

AS ORIGENS DA RELAÇÃO ENTRE O CONCEITO DE ENTROPIA E DE PROBABILIDADE DE ESTADO

AURANI MARGARETH, K. (1)

Filosofia e História da Ciência. Universidade Federal do ABC katya.aurani@ufabc.edu.br

Resumen

Pretendemos descrever as idéias principais que guiaram Boltzmann(1877) no estabelecimento da relação entre entropia e probabilidade de estado .Considerando as permutações dos valores de energia entre as moléculas de um corpo, ele definiu o conceito de probabilidade de estado. Inovou dizendo que o sistema evolui sempre a partir de estados menos prováveis aos estados mais prováveis. Assim, o equilíbrio térmico corresponde ao estado mais provável do sistema, o que segundo ele, permite relacionar entropia e probabilidade de estado. Dessa idéia se originou a moderna expressão $S = k \ln W$, onde S é a entropia , k é a constante de Boltzmann e W é a probabilidade. Para Boltzmann(1897), a probabilidade de estado pode decrescer em pequenas regiões do sistema em equilíbrio.Esses estudos históricos são voltados à formação de professores, e a uma melhor compreensão do conceito de entropia .

Objetivo: Meu objetivo é o desenvolvimento de um estudo histórico para a formação de professores. **P**retendo descrever as idéias principais que guiaram L.Boltzmann (1877) no estabelecimento da relação entre entropia e probabilidade na Física, definindo o conceito de probabilidade de estado .

Metodologia: Análise de textos originais recuperando historicamente as idéias e o contexto que foram importantes no passado para a definição dos conceitos modernos.

Marco teórico: Descrevo a seguir algumas idéias sobre a relevância da utilização de textos de história da ciência na formação do professor . Elas constituem um quadro teórico sobre o qual o meu trabalho se baseia , no ensino de ciências:

-A história das idéias é fundamental ao ensino da Ciência nos diversos níveis, na medida em que permite uma melhor compreensão do conteúdo atual exposto em geral de maneira tão sucinta e econômica (Hamburger, 1988). Assim, professor que toma contato com a história da ciência em sua formação está melhor preparado para o ensino.

-A história da ciência possibilita ao professor o conhecimento das origens dos conceitos. Os estudos históricos permitem discutir em sala de aula, questões relacionadas à definição dos conceitos. Assim, o professor pode apresentar o conteúdo matematizado de maneira mais acessível a seus alunos . Se o professor conhece o desenvolvimento das idéias pode “propiciar o aprendizado significativo de equações (que estabelecem relações entre os conceitos, ou que traduzem leis e princípios) que o utilitarismo do ensino tradicional acaba transformando em meras expressões matemáticas que servem à resolução de problemas.” (Pедуzzi, 2005)

O ensino do conceito de entropia tem sido um desafio ao professor nos diversos níveis. A análise do artigo de Boltzmann (1877), no qual ele define a relação entre entropia e probabilidade pode ser útil ao professor na compreensão desse conceito.

Falo a seguir das bases teóricas de meu trabalho em história da ciência, a partir do artigo de Boltzmann de 1877, e de um trabalho posterior (1897) em que ele discute a possibilidade de decrescimento da probabilidade de estado no universo.

No início de seu artigo, Boltzmann(1877) explicita a relação existente entre a variação da entropia e a tendência em atingir o estado mais provável. Ele expõe essa idéia através de um exemplo:

É claro que cada uma das distribuições de estados homogêneas, resultando de um certo estado inicial dentro de um tempo determinado, é tão improvável quanto cada uma das distribuições ainda não-homogêneas de estados, da mesma forma que , em um jogo de loto , cada quinta é tão improvável quanto a quinta 12345. É somente porque há mais distribuições de estados homogêneas que não-homogêneas, que a maior probabilidade é de que a distribuição de estados tornar-se-á homogênea .
(tradução nossa do original)

Boltzmann encontra assim um modo de estabelecer uma diferença entre os estados do sistema a partir da probabilidade, de tal maneira que pudéssemos obter um sentido privilegiado dos acontecimentos, a partir das interações mecânicas reversíveis como no caso de choques entre moléculas de um gás.

A escolha do exemplo está de acordo com a irregularidade do movimento microscópico, já que as fichas são escolhidas ao acaso. Também, esse exemplo mostra a idéia original de Boltzmann de que uma distribuição de energia é mais provável na medida em que ela tem mais maneiras de acontecer. Essa idéia permite caracterizar os estados pela probabilidade, relacionando-os à entropia. Boltzmann (1877) escreve no começo do artigo:

Na maior parte dos casos, o estado inicial será muito improvável, a saber, que a partir desse estado o sistema se precipitará sempre para estados cada vez mais prováveis, até que ele chegue ao estado mais provável, isto é, ao estado de equilíbrio do calor. Se nós relacionarmos isso à 2ª lei, poderemos então identificar a grandeza que costumamos chamar de entropia com a probabilidade dos estados em questão. (tradução nossa do original)

Boltzmann supõe, portanto, que o sistema evolui dos estados menos prováveis aos estados mais prováveis, o que permite a ele identificar a entropia à probabilidade dos estados. Ele utiliza a 2ª lei e a variação da entropia para dar um sentido físico às diferenças entre os estados, quantificadas por meio de probabilidade.

Boltzmann (1877) supõe nesse artigo que os valores de energia são discretos e múltiplos de uma quantidade e , variando de 0 a pe , p sendo um número finito. Nós achamos por sorteio o número de “ e ” que corresponde a cada partícula. As diferentes maneiras de distribuir a energia entre as partículas se dão através das permutações.

Boltzmann considera que dessa forma o problema é mais facilmente tratado matematicamente, e ele retorna ao problema real fazendo um limite, quando “ e ” é considerado muito pequeno, e “ p ” tende ao infinito.

Boltzmann chama de “complexão” a distribuição em que w_0 moléculas tem energia 0 , w_1 tem energia e , e assim por diante. O número de permutações possíveis dos valores de energia para uma complexão é o que Boltzmann chama de “permutabilidade”. Ele vai formalizar a probabilidade de estado por meio da permutabilidade, de forma que um estado é mais provável quando a permutabilidade é maior.

Ele refaz os cálculos da permutabilidade para as velocidades. Para o cálculo do máximo da permutabilidade, ele propõe achar o máximo do logaritmo da permutabilidade. Essa é a suposição que permite a formalização da probabilidade de estado, isto é, que a distribuição de equilíbrio ocorre quando o logaritmo da permutabilidade é máximo. Essa idéia fundamental de Boltzmann é conhecida em nossos dias na forma $S = k \ln W$, onde S é a entropia, k é a constante de Boltzmann, e W é a probabilidade de estado. (Aurani, 1992)

Posteriormente, Boltzmann (1897) chega a precisar o sentido físico da probabilidade de estado por meio de uma escala de tempo e de espaço no universo:

Podemos também supor que as eras nas quais os estados improváveis retornam são muito pequenas em comparação com a duração do universo, do mesmo modo que nossa distância de Sirius é minúscula em comparação com a extensão do universo. Deve haver então no universo, que está em equilíbrio por toda parte, e morto portanto, aqui e ali, regiões relativamente pequenas, de dimensões comparáveis à nossa galáxia (chamemo-los mundos individuais), e tais que, durante o tempo relativamente curto das eras, elas se afastam de maneira considerável do equilíbrio térmico, e entre essas regiões, aquelas nas quais a probabilidade decresce ocorrem com frequência. (tradução nossa do original)

Boltzmann põe portanto em evidência que, mesmo as interações mecânicas sendo reversíveis, podemos sempre achar, no universo, regiões onde as probabilidades decrescem. Isso não está em desacordo com a 2ª lei da termodinâmica pois ele considera que o universo está em equilíbrio. A probabilidade determina afastamentos em relação ao equilíbrio térmico, que hoje podem ser vistos como a ocorrência de flutuações.

Conclusão: Boltzmann(1877) relacionou entropia e probabilidade, considerando a permutação de valores de velocidades das moléculas de um gás. Foi assim que ele definiu a probabilidade de estado. À distribuição do equilíbrio térmico, corresponderia o máximo do logaritmo da probabilidade de estado. Dessa idéia se originou a conhecida expressão $S = k \ln W$. Assim, ele caracteriza o estado do sistema. A relação entre entropia e probabilidade segundo Boltzmann(1897), permite pensar que no universo em equilíbrio térmico existem pequenas regiões onde a probabilidade decresce, que podemos considerar como a possibilidade de ocorrerem flutuações. Esses estudos históricos podem contribuir para uma compreensão mais profunda sobre a complexidade do conceito de entropia, e de sua relação com a probabilidade de estado de um sistema.

Referências:

AURANI,K.M.(1992). *La nature et le rôle des probabilités dans les premières recherches de Boltzmann sur la deuxième loi de la thermodynamique (les articles de 1866 , 1871 , 1872 et de 1877)*.Paris: Universidade de Paris 7 . Tese de doutoramento.

BOLTZMANN,L.(1877).*Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht* .In *Wissenschaftliche Abhandlungen von Ludwig Boltzmann*. N.York :Chelsea Publishing Company

BOLTZMANN,L.(1897). *Zu Hrn. Zermelo's Abhandlungen"über die mechanische Erklärung irreversible Vorgänge"*, Annalen der Physik 60, 392-8.

HAMBURGER,A.I.(1988). *Algumas questões sobre a Ciência e seu ensino*. São Paulo: Instituto de Física da USP/P-844.

PEDUZZI,L.O.Q.(2005). *Sobre a utilização didática da História da Ciência*. In: PIETROCOLA,M.(org.) *Ensino de Física. Conteúdo, metodologia e epistemologia em uma concepção integradora*. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina.

CITACIÓN

AURANI, K. (2009). As origens da relação entre o conceito de entropia e de probabilidade de estado. *Enseñanza de las Ciencias*, Número Extra VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias, Barcelona, pp. 1599-1603
<http://ensciencias.uab.es/congreso09/numeroextra/art-1599-1603.pdf>