

# Introdução

## Pléctica o estudo da simplicidade e da complexidade

A Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra organizou em Junho de 1999 um simpósio sobre “Fronteiras da Ciência”. Um dos convidados foi Murray Gell-Mann, Prémio Nobel da Física de 1969 pela descoberta dos quarks. Impossibilitado à última hora de comparecer, fez a sua comunicação por teleconferência e editou depois a transcrição da mesma. É essa lição sobre “Pléctica: o Estudo da Simplicidade e da Complexidade”, que a “Gazeta de Física”

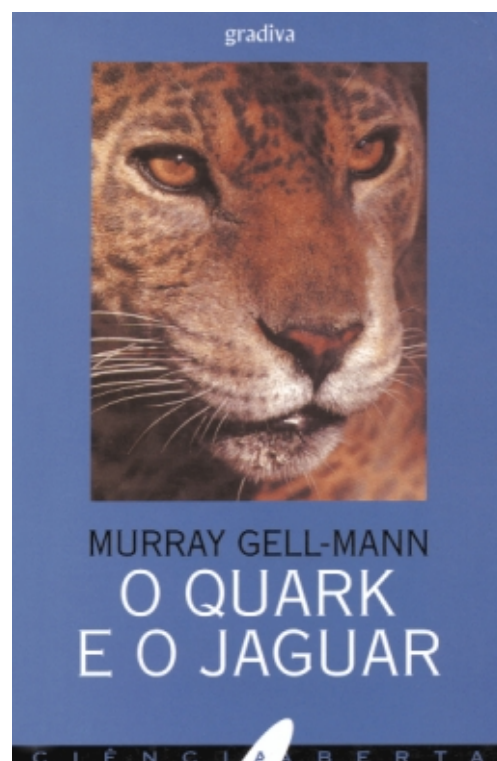
agora publica em primeira mão, por amável deferência dos editores do volume “Fronteiras da Ciência” (Gradiva), a sair este ano. O Dr. Rui Fausto, do Departamento de Química da Universidade de Coimbra, co-editor desse volume e co-organizador do evento, traduziu para português o texto de Gell-Mann. Gell-Mann foi apresentado pelo Dr. Armando Policarpo, físico da Universidade de Coimbra, publicando a “Gazeta” o texto de introdução.

## Introdução

### ao artigo de

## Murray Gell-Mann

Armando Policarpo\*



Murray Gell-Mann, cientista do maior mérito e Prémio Nobel da Física, tem dedicado nos últimos anos, no âmbito da sua actividade científica, a melhor atenção a alguns aspectos do estudo da simplicidade e da complexidade. É autor de um “best-seller”, “O Quark e o Jaguar, Aventuras no Simples e no Complexo” (Gradiva, Lisboa, 1997), em que disputa com humanistas a primazia de uma escrita culta e revela os seus interesses de uma vida inteira pela história natural, a evolução biológica, a sociologia, o pensamento criativo, a evolução cultural e, mais recentemente, por aspectos políticos e sociais, como o desenvolvimento económico sustentável.

Vou abordar, à laia de introdução à comunicação de Gell-Mann, alguns aspectos da estruturação da ciência. Farei uma simples referência aos muitos domínios que foram surgindo na constante procura da simplicidade e que, como os cacos do arqueólogo, têm no seu conjunto uma realidade que os excede.

Nesta breve abordagem surge clara a minha formação como licenciado num ramo da ciência, as Ciências Físico-Químicas, que vi, ao longo da minha vida universitária e só na minha universidade, ramificarem-se mais e mais em cerca de meia dúzia de novas licenciaturas...

A ciência é um produto do espírito humano. Nela claramente distinguimos duas grandes tendências, a lógica e a intuitiva, dois modos associados ao pensamento humano durante todo o período em que a ciência se foi fazendo. Eles vão alternando na construção do progresso científico, ao golpe da intuição sucedendo-se a tranquilidade da lógica. Por exemplo, ligado ao sucesso tão recente da ciência (nos séculos XVI e XVII) está o espírito

lógico. Com ele nasceram as leis da Física apoiadas na Matemática, que nos impõem uma harmonia, uma simplicidade maravilhosas. O que é o simples? Em particular, o conteúdo de uma lei da ciência, um verdadeiro triunfo do espírito humano. Ainda há poucos séculos vivíamos num mundo complexo cheio de milagres permanentes. A que se deve o triunfo da lógica sobre a intuição na evolução científica? A quereremos o rigor e a certeza que muito simplesmente a intuição não nos dá.

E, no entanto, da lógica não se espera muito: ela é em si mesma tautológica, assegurando-nos que se cumprem as regras do jogo, que todos os passos estão correctos, mas parando aí. O que há de ilógico na concepção de uma realidade firme, no sentido de exibir propriedades independentes dos instrumentos de medida? Ou em admitir que a velocidade de propagação de um sinal é infinita? Ou em pensar que a mecânica newtoniana, boa para o mundo sublunar e para os céus, é também aplicável a sistemas atómicos? A dedução tem relações tensas com o carácter experimental da Física, mas é menos enganadora do que a intuição.

A intuição é, assim, a grande vencedora: a ela associamos o progresso real, em particular todo o desenvolvimento da Física Moderna. Mas, poderosa como é, a intuição pode enganar-nos completamente. A título de exemplo e num domínio que não consente a mentira, a Matemática, parece evidente que toda a função contínua tem derivada, que uma curva tem sempre uma tangente, mas, de facto, não é assim. Associados às revoluções científicas não estão só os espíritos lógico e o intuitivo. Há certamente outros factores de natureza distinta. Por exemplo, um essencial: a indepen-

dência total do cientista, a liberdade de ele, sem repressão, fazer tábua rasa de verdades ou sentimentos.

E nos séculos seguintes, surgiu um outro motor, agora bem reconhecido como tal, o instrumento: o telescópio, o cálculo diferencial, o acelerador de partículas, a geometria de Riemann, o computador condicionam e geram o progresso da ciência.

Mas há ainda, pelo menos, um outro factor que se associa à evolução científica, o desenvolvimento de uma árvore imensa que se divide em ramos cada vez mais numerosos e mais finos, que cada vez mais se afastam do tronco, da unidade: a divisão do complexo em partes, partes que julgamos mais simples. Mas, nesta evolução, há certamente um elemento intuitivo; é pois fácil cometer erros. De qualquer modo, sentimos que o todo é maior do que a soma das partes, que algo se perdeu neste processo. Temos agora consciência de uma excessiva simplificação, numa procura constante e subordinada da exactidão. A nossa ciência é um mosaico disperso nas mãos da lógica e da intuição, ambas, com os seus defeitos e as suas virtudes, igualmente necessárias ao progresso.

Quais serão as primeiras pernadas desta árvore da sabedoria? A noção da existência de um real ao qual podemos ser estranhos, algo que está lá “fora”? Sem esta noção,



Murray Gell-Mann nos anos 60

## Introdução

o que é o determinismo clássico? Será um ramo inicial a linguagem matemática, com as suas entidades abstractas e bem definidas, em oposição à linguagem comum? Independentemente da sua génese, é cada vez mais claro que há ramificações erradas, no sentido de que não contribuíram para o avanço da ciência ou que procuram apressadamente refundir-se. Quase no nosso tempo, sabemos de ramificações que se fizeram e desfizeram: até ao fim do século XVII, a Física e a Química eram domínios ortogonais, que se reencontraram quando a Física começa a invadir os domínios das propriedades da matéria (e a interessar-se menos pela Mecânica Celeste). Mais de uma década antes de surgir o electrão na Física, a sua carga elementar e universal era essencialmente considerada apenas na Electroquímica. A Espectroscopia, que nos leva às galáxias mais distantes, é bem Física e Química, tanto na sua génese como nas suas aplicações. A Mecânica Quântica surge-nos como um

rebento novo da mecânica, mas é Einstein que comenta “... na Mecânica Quântica, com os seus estados e transições, já não é mesmo possível distinguir claramente a Física da Química”. A ciência tem olhado a realidade pela razão, uma visão estreita uma vez que a emoção, por exemplo, contempla horizontes mais amplos. A complexidade é uma nova síntese da ciência e talvez aproxime estas duas perspectivas, talvez faça a fusão das duas culturas, aproximando o cientista e o filósofo. A complexidade, a meio caminho entre a ordem e o caos, ao tratar a Física e a Biologia, não pode deixar de nos surpreender: a lei do aumento da entropia, o aumento da desordem, por um lado, e a evolução biológica e social que, por outro lado, está associada a transições para níveis mais complexos. Mas, por agora, a complexidade é simplesmente uma ciência, com a sua metodologia e a sua instrumentação, que utiliza as mesmas técnicas abstractas conhecidas da

Física, Antropologia, Economia, Sociologia, etc., e que procura, de acordo com a nossa visão reducionista, os poucos, tão poucos quanto possível, elementos simples que constituem o complexo. A ciência actual, com meia dúzia de partículas e de interações, construiu os protões, os átomos, as células, as galáxias. A ciência estende agora essa construção, sendo a complexidade um novo objecto da ciência. Não se iludam os leitores de Gell-Mann: está em causa ciência dura. O encontro “Fronteiras da Ciência”, incluindo como tópicos “Cosmos, Matéria e Complexidade, Vida e Homem, Sociedade e Futuro” tem, pois, razão de ser. “É necessário suplementar os estudos especializados com um olhar muito atento, mesmo que grosseiro, do todo”, diz Murray Gell-Mann. Acrescenta, no entanto, o que todos bem sabemos: que o prestígio social e académico recompensa os que estudam cuidadosamente alguns aspectos de um problema, enquanto a discussão do grande conjunto é

relegada para as conversas de café. Mas, afinal, não foi a Sociedade Francesa de Física quem recentemente alugou um café (um café “art nouveau” em Saint-Germain) para conversar sobre Física com toda a gente, como parte da sua reunião anual? É que as ciências não se podem ignorar umas às outras. Mais do que isso, o mundo real está presente na totalidade das ciências. Na sua comunicação, Gell-Mann aborda a quantificação de aspectos que associamos à complexidade, mas apresenta sobretudo algumas reflexões que procuram generalizar este conceito, inquirir da sua génese, prever o seu comportamento, procurar noções intuitivas de complexidade, e compreender o modo como esta pode emergir da simplicidade.

\* Departamento de Física da Universidade de Coimbra, [polcarpo@filip3.fis.uc.pt](mailto:polcarpo@filip3.fis.uc.pt)

Murray Gell-Mann \*

# Pléctica:

## o estudo da simplicidade e da complexidade

É um prazer comunicar com Coimbra através do sistema de teleconferência. Lamento muito não poder estar presente pessoalmente, pois gostaria, desde há muito tempo, de visitar essa antiga e maravilhosa universidade. Vamos hoje debruçar-nos sobre o tema a que chamo *pléctica*, o estudo da simplicidade e da complexidade. No Instituto de Santa Fé, que ajudei a criar, lidamos principalmente com assuntos que se relacionam com a simplicidade e a complexidade. Cheguei ao nome *pléctica* da seguinte forma. A palavra “complexo” vem de *plexus*, que significava originalmente “entrelaçado”, e *com-*, que significa “uns com outros”, ou seja complexo significa “entrelaçado de uns com outros”. Do mesmo modo, “simples” deriva de raízes que significam “dobrados uma única vez”. As palavras latinas que significam “entrelaçado” e “dobrado” têm a sua origem mais remota na raiz indo-europeia *plek-*. Em grego, esta raiz origina *plektos*, que significa “entrelaçado”. Assim, ao usar a palavra *plectics* estou a descrever o tema da simplicidade e da complexidade sem dizer se estou a falar sobre algo simples ou complexo. Então, o que entendemos por complexidade e pelo seu oposto, simplicidade? Seriam precisos muitos conceitos, muitas grandezas, para captar todos os diferentes significados implícitos no nosso uso da palavra complexidade. Mas existe um conceito – a que chamo complexidade efectiva – que representa de forma bastante aproximada aquilo que normalmente queremos dizer quando usamos esta palavra em linguagem vulgar ou no discurso científico. Uma definição não-técnica de complexidade

efectiva seria o comprimento de uma descrição extremamente comprimida das regularidades de uma determinada entidade. A compactação – a eliminação da redundância – é muito importante; de outra forma, o comprimento da mensagem preocupar-nos-ia muito pouco. No meu livro “O Quark e o Jaguar” [1], refiro o caso de uma professora primária que pediu aos seus alunos que escrevessem uma redacção de 300 palavras como trabalho de casa para o fim de semana. Um aluno, que passou o fim de semana a brincar na rua (como eu terei feito quando criança), gatafunhou à pressa já na segunda-feira de manhã o seguinte: «*Ontem os vizinhos tiveram um incêndio na cozinha. Pus a cabeça de fora da janela e comecei a gritar “fogo! fogo! fogo! fogo! fogo! fogo!...”*». Escreveu a palavra *fogo* um número de vezes suficiente para cumprir a exigência das 300 palavras da redacção. Contudo, ele poderia ter comprimido aquela descrição dizendo «[...] *Pus a cabeça de fora da janela e comecei a gritar “fogo!”* duzentos e oitenta vezes», mas a professora insistia num ensaio com 300 palavras. Um modo de considerar a compactação consiste na utilização do conceito de *conteúdo algorítmico de informação*, com o qual muitos estão certamente familiarizados. Ele foi definido para uma cadeia de *bits* [2], que é uma cadeia de zeros e uns, ou uma entidade descrita por uma cadeia de zeros e uns. O conteúdo algorítmico de informação é o comprimento do programa mais curto que pode fazer com que um dado computador universal *U* imprima aquela cadeia de *bits* e, de seguida, termine imediatamente o cálculo.

Qualquer tipo de definição que utiliza o comprimento da descrição, mesmo o comprimento de uma descrição muito concisa, envolve sempre uma certa arbitrariedade ou dependência contextual. Estamos a descrever uma dada entidade e a descrição está codificada sob a forma de uma cadeia de *bits*. Obviamente que é relevante o grau de pormenor com que descrevemos o objecto. Em Física chama-se a isto granularidade grossa. A linguagem na qual está expressa a descrição original pode também interessar, e o conhecimento e a compreensão do mundo partilhados com o nosso correspondente são certamente importantes. Todas estas coisas ajudam a determinar o comprimento da descrição. Quando a descrição é então codificada sob a forma de uma cadeia de *bits* para ser impressa por um computador, passamos a ter uma dependência contextual adicional, devida à convenção utilizada no código escolhido e também à escolha do computador universal. Mas, se considerarmos toda esta dependência do contexto, podemos fornecer uma definição mais técnica da complexidade efectiva: o conteúdo algorítmico de informação das regularidades de um objecto. Isto significa que a totalidade do conteúdo algorítmico de informação do objecto é dividido em dois termos – um que descreve as suas regularidades e outro que descreve as restantes características, que são consideradas acidentais ou aleatórias.

que estamos a fazer a distinção entre as regularidades no padrão e várias outras características da gravata que consideramos aleatórias ou acidentais, tais como as nódoas de sopa ou as pequenas irregularidades no tecido... Estas características não estão incluídas na descrição.

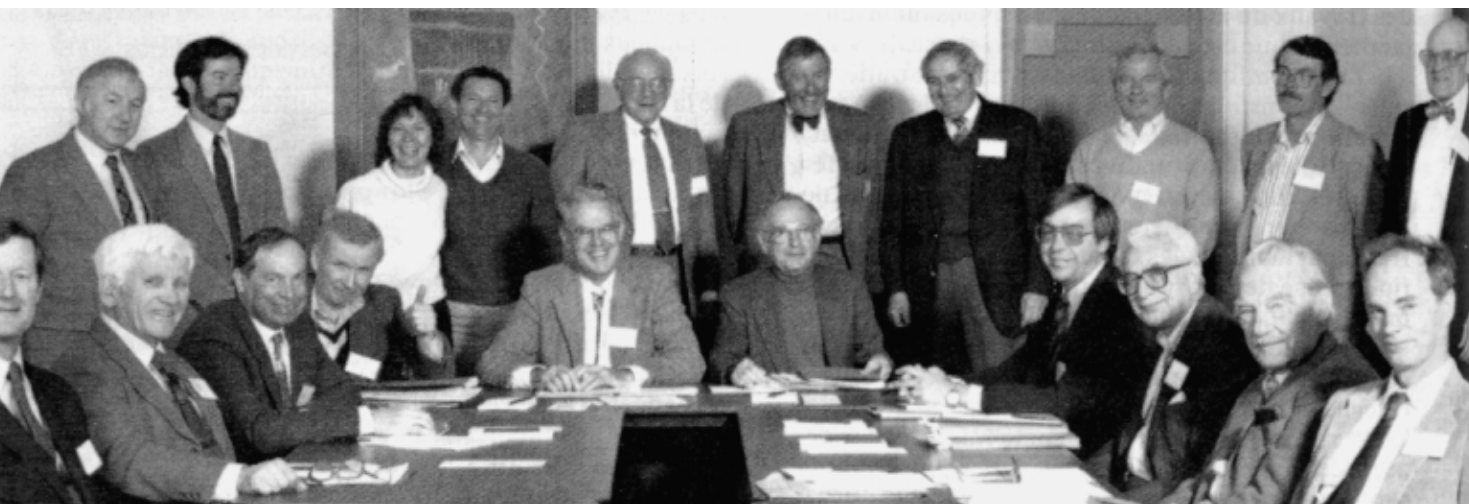
### Padrões de gravatas e *bits*

Se nos concentrarmos apenas nas regularidades apresentadas pelo padrão desta outra gravata, concluímos que, contrariamente à anterior, ela é bastante complexa. É uma gravata de Austin, no Texas, pintada à mão, e levaria muito tempo a descrever a regularidade do seu padrão.

A sua complexidade efectiva é elevada. Estas gravatas estiveram na moda há dois ou três anos, mas agora estão fora de moda e regressámos às gravatas simples, muitas vezes com riscas horizontais em vez de diagonais.

Consideremos agora uma cadeia de *bits* constituída unicamente por uns. Ela é, obviamente, muito simples, visto que é tão fácil descrever a sua regularidade. Tem uma complexidade efectiva muito pequena tal como um baixo conteúdo algorítmico de informação.

No outro extremo da escala de conteúdo algorítmico de informação teríamos uma longa cadeia de *bits* quase sem regularidades – uma cadeia de zeros e uns incompressível



Grupo fundador do Instituto de Santa Fé. Gell-Mann é o terceiro em baixo, a contar da direita.

Deixem-me usar estas gravatas como exemplo. Aqui no Novo México usamos estas gravatas tradicionais feitas pelos índios locais; mas noutros sítios, em ocasiões algo mais formais como esta, usaríamos uma gravata normal. Há alguns anos, estas gravatas com riscas diagonais paralelas vermelhas e amarelas estavam muito na moda. Podemos ver que esta gravata é muito simples. O comprimento da sua descrição é trivial – podemos fornecer apenas as cores, largura e espaçamento das riscas e a cor de fundo da gravata. Contudo, deve notar-se

ou “aleatória”, sem regularidades excepto o comprimento. O seu conteúdo algorítmico de informação é muito elevado. Na verdade, ele toma o valor máximo possível para aquele comprimento de cadeia. O programa mais curto para a descrever seria um que dissesse “Escrever” seguido pela própria cadeia de *bits*. Apesar de ter o maior conteúdo algorítmico de informação possível, a sua complexidade efectiva é novamente muito pequena, uma vez que não possui quaisquer regularidades excepto o comprimento.

Então, em ambos os casos extremos, para uma cadeia muito simples e para uma muito desordenada, existe uma complexidade efectiva pequena. A complexidade efectiva pode ser grande apenas entre estes extremos, para qualquer coisa que caia entre as situações extremas de ordem e desordem, qualquer coisa que tenha muitas regularidades diferentes.

Não há um procedimento matemático bem definido que permita garantidamente encontrar todas as regularidades de uma cadeia de *bits* ou de uma entidade descrita por ela. Em geral, identificamos regularidades através de informação partilhada, conhecida tecnicamente por informação mútua. Se processarmos uma cadeia de *bits* de certa maneira e verificarmos que, depois, a podemos dividir em duas ou mais partes e que estas partilham um conjunto de informação, então podemos concluir que existe uma regularidade nessa cadeia. Apesar da informação mútua ser um diagnóstico da regularidade, ela não nos fornece uma medida do conteúdo algorítmico de informação dessa regularidade; por isso, a informação mútua é bastante distinta da complexidade efectiva.

Embora haja mecanismos que permitem identificar regularidades, não existe, tal como já indiquei, nenhum procedimento matemático que possa garantir a identificação de todas as regularidades. Então, a complexidade efectiva, o conteúdo algorítmico de informação das regularidades, depende em parte de quem ou do que descreve o objecto. Voltemos às nossas gravatas. Recordemos que, quando analisámos a complexidade efectiva dos padrões, ignorámos os diferentes tipos de manchas. Contudo, suponhamos que éramos empregados de uma lavandaria a seco. Nesse caso, não daríamos grande importância aos padrões das gravatas; em vez disso, concentrar-nos-íamos nas nódoas de sopa, de sangue, de vinho, etc. Estas são as regularidades importantes para o empregado da lavandaria. O que são os sistemas que identificam regularidades perceptíveis e comprimem a sua descrição numa mensagem breve? Estes sistemas são aquilo que designamos por sistemas adaptáveis complexos, os sistemas que aprendem ou se adaptam ou evoluem do mesmo modo que os seres vivos. Cada um de nós é um sistema destes, capaz de identificar regularidades perceptíveis na cadeia de dados que nos atinge e de distingui-las daquilo que percebemos como aleatório ou acidental, comprimindo de seguida a descrição dessas regularidades numa mensagem breve.

Podemos descrever o modo como um sistema adaptável complexo funciona. Ele começa por receber uma cadeia de dados sobre o universo, incluindo ele próprio. Certas regularidades presentes nos dados são identificadas e comprimidas numa mensagem muito curta, a que chamo esquema. Este esquema pode ser usado, conjuntamente com alguns dados adicionais presentes na cadeia de dados original, para descrever características do universo, prever

o comportamento de objectos no universo, ou determinar comportamentos a assumir pelo sistema adaptável complexo: a descrição pode ser melhor ou pior; as previsões podem revelar-se verdadeiras ou falsas; a prescrição de um determinado comportamento no mundo real pode resultar em sucesso ou em fracasso, sobrevivência ou desaparecimento. Estas consequências desenvolvidas no mundo real são então devolvidas ao sistema adaptável complexo, de forma a condicionar os processos internos de selecção entre os vários esquemas em competição. (Apesar de um esquema ter de possuir algum grau de estabilidade ou robustez, tem também de ser capaz de experimentar pequenas variações, sofrer mutações mais drásticas ou mesmo de ser substituível por outro.)

### Sistemas adaptáveis complexos e esquemas

Todos os exemplos de sistemas adaptáveis complexos existentes na Terra, pelo menos todos aqueles que conhecemos, estão relacionados de alguma forma com a vida, embora não sejam necessariamente formas de vida ou mesmo partes ou associações de sistemas vivos. Além disso, têm uma tendência para originar outros sistemas adaptáveis complexos.

Entre os sistemas adaptáveis complexos do nosso planeta encontram-se as reacções químicas pré-bióticas que originaram as formas primordiais de vida. Assim, a evolução biológica é um sistema adaptável complexo, tal como o comportamento de cada organismo individual resultante da evolução biológica. Partes dos organismos podem também funcionar como sistemas adaptáveis complexos – por exemplo, o nosso sistema imunológico. O funcionamento do cérebro humano, conduzindo à aprendizagem e ao pensamento individual, é também um sistema adaptável complexo. Podemos também observar o comportamento de grupos organizados de pessoas: a evolução cultural humana em geral é um sistema adaptável complexo e as organizações humanas, tais como as empresas, evoluem como sistemas adaptáveis complexos. Há também sistemas adaptáveis complexos não-vivos. Os nossos computadores são agora suficientemente sofisticados para possibilitar que neles se estabeleçam sistemas adaptáveis complexos, em geral através da utilização de *software*. Onde está, neste caso, a ligação com a vida? Bem, existe uma concordância generalizada que os “maníacos dos computadores” que aperfeiçoaram o *software* para estes sistemas adaptáveis complexos nos computadores são, de facto, seres vivos!...

O que são, então, os esquemas? Consideremos um sistema adaptável complexo muito familiar que envolve muitos seres humanos, nomeadamente o empreendimento científico, no qual a maior parte de nós participa. Os esquemas são aqui as teorias. As teorias são robustas e sobrevivem, em geral, quando alcançam sucesso na previsão das propriedades do mundo real. Quando

observações realizadas cuidadosamente conduzem sistematicamente a resultados que não concordam com a teoria, então esta é modificada ou substituída por outra. Além do empreendimento científico, no qual os esquemas são as teorias, podemos considerar a evolução biológica, onde os esquemas são os genótipos, e a evolução da sociedade humana, onde os esquemas são as leis, tradições, mitos, costumes, e por aí fora. Estes esquemas são constituídos por unidades que Richard Dawkins baptizou de *memes*, que desempenham um papel análogo ao dos genes na evolução biológica. Conjuntos de *memes* constituem o DNA cultural para a evolução social. Voltemos de novo aos sistemas adaptáveis complexos nos computadores. Existem algoritmos genéticos, que se baseiam numa analogia muito imperfeita com a evolução biológica. Existem as designadas redes neuronais, que se baseiam numa analogia muito imperfeita com a forma como se pensa que o sistema nervoso humano – em especial o cérebro – funciona. Mas poderia haver muitos mais. Poderíamos ter dezenas de tipos diferentes de métodos computacionais adaptáveis e tais métodos não têm de se basear em analogias com modelos do cérebro ou da evolução biológica. Tem de existir uma classe muito vasta de sistemas adaptáveis complexos nos computadores. O que é esta classe? Que membros dessa classe podem ser utilizados para resolver cada tipo de problema? Sabemos que existem alguns problemas para os quais os algoritmos genéticos são adequados, enquanto, noutros casos, estes algoritmos não têm utilidade nenhuma. O mesmo se pode dizer das redes neuronais – há certos problemas de optimização, por exemplo, para os quais as redes neuronais funcionam muito bem, mas existem outros para os quais não funcionam. Pode demonstrar-se que não existe nenhum sistema adaptável complexo num computador que seja bom para todos os problemas de optimização. Cada um tem o seu domínio de aplicabilidade, e é um grande desafio para a teoria compreender todas as classes de sistemas adaptáveis complexos nos computadores e descobrir qual é o melhor para cada espécie de problema.

Devo agora chamar a atenção para o facto de nem toda a gente usar a minha notação. John Holland, o inventor original dos algoritmos genéticos e meu colega e amigo, usa uma terminologia diferente. Aquilo a que eu chamo sistema adaptável complexo é algo semelhante ao que ele designa por modelo interno. Ele usa o termo sistema adaptável complexo para designar o que eu chamaria de agregação fraca de sistemas adaptáveis complexos que se assemelham um aos outros. (Exemplos destes incluem um mercado constituído por investidores e um sistema ecológico constituído por organismos.) Ao usarmos diferentes terminologias, estamos ambos a ilustrar o famoso adágio que afirma que um cientista mais facilmente usaria a escova de dentes de outra pessoa

do que a nomenclatura inventada por outro cientista. Por vezes, uma aparente complexidade não reflecte uma complexidade efectiva elevada. Além do comprimento do programa mais curto que faria um determinado computador universal imprimir a descrição das regularidades da entidade em questão, temos também de considerar quanto tempo levaria o computador a imprimir a descrição com esse programa simples. Esta propriedade é conhecida por profundidade lógica das regularidades, conforme foi discutido por Charles Bennett.

### Complexidade aparente e complexidade efectiva

Consideremos, por exemplo, os níveis de energia de um núcleo atómico. As regras que determinam esses níveis de energia parecem, à primeira vista, muito complicadas, mas acreditamos actualmente que elas se podem obter a partir de duas teorias físicas simples: a electrodinâmica quântica (a teoria quântica de campos das interacções electromagnéticas) e a cromodinâmica quântica (a teoria quântica de campos dos quarks e gluões). Acreditamos que, se unificássemos estas duas teorias, obteríamos uma descrição muito pormenorizada dos núcleos atómicos, incluindo os valores de todos os seus níveis de energia. Mas os cálculos são extremamente longos e difíceis nos computadores actualmente existentes, usando métodos conhecidos de cálculo, e a maior parte deles não foram ainda efectuados. Este é, pois, um caso em que estamos aparentemente a lidar com algo muito complexo, mas que tem, de facto, uma complexidade efectiva reduzida, embora possua bastante profundidade lógica. Por outras palavras, o problema envolve um programa curto, mas que está associado a um tempo de computação muito longo. Consideremos agora um caso em que não estamos ainda certos se a complexidade aparente reflecte a existência de uma grande complexidade efectiva ou de uma grande profundidade lógica. Constituem as características universais da bioquímica na Terra um sistema único? Ou há muitos tipos diferentes de bioquímicas possíveis para sistemas que se assemelham à vida fluorescentes noutros planetas, que gravitam em torno de outras estrelas, noutras partes do Universo? Não parece existir nada particularmente especial no nosso sistema solar ou no nosso planeta ou, por isso, na vida, que apareceu cedo na Terra, logo após ter terminado o intenso bombardeamento a que esta esteve sujeita. É mais provável, então, que haja muitos mais planetas no Universo que possuam qualquer coisa semelhante à vida, isto é, sistemas adaptáveis complexos com uma química que se assemelha de alguma maneira à bioquímica terrestre. Mas terão essas bioquímicas de ser iguais? Ou há uma vasta gama de possíveis bioquímicas? Não sabemos realmente e os especialistas não estão de acordo nesta matéria.

Alguns deles pensam que os constrangimentos fundamentais da Física limitam as bioquímicas a apenas um reduzido

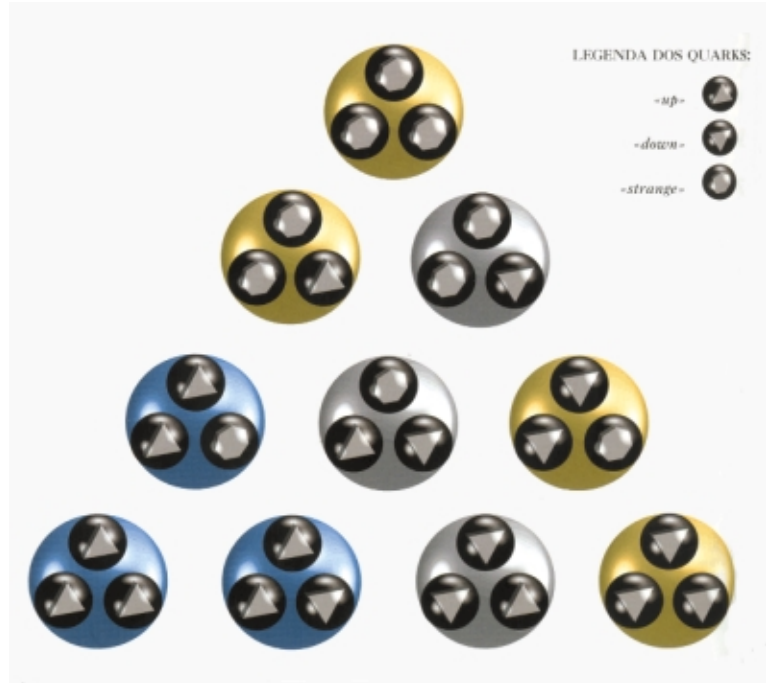
número de possibilidades. Outros teóricos acreditam que há muitas bioquímicas possíveis, das quais temos apenas um exemplo aqui na Terra. Se aceitarmos as ideias do primeiro conjunto de teóricos, a bioquímica tem uma complexidade efectiva reduzida porque pode ser obtida a partir das leis da Física. A forma de a obter pode, contudo, ser longa, o que implicaria uma boa dose de profundidade lógica. Por outro lado, se os outros teóricos estiverem correctos, a bioquímica na Terra tem uma complexidade efectiva apreciável, visto que dependerá tanto dos acidentes inesperados e casuais da história como da Física fundamental.

Este problema conduz à questão do modo como surge a complexidade no Universo. De onde surge a complexidade efectiva? Aqueles que estudam as leis fundamentais da Física acreditam, tal como eu, que essas leis são extremamente simples. Existem apenas duas dessas leis.

A primeira é uma teoria unificada de todas as partículas elementares e de todas as forças da Natureza. Pode ser que esta teoria tenha já sido formulada, na forma da maravilhosa candidata que brotou da teoria das supercordas que hoje é conhecida por “Teoria M”. O outro princípio fundamental da Física é a condição inicial do Universo, nas proximidades do início da sua expansão, há cerca de 10 mil milhões de anos. Esta pode também ser simples. De facto, algumas ideias específicas têm sido propostas segundo as quais a condição inicial do Universo poderia ser simples.

Há cem anos, teríamos dito que, fornecidas a teoria fundamental e a condição inicial, poderíamos, em princípio, prever toda a história do Universo. Mas hoje sabemos que não é assim. As nossas teorias são probabilísticas em vez de serem totalmente determinísticas. Por isso, a história do Universo é determinada simultaneamente por estes dois princípios fundamentais e pela sequência inconcebivelmente longa de acidentes inesperados e casuais com vários resultados possíveis. Antes de cada acontecimento, só estão disponíveis as probabilidades relativas associadas aos vários resultados possíveis. Um exemplo muito simples retirado da experiência laboratorial é a desintegração radioactiva de um núcleo atómico, com emissão, por exemplo, de uma partícula alfa. A direcção segundo a qual essa partícula é ejectada é absolutamente indeterminável antes de ela ser observada; todas as direcções são igualmente prováveis. No entanto, quando ela é, de facto, observada, torna-se fácil descobrir a direcção segundo a qual foi emitida.

Podemos pensar nas histórias alternativas do Universo como formando uma árvore ramificada, com uma determinada probabilidade associada a cada um dos ramos. À medida que o tempo passa e uma dada ramificação é atingida, um dos seus ramos é seleccionado. Contudo, antes da ramificação surgir, existem apenas probabilidades para as diferentes alternativas.



### Acidentes congelados e história do Universo

O notável escritor argentino Jorge Luís Borges escreveu um pequeno conto intitulado “*O Jardim das Encruzilhadas*”, no qual alguém construiu, sob a forma de jardim, um modelo de histórias ramificadas do Universo.

Pensemos apenas nos vários acidentes inesperados e casuais que tiveram como resultado nós próprios: a pequena flutuação que produziu a nossa Galáxia; os acontecimentos que foram responsáveis pela formação do nosso sistema solar; os acidentes que determinaram as características da Terra; os acidentes que deram origem à vida, durante a alvorada da história da Terra; todos os acidentes associados à evolução biológica que, conjuntamente com a selecção natural, conduziram ao aparecimento das formas de vida actuais, incluindo os seres humanos; e, depois, os acidentes do espermatozóide e do ovo, da selecção sexual, do desenvolvimento no interior do útero e na infância que conduziram a cada um dos adultos que somos nós.

Agora, de entre os acidentes inesperados e casuais da história do Universo, alguns são mais geradores de informação mútua, mais geradores de regularidades do que outros. A flutuação que deu origem à nossa Galáxia, por exemplo, pode não ser considerada muito importante à escala cósmica, mas, para tudo o que existe nessa galáxia, é de enorme importância que ela tenha tido oportunidade de surgir. Da mesma forma, muitos eventos na história da humanidade representam ramificações com consequências de enorme relevância para a história futura da humanidade na Terra.

Hoje em dia, os historiadores gostam de referir Annie Oakley, a famosa mulher pistoleira do elenco do espectáculo “*Buffalo Bill Cody’s Wild West Show*”, que



esteve em digressão pela Europa em 1889. Num dos números do espectáculo, Annie Oakley propunha-se, com um tiro, fazer saltar parte de um charuto da boca de um espectador que se oferecesse como voluntário. Normalmente, ninguém se oferecia voluntariamente para esta experiência arriscada, e o seu marido, também ele um famoso atirador, saltava para a frente com o seu charuto. Annie Oakley acertava nas cinzas do charuto do seu marido e a assistência aplaudia. Mas em Berlim, em 1889, surgiu um voluntário da audiência – o *Kaiser*. Ele estava no trono há pouco mais de um ano quando se ofereceu para ser a vítima do número de destreza de Annie Oakley. Ela estava preocupada com a sua pontaria – tinha bebido muito – mas não teve escolha. O *Kaiser* retirou a cinta do seu caro havano, aparou-lhe a ponta com o seu cortador de prata, colocou-o na boca e acendeu-o. Annie apontou à extremidade do charuto e acertou nas cinzas. Ela não matou o *Kaiser*, mas o que aconteceria se o tivesse feito? A História teria sido provavelmente bastante diferente. A Primeira Guerra Mundial teria sido muito diferente – de facto, poderia nunca ter acontecido – e por aí fora. Aqui temos um exemplo de um acidente congelado, um acontecimento casual que produz uma grande quantidade de informação mútua futura numa porção do Universo que nos interessa. Podemos agora responder à pergunta: porque é que há, em tantos domínios da experiência, uma tendência para que, à medida que o tempo passa, surjam entidades cada vez mais complexas? As leis fundamentais da Natureza, como vimos, são muito simples, incluindo a condição inicial do Universo, mas essas leis são probabilísticas. A evolução histórica dá-se numa árvore ramificada de probabilidades, com acidentes junto às ramificações. Alguns desses acidentes – os acidentes congelados – são mais importantes do que outros. À medida que o tempo flui, mais e mais acidentes congelados podem ser acumulados, tornando possível a emergência de mais e mais regularidades. Se a acumulação de resultados de

acidentes congelados se sobrepõe à sua eliminação, surgem então coisas cada vez mais complexas com o decorrer do tempo. Não é, naturalmente, verdadeiro que cada coisa individual se torne mais complexa. Longe disso; por exemplo, organismos e civilizações morrem e ficam, obviamente, muito menos complexos nesse processo. Mas o que podemos afirmar é que, em muitos casos, o conteúdo de complexidade tende a crescer à medida que o tempo passa, de tal forma que são produzidas entidades cada vez mais complexas.

O aparecimento com o tempo de entidades progressivamente mais complexas não é, de forma nenhuma, incompatível com a famosa segunda lei da Termodinâmica, que afirma que a desordem média, a entropia, de um sistema fechado tem tendência para aumentar com o tempo. Mas isso é assim no caso da desordem *média* – não há nada que impeça a existência de mecanismos de auto-organização capazes de produzir ordem local a expensas de uma maior desordem noutra lugar. Conhecemos muitos mecanismos de auto-organização, por exemplo a atracção gravitacional, que produziu as galáxias, estrelas, planetas, rochas, etc. Do mesmo modo, temperaturas baixas originam formas belas e regulares como os cristais ou os flocos de neve. Deixem-me concluir colocando uma interrogação sobre o futuro. Continuarão a surgir no Universo coisas cada vez mais complexas? Bem, nós não temos a certeza, mas podemos especular. Muitos físicos teóricos acreditam, apesar de até agora as experiências não o terem ainda provado, que acabará por se descobrir que o protão é instável. Se for assim, então os núcleos atómicos são instáveis, com tempos de vida talvez da ordem de grandeza de  $10^{25}$  anos (isto é, um um seguido de 25 zeros – um número enorme de anos). Passado algum desse tempo, grande parte dos núcleos teria desaparecido e os átomos e as moléculas teriam desaparecido também. A maioria das regularidades com que estamos familiarizados teria desaparecido e poderia então acontecer que entidades mais complexas não continuassem a surgir. De facto, o conteúdo de complexidade poderia começar a encolher quando a maior parte dos núcleos tivesse desaparecido. Contudo, este não é assunto que nos deva preocupar de imediato. Temos hoje em dia, certamente, preocupações muito mais prementes!...

\* Santa Fe Institute, Santa Fé, E. U. A.

(Subtítulos da responsabilidade da redacção)

#### NOTAS

- [1] "O Quark e o Jaguar: Aventuras no Simples e no Complexo", Gradiva, Lisboa, 1997.  
[2] *bit* = binary digit, em português, algarismo binário.

Crédito da figura da página 11:

G. Frazer, E. Lillestøl e I. Sellevag, "À Descoberta do Definito", Bertrand, Lisboa, 1995.