de Lorentz e terão valores constantes K'^j e K' diferentes das constantes escritas acima.

A aplicação dos princípios de conservação na análise da colisão entre partículas permite escrever, para o caso de duas partículas em choques elásticos observados num referencial fixo que

$$\begin{aligned} \left(\sum_i \mathbf{p}_i \right)_{\text{antes do choque}} &= \left(\sum_i \mathbf{p}_i \right)_{\text{depois do choque}}, \\ e \\ \left(\sum_i E_i \right)_{\text{antes do choque}} &= \left(\sum_i E_i \right)_{\text{depois do choque}} \end{aligned}$$

Este balanço de momentos e energias é feito num mesmo referencial. Para o caso de duas partículas, temos

$$\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2$$

e, para as energias, usando a expressão para a energia $E_i = E_{k(i)} + m_{0(i)} c^2$, podemos escrever

$$\begin{aligned} E_{k1} + m_{01} c^2 + E_{k2} + m_{02} c^2 &= \\ E'_{k1} + m'_{01} c^2 + E'_{k2} + m'_{02} c^2 &= \end{aligned}$$

Esta expressão envolve, além da energia cinética, a energia de repouso das partículas. Deve ser notado que, numa interação por colisão, as massas de repouso das partículas em geral não se conservam, o que significa evidentemente que a soma das massas de repouso do

sistema depois do choque *não é igual* à soma das massas antes do choque.

Para as colisões não elásticas, a soma das energias cinéticas sofre uma alteração como conseqüência da colisão, isto é, a soma das energias cinéticas depois do choque não é igual à soma das energias cinéticas antes do choque, de modos que podemos escrever para a variação total da energia cinética

$$\Delta E_k = \{(m'_{01} + m'_{02}) - (m_{01} + m_{02})\} c^2$$

ou

$$\Delta E_k = c^2 \Delta m.$$

Um exemplo bastante ilustrativo desta reação é a colisão entre quatro núcleos de hidrogênio que se fundem após um choque não elástico e produzem um núcleo de um átomo de hélio e mais duas partículas leves [9].

Neste caso ocorre uma variação apreciável da massa própria e a reação libera uma quantidade enorme de energia correspondente à transformação em energia do defeito de massa, (da diferença de massa)

$$c^2 \Delta m \approx 26,7 \text{ MeV},$$

e que produz a fabulosa energia de $6,6 \cdot 10^{14}$ J por quilo de hidrogênio usado na reação. É um dos exemplos mais conhecidos da fusão nuclear.

Constatamos aqui uma alteração da lei da conservação da massa de Lavoisier. Aqui a massa não se conserva, mas como a massa relativística tem um equivalente energético, o que rigorosamente se conserva é a energia. A lei de Lavoisier é aplicável às reações químicas porque nestas reações a energia envolvida é pequena e a variação de massas das moléculas é insignificante.

As colisões entre partículas, realizadas em potentes aceleradores, se revelaram um processo bastante útil e que fornece aos cientistas importantíssimas informações sobre a estrutura da matéria e sobretudo para o estudo das partículas elementares. Dessas colisões foram reveladas informações sobre estabilidades e instabilidades de partículas, suas composições e estruturas mais íntimas, pelo exame dos sub-produtos das reações por colisão. Em todo o caso, sempre, e inevitável, a energia total do processo se conserva. Muitas partículas novas foram descobertas por este processo, isto é, pela sua submissão ao princípio de conservação da energia.

O avanço da física teórica detectou no estudo das partículas elementares novos princípios de conservação, por exemplo, o princípio da conservação da carga total das partículas envolvidas na colisão, isto é a carga total das partículas antes do choque deverá ser igual à carga total das partículas resultante do choque, ou que o número total de léptons (partículas leves) é preservado durante o choque.

O estudo da física das partículas descobriu outros atributos das mesmas e que devem ser levados em conta

nos processos de colisão. Além das transformações produzidas por colisões ocorre também transformações espontâneas conseqüência da instabilidade de certas partículas produzindo relações de decaimento. Nestes casos as equações que expressam esses decaimentos satisfazem também a princípios de conservação envolvendo grandezas quânticas associadas às partículas componentes das relações de decaimentos. Assim, além das expressões dos princípios de conservação já apresentados mais acima, vêm se somar os princípios: Conservação da carga; Conservação dos léptons; Conservação dos bárions; Conservação do spin isotópico e Conservação da estranheza.

Estas leis estão claramente ligadas às interações que intervêm nos processos. Porém, como já dissemos, os princípios de conservação mencionados anteriormente são de aplicabilidade universal e independem da natureza das interações que intervêm nos processos estudado.

4.2. Princípio de conservação em presença de gravitação

As expressões formais dos princípios de conservação que temos visto até agora, ganham nova e sofisticada roupagem quando os eventos são observados numa região onde existe um campo de gravitação cuja intensidade não pode ser desprezada.

Os novos procedimentos fazem uso de relações de conservação já desenvolvidas no estudo de mecânica de meios contínuos. A expressão mais simples e de interpretação imediata é a chamada equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0,$$

escrita para um fluido de densidade ρ e sendo \mathbf{v} a velocidade de um elemento qualquer do fluido. O significado desta equação pode ser expresso facilmente.

Consideremos uma quantidade de matéria encerrada no interior de uma esfera. Então a equação de continuidade diz que a variação por unidade de tempo da quantidade de matéria no interior da esfera *é igual* à quantidade de matéria que, no mesmo intervalo de tempo, atravessa a superfície da esfera. Ou seja, se a quantidade de matéria no interior da esfera diminui, automaticamente a mesma quantidade correspondente à esta diferença de matéria, atravessa a superfície abandonando a esfera, no mesmo intervalo de tempo. Vamos escrever a forma matemática desta equação para que tenhamos uma idéia de como se constrói relações semelhantes mais sofisticadas em presença de gravitação. Vamos integrar ambos os membros da equação de continuidade em todo o volume da esfera,

$$\int \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) dV + \int (\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})) dV = 0.$$

E tendo em conta que $\int \rho dV$ é igual à massa total M contida na esfera e tendo ainda em conta um precioso teorema do cálculo que transforma a segunda integral numa integral de fluxo através da superfície da esfera, temos que

$$\frac{dM}{dt} = - \oint_S \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S},$$

onde o primeiro membro representa a variação da quantidade de matéria por unidade de tempo e o segundo membro representa o fluxo total de matéria por unidade de tempo através da superfície S .

Vemos claramente que esta expressão informa que a quantidade de matéria que passa pela superfície da esfera e por unidade de tempo, não foi criada ali mas provém da diminuição da massa por unidade de tempo da massa total contida no interior da esfera. Se o interior da esfera for vazio, nenhuma matéria atravessa a superfície, isto é, ... *do nada, nada se tira!*

A equação da continuidade fornece expressões usadas na mecânica dos meios contínuos para fixar uma condição de conservação e que será empregada em todo o desenvolvimento no estudo dos sistemas físicos com distribuições contínuas, ou como veremos nos sistemas físicos que pressupõem a presença da gravitação. Vamos desenvolver a expressão da equação da continuidade, teremos que

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0.$$

Esta equação nos permite compreender como, formalmente, ela pode ser usada para expressar uma lei de conservação. Suponhamos que no exemplo citado mais acima, a quantidade de matéria no interior da esfera não varia, permanece constante no tempo. Esta restrição pode ser representada pelas condições

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0.$$

A segunda equação, denominada de divergência da densidade de fluxo, é conseqüência do fato de que a quantidade de matéria no interior da esfera é constante (não varia no tempo, a derivada temporal da densidade é nula) e é equivalente à divergência nula da densidade de fluxo. Ou seja, o fluxo total das densidades de momentos através da superfície esférica é nulo.

Nestas equações as grandezas físicas são representadas por campos matemáticos. A densidade por exemplo, é um campo escalar, cujo valor em cada ponto é o valor da função densidade $\rho(x, y, z, t)$ naquele ponto. É a mesma situação para a densidade de impulso, ou densidade de momento ou de velocidades. O estudo das leis de conservação envolvendo processos que se realizam em

presença de um campo de gravitação, ou em presença de um campo eletromagnético, vai inevitavelmente tratar com grandezas representadas por campos, como foi o caso de exemplo acima.

Um outro excelente exemplo deste formalismo é a representação das leis de conservação em teoria da relatividade restrita.

Para isto define-se uma grandeza mais rica em componentes, uma grandeza tensorial: o tensor de impulso-energia, um tensor de 16 componentes que estão associadas às densidades de impulsão e densidades de energia.

Se este tensor for representado por $T^{\alpha\beta}$ onde os índices tomam valores de 1 a 4, e, dependendo dos valores destes índices, teremos componentes densidade de impulsão ou densidade de energia. Assim, a “divergência” quadridimensional deste tensor de impulso-energia pode ser escrita, tendo em conta que usamos a convenção $(x, y, z, ct) \rightarrow (x^1, x^2, x^3, x^4)$ é escrita como

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x^\alpha} T^{\alpha\phi} &= \frac{\partial}{\partial x^1} T^{1\beta} + \frac{\partial}{\partial x^2} T^{2\beta} + \\ \frac{\partial}{\partial x^3} T^{3\beta} + \frac{\partial}{\partial x^4} T^{4\beta} &= 0. \end{aligned}$$

Neste ponto é necessário sublinhar uma observação. Assim como as equações de Newton foram construídas em conformidade com as leis de conservação de Descartes, as teorias modernas que usam formalismo tensorial devem ser necessariamente construídas em conformidade com a expressão

$$\frac{\partial}{\partial x^\alpha} T^{\alpha\beta} = 0.$$

Que podem ser aplicadas diretamente desde que se conheça as componentes do tensor de impulso-energia. Isto é nesta teoria que envolve o tensor $T^{\alpha\beta}$, a sua divergência é nula o que garante a conservação da impulso-energia da teoria.

Então, substituindo os valores das componentes do tensor verificamos que para valores de $\beta = 4$ ou $\beta = 1, 2$ ou 3 obtemos as relações de conservação clássicas. Por exemplo, para o valor 4, a equação acima seria equivalente à equação da continuidade. As expressões formais das leis de conservação são deduzidas destas equações do modo como vimos no exemplo mais acima.

Como exemplo ilustrativo suponhamos que o tensor $T^{\alpha\beta}$ seja o tensor de impulso-energia de uma distribuição de matéria incoerente, isto é, onde a pressão é praticamente nula¹³. Neste caso as componentes deste tensor são

$$T^{ij} = \rho v^i v^j; \quad T^{i4} = T^{4i} = c\rho v^i; \quad T^{44} = -\rho c^2.$$

¹³Em teoria da gravitação einsteiniana esta distribuição material é chamada de poeira, isto é, um agregado de partículas à pressão nula.

Introduzindo estas componentes na expressão acima da divergência tensorial, teremos, para o valor $\beta = 4$, (com $\varepsilon = \rho c^2$)

$$\frac{\partial}{\partial x^i}(\varepsilon v^i) + \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon) = 0.$$

Esta equação nos diz que se a variação da energia no interior de uma esfera for nula, o fluxo de energia que atravessa a superfície é também nulo, isto é, a divergência da densidade do fluxo de energia (εv^i) é nula.

No caso da presença de gravitação, as expressões matemáticas não diferem muito destas escritas acima, porém o significado sofre grandes alterações. As expressões do tensor de impulso-energia não sofrem alteração formal, mas nas equações de divergência as derivadas parciais devem ser substituídas pela chamada “derivada covariante”. Esta derivada tem uma expressão própria e sua aplicação às grandezas tensoriais fornece duas informações: a) A variação absoluta da grandeza e b) A variação que sofre a grandeza em consequência da aceleração do referencial onde o processo é estudado.

Isto é essencial, pois em presença de gravitação não existe mais referenciais em movimento de translação uniforme, e todos os observadores, como estão sujeitos à ação do campo de gravitação, são *observadores acelerados*. Os elementos necessários para se escrever a expressão completa destas derivadas covariantes, são obtidos depois de resolvida a equação da gravitação aplicável à região, pois os potenciais de gravitação figuram explicitamente na expressão matemática da derivada covariante.

As expressões *formais* das leis de conservação em teoria da relatividade geral (em presença de gravitação) não diferem das mesmas escritas em relatividade restrita. Porém é muito mais difícil elaborar uma interpretação semelhante à que foi dada no caso da equação da continuidade mais acima.

Os termos adicionais que figuram nestas derivadas covariantes, acompanhando as derivadas parciais, proíbem interpretações simples. Os pesquisadores de questões associadas com a gravitação procuram contornar a dificuldade usando expressões aproximadas dos valores dos campos.

Vemos então, a que ponto de sofisticação as expressões das leis de conservação evoluíram desde os singelos enunciados dos pensadores da idade romântica da Física, como Helmholtz entre outros.

¹⁴Este modelo cosmológico foi elaborado depois da descoberta, em 1920 do fenômeno de recessão das galáxias por E. Hubble e sua equipe.

¹⁵Neste modelo o “meio exterior” não existe.

¹⁶A teoria do universo inflacionário de Alan Guth [10].

¹⁷Este fenômeno é semelhante ao que ocorre quando se congela lentamente uma garrafa de cerveja, levando sua temperatura abaixo do ponto de congelamento do líquido. Ao ser retirada do refrigerador vemos que a cerveja está ainda no estado líquido, porém, à menor perturbação, ela muda de estado. Começa a congelar.

5. Do nada, nada se tira?

Uma das mais extraordinárias conquistas da Física feita através da teoria da relatividade geral, foi a descrição do nosso Universo, na recém criada disciplina moderna: a cosmologia. Segundo esta teoria o modelo de universo adotado se apresenta como uma esfera de matéria descrita no espaço com quatro dimensões em expansão¹⁴ contínua e com uma densidade média atual muito pequena, da ordem de 10^{-29} gramas por centímetro cúbico.

Este modelo sugere que houve um tempo no passado em que a matéria toda do Universo se encontrava concentrada praticamente num ponto, quando ocorreu a explosão que provocou esta expansão, ainda hoje em ação.

Esta esfera se expande, sua temperatura média diminui, sua densidade de matéria também diminui. Se imaginarmos o universo como uma esfera isolada, todo o processo que ela está sendo submetida é uma transformação adiabática, então a primeira lei da termodinâmica estabelece a conservação da energia e, como não há troca de calor com o “meio exterior”¹⁵,

$$\Delta U + W = 0,$$

ou seja, o trabalho de expansão do Universo é igual à diminuição da sua energia interna.

Se, por outro lado aplicarmos um raciocínio semelhante ao que foi feito com a equação da continuidade, escolhemos uma esfera que envolve o Universo, e como o fluxo de partículas através desta esfera é nulo, e tendo em vista que a quantidade de matéria e energia contida no interior da esfera não é nulo, concluímos que a matéria total contida na esfera é invariável, constante no tempo.

A expansão deste Universo é cada vez mais lenta, desacelerada pela gravitação que tende a aglutinar as partes materiais do universo. Quando a energia interna se anular o universo cessará de se expandir, e, dependendo das condições sob as quais ele evoluiu, poderá passar a se contrair.

Entretanto em 1981, um jovem cientista americano lançou uma teoria muito interessante sobre a expansão do universo¹⁶.

Supõe-se que o universo, no início de sua expansão, tenha sofrido um “super-resfriamento” atingindo temperaturas muito baixas sem ser submetido a transformações de fases apropriadas para estas temperaturas¹⁷. Resultando que seu conteúdo material, prótons, nêutrons, neutrinos, elétrons, pósitrons e mésons, entre outros, sofreu uma rarefação tão pronunciada que o

conteúdo energético do Universo neste período se reduziu quase que exclusivamente à energia do vácuo. A energia do vácuo, já descrita pela mecânica quântica, figura nos modelos saídos da relatividade geral como uma energia repulsiva, por conseguinte, neste instante, o Universo passa por uma mudança de estado acompanhada de uma violenta explosão com eventos simultâneos de *criação de partículas*. É a teoria da inflação. Esta segunda e violenta explosão viria fornecer possibilidades de explicações para alguns problemas que preocupam bastante os que se dedicam ao estudo da cosmologia, que sem esta explosão suplementar, parecem não ter soluções.

Considerando a ocorrência deste fenômeno, a inflação, a quantidade de matéria do Universo não se conserva. Isto é: *a matéria é criada a partir do nada!*

Entretanto temos que levar em conta que no balanço total das energias envolvidas na evolução do Universo é necessário que seja incluída a energia do vácuo. E assim a expressão clássica do princípio da conservação da energia é mantida em sua forma¹⁸ mais pura.

Finalmente uma descoberta recente permitiu supor com certa segurança que o Universo se expande, mas *não se desacelera!* Se esta teoria se confirmar vemos que a energia do vácuo ainda está presente, isto é ainda não foi totalmente exaurida, fornecendo combustível para a manutenção da aceleração da expansão cósmica, *a energia do vácuo continua sendo usada!*

6. A busca do princípio universal

Na história da Física os acontecimentos envolvendo a procura de expressões gerais que traduzem o princípio de conservação da energia são muito variados e curiosos. Muitos pesquisadores participaram da busca deste princípio e depararam com uma variedade de fenômenos que exigia um tratamento de forma a impor uma certa ordenação conceitual. Um dos que destacaram foi Helmholtz como veremos a seguir.

Num artigo lido na Sociedade de Física de Berlim, em 1847, sob o título *Sobre a Conservação da Força* Hermann Von Helmholtz (1821-1894), afirma pela primeira vez que:

A conservação da energia é um princípio universal da natureza.

Entretanto sua publicação na famosa e conceituadíssima revista *Annalen der Physik* foi recusada [11].

Apesar de que a mecânica teórica, a termodinâmica, a teoria da gravitação, a Química e a teoria eletro-

magnética já estivessem teoricamente bem estruturadas, apresentando todas elas seus princípios fundamentais, ainda não era visível uma generalização tão profunda como a que Helmholtz propunha. A evolução da Física ao longo do meio século seguinte daria razão a este cientista alemão¹⁹.

A história da Ciência registra os nomes e as obras de vários pesquisadores que dirigiram suas investigações na procura de um princípio geral que pudesse representar o elo de ligação entre os vários processos de conversão de energia já plenamente estudados em muitos ramos da ciência. Era a busca de uma *Conexão entre as partes da Ciência*, segundo Kuhn²⁰, referindo-se a uma publicação inglesa de 1834.

Thomas Kuhn analisa e avalia a importância dos trabalhos desta plêiade de cientistas: J.P. Joule, J. Mayer, M. Faraday. C.F. Mohr, W. Grove. S. Carnot e outros, (Kuhn relaciona uns doze pioneiros, além de Helmholtz) que partiram da análise dos processos de conversão de Força (Energia) nos diferentes processos - mecânicos, químicos, elétricos, magnéticos - e culminaram na elaboração de um princípio de conservação, sem no entanto, atingirem uma formulação geral como a proposta de Helmholtz. São trabalhos notáveis e interessantes que foram produzidos por vias distintas, despertando em Thomas Kuhn a idéia de que constituem, na realidade, descobertas simultâneas²¹, conforme ele analisa em seu artigo mencionado acima.

O exame desses trabalhos, segundo pesquisadores da história da Ciência, dá a impressão que estes cientistas falam de coisas distintas, porém empregando a terminologia e conceitos modernos, concluiu-se que todos referem-se ao mesmo aspecto da natureza.

Para muitos pesquisadores, os trabalhos de Helmholtz apresentam uma concepção geral, matematicamente bem formulada, do princípio da conservação da energia. Igualmente as pesquisas de todos estes pioneiros também culminaram na definição de uma "força" comum aos processos de conversão estudados.

Entretanto, o trabalho de Helmholtz foi muito bem recebido por ter sido concebido e formulado com uma fundamentação filosófica e epistemológica bem elaborada.

Por outro lado, o direcionamento científico do trabalho conduziu a uma concepção completamente mecanicista da natureza, onde, obrigatoriamente, todas as interações são mediadas através de forças newtonianas. Esta característica conflita com a formalização proposta pela teoria da relatividade geral.

Apesar da roupagem científica moderna com que o princípio de conservação da energia é apresentado nas

¹⁸Entretanto a questão não se resolve assim tão facilmente pois ao incluirmos a energia do vácuo introduzimos neste cenário interações quânticas, com suas peculiaridades que dificultam interpretações clássicas, como por exemplo, o efeito túnel.

¹⁹O advento da teoria da relatividade viria, não só confirmar a universalidade do Princípio da Conservação da Energia, como revelar o papel basilar deste princípio.

²⁰T.S. Kuhn, *Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery* [12].

²¹Instalou-se também uma acirrada disputa pela primazia da formulação da lei de conservação reivindicada ao mesmo tempo por J. Mayer e J. Joule conforme já mencionado em [7].

várias disciplinas da ciência, o seu significado profundo, o seu conteúdo, permanece como foi descoberto. Todavia a expressão formal deste princípio sofreu alterações óbvias, conseqüentes das generalizações e evoluções formais das teorias.

Já examinamos as variações nas formas dos princípios, associando-as à conservação da energia e à conservação do momento, impostas pela própria generalização das teorias que se sucedem desde Newton até Einstein. Porém, como já foi dito, independentemente da sofisticação formal que reveste estes princípios, o significado epistemológico permanece o mesmo desde os mais primórdios tempos da história da ciência.

Do ponto de vista prático estes princípios funcionam como um critério que permite identificar o modo como a natureza funciona.

Por outro lado, estes princípios também funcionam como um critério de separabilidade visando isolar, entre os processos imagináveis que possam ocorrer na natureza, aqueles considerados como cientificamente viáveis. São, poderíamos dizer, condições restritivas e esta situação é ilustrada pelo princípio chamado de segunda lei da termodinâmica e pelos princípios aplicados às interações entre partículas elementares.

7. Conclusão

O que se destaca de tudo o que foi exposto é a idéia simples e direta que afirma que se pode aplicar um princípio em qualquer circunstância desde que a situação física seja apropriada e em qualquer teoria sem nenhuma necessidade de elaboração teórica a não ser o conhecimento das expressões que identificam as grandezas envolvidas no princípio.

Vimos também que expressões antigas manifestando um ou outro aspecto de conservação continuam presentes em nossas elaborações de cálculos em Física. Por exemplo da expressão *do nada, nada se tira* é a base empírica da interpretações de muitos teoremas da física teórica como foi o caso da equação da continuidade. Com o auxílio desta antiga proposição ficamos compreendendo o significado empírico das relações teóricas

referentes às expressões de leis de conservação em teorias que se desenvolvem em meios contínuos, incluindo a teoria da gravitação. Assim torna-se simples compreender por que a condição para que uma teoria seja conservativa se revela na existência *independente* de uma expressão que exprima a nulidade da divergência do tensor de impulso-energia da dita teoria. Finalmente vimos que a expressão das leis de conservação escrita em relatividade e em presença de gravitação tem um significado que se aproxima muito da idéia sugerida por Helmholtz sobre um princípio de conservação fundamental da natureza

Referências

- [1] E. Mach, *La Mécanique* (J.Hermann, Paris, 1925).
- [2] Platão, *The Great Books of the Western World* (Encyclopaedia Britannica Inc., Chicago, 1989).
- [3] J. Burnt, *O Despertar da Filosofia Grega* (Editora Siciliano, São Paulo, 1994).
- [4] A. Koyré, *Estudos Galilaicos* (Bertrand Editores, Lisboa, 1986).
- [5] M.A. Tonnelat, *Histoire du Principe de Relativité* (Flammarion, France, 1971).
- [6] K. Symon, *Mechanics* (Addison-Wesley Publishing Company Inc., Japan, 1963).
- [7] R.A. Martins, *Cadernos de Hist. e Filos. da Ciência* **6**, 63 (1984).
- [8] N.W. Zemansky, *Calor e Termodinâmica* (Editora Guanabara 2, Rio de Janeiro, 1978).
- [9] J. Aharoni, *The Special Theory of Relativity* (The Clarendon Press, Oxford, 1965).
- [10] A. Guth, *O Universo Inflacionário* (Editora Campus Campinas, 1997).
- [11] E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity* (Tomash Publishers, Nova York, 1951), v. II.
- [12] T. Kuhn, in *Critical Problems in the History of Science*, edited by M. Clagget (University of Wisconsin, Madison, 1959).