

# F604 - Física Estatística

Prof. José Antônio Brum

22 de fevereiro de 2011

## Resumo

**Objetivo:** Estudar as leis e o comportamento das partículas – átomos, moléculas,... - que compõe os sistemas físicos e sua relação com as propriedades macroscópicas desses sistemas, sendo capaz de deduzí-las. A física estatística estabelece uma ponte entre o mundo microscópico e o mundo macroscópico.

**Estratégia:** “O dilema dos educadores é que as habilidades cognitivas rotineiras, aquelas fáceis de ensinar e de avaliar, são também as mais facilmente digitalizadas, automatizadas e terceirizadas. O sucesso em educação não é mais a reprodução de conteúdo e conhecimento, mas é a capacidade de aplicar esse conhecimento em situações inéditas.” (Andreas Schleicher, O Estado de São Paulo, 25/07/2010) (A. Schleicher é o líder da Divisão de Indicadores e Análise do Diretório para Educação da OECD- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico)

# 1 Introdução

As ciências físicas (ou as ciências, de uma forma mais geral) têm como objetivo descobrir e compreender o mundo no qual vivemos. A primeira etapa, portanto, é a observação, com todos os meios técnicos que dispomos, da natureza. A análise dessa observação e a construção de *modelos físicos* (científicos) que interpretem os resultados das observações, é realizada utilizando a ferramenta *matemática* que dispomos (e criamos, muitas vezes, para esse fim). Podemos dizer que, sem exageros, só começamos a compreender realmente a natureza na medida que podemos quantificá-la, isto é, traduzir em números os resultados de nossas observações. A partir de uma compreensão com modelos matemáticos (*teoria física*), podemos fazer previsões sobre os sistemas físicos, baseados na análise dos modelos e suas aplicações em situações novas, previstas e/ou imaginadas, muitas vezes extrapolando as condições (isto é, o conjunto de informações experimentais disponíveis) nas quais ela foi desenvolvida. A verificação dessas previsões com novas observações (novos experimentos) valida mas também permite expandir a teoria física. É na previsão/verificação que se encontra o maior sucesso de uma teoria física. O corolário desse estudo é a possibilidade, utilizando os nossos conhecimentos adquiridos, de criarmos novos sistemas físicos visando a sua utilização prática pelo ser humano. De uma forma simplificada, podemos chamar a essa etapa de *tecnologia*.

Essa descrição simples, de um programa de desenvolvimento científico e sua aplicação, tem suas limitações intrínsecas. Em primeiro lugar, nossa capacidade de observação dos sistemas físicos está limitada aos meios que dispomos. Em segundo lugar, a nossa análise matemática está limitada a capacidade de cálculo que desenvolvemos. Em ambos os casos, fica claro a impossibilidade de resolvermos/compreendermos rigorosamente e em sua totalidade, o sistema físico considerado. Essas limitações tornam-se mais significativas a medida que aumenta a complexidade do sistema físico considerado e também a influência do meio externo sobre o mesmo.

A nossa interação com o mundo exterior, ou mais precisamente, com o sistema físico de

interesse, é, *a priori*, realizada por meio dos nossos cinco sentidos. E, por milênios (milhões?) de anos, esses foram os únicos instrumentos de observação que dispusemos. Naturalmente, isso estabelece limitações na nossa capacidade de compreendermos a natureza e de quantificá-la. O olho humano detecta a região da luz visível. Isso estabelece um limite de  $0,5 \mu m$  nas dimensões que podemos enxergar (comprimento de onda da luz visível). Na verdade, sem o auxílio de ferramentas externas, estamos limitados ao nosso aparato biológico (olho) que estabelece uma limitação da ordem de  $0,5 mm$ . A nossa capacidade auditiva responde razoavelmente nos limites de frequências acústicas entre 30 e 30.000  $Hz$ . O nosso tato é também uma ferramenta importante de observação - e, talvez, mais ainda de manipulação. No entanto, nossas sensações permitem apenas testar a dureza e a temperatura dos sistemas físicos dentro dos limites da escala macroscópica. Em geral, nossas observações diretas do sistema físico são bastante qualitativas, não permitindo uma quantificação mais precisa. É somente com o desenvolvimento tecnológico, ou seja, a associação do conhecimento com a criação - intencional - de novos sistemas, para uso prático, que conseguimos estender nossas capacidades de observação, tanto desenvolvendo a capacidade de quantificá-la como também estendendo os seus limites, como no caso da microscopia óptica que permite estender o alcance visual dos limites do olho humano para os limites intrínsecos do comprimento de onda da luz visível. São essas ferramentas que permitem o enorme desenvolvimento tecnológico que culmina com a revolução industrial na segunda metade do século XVIII. Essa é uma época de profunda mudança na sociedade, alavancada pela tecnologia recém desenvolvida. E, como costuma acontecer na história, o desenvolvimento tecnológico, alavancado no conhecimento acumulado, propicia o desenvolvimento do conhecimento, tanto pelas novas oportunidades de observação da natureza (novas ferramentas, novos experimentos) mas também pela exigência de melhor compreendê-la - os novos desafios. Uma das questões mais fundamentais para a compreensão da nova tecnologia era a transferência de energia e sua transformação de calor e trabalho, essencial na compreensão e desenvolvimento da máquina a vapor. A figura 1 mostra dois esquemas de máquina de vapor, como inventada por Thomas Newcomen e a

versão melhorada de James Watt, e a figura 2 mostra uma máquina a vapor de Watt. O conjunto desses conhecimentos da origem a *Termodinâmica*.

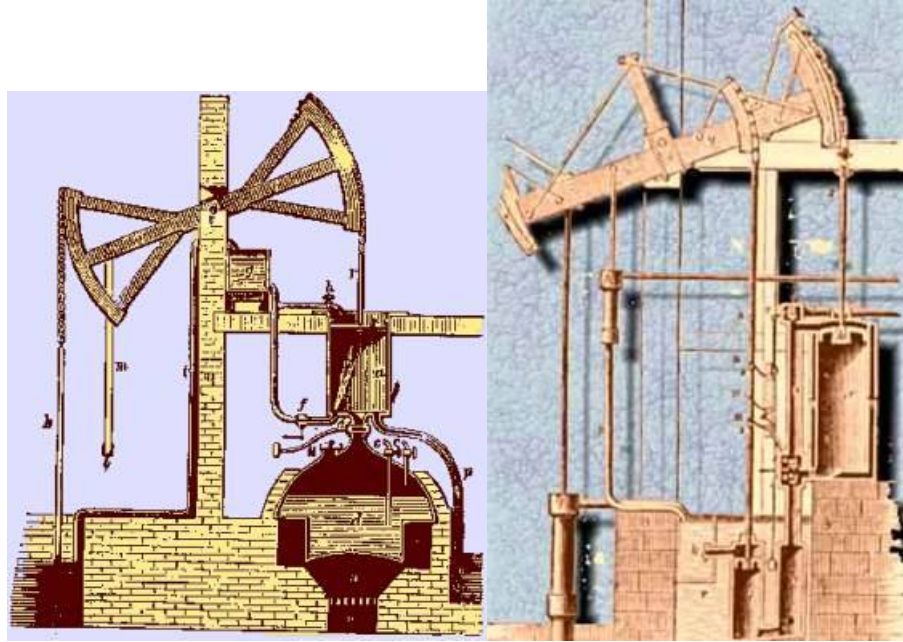


Figura 1: (Esquerda) Máquina a vapor de Thomas Newcomen construída em 1712 juntamente com John Calley. (Direita) Máquina a vapor de James Watt. Depois que uma máquina de Newcome foi enviada a J. Watt para reparos, ele introduziu melhorias que aumentaram sua potência em até quatro vezes.



Figura 2: Única máquina a vapor de Watt ainda existente. Localizada no lobby da Escola Técnica Superior de Engenharia Industrial, Madrid.

A termodinâmica nos oferece uma estrutura teórica que permite relacionar as propriedades macroscópicas de um sistema com outro. Apenas grandezas macroscópicas estão envolvidas e elas são, em princípio, suficiente para caracterizar o sistema físico de interesse. O detalhe

microscópico de cada sistema, sua estrutura atômica e molecular, é ignorado (e nem poderia ser diferente na época em que foi desenvolvida). No entanto, a termodinâmica desempenha um papel fundamental na revolução industrial. Já a importância dessa na civilização não pode ser menosprezada, bastando darmos uma olhada na evolução do Produto Interno Bruto do mundo e seu crescimento vertiginoso após a revolução industrial (ver figura 3).

### World GDP/capita 1-2003 A.D.

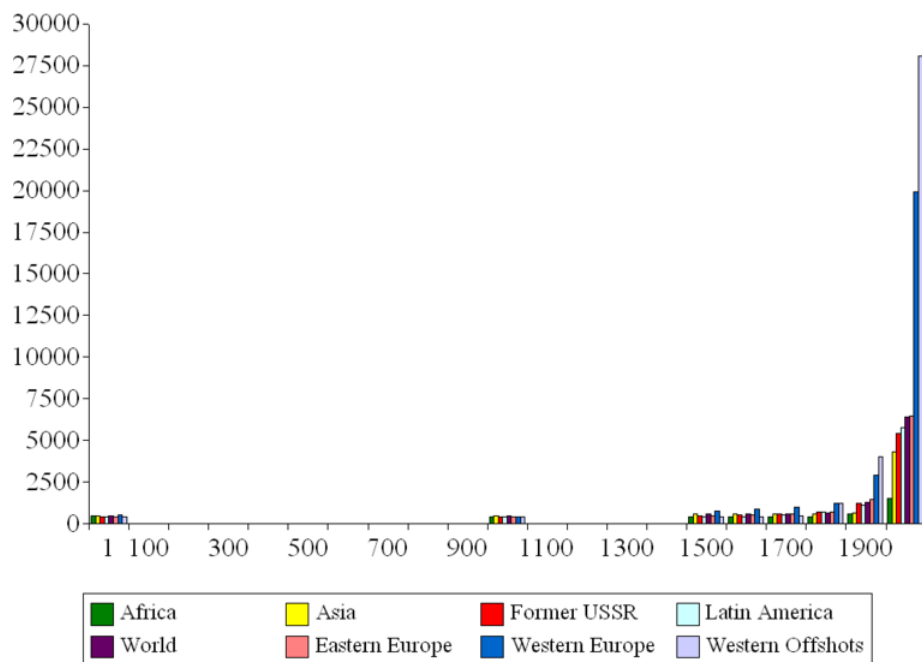


Figura 3: Evolução do Produto Interno Bruto-PIB (*Gross Domestic Product-GDP*) entre o ano 1 d.C. e 2003 d.C..

O desenvolvimento tecnológico e o desenvolvimento científico é uma via de duas mãos. O desenvolvimento tecnológico permite o desenvolvimento de novas técnicas e novos experimentos que, essencialmente, expandem enormemente a nossa capacidade de *enxergar* a natureza. Passamos a utilizar outras “luzes” para enxergarmos os materiais. Ultra-violeta, raios X, feixe de elétrons, partículas alfa, etc, tornam-se as luzes por excelência que nos permitem alcançar a resolução “visual” da ordem do Angstrom. Embora houvessem evidências para a existência do átomo desde os trabalhos de Dalton e outros (séculos XVIII e XIX) no desenvolvimento da química e os primeiros desenvolvimentos da teoria cinética dos gases por Daniel Bernoulli

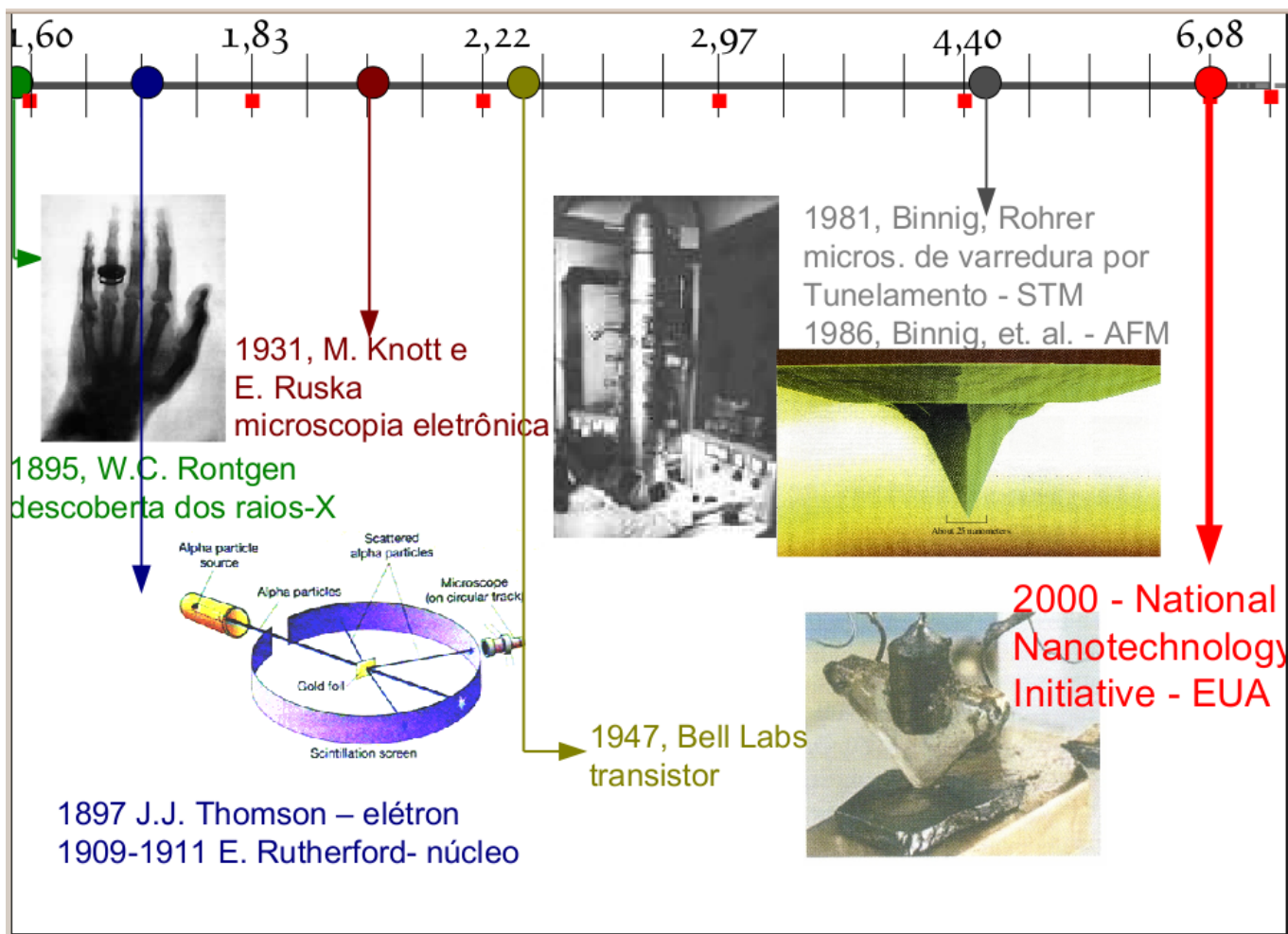


Figura 4: Evolução da ciência e sua instrumentação científica que permite observar a natureza em grande profundidade.

em 1738, é somente com o experimento de Ernest Rutherford em 1911, que estabeleceu-se em base sólida e experimental a estrutura atômica da matéria. Hoje adquirimos uma imensa capacidade de enxergarmos e de quantificarmos nossas observações da natureza. Com o desenvolvimento da microscopia eletrônica e dos telescópios, podemos observar a natureza em detalhes sub-nanométricos (já chegando a escala sub-Angstrom com os microscópios eletrônicos de última geração) até distâncias da ordem de  $10^{26}m$ . Da mesma forma, utilizando lasers pulsados, podemos observar escalas temporais da ordem do *femtosegundo* ( $10^{-12}s$ ) (e mesmo mais recentemente da ordem do *attosegundo*- $10^{-15}s$ ). Um “resumo” dessa evolução encontra-se na figura 4.

O conhecimento da estrutura atômica e molecular nos permite compreender a constituição da matéria. Sabemos que as grandezas macroscópicas que observamos e medimos são consequências do estado dessas partículas. De suas posições e velocidades, se olharmos para o sistema (do ponto de vista clássico, ou do seu estado quântico, se olharmos sob o ponto de vista quântico). A temperatura está associada a energia cinética e a velocidade das partículas. A densidade ou a massa volumétrica está associada a distância média entre as partículas. A pressão associa-se a quantidade de movimento que as partículas podem transmitir para uma superfície qualquer. A associação entre o movimento das partículas começa a ser feita em torno de 1850, procurando desenvolver uma melhor compreensão para a termodinâmica. Maxwell, em 1859, desenvolve a teoria cinética de gases, baseada no trabalho de Bernoulli. Maxwell percebeu rapidamente que era impossível desenvolver as equações baseado nas leis de Newton: havia um grande número de variáveis que tornava o cálculo irrealista. De qualquer maneira, não era necessário compreender exatamente a trajetória de uma partícula. O que era necessário era compreender como a descrição microscópica conecta-se com as propriedades macroscópicas, ou seja, realizar *médias* sobre um número enorme de moléculas. Ludwig Boltzmann começa a trabalhar no assunto em 1864, inspirado no artigo de Maxwell. Ao longo dos anos 1800s Maxwell, Boltzmann, Max Planck, Rudolf Clausius e Gibbs desenvolvem o que seria a física estatística. São principalmente os trabalhos de Maxwell e Boltzmann, independentemente, que lançam os fundamentos da física estatística com o desenvolvimento da teoria cinética dos gases ideais. Em 1872, Boltzmann estabelece a relação fundamental entre a entropia (grandeza definida por Clausius em 1850 baseado em grandezas macroscópicas) e o número de estados microscópicos, que será uma das pedras fundamentais da compreensão da matéria e sua evolução.

Podemos sintetizar o objetivo da física estatística como sendo o estudo das leis e o comportamento das partículas que compõe os sistemas físicos e sua relação com as propriedades macroscópicas desses sistemas físicos, sendo capaz de deduzí-las. A física estatística estabelece uma ponte entre o mundo microscópico e o mundo macroscópico. **Esse será o objeto**

**desse curso.**

---

O curso introduz a física estatística de sistemas em equilíbrio. Faremos uma introdução a alguns conceitos fundamentais inicialmente e depois revisaremos a probabilidade e a termodinâmica. Após essa etapa preparatória, iniciaremos propriamente dito o estudo dos sistemas físicos dentro da perspectiva da física estatística. O curso será baseado no livro “Introdução à Física Estatística” do Salinas (ref. 1) e incluirá o conteúdo dos primeiros dez capítulos. Além disso, utilizaremos como bibliografia auxiliar os livros do W. Greiner (e outros) (ref. 2) do F. Reif (ref. 3) e de S. Vaclair (ref. 4). Além disso, o livro fará uso sempre que possível do material disponível no programa “Statistics and Thermodynamics Physics” (ref. 5). Nossa prioridade será fazermos um aprendizado mais interativo, priorizando o desenvolvimento da forma de pensar da física estatística.



## Referências

- [1] Sílvio R. A. Salinas, **Introdução à Física Estatística**, EdUSP, 1997.
- [2] Walter Greiner, Ludwig neise, Horst Stöcker, **Thermodynamics and Statistical Mechanics**, Springer, 1997.
- [3] Federik Reif, **Fundamentals of Statistical and Thermal Physics**, McGraw-Hill, 1965.
- [4] Sylvie Vaclair, **Éléments de physique statistique: Hasard, organisation, évolution**, InterEditions, 1993.
- [5] Harvey Gould e Jan Tobochnik, **Statistical and Thermal Physics**, Princeton University Press, 2010 e <http://www.compadre.org/stp> (Statistical and Thermodynamic Project, apoiado pela National Science Foundations – EUA).
- [6] Marc Mézard, Notas do curso de “**Physique Statistique**”, Ecole Polytechnique, Paris, 2010.
- [7] Jean-Philippe Bouchaud e Marc Potters, **Theory of Financial Risks: from statistical physics to risk management**, Cambridge University Press, 2000.