

Fundação Universidade Federal do Rio Grande

Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental

Rev. eletrônica Mestr. Educ. Ambient.

ISSN 1517-1256

Programa de Pós-Graduação em Educação Ambiental

Volume especial, outubro de 2004.

Complexidade versus Simplicidade na Física¹

Fernando Kokubun
Departamento de Física – FURG
Avenida Itália, km 8
CEP96200, Rio Grande, RS, Brasil
kokubun@fisica.furg.br

Introdução

Falar sobre o tema Complexidade para uma audiência heterogênea como a deste encontro é um desafio tão grande como a de definir o que é Complexidade. Principalmente para quem ainda é um iniciante na área, como é o caso do autor. Formado em Física, tendo recebido um treinamento ao longo dos anos para pensar como “físico”, segundo uma visão atualmente considerada reducionista falar sobre Complexidade é uma tarefa no mínimo complexa, se me permitem uma brincadeira.

Ao longo deste encontro muitas definições sobre o que é Complexidade serão apresentadas, algumas concordantes e talvez outras sejam excludentes. Uma rápida passagem em alguns textos escritos por autores com formações diversas permitem no entanto encontrar alguns termos comuns, por exemplo, não-linearidade, caos, auto-organização e criticalidade são termos quase sempre presentes (veja por exemplos os artigos publicados em uma seção especial sobre Sistemas Complexos na *Science* volume 284, 1999 ou ainda a os textos publicados no livro *Complexidade e Caos*). Em alguns casos o termo “complexo” é atribuído para sistemas com muitos graus de liberdade e elementos que interagem de alguma forma entre si. Mas nem sempre a presença de muitos graus de

¹ Texto baseado em uma palestra proferida durante o I Encontro sobre Estudos e Pesquisas sobre a Complexidade, realizada na FURG.

liberdade² é um requisito para um comportamento complexo e nem a presença de interação entre as partes pode ser considerada como um requisito suficiente para definir ou obter Sistemas Complexos.

Mas afinal, qual o significado de Complexidade dentro do contexto atual do nosso conhecimento? A visão (paradigma?) da Complexidade exclue/suplanta/supera a visão Reducionista? E afinal, o que é um Sistema Complexo? Por que existe a contraposição entre a Complexidade e Reducionismo?

Um bom início talvez seja a frase “*toda ciência é ou física ou coleção de selos*” de Lorde Rutherford, que de uma certa forma expressa a visão dita reducionista do conhecimento científico. Vamos apresentar a seguir uma síntese que justifica (ou justificaria) a frase de Rutherford. Não tenho a pretensão de ser completo - talvez nem seja extremamente preciso - na discussão a seguir, mas apenas introduzir alguns temas, tópicos e definições que possa nos guiar em nossa discussão.

Em busca da Teoria de Tudo

A física pode ser dividida para efeito de análise de diversas maneiras, mas vamos considerar uma divisão tradicional de acordo com o tipo de interação fundamental dominante em um dado problema. Na física atual acredita-se que existam quatro interações fundamentais: gravitacional, nuclear fraca, eletromagnética e nuclear forte, em ordem crescente da intensidade da interação. A interação gravitacional é a mais antiga das interações fundamentais conhecidas, sendo que a primeira teoria consistente foi elaborada há mais de trezentos anos por Isaac Newton e atualmente a teoria mais aceita é a Teoria da Relatividade Geral, proposta por Albert Einstein em 1916, que generaliza a teoria Newtoniana. O seu primeiro grande teste foi a medida da deflexão da luz durante um eclipse solar em 1919 seguido de testes observacionais como o deslocamento espectral da luz, avanço do perihélio de Mercúrio (um problema conhecido antes do advento da Relatividade Geral, mas não explicado pela gravitação Newtoniana) e mais recentemente a observação (indireta) da emissão de ondas gravitacionais e do efeito de lentes gravitacionais, observações que somente foram possíveis devido ao grande avanço tecnológico dos últimos anos.

O eletromagnetismo é a teoria que explica as interações elétricas e magnéticas da natureza, sendo o primeiro exemplo de uma teoria unificada. Antes de Maxwell, a eletricidade e o magnetismo eram vistas como duas diferentes disciplinas. Uma das conseqüências mais importantes do eletromagnetismo é a descrição das ondas eletromagnéticas, com aplicações em diversas áreas da ciência e da tecnologia.

² Graus de liberdade na física, representa o número de coordenadas (generalizadas) independentes necessárias para descrever o sistema.

As outras duas interações a nuclear fraca e a nuclear forte, em última análise são as responsáveis para a estabilidade da matéria. Sem a sua existência a matéria seria instável. Vários experimentos realizados em grandes aceleradores de partículas comprovam cotidianamente as previsões das teorias que descrevem as interações eletromagnéticas, fracas e forte.

Além destas áreas, a física quântica, que é a teoria utilizada para estudar objetos microscópicos, tem permitido à ciência estudar o comportamento de átomos e moléculas, seja com aplicações sobre a estrutura da matéria até as grandes macromoléculas de interesses biológicos. A física clássica (não quântica) da Mecânica Newtoniana e da Teoria Eletromagnética tem sido utilizadas com grande êxito em diversas áreas do conhecimento. De fato é muito difícil encontrar alguma área da ciência e da tecnologia na qual a utilização de algum domínio da física (mecânica clássica, física quântica, teoria eletromagnética e a termodinâmica) não esteja presente e assumam algum papel relevante na explicação dos fenômenos em estudo. Este aparente sucesso da aplicação da física de uma certa forma é a justificativa para a frase atribuída a Lorde Rutherford, e portanto da visão reducionista da ciência. O sucesso da física enquanto disciplina serviu e ainda serve como um paradigma para as outras ciências.

A idéia de que conhecendo as interações fundamentais, todo o resto pode ser obtido é o cerne da idéia dita reducionista. Precisamos entender o comportamento de uma molécula? Fácil, primeiro determinamos as interações fundamentais, neste caso essencialmente interações eletromagnéticas e talvez interações mais específicas como spin-órbita, montamos o hamiltoniano do sistema e a partir dele obtemos a equação de Schroedinger³. A solução (ou soluções) podendo ser obtida com algum procedimento analítico ou numérico.

O procedimento acima – determinar as interações relevantes ao problema, a teoria adequada, montar a equação ou equações e buscar as soluções é o caminho usual no dia a dia da pesquisa em física. É importante notar que o procedimento não é exclusivo da visão reducionista. O reducionismo se faz presente no momento que é estabelecido que um conjunto reduzido de leis físicas são suficientes para descrever toda uma ampla gama de fenômenos naturais, desde o movimento dos quarks dentro dos núcleos, até o nascimento e evolução do Universo, passando pelo estudo de reações químicas seja de substâncias simples até as grandes macromoléculas de interesses biológicos, sem esquecer dos aparelhos e “gadgets” tecnológicos presentes na nossa vida cotidiana.

O sonho final de todo físico teórico é a busca da teoria final a grade teoria unificada, na qual todas as interações fundamentais estariam contidas e descritas de uma maneira unificada, a sonhada Teoria de Tudo. Uma vez obtida esta teoria, todo e qualquer fenômeno natural seria passível – pelo menos em tese – de ser descrito e previsto. Precisamos de um novo fármaco? Não há problema, vamos recorrer à Teoria de Tudo! Escolhemos as escalas relevantes ao problema, efetuamos algumas aproximações adequadas e resolvemos as equações obtidas. Um novo tipo de material? Uma explicação para uma nova classe de

³ Metade ou talvez a quase totalidade do que foi explicado neste parágrafo é incompreensível? Não se preocupe, os detalhes específicos não são importantes no momento.

objetos astrofísicos? A cura de uma doença? Previsões sobre o clima em Júpiter? A Teoria de Tudo possui a resposta, basta saber efetuar as devidas aproximações, escolher as escalas relevantes ao problema e resolver as equações obtidas! Com a Teoria de Tudo, todo o problema se reduzirá a uma busca de como resolver as equações obtidas. Tudo simples, tudo reduzido a uma única teoria unificada. A partir desta cornucópia teórica todos os problemas poderão ser solucionados! (Não perguntem como ...)

No entanto, mesmo o mais árduo defensor dos métodos da física sabe que não basta conhecer as leis fundamentais seja para descrever todo e qualquer fenômeno natural de maneira completa ou para obter a manufatura de algum novo artefato tecnológico. Tentar construir um prédio partindo das interações entre os quarks e glúons é no mínimo uma insanidade. Felizmente aprendemos que existem diversas escalas na Natureza. Dependendo por exemplo da energia envolvida, da distância característica ou das velocidades relevantes ao problema, simplificações importantes podem ser efetuadas, tornando a análise do problema mais factível de ser resolvido.

Em última análise, a busca da Teoria de Tudo é a busca de uma abordagem simplificadora da natureza e pode ser resumida com

***As leis básicas da física são simples.
As mesmas leis valem em todo o Universo.***

Em resumo, a Teoria de Tudo ambiciona a elaboração de uma teoria que contenha todas as outras teorias da física, ou parafraseando Tolkien : **Uma equação para todos governar.**

Para utilizar de maneira efetiva a Teoria de Tudo (o *Um Anel da Física*) no entanto é necessário saber estabelecer as escalas do problema em estudo. Isto definido, a solução do problema se resumirá a uma busca de uma técnica adequada para resolver a ou as equações obtidas. Sem esquecer a capacidade de interpretar corretamente os resultados obtidos.

É importante estabelecer que quando dizemos: “As leis básicas da Física são simples”, o termo simples significa que todas as interações serão descritas por uma única equação ou por um conjunto reduzido de equações, tendo como ponto de partida poucas premissas básicas (os físicos preferem dizer: simetrias do sistema). Simplicidade não é sinônimo de facilidade de resolução ou mesmo simplicidade de aplicação.

Incertezas no Céu

Mas a natureza é sempre mais estranha do que parece. No final do século XX, quando a Gravitação Newtoniana reinava absoluta como exemplo da capacidade científica, do poder ilimitado de efetuar previsões sobre o comportamento futuro e passado, uma questão não tinha ainda uma resposta definitiva: a estabilidade do Sistema Solar. Após muitas tentativas, Henri Poincaré demonstrou que não era possível fazer nenhuma previsão sobre o comportamento futuro do Sistema Solar. Ou seja, a questão da estabilidade do

Sistema Solar não poderia ser respondida. Era o surgimento do que hoje conhecemos como a Teoria do Caos. De uma maneira simplificada, Poincaré conclui que se quisermos efetuar uma previsão a longo prazo sobre a dinâmica do Sistema Solar, seria necessário conhecer com absoluta precisão as condições iniciais do problema. Qualquer pequena variação nestas condições iniciais resultariam em uma grande diferença no resultado final!

Um sistema caótico é um exemplo de comportamento complicado em sistemas com poucos graus de liberdade⁴. Para mapas⁵ inversíveis são necessários dois graus de liberdade para que um sistema apresente caos e para mapas não inversíveis basta um grau de liberdade. No caso de fluxos, isto é, sistemas descritos por equações diferenciais, são necessários três graus de liberdade.

Para efeito da nossa discussão, o mais importante é de que mesmo trabalhando com sistemas aparentemente simples como o mapa logístico

$$y_{n+1} = \mu (1 - y_n)$$

a dinâmica resultante pode ser bastante complicada (complexa?). Uma característica importante dos Sistemas Caóticos é de que não é possível efetuar previsões a longo prazo do comportamento futuro do sistema. A previsão estando limitado a um período de tempo caracterizado pelo chamado expoente de Lyapunov. Em linhas gerais, quanto maior o valor deste coeficiente, menor será o período na qual é possível efetuar previsões sobre o sistema.

Leis de Escalas e Criticalidade Auto Organizada

Até o momento falamos sobre a existência de escalas que definem quais tipos de aproximações devem ser usadas. Mas existem alguns fenômenos em que aparentemente certos acontecimentos ocorrem em todas as escalas, obedecendo uma lei de potência

$$F \propto x^{-b}$$

onde x é uma variável e b é um coeficiente constante para todas as escalas de x . Neste caso temos um fenômeno que é invariante sob transformação de escala, isto é, o fenômeno está presente em todas as escalas, não sendo possível escolher uma faixa de escala para simplificar o problema. Este tipo de comportamento ocorre normalmente após o sistema atingir o que chamamos de estado crítico e o sistema tende a se auto-organizar espontaneamente. Um exemplo clássico de sistema auto-organizado é formação de uma pilha de areia: despejamos lentamente areia em uma superfície horizontal. Lentamente é formado uma pilha de areia. Ao atingir uma certa altura, a pilha deixa de crescer em altura, por mais que seja despejada areia. Neste ponto começam a ocorrer avalanches nas bordas da pilha de areia que tendem a estabilizar a sua altura. O ponto interessante é de que

⁴ O termo graus de liberdade para quem trabalha com Sistemas Dinâmicos é diferente do utilizado usualmente em Física. Aqui, graus de liberdade é simplesmente o número de equações diferenciais autônomas de primeira ordem necessários para descrever o comportamento do sistema.

⁵ Mapas são basicamente um tipo de equação matemática, na qual a evolução dinâmica se faz em passos discretos.

localmente a distribuição de areia sofre contínuas modificações devido as avalanches, mas a estrutura global da pilha se mantém inalterada (estacionária).

Em sistemas adaptativos auto-organizados ocorre um fenômeno semelhante ao que ocorre com sistemas caóticos: a grandes variações devido a pequenas alterações. No entanto existe uma diferença fundamental: as mudanças não ocorrem de forma imprevisível, pelo menos no que diz respeito ao comportamento global do sistema. O fenômeno – no nosso exemplo as avalanches – ocorrem e podem ser previstas, mas não sendo possível afirmar qual a escala de avalanche que irá ocorrer. Pela lei de potência podemos saber que as maiores avalanches serão menos frequentes do que as menores, e que uma vez atingido o estado crítico uma avalanche com certeza irá ocorrer.

Afinal, o que é um Sistema Complexo?

Ao invés de utilizar as interações para classificar os fenômenos físicos, podemos classificar utilizando o comportamento da evolução dinâmica do sistema (em particular os sistemas não lineares). (I) Sistemas com evolução ordenada, com ciclos definidos e imutáveis (ou pelo menos variando muito lentamente com a evolução); (II) sistemas caóticos nos quais a previsibilidade é limitada no tempo e (III) os sistemas como os adaptativos que mudam com o tempo, mas mantém um certo grau de organização na sua evolução. Este último caso seria para muitos os Sistemas com Dinâmica Complexa.

Uma definição mais precisa do que seria um Sistema Complexo, pode ser encontrado em J. Palis (ver Complexidade e Caos, 1999) que propõe

“.. os Sistemas Complexo estão na 'fronteira' entre os sistemas simples (sem ciclos) e os caóticos, com linhas instável e estável cruzando-se transversalmente”

De maneira simplificada sistemas que apresentam periodicidade, mesmo que multiperíodos, não são Sistemas Complexos, mesmo que possuam dinâmica (comportamento) complicada/rebuscada/multi-periódica. É importante notarmos que nesta definição, um sistema que apresenta dinâmica caótica não é necessariamente um Sistema Complexo.

Comentários Finais

Se hoje o tema Complexidade é considerado um tópico atual não significa que uma visão simplificadora/reducionista deva ser abandonada. Até porque a noção de Complexidade em suas mais diversas definições, surge graças ao estudo detalhado de diversos sistemas naturais, utilizando a visão dita “reducionista”. O comportamento dos Sistemas Complexos, podem ser entendidos como tendo origem nas leis fundamentais da física. Mas um ponto importante a ser ressaltado é de que nos Sistemas Complexos a utilização de leis fundamentais não é de muita utilidade, sendo necessário utilizar algum

tipo de abordagem que considere uma atuação efetiva de todas as interações existentes entre todos os componentes do sistema. Estas interações efetivas, muitas vezes não são complicadas, mas surpreendentemente simples. Mas o resultado de muitas componentes interagindo por regras simples pode tornar o comportamento do sistema complicado, dando origem aos Sistemas Complexos.

E finalmente, na opinião do autor, a contraposição Complexo x Simples/Reduccionismo, deve ser entendido como uma necessidade de aplicar diferentes abordagens dependendo do tema em estudo, não existindo ou não tendo absolutamente nenhum sentido propor que uma abordagem é superior a outra. Afirmar que a abordagem dita reducionista, não tem aplicação ou que está com os dias contados, é um exagero tão grande que nem mereceria ser discutido em um debate científico. Em última análise, um cientista deve buscar uma resposta/explicação do por que de determinados comportamentos. Se uma interação simples entre as partes explica um fenômeno com Dinâmica Complexa, devemos nos perguntar “Qual a relação/origem desta interação simples com as interações fundamentais da Natureza? Será possível extrair uma lei geral aplicável a todos os fenômenos semelhantes?”. Estes tipos de perguntas de certa forma acabam nos remetendo para a busca da razão primária/primitiva dos fenômenos em estudo. Mas isto é precisamente o caminho da física em busca de uma Teoria de Tudo! Desta forma Complexidade/ Reduccionismo deve ser entendida como faces de uma mesma moeda.

Em resumo

Na natureza existem estruturas complexas mesmo em situações simples.

As Leis podem ser simples mesmo em situações complexas.

Referências Bibliográficas

Os textos abaixo contem diversas abordagens e aplicações de Sistemas Complexos

ⓈScience, v284, 2 abril 1999.

ⓈComplexidade & Caos, Editora UFRJ/COPEA, 1999.

ⓈThinking in Complexity, K. Maizner, Springer, 1999.

ⓈPattern in the Sands, T. Bossomaier, D. Green, Perseus Books, 1998.

Para os interessados em textos sobre Caos, os seguintes livros são interessantes

ⓈChaos and Time-Series Analysis, J.C. Sprott, Oxford Press, 2003.

ⓈChaos in Dynamical Systems, E. Ott, Cambridge Press, 1993.

Para uma leitura sobre física, existem diversos textos mas

☉ **Space, Time & Gravitation**, Sir A. Eddington, Cambridge, 1920;

apesar de ser um texto antigo é bem lúcido e interessante de ser lido, escrito por um dos primeiros entusiastas da Teoria da Relatividade Geral.

Um outro texto interessante, na área de da física é

☉ **In search of the ultimate building blocks**, G. 't Hooft, Cambridge Press, 1997;

escrito por um laureado com o Nobel de Física, sendo um livro que aborda o surgimento da chamada Teoria Padrão que descreve a estrutura da matéria.