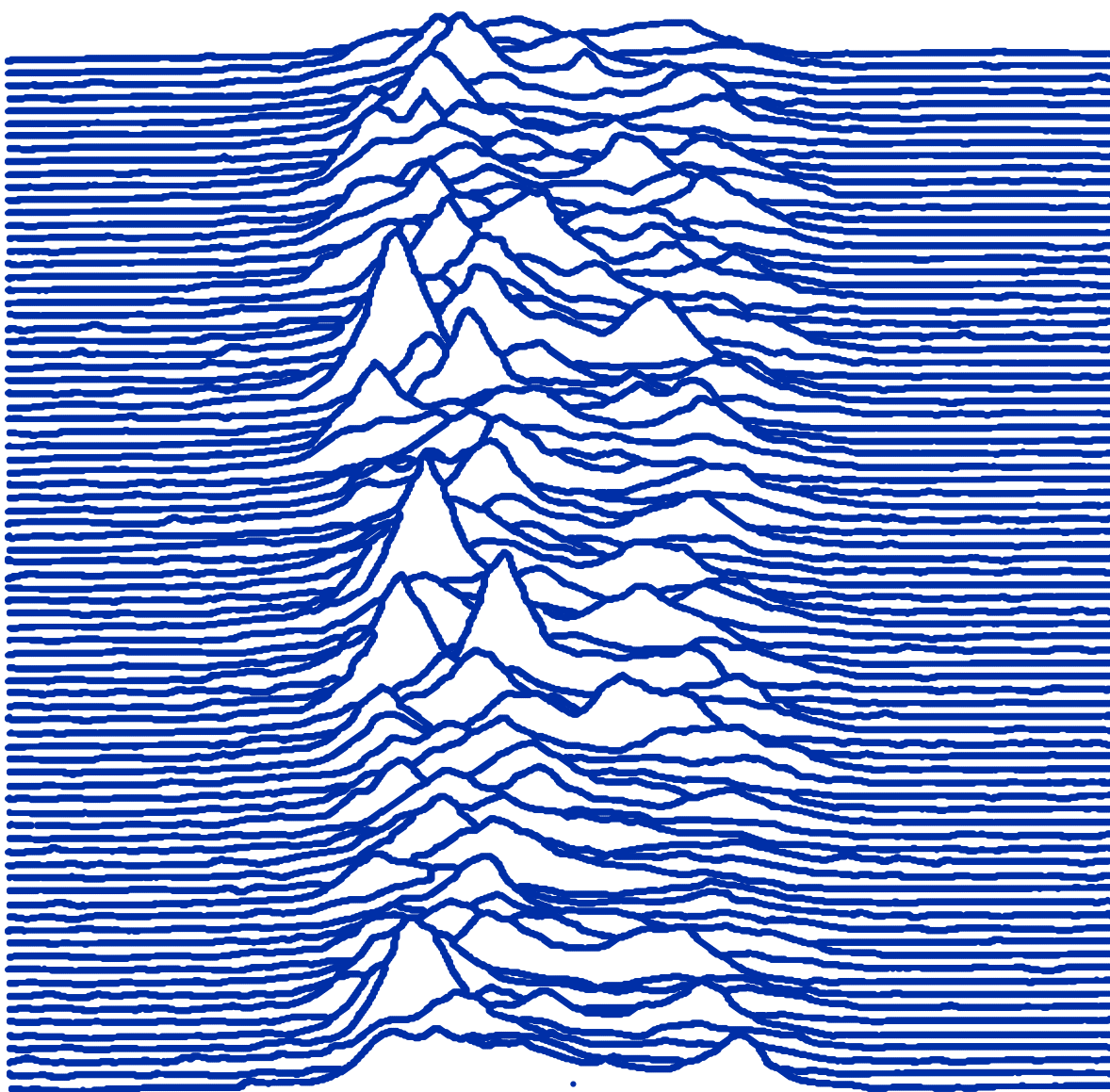


PULSAR

EDIÇÃO 40 | NOVEMBRO 2019 | DISTRIBUIÇÃO GRATUITA



Destaque acima: Primeira fotografia de um buraco negro (M87)

Fonte: *Event Horizon Telescope Collaboration*

Imagem de capa: Sinal rádio captado por um radiotelescópio do pulsar PSR B1919+21

Créditos: *Radio Observations of the Pulse Profiles and Dispersion Measures of Twelve Pulsars*, Harold Dumont Craf, Arecibo Observatory

Apoio Financeiro



UID/FIS/00099/2019

Parceiros



Ficha Técnica

Direção:

Rodrigo Câmara, Carolina Gonçalves, Pedro Piçarra, Sebastião Antunes, Ana Filipa Valente, Thomas Gaehtgens, Inês Rainho

Redação:

Carolina Gonçalves, Bárbara Mota, Marta Couto, João Gonçalves, Eduardo Bastiana, João Mesquita Lopes, Alexandre Barbosa, Inês Rainho, Carlos Cunha, Sara Marques, João Melo, Patrícia Muíño, Mónica Afonso, Beatriz Belbut, João Rosa, André Guimarães, Pedro Braz, Diogo Velosa

Revisão linguística:

Sebastião Antunes, Pedro Piçarra, Carolina Gonçalves, Ana Filipa Valente, Inês Rainho, Alexandre Barbosa, Miguel Farias, Maria Costa, Hugo Miranda

Comissão Científica:

Bruno Gonçalves (Fusão Nuclear), Diana C. Leitão (Nanotecnologias), Filipe Mendes (Energia), João M. Dias (Ótica e Lasers), José P. S. Lemos (Astrofísica e Gravitação), Manuela Mendes (Geofísica), Mário Pimenta (Física de Partículas), Rui Dilão (Biofísica e Sistemas Dinâmicos), Vasco Guerra (Física de Plasmas), Vítor R. Vieira (Física da Matéria Condensada)

Arte

Design e montagem: Ana Filipa Valente, Thomas Gaehtgens e Carolina Gonçalves

Produção

Impressão: Ligrate Atelier Gráfico, Lda.

Tiragem: 1500 exemplares

Contacto

Site: <http://pulsar.nfist.pt>

Facebook: <https://www.facebook.com/pulsarmag>

e-mail: pulsar.nfist@gmail.com

Morada: Núcleo de Física do Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais 1, Edifício Ciência - Departamento de Física, 1049-001 Lisboa

Telefone: 218419075 **Ext:** 3075

Índice

- 4** Breves
- 5** Abrindo as Portas da Percepção
- 6** Os Segredos do Movimento Celeste
- 8** A Evolução da Cooperação
- 10** Escrevendo as Equações da Expressão Genética
- 12** A Um Passo do Big Bang
- 13** Um por Todos, Todos por Um: Decompondo Empiricamente um Sinal
- 15** Flatland, Um Romance a Muitas Dimensões
- 16** Wormholes e Viagens no Tempo
- 18** Entrevista a David Tong
- 22** Os Ensinaamentos da Run 2 do LHC: Oportunidades e Desafios
- 24** Mudam-se os Tempos, Mudam-se as Vontades
- 25** Surround Modulation no Córtex Cerebral
- 28** Estudo do Ângulo de Deflexão da Bola Branca em Colisões entre Bolas de Bilhar
- 30** O Pai Natal Relativista
- 31** Agenda Científica

Editorial

Quarenta edições depois, a PULSAR continua presente. Desta vez, a edição é ainda mais especial, por assinalar o quadragésima publicação da mesma. Há quarenta anos foi lançado o famoso álbum da banda *rock* Joy Division – *Unknown Pleasures* – cuja capa é uma imagem obtida computacionalmente a partir de dados de um pulsar. Foi a capa deste álbum que serviu de inspiração à capa da edição 40 da PULSAR.

Este ano, a equipa da PULSAR decidiu inovar e realizou-se pela primeira vez um concurso direcionado a alunos do ensino secundário do Curso de Ciências e Tecnologias – o Concurso Pulsar Jovens Investigadores – que visa essencialmente estimular a excelência científica nestes alunos. Os vencedores do concurso contribuíram com um artigo para esta edição.

Por fim, gostaríamos de expressar o nosso agradecimento a todos os autores que contribuíram para a revista, bem como a toda a comissão científica.

Até à próxima,

A Direção da PULSAR

Ano Internacional Da Tabela Periódica

A Organização das Nações Unidas (ONU) declarou 2019 como sendo o Ano Internacional da Tabela Periódica dos Elementos Químicos. Um dos principais motivos para a comemoração é que se completam em 2019 150 anos desde a primeira tabela de Dmitry Mendeleev, publicada em 1869. Mendeleev foi o primeiro a organizar a informação dos elementos químicos conhecidos, sendo que, observando a forma periódica como se repetiam as propriedades, conseguiu prever a existência de alguns elementos antes que estes tivessem sido descobertos.

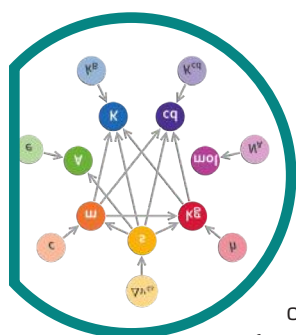


A Terceira Mulher De Sempre A Ganhar Um Nobel Da Física

Donna Strickland, professora de Física na Universidade de Waterloo, no Canadá, foi premiada em conjunto com dois colegas (Gérard Mourou, Arthur Ashkin) com o prémio Nobel da Física de 2018. Apesar do Nobel da Física já ter sido atribuído a 210 pessoas, Strickland é apenas a terceira mulher a recebê-lo, depois de Marie Curie (1903) e Maria Goeppert Mayer (1963). A desigualdade entre homens e mulheres estende-se a outros campos, sendo que a Química também só premiou este ano a quinta mulher com o Prémio Nobel da Química.

Nascem Os Primeiros Bebés Geneticamente Modificados

Em Novembro de 2018, o cientista chinês He Jiankui afirmou ter alterado o ADN de dois embriões, sendo que, presumivelmente, as duas gémeas já nasceram e são saudáveis. A modificação genética dos embriões foi feita com a técnica CRISPR, a mais usada para remover e substituir, com extrema precisão, sequências de ADN, e foi justificada com vista a tornar as bebés imunes ao vírus VIH. Embora a modificação do genoma humano possa permitir a erradicação de doenças hereditárias, esta é altamente controversa, estando em causa a alteração de todo o património genético e a criação eticamente questionada de pessoas “à medida”. A própria comunidade científica ficou chocada com este anúncio e várias vozes se levantaram alertando que a “experiência em seres humanos é inconsciente e que não é moralmente ou eticamente defensável”.



O Novo Quilograma

Depois de 129 anos, a definição universal de quilograma torna-se mais precisa e abandona de vez o cilindro de platino-irídio guardado no Pavilhão de Breteuil, na periferia de Paris, que antes servia de padrão. Em Novembro de 2018, na 26ª. Conferência Geral de Pesos e Medidas realizada em Versalhes, os 60 estados-membros votaram unanimemente por redefinir o quilograma. A nova definição de quilograma baseia-se no uso da balança de Watt, em que se equilibra a massa do corpo com uma potência eletromagnética. A potência é calculada a partir do valor da corrente elétrica aplicada para a gerar e do valor da constante de Planck, ambos conhecidos. Assim sendo, o quilograma passa a depender de uma constante universal invariável (constante de Planck, h).

Proteína Animal Livre De Animais

A próxima revolução da indústria alimentar pode estar próxima de chegar às prateleiras dos nossos supermercados. Uma das empresas que promete produzir carne livre de sacrifício animal é a JUST, onde a carne é produzida através de células extraídas da raiz de penas de galinha num processo que não implica qualquer tipo de sofrimento para o animal. Depois dessa recolha celular, esse pequeno volume de células vivas é multiplicado em laboratório até chegarmos ao hambúrguer. Apesar de estes processos já serem bastante bem conhecidos, muitas vezes ainda se usa de soro bovino como meio de cultura. Assim sendo, mesmo que o primeiro hambúrguer “proveta” já tenha sido lançado, ainda são precisos alguns anos de investigação para que os produtos sejam rentáveis e completamente amigos dos animais.



Abrindo as Portas da Percepção

por João Gonçalves, aluno do 3º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

Foi em 1968 e ao som de *Also Sprach Zarathustra*, de Strauss, que Stanley Kubrick brindou o mundo com a sua visão magnânima e enigmática da conquista espacial: *2001: A Space Odyssey*. Um ano antes de Neil Armstrong e Buzz Aldrin pisarem o solo lunar, milhões de espetadores haviam já viajado a bordo da *Discovery One* para lá de Júpiter e em direção a um futuro incompreensível, mas nem por isso menos fascinante.

50 anos depois, esse espírito aventureiro e essa insaciável fome de conhecimento que tanto marcaram o final da década de 60 parecem manter-se ainda hoje vivos, como evidenciado pelo interesse popular nas descobertas da Física moderna e nos mais recentes feitos da engenharia: o Bosão de Higgs, as ondas gravitacionais ou os planos megalómanos de expansão interplanetária de Elon Musk, entre tantos outros exemplos.

Infelizmente, entre a banda sonora inesquecível e a hipnotizante cinematografia e efeitos especiais de *2001* (que valeram a Kubrick o seu único Oscar) escondem-se os defeitos e falhas que assolam ainda hoje a Humanidade, tanto ou mais do que em 1968. Na primeira das três secções nas quais está dividido o filme, *The Dawn of Man*, seguimos a vida de um grupo de hominídeos primordiais numa savana africana pré-histórica e particularmente a sua descoberta de um misterioso monólito negro, de faces lisas. A súbita aparição do objeto assusta as criaturas até que o seu fascínio e a sua vontade de o conhecer as levam a esticar lentamente os braços até lhe tocarem com as pontas dos dedos, deixando-se influenciar pelo seu poder desconhecido. No dia seguinte, um dos hominídeos tem um momento de epifania ao remexer nos ossos de um companheiro falecido e começa a embatê-los uns nos outros, repetidamente, numa cena cada vez mais intensa. Ao fim de algum tempo, e munido de uma imparável raiva, a criatura corre em direção a um seu semelhante (presumivelmente, um membro de uma tribo inimiga), e fustiga-o com um osso, matando-o. É o nascimento das ferramentas, e com elas o poder da imaginação e criação, mas a que preço?

Kubrick parece querer dizer-nos que o progresso surge do conflito, da violência, da guerra.

Analisando a sua cinematografia torna-se evidente o seu apreço pela análise e dissecação destes vícios humanos: *Dr. Strangelove* é uma crítica sardónica ao ridículo da guerra nuclear; *A Clockwork Orange* uma viagem por um mundo macabro de ultraviolência; *The Shining* um mergulho profundo nos limites perturbadores da psique humana. Olhando para o mundo real, é difícil discordar dele: é inegável a forma como o progresso científico parece disparar quando coincide com interesses políticos e militares em tempos de guerra e abrandar em tempos de paz, para detrimento do progresso social, do bem comum e da preservação do meio ambiente.

No entanto, por detrás deste manto negro de cinismo,

2001 deixa transparecer um idealismo quase religioso e uma esperança inabalável dos seus criadores (o roteiro foi escrito conjuntamente por Stanley Kubrick e Arthur C. Clarke) no potencial da Humanidade: apesar de tudo, o Homem continua a prosperar e a progredir, alcançando a Lua e



Figura: A descoberta das Ferramentas

viajando mais longe ainda, em direção a Júpiter, na segunda secção do filme: *Jupiter Mission*. É aí que conhecemos o célebre HAL9000, o computador de bordo que acompanha uma equipa de astronautas nesta viagem interplanetária. Na nossa época de consideráveis progressos nas áreas da robótica e da inteligência artificial, o desfecho deste segmento (onde HAL9000 acaba por assassinar quase todos os seres humanos a bordo da nave) deveria servir-nos como conto preventivo. No entanto, também aqui o idealismo do filme se parece sobrepor ao seu fatalismo, e somos levados a crer que o nosso fim não virá pelas mãos das nossas próprias criações, pois é o engenho humano quem derradeiramente destrona o poder quase divino da máquina, qual Prometeu roubando o fogo aos deuses, e o único astronauta a sobreviver à chacina de HAL acaba mesmo por desligá-lo e prosseguir com a sua missão.

O terceiro segmento do filme, *Jupiter and Beyond the Infinite*, é o mais denso e enigmático. Nele acompanhamos o astronauta David Bowman, o último sobrevivente da missão do segmento anterior, numa viagem psicadélica pelos limites do espaço, do tempo e da compreensão humana, que culmina na sua morte e renascimento físico e espiritual sob a forma de uma criatura com a aparência de uma criança humana que começa a dirigir-se em direção à Terra. Nem todos os alucinogénios dos anos 60 darão alguma vez uma resposta concreta quanto ao significado destas cenas finais, mas é evidente que o seu carácter profundamente simbólico nos remete para a ideia geral que caracteriza este *magnum opus* da carreira de Kubrick: estamos destinados a algo mais.

A beleza de estudar Ciência e, no nosso caso particular, Física, é que podemos presenciar a abertura das portas da nossa própria percepção do Universo e saborear uma porção, embora muito pequena, da infinita complexidade de tudo o que existe. Nos 50 anos de uma das maiores obras de ficção-científica de sempre, e numa altura em que a influência da pressão do trabalho nas nossas vidas pessoais nos faz ponderar constantemente sobre se estudar Física ainda valerá a pena, é importante recordar o que este filme nos ensina: o caminho para o progresso é lento e sofrido, mas só percorrendo-o é que alcançaremos todo o nosso potencial, enquanto indivíduos e enquanto espécie. ■

Os Segredos do Movimento Celeste

por Carlos Cunha e Sara Marques, alunos do 3º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica e do Mestrado Integrado em Eng. Aeroespacial, IST, respetivamente



Um Pouco de História.....

Johannes Kepler, baseando-se em observações mais precisas, aprimorou as conclusões de Copérnico ao indicar que as órbitas dos planetas não são circulares, mas elípticas. Tal implicaria que o Sol não se encontrava no centro da órbita, mas num dos pontos focais da elipse, ficando o outro vazio.

Esta é a primeira de 3 leis enunciadas por Kepler. Foi somente mais tarde, quando Newton e Gottfried Leibniz descobriram o cálculo infinitesimal, que foi provada, matematicamente, a veracidade das leis do movimento orbital dos planetas de Kepler.

A segunda lei afirma que a área da órbita varrida pelo corpo celeste é igual para intervalos de tempo iguais.

A terceira lei expressa a relação $T^2 = a^3$, em que a é o semieixo maior da elipse e T é o seu período.

Assume-se que existe um corpo massivo num dos pontos focais parado e a ser orbitado por um corpo de pequenas dimensões e massa. Nas suas teorias, também são negligenciados efeitos como pressão devido à radiação solar, fricção devido às atmosferas dos corpos em órbita e a possível influência de forças gravíticas geradas por outros satélites.

Para se estudar a órbita de planetas como Mercúrio, ainda se tem de ter em conta efeitos relativísticos para se ter uma maior precisão nos cálculos.

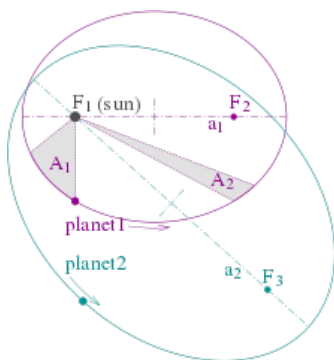


Figura 1: 1ª e 2ª Leis de Kepler.

Os 6 Parâmetros Mágicos - Elementos Keplerianos

A órbita de um satélite é sempre um plano em torno do corpo mais pesado. Existem 6 parâmetros fundamentais para descrever a órbita [2]: 3 deles descrevem o aspeto do plano e a posição do satélite na elipse (ou seja, na sua órbita) e os outros 3 descrevem como este plano está orientado no referencial celeste de inércia. Falaremos um pouco de cada um deles.

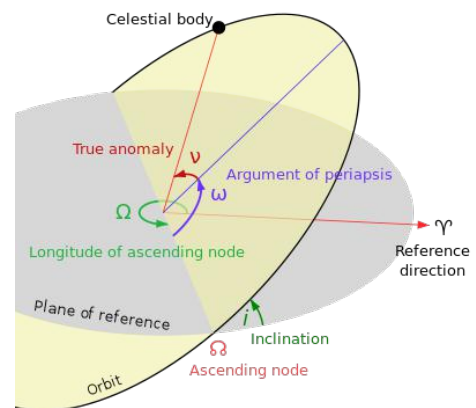
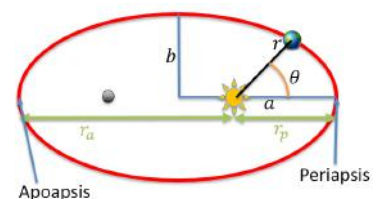


Figura 2: Elementos Keplerianos.

Semieixo Maior e Menor

Figura 3: Apogeu e Peri-geu numa Órbita.



Descrevendo uma órbita elíptica, teremos dois raios. O raio mais curto designa-se semieixo menor e o mais longo semieixo maior. O semieixo maior é o primeiro parâmetro kepleriano, que usaremos para descrever o tamanho da elipse.

No caso de satélites artificiais, é prático relacionar estes parâmetros com o apogeu (ponto em que o satélite está o mais afastado da Terra) e com o perigeu (ponto em que está mais próximo da Terra). Neste caso temos,

$$b = \frac{r_{apogeu} + r_{perigeu}}{2}$$

Excentricidade (e)

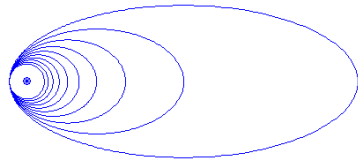
Para podermos definir a órbita, temos também de saber a sua forma. Esta é dada pela excentricidade, uma grandeza sem unidades que pode ser facilmente calculada através da seguinte fórmula,

$$e = \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p}$$

Para certos valores de excentricidade iremos ter diferentes tipos de órbitas associadas:

- **Órbita Circular:** $e = 0$
- **Órbita Elíptica:** $0 < e < 1$
- **Órbita Parabólica:** $e = 1$
- **Órbita Hiperbólica:** $e > 1$

Figura 4: Excentricidade de 0 a 0.9.



Anomalia Verdadeira (θ)

O terceiro parâmetro orbital, designado por anomalia verdadeira θ , é o ângulo formado entre o semieixo maior e a linha que une o satélite ao corpo sobre o qual este gira, no seu foco. θ varia com o tempo, sendo 0° quando atinge o perigeu e 180° no apogeu. A expressão abaixo descreve a órbita em coordenadas polares em função de θ .

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta}$$

Inclinação (i)

A inclinação é o primeiro parâmetro orbital a descrever a orientação da órbita e é o ângulo entre o plano que contém a elipse e o plano de referência. Este é medido no nodo ascendente. Uma órbita será retrógrada quando a inclinação é maior que 90° .

Argumento do Periastro (ω)

Este corresponde ao ângulo entre o nodo ascendente e o semieixo maior da elipse. Para os objetos cujas órbitas são em torno do Sol, esse elemento denomina-se argumento do periélio e , para os que orbitam em torno da Terra, é o argumento do perigeu.

Longitude do Nó Ascendente (Ω)

Este é o último parâmetro a descrever as órbitas celestes. É o ângulo entre a direção de referência e o nodo ascendente na direção do movimento do satélite (no sentido anti-horário).

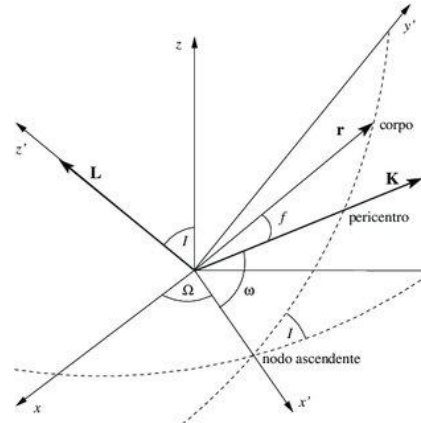
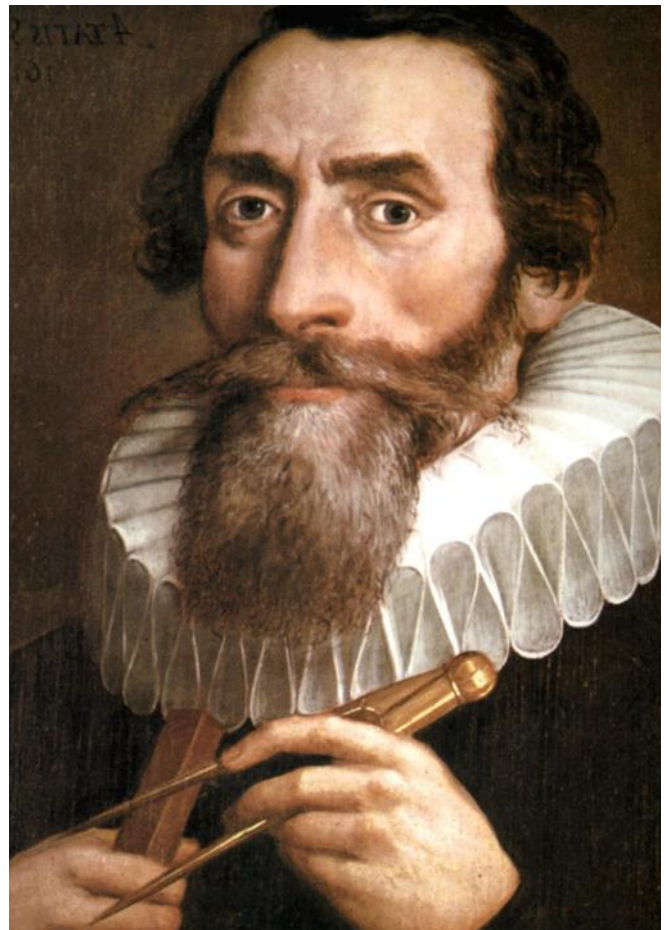


Figura 5: 3 parâmetros que descrevem a orientação orbital.

Em conclusão, estes parâmetros são ainda uma ferramenta muito interessante, com fortes implicações na astrofísica e na indústria espacial. [1] ■

Referências:

- [1] European Space Agency. www.esa.int/Education/Fly_A_Rocket/The_online_course, dec. 2018.
 [2] NAROM Norwegian Centre for Space-related Education. www.narom.no/undervisningsressurser/sarepta/rocket-theory/satellite-orbits/, dec. 2018.



A Evolução da Cooperação

por Marta Couto, alumna do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

A Física também resolve problemas não físicos

O comportamento humano sempre foi objeto de estudo das mais variadas áreas do saber – desde a Filosofia à Psicologia e Sociologia. Mais recentemente, reparando em certas semelhanças entre os sistemas físicos e os sociais, os Físicos e os Matemáticos também começaram a interessar-se por este tema e a tratá-lo à luz das ciências ditas exatas¹. Isto é possível pois, tal como os átomos se organizam para compor toda a matéria, também os humanos se inserem em sistemas complexos de grande dimensão. As propriedades dos materiais que vemos à nossa volta derivam de múltiplas interações ao nível atómico. De forma idêntica, também as pessoas interagem e se influenciam mutuamente ao nível local, dando origem à emergência de propriedades coletivas por vezes inesperadas². Ou, como Aristóteles observou, “*o todo é maior do que a simples soma das suas partes*”.

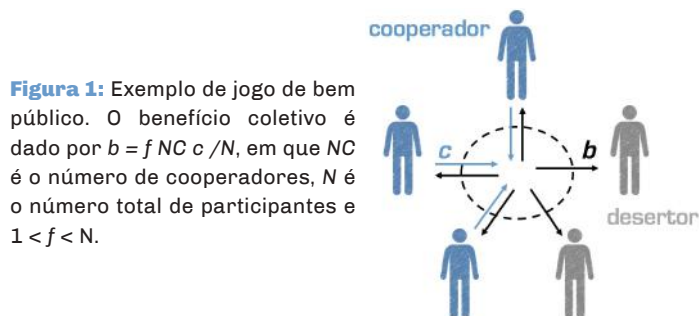
Com esta ideia em mente, muitos fenómenos sociais podem ser estudados utilizando modelos inspirados na Física Estatística e na Física da Matéria Condensada. Exemplos disso são o modelo de Ising (para descrever materiais ferromagnéticos) aplicado à dinâmica de opiniões, o modelo de segregação racial de Schelling, o modelo de disseminação de traços culturais de Axelrod, entre muitos outros. Devido à sua complexidade, muitos destes problemas não podem ser resolvidos analiticamente, sendo necessário recorrer ao poder das simulações computacionais.

Cooperação – um paradoxo

Um dos mais fascinantes temas relativos ao comportamento humano é a *cooperação*. Ela está difundida na Natureza, ocorrendo entre diferentes espécies e num espectro de escalas muito alargado, desde bactérias a grandes mamíferos. É um mecanismo fundamental para a evolução, a par da seleção e da mutação. Foi até identificada como um dos maiores desafios científicos do nosso tempo.

Parte do seu fascínio vem do facto da cooperação ser, quando quantificada, paradoxal. Podemos definir cooperação como uma interação em que um dos intervenientes está disposto a “pagar” um custo (c) para que outro(s) tenha(m) algum ganho ou benefício (b). Por exemplo, no *jogo de bem público*³, conceito bem conhecido em Teoria de Jogos, os participantes decidem contribuir (cooperar) ou não para uma conta comum; a quantia amealhada é posteriormente aumentada por um

certo fator (f) e igualmente distribuída por todos (Fig. 1). Se ninguém contribuir (ou, dito de outra forma, ninguém cooperar), não há vantagem para qualquer dos participantes. Porém, se alguém cooperar, quem não contribuir terá o benefício coletivo a custo zero para si. Assim, este conflito de interesses constitui um dilema social – o que é bom para o indivíduo não é bom para o coletivo.



Se de um ponto de vista inteiramente racional, a melhor estratégia é não cooperar, porque cooperamos no nosso dia-a-dia? É certo que as nossas decisões nem sempre são racionais, mas também é certo que o ser humano não é indiferente à oportunidade de ganhar uma vantagem imediata. Então, o que pode explicar a emergência da cooperação? Como é que este fenómeno pode ter evoluído e persistido nas sociedades, desde os nossos antepassados até aos dias de hoje?

Mecanismos que promovem a cooperação

Existem várias respostas possíveis às perguntas anteriores. Diversos estudos demonstram, teórica e empiricamente, que certos mecanismos promovem o aumento da cooperação. Aliás, se os mesmos não fossem inerentes às nossas interações, o resultado natural seria a chamada “*tragédia dos comuns*”, situação em que todos os indivíduos agem somente segundo o próprio interesse. É aliciante conhecer este tipo de mecanismos essencialmente por duas razões: uma é o simples facto de o Homem ter uma contínua curiosidade em relação ao funcionamento do mundo e de si mesmo; a outra é porque nos pode ajudar a influenciar sistemas onde os níveis de cooperação não são (ainda) satisfatórios, mas são necessários. Aqui, descrevemos os mecanismos mais importantes identificados até hoje (Fig. 2).

A *reciprocidade direta* está presente quando os mesmos agentes interagem repetidamente. Se soubermos que vamos encontrar mais vezes a mesma pessoa, temos tendência a cooperar mais, esperando que no futuro essa cooperação seja reciprocada, resultando em benefícios para ambas as partes. Já a *reciprocidade indireta* existe, pois, mesmo que não haja encontros futuros com as mesmas pessoas, as nossas ações contribuem para a construção de uma reputação que poderá ser conhecida dos nossos futuros “oponentes”, sendo menos provável cooperar-se com alguém que tenha má reputação do que o contrário. A *seleção espacial* relaciona-se com a es-

¹ Curiosamente, a Ciência da Cognição, muito ligada à Psicologia e com origem na denominada Psicofísica, teve origem na procura de leis semelhantes às da Física aplicáveis ao estudo da cognição, levada a cabo por Físicos nos anos 50 e 60 do Séc. XX – até o Institute for Advanced Studies equacionou, na altura, a introdução de uma cátedra em Social Sciences, liderada por um Físico Americano chamado Duncan Luce.

² Ver o livro *The Social Atom*, de Mark Buchanan.

³ Um *bem público* pode ser usufruído por todos (quer tenham para ele contribuído ou não) e é indivisível (a sua utilização por uns não reduz a disponibilidade para os próximos), como é o caso de infraestruturas e locais públicos. Contrariamente, um *recurso comum* é passível de escassez, como é o caso das pescas e dos recursos florestais.

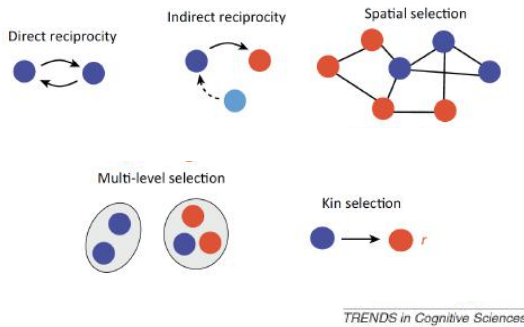


Figura 2: Cinco mecanismos que promovem a cooperação: reciprocidade direta, reciprocidade indireta, seleção espacial, seleção multi-nível e seleção de parentesco.

estrutura ou organização das nossas relações. Essa estrutura define quem interage com quem – pode tratar-se de uma distribuição geográfica (contacto entre vizinhos, por exemplo) ou de uma rede social mais complexa. O tipo de organização influencia o nível de cooperação, havendo redes com topologias mais propícias ao estabelecimento de relações cooperativas. A *seleção multi-nível* acontece quando há uma competição entre grupos diferentes: grupos compostos por indivíduos que cooperam entre si são mais viáveis, em termos evolutivos, do que grupos de desertores – afinal, *a união faz a força*. Finalmente, a *seleção de parentesco* é a propensão para cooperar com quem se tem relação genética (familiares ou indivíduos da mesma espécie). Como sugere a célebre expressão “*selfish gene*” de Dawkins, os genes são egoístas – a cooperação com organismos de material genético semelhante contribui para a própria sobrevivência.

Teoria de Jogos Evolutiva

No estudo da evolução da cooperação humana, é útil definirmos as interações entre agentes como um “jogo” – existem certas estratégias que podem ser escolhidas (no caso mais simples, cooperar ou não cooperar) e uma regra de pontuação que indica os ganhos/perdas de cada jogador após uma ronda⁴. Este formalismo matemático é chamado de Teoria de Jogos (já mencionada anteriormente). Imaginemos agora uma população de jogadores que vão interagindo entre si. Como é que a adoção de estratégias evolui no tempo? Será possível acabar num estado em que a sociedade é inteiramente composta por cooperadores? Para descobrir isso, podemos recorrer a outra ferramenta matemática, a Dinâmica Evolutiva. Este é um método que permite estudar a evolução de populações, isto é, como a sua composição muda com o tempo.

A *seleção natural* de Darwin diz-nos que indivíduos com fenótipos de maior *fitness* têm uma maior capacidade de sobrevivência, pois estão melhor adaptados ao meio envolvente. Assim, a sua capacidade de se reproduzirem é também maior, resultando num aumento da frequência dos respetivos genótipos numa dada população. Podemos usar esta ideia e construir uma analogia para resolver o nosso problema: aos genótipos associamos estratégias, cujo *fitness* é determinado pela pontuação resultante das interações com outros agentes, sendo a reprodução sub-

stituída por um processo de imitação ou aprendizagem, em que as melhores estratégias (com maior *fitness*) serão adotadas com maior probabilidade. Esta combinação de Teoria de Jogos com Dinâmica Evolutiva é denominada de Teoria de Jogos Evolutiva, sendo o principal método utilizado no estudo da evolução da cooperação. Os resultados daí obtidos podem depender de vários fatores, como a composição inicial da população, o “jogo” fundamental, a regra de seleção (ou imitação) e os mecanismos que estão presentes, como os que foram apresentados acima.

Estudos experimentais, em que pessoas recrutadas para o efeito participam em jogos de cooperação, têm também um papel essencial no entendimento do comportamento humano. De notar que a teoria ajuda a prever certas tendências, evitando esforços e gastos experimentais desnecessários; no entanto, certas experiências revelam pontos não considerados nos modelos que podem ser relevantes, designadamente enviesamentos culturais. Assim, a experiência e a teoria não se devem distanciar, sendo ambas necessárias à correta compreensão da cooperação e sua evolução.

Alterações climáticas – uma aplicação

Como já foi referido, é importante conhecer as condições que promovem a cooperação se quisermos redesenhar sistemas onde esta ainda não é suficiente. Um exemplo atual e pertinente é a forma como temos lidado com as alterações climáticas. Claramente, os acordos internacionais ainda não estão a dar os frutos pretendidos, embora os esforços estejam a aumentar. Como é que podemos abordar este problema do ponto de vista da Teoria de Jogos Evolutiva? Esta situação pode ser mimetizada recorrendo a uma espécie de jogo de bem público associado a um dilema social de cooperação: os países ou estados cooperadores são aqueles que respeitam as metas acordadas tomando medidas de prevenção dos efeitos nefastos para o ambiente (por exemplo, diminuição da emissão de gases poluentes), enquanto que os países desertores não contribuem com o seu esforço, mas usufruem do bem gerado pelos outros (aqui, o *bem público* é a proteção ambiental).

Porém, se um número mínimo de cooperadores não for atingido, todos os intervenientes correm o risco de perder o que têm, isto é, a alteração drástica do clima torna-se mais provável, degradando as condições de habitabilidade na Terra. Têm sido feitos estudos implementando estas ideias e algumas conclusões interessantes foram já retiradas. Por exemplo, mostra-se que é mais fácil a cooperação emergir em grupos pequenos, por isso, acordos articulados ao nível local e com poucos participantes são mais eficazes do que as convenções globais. Outra solução passa por um sistema de incentivos como punições e/ou recompensas geridos por instituições externas.

Como acabámos de ver, a Física e a Matemática permitem-nos abordar problemas que vão bastante além do objeto de estudo clássico destas disciplinas. O que se torna ainda mais importante quando muitas das grandes questões dos dias de hoje só poderão ser respondidas no seio da multidisciplinaridade e interdisciplinaridade⁵. ■

⁴ A pontuação de um jogador depende da sua escolha de estratégia, mas também das escolhas dos seus oponentes, que não são conhecidas de antemão, mas apenas no final de uma ronda.

⁵ Referências: Axelrod 1984, Castellano et al. 2009, Rand e Nowak 2013, Vasconcelos, Santos e Pacheco 2013, Perc et al. 2017

Escrevendo as Equações da Expressão Genética

por Bárbara Mota, alumna do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

A construção de modelos quantitativos de fenómenos biológicos é um dos contributos mais comuns da física e da matemática para as ciências da vida. Com tais modelos, pretendemos capturar aspetos fundamentais de um comportamento, de um fenómeno, partindo de um conjunto de hipóteses. A modelação permite-nos compreender melhor quais os fatores-chave que estão por detrás dos fenómenos, assim como testar hipóteses que tentam explicar as observações e ainda prever comportamentos que poderão ser ou não observados experimentalmente.

Relógio Biológico

Consideremos os ciclos circadianos na mosca da fruta *Drosophila melanogaster*.



Ciclos circadianos correspondem a ritmos com uma duração de 24h e são conhecidos como “relógios biológicos”. Estes ritmos estão associados a expressão de determinados genes, como o gene *per*, o primeiro gene que se descobriu desempenhar um papel fundamental na manutenção destes ritmos. Num artigo de 1990, foram publicados resultados experimentais da variação de mRNA (ácido ribonucleico mensageiro) e proteína associados à expressão do gene *per* na mosca da fruta. Observou-se que estas concentrações oscilavam com períodos de 24h. Estas oscilações parecem dever-se a um mecanismo de regulação mútua do tipo *feedback* negativo. Na figura 1, temos um esquema com as hipóteses apresentadas por Hardin *et al.*

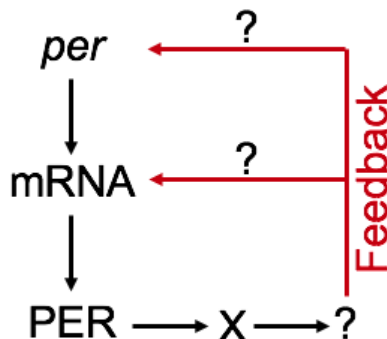
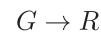


Figura 1: Hipóteses apresentadas por Hardin *et al.* para explicar a ocorrência de oscilações das concentrações da proteína PER e do mRNA observadas na *Drosophila melanogaster*. A expressão genética está representada pelas setas verticais, à esquerda. X é um produto da atividade da proteína PER. A regulação pode ocorrer quer antes ou depois da expressão genética. Adaptado de [3].

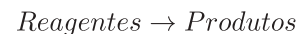
Lei da Ação das Massas e Expressão Genética

O primeiro passo na modelação é o estudo detalhado de mecanismos, etapas e intervenientes do sistema que queremos modelar. Olhemos, em concreto, para a expressão do gene per com produção de uma proteína (PER). A “leitura” dos genes resulta na produção de proteínas, isto é, um gene contém as instruções necessárias para que uma determinada proteína seja produzida. O processo da produção de uma proteína faz-se por duas etapas: **1) transcrição:** a informação contida no gene é transcrita para mRNA; **2) tradução:** nos ribossomas, os aminoácidos necessários para a constituição da proteína são agregados, de acordo com as instruções trazidas pelo mRNA.

Representando o gene por G, o RNA por R e a proteína por P, estas reações bioquímicas podem ser escritas da seguinte forma:



É possível estudar como as quantidades destas substâncias variam no tempo. Para tal, fazemos uso da **lei de massa-ação**. Tendo uma reação bioquímica do tipo:



Esta lei diz-nos que a taxa a que a uma reação tem lugar é proporcional ao produto da concentração dos reagentes:

$$\frac{\Delta[C]}{\Delta t} = k[A][B]$$

Onde $[N]$ representa a concentração de uma substância N e k a constante de proporcionalidade. Esta lei é bastante intuitiva: tem por base a ideia de que, quanto maior for a quantidade dos reagentes (A e B) presentes em determinado volume, maior é a probabilidade destas substâncias interagirem e reagirem, dando origem a outras substâncias (C).

Voltando ao nosso exemplo, podemos escrever a taxa de variação da concentração da proteína como $\frac{\Delta[P]}{\Delta t} = k[R]$, onde k é a constante desta reação. Em rigor, esta expressão é escrita como $\frac{d[P]}{dt} = k[R]$, que não é mais do que a taxa de variação instantânea (derivada). Como físicos que nos prezamos, daqui para a frente escreveremos sempre esta lei da forma correta.

Tanto o mRNA como a proteína sofrem degradação e, por isso, temos que acrescentar ao sistema reacional mais duas reações:

- | | |
|---------------------------|---------------------------------|
| 1. Transcrição | $G \xrightarrow{k_1} R$ |
| 2. Tradução | $R \xrightarrow{k_2} P$ |
| 3. Degradação de mRNA | $R \xrightarrow{k_3} \emptyset$ |
| 4. Degradação da proteína | $P \xrightarrow{k_4} \emptyset$ |



Estamos agora em condições de escrever as equações que descrevem a dinâmica da expressão genética:

$$\begin{cases} \frac{d[R]}{dt} = k_1 - (k_2 + k_3)[R] \\ \frac{d[P]}{dt} = k_2[R] - k_4[P] \end{cases}$$

Onde k_i é a constante da reação número i . Neste processo, não há formação de novos genes ou destruição destes, por isso, não temos qualquer variação desta quantidade. O valor de k_1 representa, assim, uma taxa constante a que ocorre a transcrição genética. Repara que alguns dos termos são antecidos por um sinal de menos. Tal indica que as concentrações destas substâncias sofrem uma diminuição. Na primeira equação, existem dois termos com sinal de menos que correspondem a tradução e degradação de mRNA.

Estado de Equilíbrio

Com estas equações podemos determinar as relações entre os parâmetros que correspondem a um estado de equilíbrio do sistema, isto é, um estado em que ambas as concentrações não sofrem alterações no tempo. Este estado de equilíbrio é dinâmico, já que as reações continuam a ter lugar, mas de tal forma que não há variações nas quantidades das substâncias intervenientes. Para determinar o estado de equilíbrio do sistema, temos que igualar as taxas de variação a zero e resolver este sistema de equações para determinar as concentrações de mRNA e da proteína no equilíbrio.

Concentração

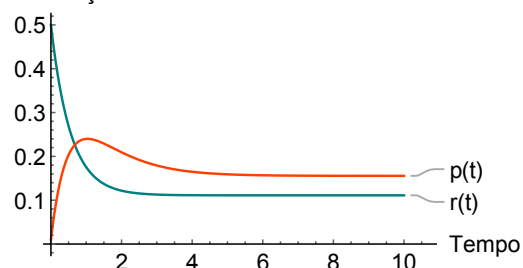


Figura 2: Evolução temporal do sistema para os valores dos parâmetros $k_1=0.2$, $k_2=1.4$, $k_3=0.4$ e $k_4=1.0$. Após algum tempo, as concentrações da proteína, $p(t)$, e de mRNA, $r(t)$, não variam no tempo. Dizemos que o sistema atingiu um estado de equilíbrio.

O conjunto de equações que aqui estudamos é o ponto de partida para modelar muitos dos sistemas genéticos que se conhecem. No caso concreto deste ciclo circadiano, é necessário chegar a um modelo de como a regulação tem lugar e estudar a dinâmica das outras espécies bioquímicas intervenientes. O primeiro passo na validação de tal modelo é a verificação de ocorrem oscilações nas concentrações das substâncias. ■

Referências:

- [1] Ingalls, B. (2013), *Mathematical Modeling in Systems Biology*, Cambridge, MIT Press
- [2] Konopka, R., Benzer, S. (1971) Clock mutants of *Drosophila melanogaster*, *Proc. nt. Acad. Sci.USA*, 68, 2112-2116
- [3] Hardin, P., et al (1990), Feedback of the *Drosophila* period gene product on circadian cycling of its messenger RNA levels, *Nature*, 343(6258), 536-540
- [4] Dilão, R., Mota, B., The transcriptional regulation of PER protein in *Drosophila*, (preprint 2018, submetido a JTB)

A Um Passo do Big Bang:

Estudo do Plasma de Quarks e Gluões na Colisão de Iões Pesados

por João Mesquita Lopes, aluno do 3º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST
(com o especial agradecimento à Prof. Dra. Liliana Apolinário por todo o apoio facultado ao longo do estágio desenvolvido no LIP no qual se desenvolveu o estudo de QGP e de DeltaS12 em particular)

Imediatamente após o Big Bang, formou-se um plasma de quarks e glúons (QGP), que é um estado da matéria associado a altas temperaturas e pressão também elevada, no qual as partículas (neste caso, quarks e glúons) se comportam como estando (assintoticamente) livres.

Para além do Big Bang, e mais próximo do nosso alcance, também na colisão de iões pesados a energias ultra-relativistas se verifica a formação deste plasma, pelo que temos uma hipótese de estudar um dos estados primordiais do Universo! Apesar de tudo, o curto período de vida do QGP impede que as suas características sejam estudadas de forma direta. Uma das possibilidades é utilizar conjuntos de partículas com velocidade elevada, provenientes de processos de *hard scattering* (interações muito fortes que envolvem transferência de grandes quantidades de energia) como instrumento de análise. As partículas produzidas neste processo vão-se fragmentar em partículas de energia mais baixa que podemos em seguida reconstruir sob a forma de jatos (podemos pensar nos jatos como pequenos cones de partículas). Ao se propagarem através do plasma, estas partículas (ou o jato resultante) são modificadas, sendo, por isso, portadoras de informação relativa às propriedades do meio em estudo. Se reconstruirmos o jato no percurso inverso, em direção à colisão, podemos obter mais informações sobre o QGP, já que nos aproximamos cada vez mais das mesmas condições que existiam na colisão inicial!

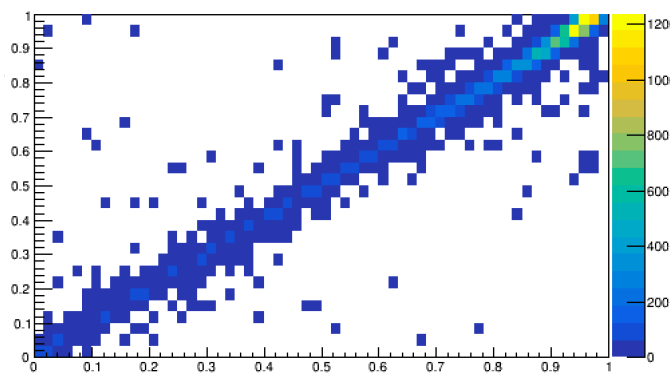


Figura 1: Response matrix para 50.000 eventos.

Contudo, a colisão dos iões iniciais origina outras partículas não relacionadas com o *hard scattering* - i.e., o próprio QGP. Para a análise de jatos, estas partículas constituem um obstáculo porque podem, de certa forma, contaminar os jatos que nos interessam reconstruir (elas vão alterar a magnitude das modificações que queremos avaliar). São por isso consideradas partículas de *background*. Para tentar estudar o plasma sem o impacto das partículas de *background*, surgiu a variável "DeltaS12", introduzida por [1] como sendo a diferença entre a fração de momento transversal (uma quantidade que é proporcional à energia dos jatos) dos dois sub-jatos (subdivisão do jato) mais energéticos. Pretende-se,

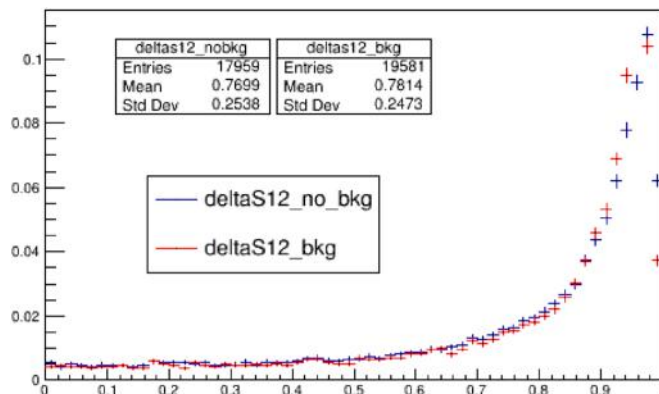


Figura 2: DeltaS12 para situação com influência de *background* (a vermelho) e sem influência de *background* (a azul).

então, analisar se DeltaS12 sofre alterações muito significativas quando consideramos o *background*.

Consideraram-se eventos de colisão de um protão com outro protão (evento pp) simulados por um gerador de eventos Monte Carlo (Pythia 8 [2]). A reconstrução de jatos foi feita recorrendo à ferramenta FASTJET [3] e a produção dos gráficos finais com ROOT [4].

Numa primeira fase, introduziram-se partículas de *background* no jato (método de *pt smearing*, em que *pt* significa momento transversal) de forma a avaliar o efeito de uma possível alteração do momento transversal dos sub-jatos no valor de DeltaS12. Os resultados obtidos foram bastante animadores!

Apresentam-se gráficos referentes ao cálculo de DeltaS12 com e sem partículas de *background* para 50.000 eventos e 50 partículas de *background* por jato. É possível ver que, para esta primeira abordagem, existe uma forte correlação entre o valor de DeltaS12 calculado no caso com e sem partículas de *background* (a matriz de correlação - *response matrix* - tem maior densidade de amostras na diagonal), ou seja, este observável não é sensível a uma alteração do *pt* dos sub-jatos. De facto, a distribuição permanece praticamente inalterada, pelo que DeltaS12 revela robustez quando se consideram os efeitos do *background* inserido diretamente dentro do jato reconstruído.

Para testar melhor a resiliência experimental deste observável, recorreu-se a um novo método em que se adiciona ao evento pp uma simulação de um evento real de partículas QGP (os gráficos de simulações com 100.000 eventos). Neste caso, antes da reconstrução, procede-se à estimativa e subtração do *background*. Ainda assim, algumas partículas de *background* participam na reconstrução do jato e respectivos sub-jatos. O cálculo do DeltaS12 é feito posteriormente. Comparando os resultados desta simulação com os referentes a uma simulação sem interação de partículas de *background*, pode verificar-se a obtenção de um maior número de amostras com distorções do va-

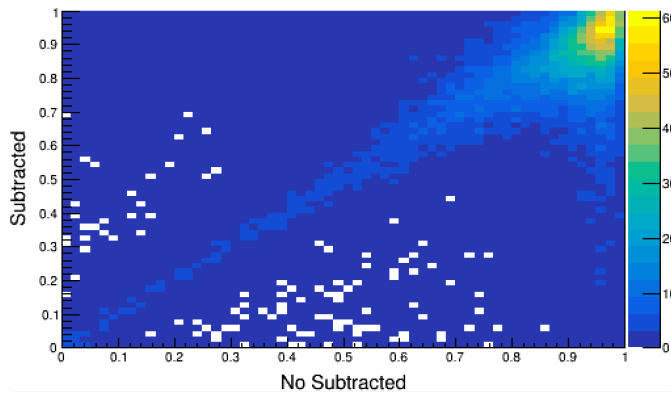


Figura 3: Response matrix para 100.000 eventos.

lor de DeltaS12. No entanto, destaca-se a forte componente diagonal da matriz de correlação (*response matrix*), que pode ser utilizada experimentalmente para obter a distribuição inicial do DeltaS12 e, com isso, avaliar com exatidão as propriedades do QGP.

Os resultados obtidos ao longo deste estágio permitem concluir que DeltaS12 é experimentalmente robusto, devido às alterações observadas nos dois métodos. DeltaS12 pode vir a ser utilizado como um observável para pesquisas relacio-

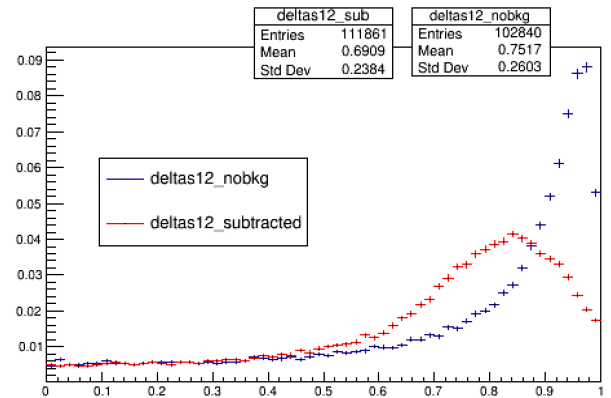


Figura 4: DeltaS12 para situação com influência de *background* (a vermelho) e sem influência de *background* (a azul).

nadas com o QGP em colisões reais de iões pesados, logo vale a pena continuar a investigar este tema! ■

Referências:

- [1] Apolinário, L., Milhano, J.G., Ploskon, M. et al. Eur. Phys. J. C (2018) 78: 529.
- [2] M. Cacciari, G.P. Salam, G. Soyez, Eur. Phys. J. C72, 1896 (2012). DOI 10.1140/epjc/s10052-012-1896-2.
- [3] M. Cacciari, G.P. Salam, G. Soyez, Eur. Phys. J. C72, 1896 (2012).
- [4] <https://root.cern.ch>.

Um por Todos, Todos por Um: Decompondo Empiricamente um Sinal

por Eduardo Bastiana, aluno do 3º ano Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

Imaginemos um acorde num piano a ser tocado. Composto pelas n notas musicais que, somadas, nos dão o acorde final, é de assumir que o som emitido, o sinal sinusoidal gerado pelo piano, seja a soma dos sinais de cada nota individual. Nesta situação simplista, podemos saber quais as teclas pressionadas decompondo o sinal: a função temporal que o descreve será a soma das funções que descrevem cada uma das n notas musicais. Atualmente, esta análise de sinais como o som ou uma oscilação é frequente efetuada com recurso a transformadas de Fourier: resumidamente, estas tentam decompor o sinal noutras funções temporais (ou componentes do sinal) que, somadas, resultam no sinal original. Estas componentes do sinal possuem a particularidade serem sinais sinusoidais de frequência e amplitude fixa ao longo do tempo (como uma nota musical). No entanto, para que esta decomposição ocorra, é necessário considerar o sinal como estacionário, isto é, amplitude e/ou frequência fixas ao longo do tempo. Caso fizesse vibrar uma corda e, enquanto obtia o sinal sonoro gerado pela mesma, fizesse variar o comprimento desta, o sinal seria não estacionário, dado as propriedades da corda variarem ao longo do tempo. Muitas situações físicas reais (como a análise meteorológica ou um eletrocardiograma) enquadram-se nesta categoria, sendo que, neste âmbito, a decomposição empírica de sinais

(*Empirical Mode Decomposition* - EMD), desenvolvida por N. E. Huang et al. [3], surge como resposta, dado possibilitar a análise de um sinal sem dele se conhecer informação apriorística (como a amplitude ou a frequência). Apresenta também a vantagem de ser simples de implementar e ter um carácter iterativo: baseia-se num algoritmo que é executado várias vezes até se obter o sinal pretendido, algo vantajoso presentemente pois tira proveito dos métodos computacionais exponencialmente em evolução em termos de poder de processamento e eficiência.

Esta técnica analisa o sinal como se este se tratasse da sobreposição de oscilações moduladas em amplitude e frequência (i.e., estas propriedades variam ao longo do tempo, como as ondas de rádio AM/FM), decompondo-no em diferentes componentes (diferentes funções temporais), denominadas *Intrinsic Mode Functions* (IMF). Apesar de ter uma base empírica (foi 'deduzido' a partir da observação e comprovado pelo mesmo modo), não admitindo deste modo uma comprovação teórica da mesma, é possível já observar a eficiência e precisão da mesma em diversos artigos (ver [2], [3] e [4]).

Para a obtenção das IMFs, recorre-se a um algoritmo que executa o chamado *sifting process*, adquirindo-se assim as sucessivas IMFs. Obtém-se primeiro as componentes de maior frequência.

Esta iteração engloba 4 passos:

1) Obtém-se as coordenadas dos extremos máximos e mínimos da função;

2) Obtém-se os envelopes que contêm a função, interpolando os extremos. Estes envelopes não são mais que funções que interpolam (ligam) os máximos e os mínimos - imaginemos a função representada na figura 1.

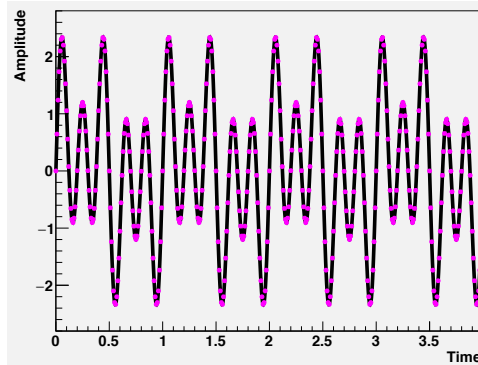


Figura 1: Sinal original

Se obtivermos as coordenadas dos extremos (máximos e mínimos) da função, é possível fazer passar uma linha por estes, obtendo-se duas funções que descrevem o comportamento dos extremos da função, sendo que esta está sempre limitada por estes. A função é obtida por um processo denominado de *cubic spline*, que pode ser consultado em [6], e são obtidos os envelopes representados na figura 2.

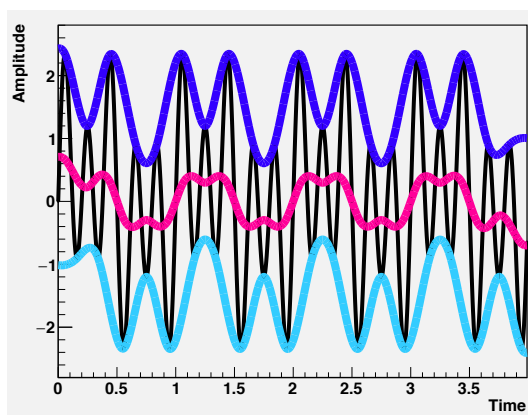


Figura 2: Envelopes e média do sinal original.

3) É calculada a média do sinal, $média(t) = \frac{emín(t) + emáx(t)}{2}$, também ela um sinal temporal, exibida a rosa na figura anterior.

4) É extraído o detalhe do sinal, $detalhe(t) = sinal(t) - média(t)$. Este detalhe é depois iterado: sendo assumido como o sinal a analisar, voltam-se a calcular os envelopes, a sua média, e um novo detalhe é obtido. Quando o sinal obtido obedece a certas propriedades, é aceite como uma IMF, passa-se ao passo 5.

5) À função original subtrai-se a função IMF obtida e é obtido um resíduo. Este volta a passar pelos processos de 1 a 4 até se encontrar uma nova função IMF. As IMFs obtidas são representadas a cores diferentes na figura 3.

É de notar uma particularidade no passo 4): quando sabemos que já obtivemos uma IMF? Estabelece-se então uma IMF como uma função com o mesmo (ou, no máximo, diferindo apenas por um) número de zeros e de extremos,

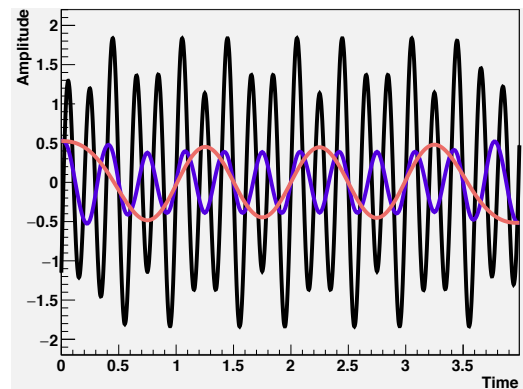


Figura 3: IMFs obtidas.

tendo também envelopes máximo e mínimo simétricos ([2] e [3]). Cada vez que se encontra uma das componentes dos sinais esta é guardada, analisando-se o resíduo que resta quando se subtrai ao sinal a IMF obtida. Caso este seja monótono (variação nula tornando impossível retirar mais informação do sinal), sabemos ter encontrado todas. Esta variação nula não é um critério absoluto, mas sim um parâmetro de variação máxima ao qual o resíduo deve obedecer. É interessante notar que, sendo um critério empírico e adaptável, diferentes resultados poderão ser obtidos consoante a definição deste.

A sobreposição das IMFs encontradas resultará no sinal inicial. No caso ideal considerado inicialmente, obteríamos n IMFs, cada uma correspondente a cada uma das notas emitidas ao pressionar cada tecla.

A título de curiosidade, é possível analisar as IMFs obtidas através de uma outra perspetiva. De modo a representar num só gráfico a frequência em função do tempo, é possível elaborar um gráfico 2D chamado de espectro de Hilbert. Este caracteriza-se por poder ter ainda uma terceira dimensão, assinalada pelas diferentes cores, que tanto representam a intensidade como a potência do sinal naquele ponto.

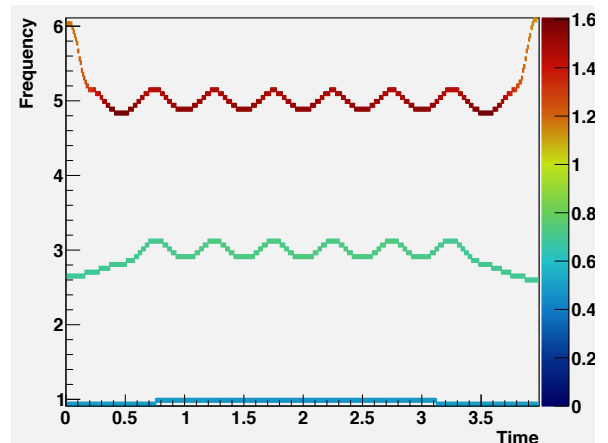


Figura 4: Espectro de Hilbert obtido.

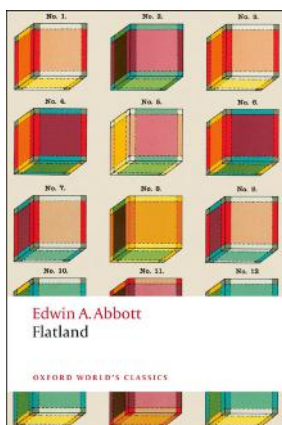
Referências:

- [1] F. Barão, 2018, <http://labrc.ist.utl.pt/ComputPhys.web/Projecto/P.html>.
- [2] Gabriel Rilling, Patrick Flandrin and Paulo Gonçalves, *On empirical mode decomposition and its algorithms*.
- [3] http://www.scholarpedia.org/article/Hilbert-Huang_transform.
- [4] M.C. Peel, G.E. Amirthanathan, G.G.S. Pegram, T.A. McMahon and F.H.S. Chiew, *Issues with the Application of Empirical Mode Decomposition Analysis*.
- [5] A. Balogh, H.S. Hudson, K. Petrovay, R. von Steiger, *Introduction to the Solar Activity Cycle: Overview of Causes and Consequences*, 2014.
- [6] <http://mathworld.wolfram.com/CubicSpline.html>.

FLATLAND,

Um Romance a Muitas Dimensões

por Carolina Gonçalves, alumna do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST



Flatland, por Edwin A. Abbott, é um clássico com pouco mais do que 100 páginas, escrito provavelmente por um padre e professor e editado a primeira vez em 1884. O autor por detrás desta obra é uma influente figura da época Vitoriana no Reino Unido e assina mais do que 50 livros em temas como a educação e teologia, nunca fazendo prever que escreveria um romance sobre um mundo a duas dimensões – a Flatland.

Dividido em duas partes, o livro Flatland começa por relatar na primeira pessoa a vida no seu espaço bidimensional: os seus costumes, normas, dificuldades e particularidades. Com uma velada crítica à sociedade Vitoriana, descreve a sociedade da Flatland, dividida em rígidas classes sociais, sendo que a nobreza vem do número de lados (ou ângulos) que se tem. Assim sendo, as figuras que habitam este universo são as linhas, os triângulos, os quadrados, os pentágonos, hexágonos e assim por diante até se chegar aos círculos, que descrevem os padres.

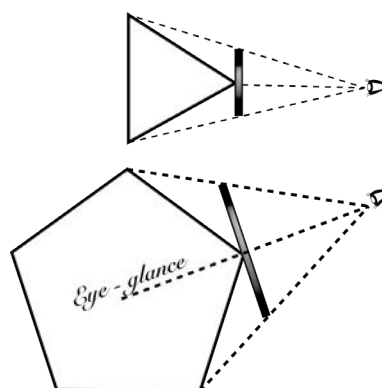
Também influenciado pela vivência da sua época, a primeira parte do livro fala bastante do papel das mulheres, cuja forma na Flatland é a mais singela, reduzindo-se apenas a uma linha reta e refere com alguma preocupação a necessidade de educação das mesmas.

Este relato na primeira pessoa não termina sem que o narrador – um quadrado da Flatland – nos explique como seria viver no seu universo em que todas as figuras são vistas como linhas rectas. Esta equivalência entre todas as formas pode ser explicada se nós, que vivemos a três dimensões, imaginarmos o que veríamos se olhássemos, de lado, para papéis com várias formas quando poitados numa mesa. Assim, para distinguir as formas, existe na Flatland o “brilho”, que resulta num gradiente que as linhas apresentam, tanto mais brilhante quanto mais lados a figura tiver.

Na segunda parte do livro acompanhamos o nosso narrador Quadrado à sua viagem por mundos com dimensões diferentes da suas – ele visita a Pointland (com zero dimensões), a Lineland (com duas dimensões) e depois é confrontado com a existência da Spaceland (com três dimensões), que todavia lhe é inacessível.

Os argumentos que se usam para explicar aos habitantes de cada espaço a existência de outras dimensões, por exemplo, para explicar ao único ponto da Pointland que existem criaturas para além dele, fazem qualquer físico relembrar-se dos momentos de incredulidade que, na comunidade científica, antecedem períodos de mudança de paradigma com teorias novas e revolucionárias (recordemos Planck, que duvidava da sua própria descrição quântica do átomo). Também nos faz refletir quanto a nossa visão do universo é enviesada, pelo simples facto de só experienciarmos 3 dimensões espaciais, sendo que não devemos excluir à partida dimensões extra para melhor explicarmos o universo.

Efetivamente, o livro termina com a óbvia extensão do universo para a quarta dimensão. Se os habitantes da Spaceland (sólidos) vêm o interior das figuras da Flatland (ou seja, a sua área), então haverá um espaço a 4 dimensões em que se verá o interior dos sólidos. Este espaço, que é curiosamente chamado de Thoughtland, pouco mais será do que uma construção por analogia que poderia ainda ser aumentada para 5, 6, 7 até N dimensões. É, no entanto, absolutamente revolucionário que, em 1884, um padre escrevesse um livro que desafiasse a nossa tridimensionalidade. Flatland é efectivamente muito anterior a Einstein (que à data da publicação de Flatland tinha apenas 5 anos) ou à teoria espaço-tempo e vem muito antes de qualquer explicação física que fosse além das 3 dimensões. É, portanto, uma importante lição para aqueles que apenas se guiam pela ciência: por vezes, a literatura supera-nos, a imaginação é maior do que a nossa observação e a ficção pode trazer muitas respostas. ■



Wormholes e Viagens no Tempo

por João L. Rosa, aluno de doutoramento na área da Relatividade Geral e Gravitação, CENTRA, IST

Desde a sua teorização em 1916, no contexto da Teoria da Relatividade Geral desenvolvida por Albert Einstein, que os wormholes (ou buracos de minhoca) têm sido objecto de fascínio por entre os fãs da ficção científica, nomeadamente no universo de *Stargate*, em aparições pontuais no universo de *Star Trek* e *Dr. Who*, e mais recentemente no premiado filme *Interstellar* de Christopher Nolan.

Mas o que são ao certo estes objectos que nos permitem viajar distâncias interestelares em intervalos de tempo tão curtos? É simples. Para compreender o que é um wormhole, pegue na folha de papel A4 mais próxima de si e desenhe dois pontos A e B em cantos opostos da folha. Esta folha de papel representa o nosso universo, o ponto A representa a nossa galáxia e o ponto B representa uma galáxia distante. Agora, dobre a folha gentilmente, sem vincar, de maneira a unir o ponto A ao ponto B e faça um lápis atravessá-la de um lado ao outro, perfurando estes dois pontos. Parabéns! Acabou de criar um *wormhole* no nosso universo: um túnel que une dois pontos afastados do universo usando a curvatura do espaço através de uma dimensão extra, chamada hiperespaço. As duas aberturas deste túnel denominam-se bocas e a região mais estreita do túnel é chamada garganta.

Existem vários problemas associados à existência de *wormholes*. O problema mais importante está relacionado com a sua origem: ao contrário dos buracos negros, que se sabe serem originários do colapso de estrelas massivas, não existe uma teoria que nos explique como é que os *wormholes* se formam naturalmente no universo. No entanto, isto não significa que os wormholes não podem existir. Reparemos, na tabela periódica, nos elementos mais pesados no canto inferior direito. Estes elementos altamente instáveis não existem na natureza, mas as leis da física e o nosso conhecimento tecnológico permitem que a nossa civilização os sintetize em laboratório. Ergue-se então a questão: será uma civilização infinitamente avançada, ou seja uma civilização que está limitada apenas pelas leis da física e não por limitações tecnológicas, capaz de sintetizar *wormholes* em laboratório? Para responder à questão anterior, estudemos os restantes problemas levantados pela existência de *wormholes*.

Num *wormhole* que se encontre a deambular pelo espaço, a única força relevante a atuar sobre si é a sua própria gravidade. Sendo esta uma força atrativa, o *wormhole* devia colapsar sobre si próprio assim que fosse formado. É então necessária uma força extra que suporte a abertura da garganta enquanto as nossas naves o atravessam, uma força repulsiva, uma força anti-gravitacional! Para criar esta força, é necessário aquilo a que chamamos matéria exótica: um fluido com densidade média de energia negativa. Apesar desta característica estranha, a matéria exótica existe na vida real, sob a forma de flutuações quânticas próximas de

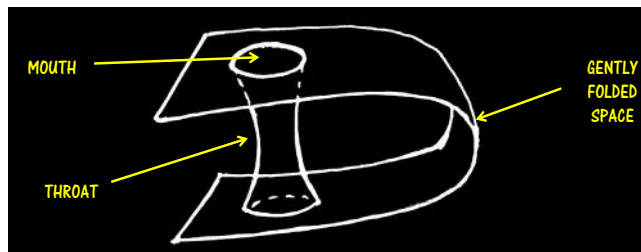


Figura 1: Representação de um *wormhole* (túnel que liga duas "bocas" (*mouths*), isto é, duas regiões do mesmo espaço-tempo ou de espaço-tempos diferentes, através de uma dimensão espacial extra chamada hiperespaço). A ilustração mostra ainda a "garganta" (*throat*), a região mais estreita do túnel que liga as duas "bocas", e o espaço gentilmente dobrado (*gently folded space*).

campos gravíticos extremamente grandes. À partida, não podemos excluir que uma civilização infinitamente avançada possa usar estas flutuações para criar um *wormhole* e mantê-lo aberto tempo suficiente para que possa ser usado como meio de transporte.

Outro argumento importante contra a existência de *wormholes* baseia-se no facto de estes poderem ser usados como máquinas do tempo. Para percebermos como, voltemos um pouco atrás à Teoria da Relatividade Restrita que, em 1905, nos introduziu os conceitos de dilatação do tempo e contração do espaço. Segundo esta teoria, quando um objecto se move a velocidades altas, não negligenciáveis quando comparadas com a velocidade da luz, o tempo passa mais rápido à sua volta e o espaço que percorre diminui. O fator de proporcionalidade nestes dois fenómenos é o mesmo, denominado fator *gamma*. Consideremos um exemplo: o Tiago e o André são gémeos, têm ambos 20 anos, e encontram-se em frente ao Pavilhão Central no IST no dia 1 de Janeiro de 2020, dia de lançamento de uma missão espacial a bordo da nave mais rápida da história da Humanidade, capaz de viajar pelo espaço a velocidades próximas da velocidade da luz, numa viagem até à estrela Sirius, que se encontra a 8 anos-luz de distância do Sol. Tiago embarca nesta missão e André fica à sua espera. Graças ao fenómeno da contração do espaço, as altas velocidades da nave comprimiram a distância de 8 anos-luz para apenas alguns quilómetros, e para Tiago a missão de ida e volta demorou apenas alguns instantes. No entanto, ao regressar, Tiago vê o seu irmão André com 36 anos, no dia 1 de Janeiro de 2036. O fenómeno da dilatação do tempo é real e os seus efeitos são extremamente importantes no dia a dia para o funcionamento por exemplo do GPS, já que para os satélites em órbita o tempo passa a uma velocidade diferente do que para nós à superfície da Terra e não ter em conta este efeito levaria a imprecisões enormes na localização, inutilizando assim o sistema.

Como pode então este efeito ser usado para transformar

um *wormhole* numa máquina do tempo? Considere-se o exemplo descrito no parágrafo anterior com uma pequena diferença: ao longo de toda esta missão, Tiago e André estão a dar um aperto de mão através de um *wormhole*. Uma das bocas do *wormhole* encontra-se em frente ao Pavilhão Central, enquanto que a outra se encontra no *cockpit* da nave espacial. Através do *wormhole*, os dois gémeos podem comunicar entre si e o tempo passa de igual maneira para ambos, pois o comprimento do *wormhole* é constante. No final da missão, quando Tiago aterriza no dia 1 de Janeiro de 2036 no Técnico, através do *wormhole* ele aperta a mão do seu irmão André apenas alguns instantes depois da nave partir, ainda no dia 1 de Janeiro de 2020. Caso André atravessasse o *wormhole* para vir ter com Tiago, vai viajar 16 anos para o futuro! Por outro lado, o André de 36 anos que vê o seu irmão a aterrar em 2036 pode também atravessar o *wormhole* e visitar o seu “eu” do passado, 16 anos mais cedo! Viajar através deste *wormhole* corresponde a uma viagem de 16 anos para o futuro ou para o passado, consoante a direção em que é atravessado, este *wormhole* transformou-se numa máquina do tempo.

Existem inúmeros paradoxos associados à possibilidade de viajar no tempo que representam obstáculos contra a existência de *wormholes*. O mais famoso destes paradoxos é conhecido por paradoxo do matricídio. Neste paradoxo há um homem, chamemos-lhe Pedro, que entra num *wormhole* regulado para funcionar como uma máquina do tempo, viaja para o passado e mata o seu pai antes dele próprio ter sido concebido. Ora, no futuro deste passado, Pedro nunca chegaria a nascer e, portanto, nunca teria a hipótese de viajar para o passado para matar o pai e impedir-se a si próprio de nascer, é um paradoxo.

O paradoxo do matricídio pode ser simplificado para um caso ainda mais simples de compreender. Considere-se um *wormhole* regulado para funcionar como uma máquina do tempo que nos leva apenas 5 segundos para o passado, e dispomos as duas bocas deste *wormhole* de forma a formarem um ângulo de 90° entre si (ver figura 2). Agora, lancemos um berlinde para uma das bocas do *wormhole*. Se o berlinde for lançado com a velocidade certa, ao viajar 5 segundos para o passado vai acabar a colidir consigo próprio, alterando a sua própria trajetória e impedindo-se de entrar no *wormhole* em primeiro lugar. Mas se ele nunca entrou no *wormhole*, então nunca poderia ter viajado para o passado e colidir consigo próprio. Como podemos resolver este paradoxo que parece tão simples à primeira

vista?

A resposta está naquilo a que chamamos órbitas auto-consistentes. Nestes exemplos, a interação com o seu “eu” do passado é a razão pela qual a viagem no *wormhole* ocorre, e não a razão pela qual esta viagem é impedida. No exemplo do berlinde, este é lançado com uma dada velocidade numa dada direção que não a do *wormhole*. Do nada, outro berlinde que saiu de uma das bocas do *wormhole* atinge o nosso berlinde, que é então defletido e acaba a entrar na primeira boca do *wormhole*, saindo depois pela segunda boca 5 segundos antes e colidindo com a sua versão do passado. A interação provoca a viagem no tempo e não o contrário! Esta órbita levanta um grave problema na física clássica, pois a trajetória do berlinde deve ser única e depender apenas das suas condições iniciais, enquanto que neste exemplo as mesmas condições levam a duas possibilidades diferentes: ou o berlinde atravessa o espaço sem colidir e sem atravessar o *wormhole*, ou então é levado a atravessar o *wormhole* pelo seu “eu” do futuro.

Outro problema das órbitas auto-consistentes é que estas não se aplicam a objetos que tenham controlo sobre si próprios, como seres humanos. Se o berlinde pudesse escolher a sua trajetória e decidisse não colidir consigo próprio depois de viajar no tempo, então nunca teria entrado no *wormhole* e recuperar-se-ia o paradoxo. Assim sendo, resta-nos assumir uma de duas coisas: ou que alguma lei da física que ainda não conhecemos controla o funcionamento das órbitas auto-consistentes e garante que este paradoxo não ocorre; ou simplesmente afirmamos que as viagens no tempo não são possíveis, conjectura a que chamamos Proteção Cronológica. (Em física, a palavra conjectura indica um fenómeno que se observa recorrentemente, mas para o qual não existe uma demonstração.)

Conclusão? Infelizmente, ainda não temos o conhecimento suficiente para confirmar ou excluir totalmente a existência de *wormholes*. É necessária mais investigação nas áreas da gravitação e da física quântica para compreendermos melhor estes fenómenos. Até lá, a existência de *wormholes* permanecerá uma esperança na nossa imaginação. Mas se as leis da física permitem a existência de objectos tão fantásticos como buracos negros, formas de energia tão estranhas que aceleram a expansão do nosso universo, ou até ondas que propagam energia sob a forma de gravidade e que demoraram um século desde que foram teorizadas até serem detetadas, um mero túnel através do espaço não parece assim tão exótico... Pois não? ■

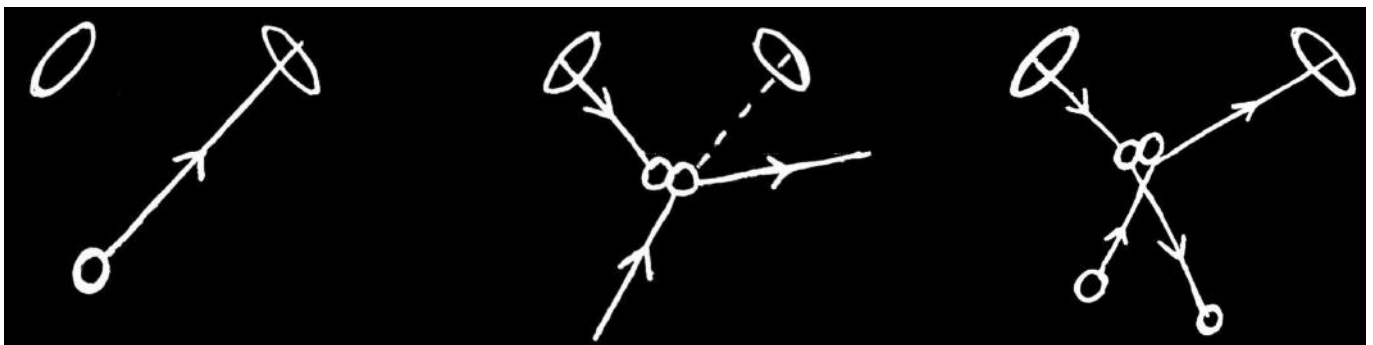


Figura 2: Paradoxo do matricídio - A bola entra na boca da direita (figura da esquerda) e sai pela boca da esquerda 30 segundos antes de entrar na primeira boca, atingindo-se a si própria e impedindo-se de entrar na boca (figura do centro). Como solução, as órbitas devem ser auto-consistentes: a bola ser atingida por ela própria é o que a faz entrar na boca da direita em primeiro lugar.

Entrevista a David Tong

por João Melo, alumnus do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

João Melo, ex-aluno do Mestrado Integrado em Engenharia Física Tecnológica, esteve à conversa com David Tong, o seu ex-professor de Física Teórica na Universidade de Cambridge. Falaram de Teoria Quântica de Campo, a principal área de investigação deste professor, mas também de como é ensinar física tanto aos seus estudantes como ao público geral. David Tong explicou o seu percurso, o mistérios que a física ainda tem por desvendar e a sua convicção de que estamos numa era de ouro, porque avançamos mais rápido do que alguma vez no passado.

Como explicaria a sua área de investigação a um aluno do ensino secundário?

Bem essa é difícil! [risos] Tive dificuldade tantas vezes... Eu faço física teórica, por isso, a ideia geral é tentar perceber as leis que governam o nosso universo. Obviamente, isso é extremamente ambicioso, e extremamente difícil. Muito poucas pessoas conseguem, de facto, contribuir com algo que leve a um grande progresso, por isso, a grande maioria faz apenas parte do movimento de perceber o que se passa a um nível fundamental. Ao mesmo tempo, o nosso trabalho é também tentar perceber as leis da física que já temos.

Isso é um pouco geral, poderia ser um pouco mais específico em relação àquilo que faz realmente?

Sim. Eu trabalho em algo chamado campos quânticos, que obviamente não aparece muitas vezes nos meios de comunicação, embora devesse ter destaque mais regularmente. A ideia chave é que não somos feitos de partículas, mas sim de uma substância amorfa tipo fluidos. As coisas a que chamamos partículas são ondulações nesse fluido - o campos quânticos. A teoria que governa esses campos quânticos constitui a base do nosso universo. Contudo, é matematicamente muito difícil; há muito que não compreendemos acerca dela. Por isso o que eu tento é compreender essas teorias melhor. Uma coisa particularmente boa é que essas teorias também se aplicam a outras partes ligeiramente mais práticas. Por exemplo, se quiseres perceber como é que materiais funcionam, ou como é que eletrões se movem dentro de vários materiais, especialmente materiais mais interessantes como supercondutores, ou coisas estranhas que acontecem em campos magnéticos novamente precisamos desta teoria de campo quântica. Outra forma de o dizer é que a teoria de campo quântica é a teoria que está subjacente a toda a física - isso é o que responderia à tua primeira pergunta.

Mencionou que teoria de campo quântica não tem muito destaque nos meios de comunicação. Sente que é uma parte importante da ciência, ser explicada para o público em geral?

Sim, eu acho que é importante. Eu tento fazê-lo porque eu acho que é muito divertido e gosto bastante de o fazer. Eu adoro explicar a crianças na escola ou a qualquer outro físico, só porque é um assunto que me interessa muito e é bom ver outras pessoas ficarem entusiasmadas com isso.

Mas é certamente importante passar a mensagem.

A principal mensagem que eu tento transmitir é que a física não é um assunto acabado. Há muitas coisas que não compreendemos, e de uma certa perspetiva esta é verdadeiramente a era de ouro da física. Estamos a fazer descobertas numa base muito mais frequente agora do que alguma vez no passado. Há coisas gigantes que não compreendemos e nos confundem por completo. E seria bom atrair pessoas jovens e inteligentes para a área.

Mencionou que há ainda há muito por compreender. O que acha que são os maiores desafios para a física na atualidade?

O número um para mim, de longe, é provavelmente o problema que eu passei mais tempo a pensar e sobre o qual escrevi num artigo - a constante cosmológica. Isto é, o nosso universo está a expandir, sabemos isso há quase 100 anos, mas há 15, quase 20, anos atrás aprendemos que essa expansão está a acelerar: o universo está a acelerar, isto é, a ficar maior, mas cada vez mais rapidamente. E nós pensamos que sabemos porquê. É devido a algo que, às vezes, é chamado de constante cosmológica, mas a verdade é que não fazemos a mais pequena ideia de por que é que a constante cosmológica tem o valor que tem. Para além disso, todas as nossas tentativas mais ingénuas para a calcular erram espetacularmente. Por muitas, muitas, ordens de grandeza. E eu não percebo o que se passa. É muito claro para mim, de todos os artigos que li, que ninguém percebeu também. Tanto quanto percebo não há boas ideias.

Isso é um problema, outro é o que se chama o problema de hierarquia. É de facto bastante semelhante, tem a ver com a massa do bóson de Higgs. Os dois problemas, parecem-me mesmo muito parecidos. Depois há uma série de outros problemas, que são interessantes, mas que não é claro que haja soluções ao virar da esquina. O que é a matéria escura? Isso é claramente uma questão importante e interessante, mas pode ser que muito simplesmente não temos as ferramentas ou as experiências para descobrir. E depois há outros ... Algo que se chama bariogénese, que lida com como é que as coisas foram feitas no princípio do universo. Mais uma vez, talvez seja interessante, mas pode ser que ainda não estejamos no ponto certo.

Do ponto de vista de matéria condensada, há muitas questões espetaculares, que são tão básicas como pegar em 10^{23} eletrões, metê-los numa caixa e ver o que é que eles fazem. E eles fazem coisas espetaculares! Podem passar através de materiais sem qualquer tipo de resistência,



Figura 1: David Tong na palestra "Our place in the universe". David Tong é conhecido por ser um excelente orador que contagia a audiência com o seu entusiasmo pela física.

nos chamados supercondutores de altas temperaturas que ainda não compreendemos. Por que é que eles se fundem em campos magnéticos para formar o que chamamos de estados de Hall quânticos fracionários? O elétron, que é completamente indivisível, fraciona-se, as partículas que se formam e se movem têm um terço da carga do elétron, ou um quinto da carga do elétron. Isto são coisas que compreendemos mais ou menos, mas não percebemos em geral quando é que este tipo de coisas acontece. Por isso há muitas questões excitantes. O que me entusiasma mais é que suspeito que todas estas coisas estão conectadas, que perceber o que se passa em materiais provavelmente está relacionado com o que se passa em cosmologia.

E algumas destas coisas são motivadas ou estão diretamente relacionadas com aplicações práticas, ou nem por isso?

Para mim, eu não podia querer saber menos de aplicações. Eu não tenho dúvidas que elas irão aparecer. Se a questão é que coisas interessantes é que os materiais podem fazer, então é óbvio que vai haver gente inteligente que vai descobrir formas de melhorar a sociedade. Mas não é esse o jogo, para mim o jogo é compreender a natureza e o que ela pode fazer.

O professor tem muitas sebatas escritas, e algumas aulas gravadas. Sente que é uma parte importante de ser um investigador, ensinar?

Eu acho que depende muito, nem toda a gente o faz. Algumas pessoas preferem focar-se na sua investigação. Primeiro, eu acho que ensinar é extremamente útil, e gosto muito de ensinar (talvez seja essa mesmo a razão principal).

Mas eu acho que é útil porque eu posso aprender o assunto como deve ser. É uma espécie de privilégio extraordinário em que me dão dois meses e eu tenho que explicar algo a alunos e, ao mesmo tempo, tenho de aprender estas coisas por dentro e por fora numa forma que nunca fiz realmente. A cadeira que estou a ensinar agora sobre teoria de campo estatística, que basicamente trata o que acontece quando se ferve água, é sobre coisas que eu já conhecia de uma forma ou outra antes mas que nunca tinha feito todos os cálculos na perfeição em pormenor, e ainda não estou certo de que o fiz. Por isso, são coisas que eu acho que são um verdadeiro luxo. Eu posso fazer isso, tirar dois meses por ano para melhorar a minha própria compreensão. E eu escrevo estas sebatas em grande parte porque são bastante usadas, eu acho que ajudam.

Disse uma coisa engraçada, que gostava de dar aulas porque o professor aprendia algo. Não acha que está um bocado ao contrário? Normalmente não é o professor que ensina algo e os alunos que aprendem?

Era bom que os alunos aprendessem qualquer coisa também! [risos] Eu não sei, eu simplesmente gosto muito mais se estou a aprender ao mesmo tempo que os alunos. A maior parte das pessoas, na maioria das universidades no mundo, ensinam a mesma cadeira durante muitos anos, enquanto eu acho que nunca ensinei a mesma cadeira mais do que dois anos. A segunda vez está um pouco mais polido, eu corrijo todos os erros, mas não é muito recompensador. Dá muito menos trabalho na segunda vez, mas não é tão recompensador para mim. Eu não retiro muito disso. Espero que os alunos retirem.



Figura 2: David Tong numa das suas aulas. Actualmente David Tong é professor na Universidade de Cambridge, mas para chegar onde está hoje candidatou-se a mais do que 120 posições!

Como se tornou um físico teórico?

Eu acho que foi a rota de carreira normal. Que devo dizer, é muito precária. É preciso muito trabalho e alguma quantidade de talento, mas principalmente é preciso muita sorte. Há mesmo muita sorte envolvida. Por isso, para mim, eu comecei a interessar-me por física quando tinha... acho que tinha 16 ou 17 anos. Eu era razoável a matemática na escola, mas alguém me deu um livro de Stephen Hawking "Uma Breve História do Tempo", nos meus anos. E eu não tinha muita exposição a ciência, eu não sabia que uma pessoa se podia tornar num cientista ou num físico, eu simplesmente sabia que gostava bastante daquilo, mas aquele livro abriu-me os olhos em relação ao que era possível. A partir daí foi uma rota muito usual. Eu fui para a Universidade de Nottingham, tive uma boa educação, fui para Swansea para fazer o doutoramento, e aí houve alguns problemas... Não é uma das universidades famosas para se fazer física, mas eles tinham um grupo excelente, o que significava que era um bocado difícil para chegar aos sítios de topo. Depois de fazer um doutoramento, faz-se um pós-doc, por isso eu fiz muitos pós-docs. Depois de eu acabar o doutoramento, eu candidatei-me, acho que a 120 empregos, e tive uma oferta, que era em Mumbai. Por isso eu fui para a Índia para o meu primeiro pós-doc. Foi completamente brilhante, e depois as coisas foram simplesmente andando, fui tendo várias ofertas de emprego até que finalmente acabei aqui.

“ A principal mensagem que eu tento transmitir é que a física não é um assunto acabado. Há muitas coisas que não compreendemos, e de uma certa perspetiva esta é verdadeiramente a era de ouro da física.

Candidatou-se a 120 empregos e só teve uma oferta!? Tem algum tipo de conselho para jovens estudantes que queiram seguir física?

Sim, o meu conselho é se gostam de física, façam. E se não gostam, foram treinados para ser capazes de resolver problemas de uma forma quantitativa, e há muitas outras oportunidades de emprego fantásticas por aí fora, por isso não é preciso pôr todas as esperanças na física. Mas se realmente estás a gostar... Eu devo dizer que investigação em particular é árdua porque se passa todo o tempo encalhado. É 80% do tempo estar encalhado, não saber o que fazer a seguir, e não há ninguém a quem se possa perguntar porque não há ninguém no mundo que tenha resolvido esse problema. Por isso, a maioria do tempo é algo miserável. Os pequenos momentos de luz e alegria que se tem quando finalmente se resolvem têm que compensar por toda a miséria do tempo em que se passou encalhado. Algumas pessoas adoram isso, outras acham que é frustrante. Mas para mim, sim, eu acho que é espetacular, é o melhor emprego do mundo. Mas é um emprego muito competitivo, há mesmo muito mais pessoas por aí do que há lugares, mas se estás a gostar então continua em frente. E se achas que é demasiado severo então há muitos outros sítios bons e coisas para se fazer.

Outra coisa que os estudantes normalmente se preocupam bastante, especialmente no ensino secundário são as notas. Acha que é necessário ser um bom aluno e/ou ser particularmente inteligente para se fazer física teórica?

Eu acho que é preciso ser bom aluno. Tal como disse, é muito competitivo, a todos os níveis. Certamente se gostas podes aprender a grande teoria. Podes aprender mecânica quântica e relatividade geral ao nível de licenciatura. Tens o gozo de aprender e ao mesmo tempo adquires competências que podem ser úteis noutros lugares. Por isso, se

quiseres fazer uma licenciatura, não é preciso ser nenhum Einstein. Se quiseres fazer investigação os números sobem, ajuda ter boas notas.

Sempre foi um bom aluno, ou só assim que começou a fazer física?

Eu era razoável, não fui a nenhuma escola muito espetacular mas sempre me saí bem.

Outra coisa importante é colaboração. Fez o primeiro pós-doc na Índia. Sente que a Física é uma área colaborativa global, ou sente que é mais fechada?

Não, é completamente aberta. E quanto a mim é a melhor coisa acerca da comunidade. Completamente global, em qualquer ponto do mundo. Certamente todos os países desenvolvidos e muitos países em desenvolvimento têm verdadeiramente excelentes físicos. Especialmente física teórica dado que não custa muito. Só é preciso papel e caneta, talvez um portátil e um caixote do lixo e é isso. Há bastantes grandes experiências por aí fora, satélites ou experiências em física de partículas, por isso se fores um teórico é muito barato sê-lo. A Índia agora é um país rico onde dinheiro para ciência não é um problema, mas quando fiz o pós-doc lá as coisas eram um pouco diferentes. Apesar disso eles podiam ter um grupo líder mundial em teoria de cordas, porque há muitos indianos inteligentes e é uma coisa muito barata de se fazer. Por exemplo, uma coisa que gosto é que tenho muitos amigos iranianos que são físicos, e muitos amigos israelitas que são físicos. Mas a coisa que de certa forma me espanta é que todos os meus amigos israelitas são amigos de todos os meus amigos iranianos, e não acho que haja alguma comunidade no mundo onde exista este nível de cooperação entre países cujos líderes políticos afirmam que são inimigos. E eu acho que isso é de facto bastante especial.

E em relação a outros tipos de confrontos, como raça ou género. Acha que a Física também é uma comunidade aberta nesse aspeto, ou que tem os mesmos problemas que o resto do mundo?

Claramente tem problemas, especialmente em termos de equilíbrio de género. Isso precisa de mudar, e tenho grandes esperanças que mude. Mas é difícil. Consegues ver nas aulas em que estamos, há uns 100 estudantes e não sei quantas mulheres, mas menos de 10%. Eu não sei como é que vamos abordar isso. Neste país (Reino Unido) pelo menos, começa ao nível das escolas. Nesse nível as raparigas que fazem física são 20% do total, talvez. Noutros países acho que é melhor. É um grande problema e adorava saber como mudar isso.

Mas acha que é discriminação ao nível da própria instituição, ou que simplesmente as mulheres não aparecem para o trabalho?

Não é discriminação explícita. Provavelmente seria melhor perguntar a alguém do outro género. Mas a minha impressão é que se te dizem desde uma idade tenra que a ciência não é para ti, em algum ponto isso fica. Também acho que é verdade que é um campo competitivo, e que essa competi-



Há muitas questões excitantes. O que me entusiasma mais é que suspeito que todas estas coisas estão conectadas, que perceber o que se passa em materiais provavelmente está relacionado com o que se passa em cosmologia.

vidade pode ser dissuasora, não apenas para mulheres, mas para muitas pessoas. Certamente ao nível de investigação toda a gente está a tentar entender coisas. Eu tento ser simpático, mas se estou a tentar mesmo, mesmo muito num assunto, e estou enalhado, ou não sei o que estou a fazer, às vezes, completamente perdido, então não é o tempo mais fácil para me apanhar e fazer-me uma pergunta.

E em relação a colaboração com outros departamentos, como Matemática, ou Química? Acha que isso existe bastante?

Enquanto comunidade internacional eu acho isso extremamente impressionante. O tipo de física que faço é muito no lado matemático da física, mas certamente já trabalhei em coisas muito matemáticas, e que quase poderiam ser consideradas matemática pura. Nesta comunidade existe um espectro de matemática pura a física, e todos vamos aos mesmos encontros e falamos uns com os outros. Eu também trabalhei em física da matéria condensada, que é aplicar a física para compreender sólidos, e mais uma vez há uma comunidade de pessoas que todos se conhecem e que todos interagem. Eu trabalhei em cosmologia do universo jovem, e mais uma vez as pessoas que constroem satélites falam com as pessoas que estão a pensar na teoria. Eu trabalhei menos em física de partículas e o mesmo é verdade aí. Mas na realidade há estas áreas muito diversas, agora tem havido muita interação entre as pessoas de informação quântica e as pessoas na minha comunidade, por isso eu acho que é muito aberta a novas ideias.

Para além da Física tem algum outro interesse ou hobby?

Não, só Física (risos). É tão boa, porque é que é preciso mais alguma coisa?

Então acha que a visão do cientista maluco é verdade nalgum sentido?

Bem, uma das coisas boas deste trabalho é que temos muita gente estranha em Física. E isso é brilhante. Conhecer gente interessante é algo que aprecio. Mas a maioria das pessoas não são cientistas malucos. A maioria das pessoas têm interesses variados, são cultas e adoram diferentes coisas. Mas para mim, é só a Física. ■

Os ensinamentos da Run 2 do LHC: oportunidades e desafios

por Patrícia Mulhão, professora do Departamento de Física, IST, e investigadora do Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, LIP

O Modelo Padrão da Física de Partículas (SM, nas suas siglas em inglês) é a teoria que descreve as partículas fundamentais e as suas interações.

Partindo de princípios básicos de simetria, o SM permite derivar as equações que descrevem as interações eletrofraca e forte através da troca de bósons (as partículas fundamentais portadores das interações). O último ingrediente é o mecanismo de Higgs, que permite introduzir a quebra espontânea da simetria eletrofraca (EWSB) e com isso os termos de massa das partículas fundamentais. Ao longo dos anos, o SM tem coletado inúmeros êxitos. É uma teoria tremendamente preditiva, que não só postulou a existência de novas partículas, descobertas experimentalmente uns tempos depois (tais como os bósons W e Z), como também descreve de forma precisa um grandíssimo número de processos de física. Entre os seus êxitos está também a quantidade prevista e verificada com maior precisão na história da física: o momento anômalo do elétron, com uma precisão de mais do que 10 algarismos significativos e que concorda com as medições experimentais com a mesma precisão!

Apesar de todos estes êxitos, sabemos que o SM está incompleto porque há processos de física que não consegue descrever. Tal é o caso da matéria e a energia escura do Universo, cuja natureza é totalmente desconhecida neste momento. De facto, dado que a matéria e a energia escura constituam perto de 95% do Universo, poderíamos dizer que o SM só consegue descrever uma pequena parte, 5%. O SM também não inclui a gravidade, nem consegue descrever alguns outros fenómenos, como o facto de que sejamos feitos de matéria (e não de antimatéria). Tudo isto faz pensar que o SM é só uma parte de uma teoria maior e mais fundamental, que possivelmente também inclui novas partículas. Existem muitas teorias para além do SM que explicam alguma (ou várias) destas questões em aberto, como podem ser as Supersimetrias (SUSY), teorias de grande unificação (GUT), *supergravity* (SUGRA),...

O Grande Colisor de Hadrões do CERN (o LHC) foi construído para testar os limites do SM e procurar novas partículas, previstas ou não por estas novas teorias. Nos três primeiros anos de operação do LHC - a Run 1 (2009-2012) - o seu maior êxito foi a descoberta do bóson de Higgs, feita pelas experiências ATLAS e CMS. Esta descoberta motivou o prémio Nobel da Física de 2013, outorgado a Peter Higgs e François Englert pela descrição do mecanismo de quebra espontânea da simetria eletrofraca. Poderia pensar-se que se fechava assim um capítulo no estudo das partículas fundamentais, mas na realidade este evento iniciou uma nova fase na qual o estudo das propriedades do bóson de Higgs aparece como um dos objetivos principais: será que o bóson descoberto é, de facto, a partícula prevista pela teoria de Higgs? As suas

propriedades concordam com o previsto pelo SM? Será que o SM descreve de forma precisa a EWSB? Será que o bóson de Higgs tem alguma ligação à matéria escura?... As respostas a todas estas questões são um dos objetivos que o LHC pretende atingir nos próximos anos.

A segunda tomada de dados, a Run 2, terminou em dezembro de 2018, depois de outros três anos de operação (2015-2018), proporcionando um aumento de mais do que um fator 4 no número total de colisões de prótons colectadas. Esta tomada de dados caracterizou-se pelas medições das propriedades do bóson de Higgs e outros processos do SM, assim como das pesquisas de nova física.

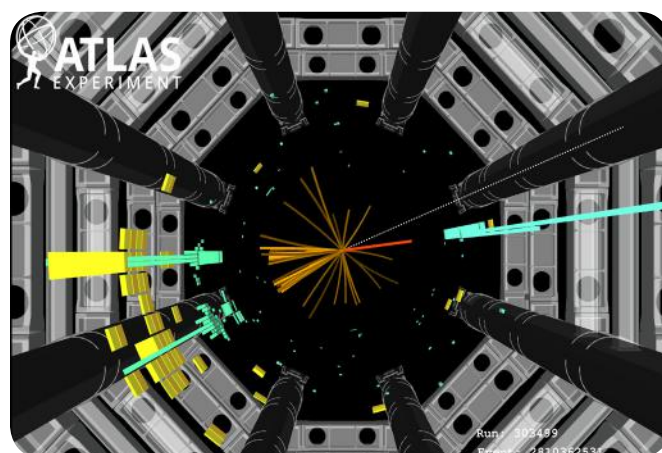


Figura 1: Evento candidato a um decaimento do Higgs a dois quarks b

No caso do bóson de Higgs, determinar as suas propriedades quer dizer medir a forma como interage com as outras partículas fundamentais (os bósons, os léptões e os quarks) e consigo próprio, como é produzido no LHC e como decai, qual é a sua massa e quais são os seus números quânticos. Na Run 1 tinham já sido observados os decaimentos a bósons (WW, ZZ e $\gamma\gamma$), que continuam a ser estudados e medidos com muito mais precisão na Run 2. A maior estatística disponível na Run 2 permite estudar a probabilidade de produção em função de propriedades tais como o momento transversal do bóson de Higgs ou de outras partículas produzidas no mesmo evento, a produção associada com outras partículas,... Ambas as experiências, ATLAS e CMS, observaram independentemente e pela primeira vez em 2018 o decaimento a pares de quarks b (na figura 1) e a produção associada com pares de quarks top, que demonstram a interação do bóson de Higgs com os quarks. Também mediram a sua massa com uma precisão da ordem de 0,2% e observaram os seus decaimentos a léptões tau. Os resultados obtidos, ainda com menos de metade dos dados coletados, concordam com as previsões

do Modelo Padrão, se bem que as incertezas nas medições são ainda muito grandes e serão precisos muitos mais dados para poder testar com precisão os limites do SM no setor do Higgs.

Além das propriedades do Higgs, na Run 2 continuaram-se as medições de precisão de processos previstos pelo SM, tais como as propriedades do quark *top*, a produção de pares de bósons vetoriais, produção de jatos de partículas originados por quarks ou glúons,... É de destacar também a medição de alta precisão da massa do bóson W, feita pela experiência ATLAS, na qual se alcançou uma precisão de 0,02%, uma das medições mais precisas do mundo apesar das dificuldades inerentes a esta medição num colisor hadrónico. A massa do bóson W, junto com a do quark *top* e do bóson de Higgs, servem para testar a coerência interna do Modelo Padrão, dado que a teoria prevê a relação entre as três massas. Os resultados obtidos mostram uma certa discrepância entre o valor esperado para a massa do Higgs, tendo em conta as massas do *top* e do W, e o seu valor medido. Isto poderia vir a ser uma primeira evidência de nova física no setor do Higgs, daí a necessidade de melhorar a precisão na medição das suas propriedades.

A Run 2 permitiu também estender os limites das pesquisas por novas partículas. Uma larguíssima lista de pesquisas foram feitas, considerando diversos estados finais, topologias, modelos ou previsões e ainda muitos estudos genéricos (independentes dos modelos) que pesquisam por ressonâncias a decair a dois quarks, dois léptões, dois fótons,... ou certos tipos de topologias mais sensíveis a nova física. Nenhuma destas análises apresentou ainda uma evidência clara de novas partículas, se bem a maioria deles foram feitos com uma fração ainda pequena dos dados coletados na Run 2. Na ausência de evidências, impuseram-se limites na massa das novas partículas, que oscilam entre os centos de GeV até perto de 8 TeV em alguns casos.

Os desafios para o futuro passam por medir com precisão as propriedades do bóson de Higgs e as previsões do Modelo Padrão, assim como continuar a procurar por nova física. As medidas de precisão podem verificar (ou não!) as previsões da teoria, testando os limites até os quais as previsões são corretas. Qualquer desvio claro com respeito à previsão será um indicador da existência de nova física e tal vez proporcione alguma pista sobre as questões em aberto. Por outro lado, é preciso também continuar as pesquisas diretas por novas partículas, estendendo os limites de massa no caso de não observar nada. Este programa requer de uma luminosidade integrada (quantidade de colisões de prótons) 20 vezes maior do que a adquirida até agora. Isso implica não só obter dados durante mais tempo mas também melhorar tanto o LHC como os detetores, de forma a conseguir uma taxa ainda maior de colisões de prótons.

Para conseguir acumular tanta luminosidade, o LHC vai seguir um programa de Upgrades dividido em duas fases. Na primeira, a acontecer agora durante os próximos dois anos (2019-20), o acelerador será melhorado para poder duplicar a luminosidade total adquirida na Run 2. Com a segunda fase, a acontecer entre 2024-25 e com uma tomada de dados que durará aproximadamente 10 anos,

conseguir-se-á aumentar em 10 vezes a luminosidade total acumulada. Isso implica importantes mudanças nos ímanes do LHC e também nos detetores ATLAS e CMS.

O aumento do número de colisões de prótons impõe importantes desafios para as experiências: por um lado está o envelhecimento por radiação de alguns dos elementos do detetor, que levariam a uma perda de desempenho se não fossem trocados. Por outro lado, é preciso melhorar as capacidades do detetor para permitir distinguir as partículas de interesse com uma quantidade até 10 vezes superior no número de colisões de prótons. Para perceber isto é preciso saber que os prótons no LHC estão distribuídos em pacotes que se cruzam com uma frequência de 40 MHz (40 milhões de vezes por segundo). Em cada cruzamento dos pacotes de prótons produzem-se na atualidade até 40 colisões de prótons, originando um volume de dados de 60 TB/s, tão grande que não pode ser armazenado. Isto obriga a fazer uma análise e seleção em tempo real (no sistema de “trigger”), utilizando tanto processadores de *hardware* especificamente desenvolvidos para este propósito, como uma série de algoritmos de *software* desenhados para identificar assinaturas específicas.

Após a fase II do *Upgrade* do LHC, o número de colisões em cada cruzamento dos pacotes de prótons aumentará para 200. O sistema de *trigger* terá de ser mais rápido e mais inteligente para analisar um maior volume de dados e continuar a escolher os eventos de física relevantes com a mesma eficiência, enquanto rejeita os eventos que não se vão usar. Novos processadores dedicados, assim como novos algoritmos de seleção, eventualmente utilizando também aceleradores de *hardware* como placas gráficas, estão a ser desenvolvidos nestes momentos para melhorar o sistema de *trigger*. Adicionalmente, os detetores terão também de ser melhorados. Será preciso distinguir a colisão de prótons que originou cada uma das partículas detetadas. Isto vai requerer a mudança do detetor de traços, que identifica as trajetórias das partículas carregadas, para aumentar a sua cobertura, assim como a introdução de um novo detetor de tempo de voo, com uma precisão em tempo da ordem de 10 μ s. A eletrónica de aquisição de dados de cada um dos subdetetores terá também de ser modificada para proporcionar informação digital a uma taxa maior, como requerido pelo novo sistema de *trigger*. E tudo isto terá de acontecer enquanto as análises e a obtenção de dados continuam!

Em conclusão, para tentar descobrir as respostas a algumas das questões fundamentais e testar os limites de precisão do Modelo Padrão, o LHC continuará a produzir colisões de prótons a taxas cada vez mais altas nos próximos 15 anos, impondo imensos desafios tanto tecnológicos como de investigação em física para os próximos anos. ■

Referências:

- [1] Página pública de ATLAS: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic>
- [2] Página pública de CMS: <https://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/>

Mudam-se os tempos, mudam-se as vontades

por Mónica Chaves Afonso, PhD, investigadora do CeFEMA no grupo de membranas, química e processos eletroquímicos e engenheira química na empresa OMNIDEA Lda.

Com o entrelaçar dos caminhos neuronais, ao ritmo vertiginoso de raciocínios incansavelmente mais velozes, a cada segundo que passa, a humanidade continua a sua infindável procura. Em inevitável harmonia com o planeta mãe, abandona definitivamente o seu papel de predadora insaciável, tornando-se parte integrante e consciente do equilíbrio dinâmico, que durante milénios lhe tem sido favorável.

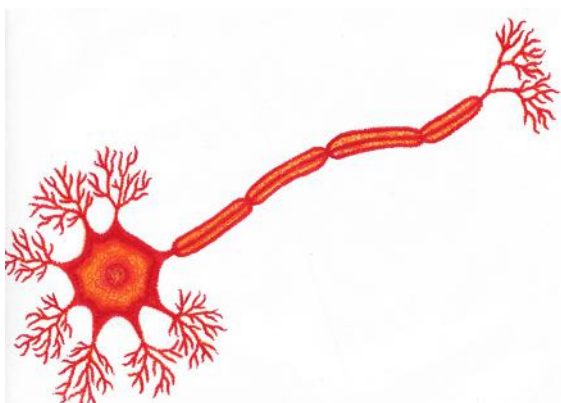


Figura 1: Neurónio. Ilustração de Verónica Fonseca.

Se o petróleo se apresentava como a única fonte natural, com o esvaziar do poço e não sendo ainda possível satisfazer todas as necessidades energéticas a partir da estrela mãe, porque o planeta insiste periodicamente no anoitecer, a humanidade mergulhou na quimera de novas fórmulas para obtenção de energia, colhendo os elementos da tabela periódica, agora com uma nova consciência: recolher e semear. Eis que renascem as células de combustível relegadas durante décadas para segundo plano, imaturas, pesadas, sedentas de novos materiais, mas com um potencial imenso, seja no mar, na terra, no céu e no espaço. Veja-se o exemplo da NASA que as utilizou em todas as missões tripuladas, porque para além da energia, fornecia água potável aos astronautas.

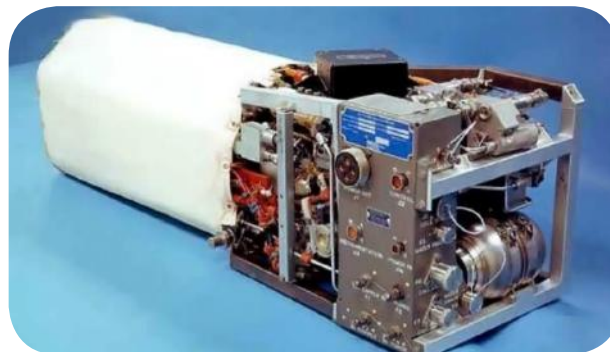


Figura 2: Célula de combustível (dispositivo que converte energia química em eletricidade) utilizada pela NASA, fornecia energia ao “Space Shuttle Orbiter”. Neste caso a reação electroquímica é: $2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O$. A reação directa é espontânea (célula de combustível) e a inversa necessita de energia para acontecer (electrolisador).

A energia produzida, é também veículo crucial no transporte da informação. Da carta em papel ao *WhatsApp*, do pombo correio ao satélite, o mundo torna-se cada vez mais pequeno. A conquista do espaço não se resume a descobrir novos mundos, como também e não apenas, a melhorar a transmissão da mensagem, garantindo a sua chegada a todos os pontos do planeta. De *2001: Odisseia no Espaço* (1967) a *Interstellar* (2014), de Sputnik (URSS, 1957) a Galileo (ESA, 2018), da mecânica clássica à quântica, os satélites evoluem em tamanho, tecnologia, função e filosofia.

O interesse em missões com órbitas baixas (*Low Earth Orbit* - LEO) promoveu o crescimento do segmento do mercado de microssatélites. Estas estrelas irrequieta no céu noturno, utilizam materiais leves e componentes “*commercial off the shelf*” (COTS) sendo constituídas por unidades cúbicas de dimensões reduzidas (10 cm x 10 cm x 11.35 cm). Encaixar dispositivos de armazenamento de energia



Figura 3: À esquerda: fotografia da autoria da ESA, CNES, Arianespace, Optique Vidéo du CSG, Service Optique mostra um dos satélites no centro espacial da Guiana Francesa (CSG). À direita: ilustração de ESA–Pierre Carril, 2017. Nesta imagem podem ver-se os quatro CubeSats a destacarem-se da nave Ariane 5 que os transportou para a órbita desejada.



Figura 4: À esquerda: ilustração de ESA–Pierre Carril, Sentinel-3. Satélite do programa europeu Copérnico, fornece medições sistemáticas dos oceanos, terra, gelo e atmosfera. À direita: INFANTE, o primeiro satélite Português a ser lançado em órbita em 2021 para estudar os oceanos. Imagem retirada do sítio: <https://pplware.sapo.pt/ciencia/infante-o-satelite-portugues2021/>. Resulta de um consórcio nacional liderado pelo grupo TEKEVER que integra 9 empresas, Active Space Technologies, Omnidea, Active Aerogels, GMV, HPS e Spinworks e 10 centros de I&D reconhecidos internacionalmente nas suas áreas de competência, como o CEIIA, FEUP, ISQ, FCT-UNL, INL, IPN, IPTomar, ISR Lisboa, IT Aveiro e UBI.

(baterias de ião lítio, células de combustível,...) dentro de tão pequenos cubos é um desafio estimulante para a engenharia, porque um grama poupado no lançamento resulta numa inestimável economia!

Células de combustível reversíveis, materiais leves e resistentes, dispositivos multifuncionais, novas formas de propulsão... ciência aplicada e fundamental, física, química, biologia, aeroespacial, design, arte, filosofia, economia... caminham juntas no evoluir da tecnologia.

O futuro como será? Híbridos multifacetados? Distintas filosofias? Para a humanidade o impossível é pura utopia!

Pedra Filosofal

[...]

*Eles não sabem, nem sonham,
que o sonho comanda a vida.*

*Que sempre que um homem sonha
o mundo pula e avança
como bola colorida
entre as mãos de uma criança.*

António Gedeão, Rómulo de Carvalho

Poeta, Físico ■

Surround modulation no córtex cerebral: compreender a percepção do mundo visual

por Beatriz Belbut, alumna do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST, e aluna de doutoramento no programa de neurociência da Fundação Champalimaud

Sentar-se numa poltrona antiga, sentir-lhe os relevos de veludo, notar a quentura suave do chá que se permeia por uma chávena lisa agarrada com entar-se numa poltrona antiga, sentir-lhe os relevos de veludo, notar a quentura suave do chá que se permeia por uma chávena lisa agarrada com ambas as mãos, a hortelã que estala feita perfume a cada golo, saborear devagar a erva-doce que lhe misturámos. Então, perceber um som perdido fora da janela, passos e assobios caminchantes, olhar e ter a certeza de um céu azul, da agitação de uma folha citadina e de uma cara amiga reconhecida por baixo da varanda. Experienciar o mundo e os seus largos detalhes é parte talhante e irremediável da vivência humana.

Enquanto animais, absorvemos informação do nosso meio através de sensores extraordinariamente eficientes e o nosso sistema nervoso produz então sensações distintas

de acordo com os sinais capturados. Estamos equipados com detetores sensíveis, rigorosos e completos, que nos permitem obter informação acerca das características do ambiente que nos rodeia de acordo com as nossas necessidades biológicas e contextuais.

Contudo, talvez uma das mais fascinantes qualidades da experiência sensorial seja a nossa habilidade de a encapsular numa dada configuração mental. O nosso sistema nervoso permite a formação de um mapa de correspondência entre o mundo exterior e a realidade interior de cada indivíduo - não sentimos o nosso meio num modo de deteção sensorial passiva, mas necessariamente implicamo-nos no processo da sua percepção. Esta experiência envolve a integração do nosso conhecimento anteriormente aprendido, da nossa memória, do contexto do objeto-alvo que percebemos, do nosso estado e foco de atenção, culminando

na representação interpretada que nos permite responder ao estímulo, tomar decisões com base no mesmo, alterar o nosso comportamento, o nosso estado interno ou prontamente identificar esse estímulo em possíveis futuras recorrências similares.

Em neurociência, importantes questões continuam a ser invocadas quanto à eficiência, os mecanismos, as funções, circuitos e problemática computacional associadas a este processo sensorial e neuronal. O sumo da pergunta mantém-se: como percebemos o mundo?

Percepção visual e a estrutura das vias nervosas visuais

Em particular, *ver* permite o processamento de informação substancial e relevante sobre o exterior. Os processos visuais são levados a cabo de forma notoriamente eficiente, rápida e envolvente.

Notando a relevância desta pergunta, o psicólogo britânico Richard Gregory expõe no seu livro *Eye and Brain: The Psychology of Seeing*, em 1966:

"We are so familiar with seeing, that it takes a leap of imagination to realize that there are problems to be solved. But consider it. We are given tiny distorted upside-down images in the eyes, and we see separate solid objects in surrounding space. From the patterns of stimulation on the retina we perceive the world of objects and this is nothing short of a miracle."

Compreender a percepção visual e os seus processos fundamentais é um dos mais presentes desafios da neurociência, prometendo e indicando vias também para a compreensão do problema perceptual noutras modalidades sensoriais, assim como dos princípios e funcionamento sistémico do cérebro.

Neste caso, o sistema recebe a informação sobre uma imagem física pela retina. Ao receber a luz presente num dado campo visual, a retina mapeia os padrões de variações temporais e espaciais desses sinais luminosos numa camada de células fotoreceptoras que respondem com um padrão de atividade elétrica num mapa retinotópico: uma representação organizada e topograficamente ordenada do campo visual.

Estes sinais são então transmitidos ao longo do sistema nervoso que processa as características do estado presente da cena visual, em paralelo para cada região da imagem, numa estrutura neuronal organizada hierarquicamente.

Os sinais seguem vias de *feedforward* com cada nível a integrar informação sobre uma parte maior do campo visual. Para além disso, à medida que se sobe na hierarquia, os neurónios envolvidos são cada vez mais seletivos e responsivos a características mais complexas - no início da hierarquia encontrar-se-ão neurónios responsivos a linhas orientadas, enquanto que em áreas superiores os neurónios poderão ser específicos ao reconhecimento de objetos ou faces.

Melhorando a eficiência do processo, existem também ligações horizontais entre neurónios na mesma área hierárquica cerebral, havendo então a possibilidade de troca local de informação entre células que processam diferentes zonas do campo visual, no mesmo nível cerebral.

Concomitantemente, conexões de *feedback* são superimpostas de áreas hierarquicamente superiores para áreas inferiores, transmitindo estas sinais que contêm

informação contextual e mais processada que a informação de *feedforward* que atinge a mesma área. Recebendo este *input* mais complexo, os neurónios podem então modificar o seu estado funcional e produzir novas conjecturas, *educated guesses* de alta probabilidade de sucesso sobre a natureza do *input* que as atingiu via *feedforward*.

Propõe-se que a unificação dos *outputs* paralelos deste sistema culmine finalmente numa percepção sensorial consciente.

Em verdade, não existe uma cópia identicamente completa do mundo exterior na nossa realidade perceptual - no entanto, talvez contrariamente a uma primeira intuição, suposições sensíveis e sofisticadas aparentam ser tão efetivas como essa medida, para além de eficientes e biologicamente realizáveis dentro do quadro parcimonioso da natureza.

O córtex visual primário e surround modulation

A primeira área cortical que recebe sinais da retina é chamada de córtex visual primário ou V1. Nesta área, tal como na retina, os neurónios estão retinotopicamente organizados e respondem a estímulos visuais quando estes são apresentados numa dada zona específica do campo visual. Cada neurónio visualmente responsivo tem portanto um campo receptivo - uma resposta será induzida neste neurónio apenas quando um estímulo visual de parâmetros ótimos for apresentado no seu campo receptivo.

Para além disso, os neurónios em V1 respondem maioritariamente a segmentos - linhas orientadas - e têm também uma propriedade acrescida: podem ser *tuned*, seletivos a características particulares, tal como a orientação dessas linhas (*orientation selective*) ou a sua direção de movimento (*direction selective*), respondendo então preferencialmente a uma particular orientação ou direção e não manifestando virtualmente qualquer resposta às características que lhe sejam ortogonais.

Surround modulation (SM) é um fenómeno que ocorre em V1 e noutras áreas sensoriais e que tem sido implicado em computações e mecanismos fundamentais de percepção visual, eficiência de codificação e integração espacial de campos visuais.

Neurónios em V1 respondem a estímulos visuais quando estes são apresentados no seu campo receptivo. Por definição, a apresentação de um estímulo fora do campo receptivo de um neurónio implica que nenhuma resposta esteja



Figura 1: Ilustração de Moonassi.

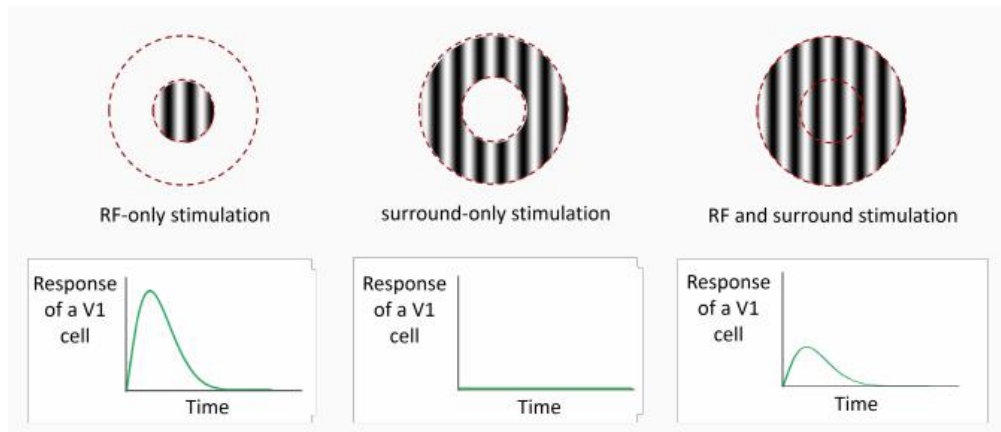


Figura 2: Ilustração de efeito de *surround modulation* numa célula do V1. A linha de cima representa o estímulo visual apresentado ao animal e a de baixo a respetiva resposta neuronal. **Painel à esquerda:** Há uma resposta da célula quando um estímulo visual é apresentado no seu campo recetivo (representado como a região central do estímulo). **Painel central:** Por definição, quando o estímulo é apresentado na região de *surround* da célula, fora do seu campo recetivo, nenhuma resposta é obtida. **Painel à direita:** No entanto, se um estímulo for apresentado simultaneamente no campo recetivo e no *surround*, então a resposta da célula pode ser modulada, isto é, ou suprimida ou facilitada, em relação à resposta que tinha quando o estímulo apenas estava no seu campo recetivo. Este efeito é chamado de *surround modulation*.

presente nesta célula. No entanto, a apresentação simultânea de estímulos dentro e fora do campo recetivo de um neurónio leva a que se verifique a *modulação* do sinal desta célula: a resposta poderá ser suprimida (menos intensa) ou facilitada (mais intensa), em relação à resposta presente com o estímulo apresentado apenas no campo recetivo da célula. O sinal e a intensidade deste efeito de SM dependem das características dos estímulos apresentados nas áreas do campo receptivo e do *surround*, a zona exterior a este centro.

Em geral, as respostas são mais suprimidas quando os estímulos no campo recetivo e no *surround* são similares: da mesma orientação, frequência espacial, direção de movimento. Por outro lado, o efeito é de menor supressão ou até mesmo facilitação quando os parâmetros são ortogonais.

A particularidade de respostas mais intensas com estímulos dissimilares sugere que SM esteja implicado em processos de saliência visual, percepção de limites de objetos e segregação de figuras do seu *background*.

Para além disso, a função de SM pode também ser a de reduzir redundâncias em respostas neuronais, criando um código mais *sparsed* e produzindo um sistema neuronal mais eficiente no seu todo. Por exemplo, a supressão de respostas a linhas com orientações semelhantes no campo recetivo e no seu *surround* pode ser intuitiva na perspectiva de que linhas vizinhas com inclinações parecidas são estatisticamente expectáveis no mundo natural e portanto não requerem codificação proeminente e energeticamente custosa. SM serviria portanto para reduzir as correlações espaciais e temporais do mundo visual nas representações neuronais.

SM tem sido estudado em múltiplas espécies e modalidades sensoriais. Normalmente estas investigações são levadas a cabo com estímulos como círculos que se vão expandindo da zona do campo receptivo até o raio em que se verificar efeito de modulação de resposta, a partir do qual é estabelecida a zona de *surround* ou com zonas anelares estabelecidas similarmente. Assim, as características dos estímulos são feitas variar, de forma a avaliar-se as proprie-

dades de SM.

No entanto, estas abordagens mais comuns pressupõem que o efeito é uniforme: que existe simetria e isotropia. Por outro lado, os circuitos neuronais propostos como mediadores deste fenómeno têm recentemente mostrado assimetrias na sua organização funcional. No projeto que levei a cabo durante a tese, estudei então a estrutura espacial de SM no córtex primário de roedores, apresentando-lhes estímulos visuais não-uniformes e simultaneamente medindo as suas respostas neuronais em V1. Estas medições foram possíveis pela combinação de um método de *imaging* de alta resolução chamado *two-photon laser scanning microscopy* com a fluorescência dos neurónios ativos de animais transgénicos.

Grandes volumes de medições relativas a diferentes células foram obtidos com este método, possibilitando comparações estatísticas de efeitos de SM mediante uma numerosa quantidade de tipos de estímulos: obtivemos que SM é efetivamente não uniforme, com assimetrias dependendo das combinações de direções e orientações dos estímulos no centro e em diferentes posições de áreas de *surround*, assim como da seletividade dos neurónios envolvidos.

Este estudo adiciona à ideia estabelecida de que a visão e a percepção são efeitos contextuais: uma integração espacial global é processada numa dada forma estruturada, com regras de assimetria não-uniforme, num efeito complexo de *surround modulation*. Este mecanismo poderá assim estar notoriamente envolvido na extraordinária eficiência e na maravilhosa experiência que nos são permitidas ao olhar, ver, interpretar, perceber e perceber o mundo em que nos incluímos. ■

Referências:

- [1] Angelucci, A. *et al.* Circuits and Mechanisms for Surround Modulation in Visual Cortex. *Annual Review of Neuroscience* **40**, 425(451. issn: 0147-006X (2017).
- [2] Marques, T., Nguyen, J., Fioreze, G. & Petreanu, L. The functional organization of cortical feedback inputs to primary visual cortex. *Nature Neuroscience* **21**, 759(764 (2018).

Estudo do Ângulo de Deflexão da Bola Branca em Colisões entre Bolas de Bilhar

por André de Sousa Guimarães, Pedro dos Santos Braz e Diogo Velosa, ex-alunos do Externato Marista de Lisboa

Este é o artigo vencedor do primeiro concurso da PULSAR Jovens Investigadores!

Resumo

Modelos teóricos relativos à colisão entre bolas de bilhar são tradicionalmente simplificados em demasia, resultando em dados que são geralmente inconsistentes e incompatíveis com os obtidos através de experiências reais. Neste estudo é analisado o ângulo de deflexão da bola branca após uma colisão com uma bola-alvo inicialmente em repouso, através da utilização do *software* de análise de vídeo *Tracker*, para determinar o referido ângulo de deflexão em função do ângulo formado entre a reta que une os centros de massa das duas bolas aquando da colisão e o vetor velocidade da bola branca no mesmo instante. Os valores obtidos experimentalmente para o ângulo de deflexão da bola branca sugerem que modelos tais como um dos propostos por Alciatore em [1], e com o qual os resultados obtidos foram comparados, não descrevem com total precisão uma colisão entre duas bolas de bilhar numa situação real.

Palavras-chave: colisão; bilhar; deflexão.

Introdução

O conhecimento ou intuição acerca da física envolvida em desportos da família do bilhar é um fator condicionante do desempenho dos praticantes destas modalidades, segundo [2], uma vez que a precisão na previsão da posição final das bolas após uma jogada são aspetos cruciais destas modalidades, de acordo com [3].

Por esta razão, é importante que se construam modelos baseados em resultados teóricos ou experimentais que permitam a um jogador de bilhar determinar de forma moderadamente precisa, mas relativamente simples, as trajetórias descritas por duas bolas que colidem.

Contudo, os modelos geralmente propostos para este fim tendem a adotar variadas simplificações, que podem originar cenários reais incoerentes com o modelo utilizado [4].

Neste estudo, valores obtidos experimentalmente para o ângulo de deflexão sofrido pela bola branca após uma colisão, para diversos valores do chamado ângulo de corte (v. Figura 1), são comparados com os previstos por um modelo apresentado por Alciatore em [1] e que se encontra descrito a seguir.

Regra dos Trinta Graus

Dada a facilidade relativa que deve existir em utilizar o modelo teórico em análise para que um jogador de bilhar o possa utilizar realisticamente durante um jogo, este pressupõe que a bola-alvo se encontra inicialmente em repouso e que a bola branca não adquire qualquer *topspin* ou *side-spin* após a tacada.¹

¹ Para uma análise teórica mais complexa, consultar [5].

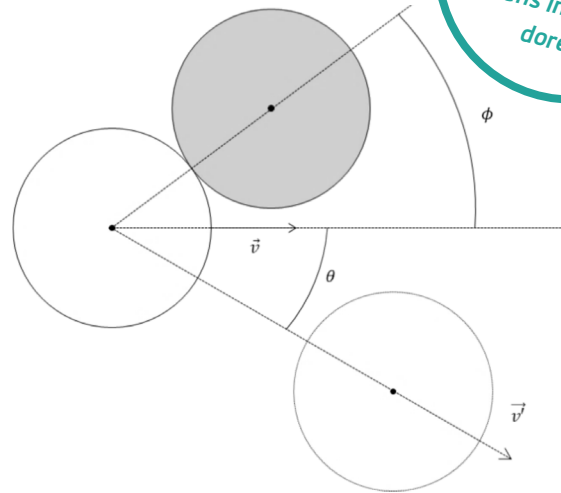


Figura 1: Ângulo de corte, ϕ , e ângulo de deflexão, θ , numa colisão entre duas bolas de bilhar. Encontram-se ainda representados os vetores velocidade da bola branca antes e após a colisão.

Em [1], Alciatore propõe a seguinte expressão para o ângulo de deflexão, θ , da bola branca após a colisão, em função do ângulo de corte, ϕ :

$$\theta = \arctan \left(\frac{\sin \phi \cos \phi}{\sin^2 \phi + \frac{2}{5}} \right) \quad (1)$$

A Figura 2 apresenta um gráfico do valor de θ em função de $\phi \in [0; 90]^\circ$, com base na equação (1).

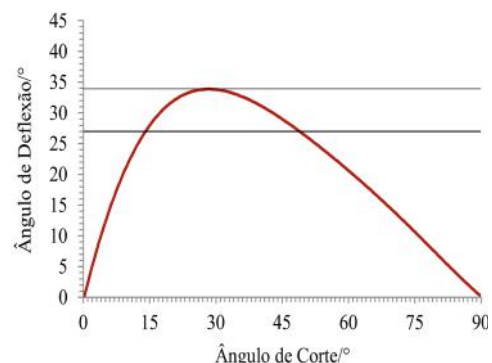


Figura 2: Gráfico do ângulo de deflexão previsto para a bola branca, em graus, em função do ângulo de corte, em graus, de acordo com a equação (1). Encontram-se ainda apresentados os valores máximos e mínimos do ângulo de deflexão para ângulos de corte no intervalo $[15,0; 49,0]^\circ$

O modelo em causa defende que, na maioria das situações, o valor de θ pode ser aproximado a 30° já que para $\phi \in [15,0; 49,0]^\circ$, o valor de θ pertence ao intervalo $[27,0; 33,8]^\circ$.

Contudo, mesmo um desvio de 6° entre o valor previsto para o ângulo de deflexão da bola e o valor real do ângulo de deflexão da bola, numa tacada em que a bola se desloca 200 mm pode traduzir-se numa variação de 20 mm na

posição final da bola, de acordo com [3], o que coloca em causa a precisão deste modelo.

Modelo Utilizado para a Obtenção de Dados

Os dados foram obtidos filmando colisões entre duas bolas de bilhar sobre uma mesa de bilhar, com variação do ângulo de corte.

Para garantir que as condições iniciais de cada ensaio fossem o mais semelhantes possível, a bola branca foi colocada em movimento por ação da força gravítica, ao descer um tubo de PVC com um metro de comprimento, sendo a posição relativa entre este e a bola-alvo o fator condicionante do ângulo de corte.

Os dados relevantes (i.e. a direção da velocidade das bolas antes e após a colisão) foram obtidos recorrendo-se ao *software* de análise de vídeo open-source, *Tracker*.²

Foi apenas realizado um ensaio por cada valor do ângulo de corte estudado, devido à dificuldade em obter dois ângulos de corte exatamente iguais em dois ensaios distintos.

Resultados e Discussão

O gráfico da Figura 3 apresenta os valores previstos para o ângulo de deflexão, em graus, da bola branca segundo a equação (1) (vermelho), bem como os valores obtidos experimentalmente para este ângulo (azul), em função do ângulo de corte, em graus.

O desvio absoluto médio para o ângulo de deflexão medido experimentalmente face ao valor previsto pelo modelo teórico é igual a $4,91^\circ$, sendo o desvio absoluto máximo igual a $18,6^\circ$, para os valores do ângulo de corte estudados.

Contudo, é possível observar que os valores obtidos experimentalmente para o ângulo de deflexão seguem uma distribuição semelhante aos valores previstos pelo modelo, embora sejam, em geral, superiores aos previstos teoricamente.

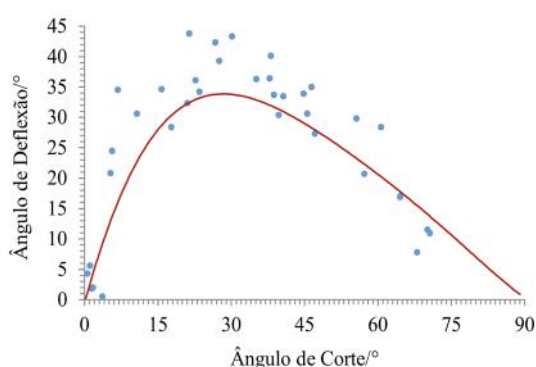


Figura 3: Valores obtidos experimentalmente para o ângulo de deflexão, em graus, em função do ângulo de corte, em graus, sobrepostos ao gráfico da Figura 2.

Para além disso, a praticidade deste modelo fundamenta-se na possibilidade de aproximar o ângulo de deflexão ao valor de trinta graus para ângulos de corte no intervalo $[15,0; 49,0]^\circ$. No entanto, para esse intervalo, os dados obtidos experimentalmente possuem um desvio absoluto médio de $5,8^\circ$ relativamente ao valor 30° . É possível verificar ainda que, para este intervalo, o desvio absoluto máximo relativamente ao valor 30° é igual a $13,8^\circ$.

O valor obtido para o desvio absoluto médio é, como referido anteriormente, suficiente para causar desvios sig-

nificativos entre a posição prevista e a posição real da bola branca após uma colisão, de acordo com [3].

Estas observações permitem concluir que este modelo não permite determinar com a exatidão necessária o ângulo de deflexão sofrido pela bola branca após uma colisão.

Contudo, existem diversos fatores que podem colocar em causa a precisão dos dados obtidos, já que para que estes fossem perfeitamente fiéis à realidade era necessário que a câmara utilizada se encontrasse perfeitamente paralela à mesa, que o número de *frames* por segundo utilizado fosse extremamente elevado para que não ocorresse distorção da imagem e para que a velocidade média das bolas pudesse ser aproximada à sua velocidade instantânea com precisão suficiente.

Para além disso, assumiu-se que as bolas e o seu movimento poderiam ser reduzidos a uma massa pontual representada no centro da esfera que as constitui, o que não será verdade, por exemplo, caso a sua massa não se encontrasse distribuída de forma perfeitamente homogênea.

Ainda assim, os dados obtidos experimentalmente parecem indicar que o modelo considerado não descreve a situação considerada com total exatidão.

Contudo, a comparação com apenas este modelo não constitui, de qualquer forma, uma análise extensiva a todos os modelos teóricos representativos da situação considerada.

Por outro lado, não foi proposto outro modelo mais preciso do que o analisado para a determinação do ângulo de deflexão sofrido pela bola branca após uma colisão, inclusivamente uma vez que o presente estudo exclui situações de interesse para os praticantes da modalidade, como aquelas em que a bola adquire *spin*, sendo a obtenção de dados relativos a estes cenários e subsequente comparação com modelos teóricos um tema de interesse para estudos futuros.

Adicionalmente, durante o tratamento de dados observou-se ainda que após a colisão, os módulos da velocidade das bolas aumentam durante algum intervalo de tempo, ao invés de diminuírem como consequência da força de atrito existente entre as mesmas e a mesa, como seria de esperar. Também na direção da velocidade das bolas é possível observar alguma variação após a colisão, evidenciando que estas descrevem uma trajetória que não é perfeitamente retilínea.

Por fim, observou-se ainda que a direção da velocidade da bola-alvo após a colisão nem sempre era exatamente igual à direção da reta que unia os centros das duas bolas no instante da colisão, possuindo ligeiros desvios absolutos, geralmente inferiores a 3° .

Os desvios obtidos face às previsões teóricas poderão resultar de desvios da própria mesa de bilhar utilizada. Todas as observações referidas, embora não se encontrando no âmbito deste estudo, não deixam de constituir temas de interesse que são também passíveis de estudo.

Conclusão

Após a sua comparação com o modelo proposto em [1], os dados obtidos experimentalmente revelam não se enquadrar com as previsões teóricas propostas por este modelo para a situação em estudo.

Contudo, foram omitidas do presente estudo situações de interesse prático num jogo de bilhar, quando a bola

² Disponível em <https://physlets.org/tracker/>.

branca possui qualquer tipo de spin, por exemplo, o que constitui uma área de possível interesse para um estudo semelhante, em conjunto com outras observações experimentais referidas, envolvendo a comparação de dados obtidos experimentalmente com dados previstos por modelos teóricos, um tema raramente abordado por estes estudos e relativamente ao qual existem ainda aspetos com uma reduzida compreensão teórica.

Finalmente, embora não seja proposto nenhum modelo que descreva de forma mais precisa a colisão entre duas bolas de bilhar do que os propostos por [1], foram obtidos dados experimentais que podem contribuir para o desenvolvimento de tal modelo, cuja existência poderia beneficiar o desempenho de praticantes de desportos da família do bilhar ao constituir uma ferramenta útil para a determinação das consequências de uma colisão entre duas bolas num jogo real.

Agradecimentos

À professora Teresa Figueiredo, à professora Guida Dias e ao professor Hugo Santos pelo seu incentivo, orientação e auxílio.

Ao Externato Marista de Lisboa, por fornecer parte do material utilizado na recolha de dados.

Ao Cocas Place Bar, por disponibilizarem o seu espaço para a concretização deste estudo.

Referências:

- [1] D. Alciatore, "Pool and Billiards Physics Principles by Coriolis and Others," Agosto 2008.
- [2] E. Costa, "Bola, taco, sinuca e física," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 29, n.º 2, pp. 225-229, 2007.
- [3] S. Mathavan, M. R. Jackson e R. M. Parkin, "Numerical simulations of the frictional collisions of solid balls on a rough surface," *Sports Engineering*, 3 Junho 2014.
- [4] N. Derby e R. Fuller, "Reality and Theory in a Collision," *The Physics Teacher*, vol. 37, pp. 24-27, Janeiro 1999.
- [5] R. E. Wallace e M. C. Schroeder, "Analysis of billiard ball collisions in two dimensions," *American Journal of Physics*, vol. 56, n.º 9, pp. 815-819, 1988.

O Pai Natal Relativista

por Alexandre Barbosa, aluno do 2º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST



Uma noite mágica por ano, um só homem percorre o mundo para distribuir presentes a crianças bem-comportadas, deixando as mais curiosas perplexas e a perguntarem, a si mesmas ou em voz alta, como é que este rechonchudo habitante do Pólo Norte consegue completar, sem ser visto, esta tarefa à primeira vista impossível.

O mistério do Pai Natal, no entanto, pode ser explicado por um artigo, publicado em 1905, por um físico cujo nome, se ainda não se esqueceram da pergunta enquanto desembulhavam as suas prendas, não estranhariam: Albert Einstein.

A voar no seu trenó puxado por renas, o Pai Natal tem, tendo em conta as diferenças horárias, 31 horas para distribuir presentes a cada uma das setecentos milhões de crianças que celebram o Natal, percorrendo uma distância superior à da Terra ao Sol, o que significa que tem de viajar a uma velocidade de, pelo menos, dez milhões de quilómetros por hora, ou cerca de 0,01c, um centésimo da velocidade da luz. E, na realidade, a velocidade terá de ser muito maior, próxima da velocidade da luz, para o Pai Natal ter tempo de ter tempo de verificar novamente a sua lista e tornar a longa viagem menos cansativa para as renas.

A um objeto a uma velocidade próxima da velocidade da luz, acontecem coisas *estranhas*: o tempo, para ele, *dilata* e ele próprio *encolhe*. Enquanto dormimos, o Pai Natal move-se tão depressa que o tempo, só para ele, passa mais devagar. É por isso não só que tem mais tempo para entregar os presentes, mas também porque parece não envelhecer. Ao encolher na direção do movimento, se for suficientemente rápido e numa trajetória adequada, o Pai Natal emagrece, e é assim que consegue descer, com o seu enorme saco de prendas, pela mais exígua chaminé.

O efeito Doppler explica porque é que não conseguimos

ouvir o Pai Natal a chegar – à medida que se aproxima, o som dos sinos e o seu 'Ho, Ho, Ho' ficam cada vez mais agudos até os deixarmos de ouvir. Contudo, se na noite de Natal ouvirmos um estrondo, é possível que seja o das suas renas a ultrapassarem a velocidade do som.

O enigma ainda não ficou, porém, completamente esclarecido: se cada criança bem-comportada receber uma caixa de *Lego*®, o Pai Natal leva no seu saco mais de cem mil toneladas de brinquedos, ou seja, mais de *quatro mil* vezes a capacidade do maior avião de carga do mundo! E, na verdade, ainda é mais pesado! Ao viajar a velocidades *relativistas*, isto é, comparáveis à velocidade da luz, a massa de um objeto aumenta, para um observador parado.

Como é que o Pai Natal consegue voar tão depressa com um trenó tão pesado? Certamente não será com bolachas e leite que arranja as quantidades tremendas de energia de que precisa... ou talvez seja! A resposta encontra-se na mais célebre equação da Física: $E = mc^2$.

A energia cinética do conjunto do Pai Natal com o seu trenó carregado de brinquedos e renas é da ordem dos milhares de triliões (10^{21}) de joules. Por outro lado, numa única bolacha de 10 g estão dez mil biliões (10^{16}) de joules! Admitindo que os chifres das renas as tornam perfeitamente aerodinâmicas, o Pai Natal só precisa de cem mil bolachas para ter energia suficiente para a viagem, e de um reator de fusão nuclear completamente eficiente, claro.

Alguns dos segredos do Pai Natal ainda estão por desvendar: como é que as suas renas voam? Como é que o Pai Natal aguenta a enorme aceleração centrífuga ou o calor gerado pela resistência do ar a que está sujeito, sem entrar instantaneamente em combustão?

Quando escrever a minha próxima carta para a Lapónia, não me vou esquecer de lhe perguntar! ■

Agenda Científica



Escola de Verão de Astronomia 10 a 12 de Julho de 2019, Lisboa

A Escola de Verão de Astronomia (EVA) é uma iniciativa do NFIST destinada a promover a Astronomia e Astrofísica juntos dos participantes (alunos do ensino secundário). Ao longo de três dias, foram discutidos assuntos como Gravitação, Evolução Estelar, Cosmologia e a Estrutura e História do Universo, tentando desta forma, promover a discussão de áreas da física que não são abordadas no ensino secundário e complementar as que são. Também se realizará em 2020.

Mais info: <https://nfist.pt/eva/>



**FESTA
AVANTE!**

6/7/8 SET'2019
ATALAIA | AMORA | SEIXAL

Festa do Avante!

6 a 8 de Setembro de 2019, Seixal

O Circo da Física esteve presente na última Festa do Avante!, no Seixal. Mais uma vez, foi convidado a fazer parte do Espaço Ciência, com o tema "Drogas e Dependências". Durante a atividade, foram usadas as experiências do Circo da Física para explicar vários conceitos físicos aos visitantes do espaço.

Info sobre a visita do Circo ao festival de 2019:
<http://circo.nfist.pt/avante-2019/>



XXXIII Semana da Física

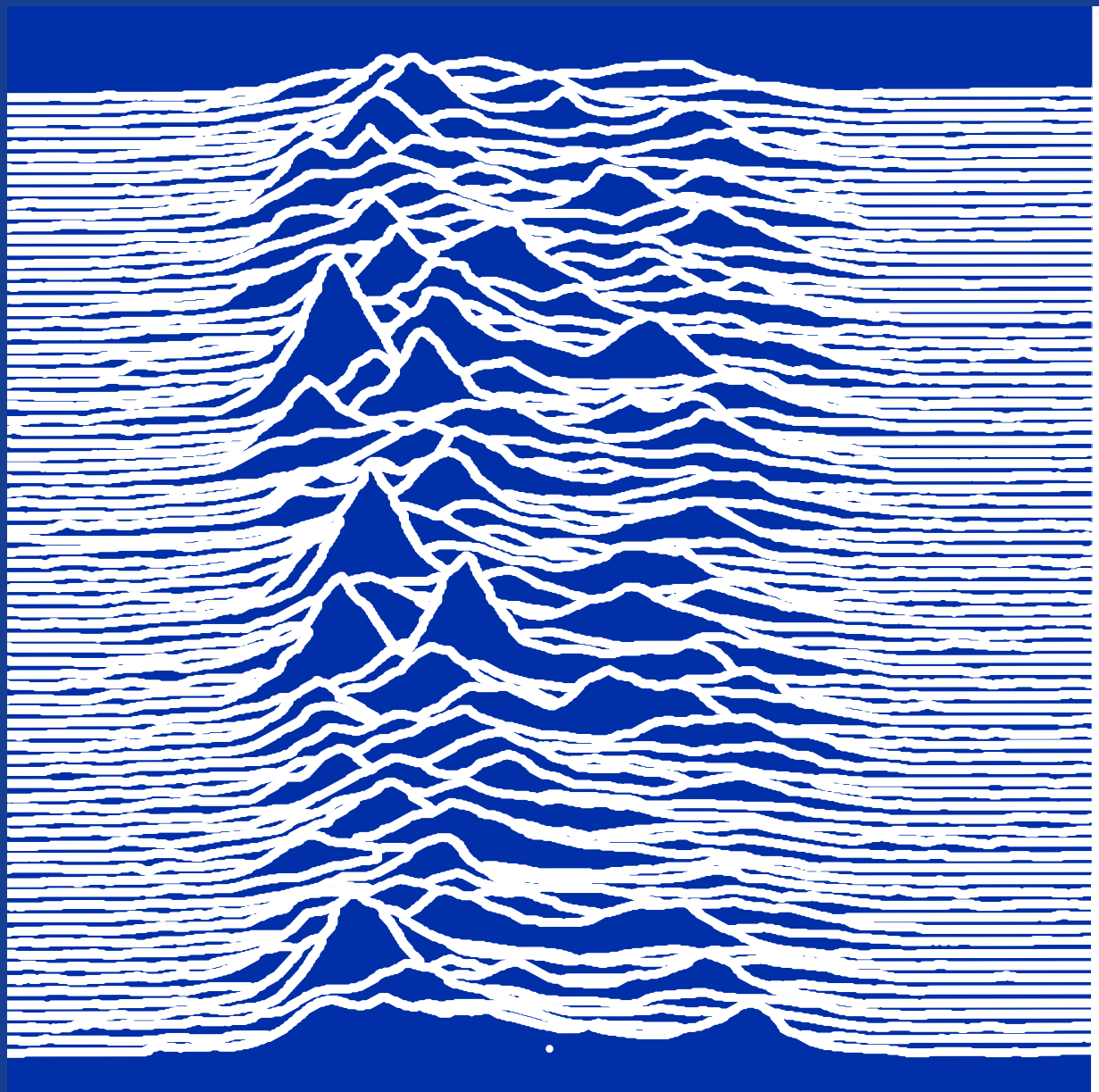
17 a 22 de Fevereiro de 2020, Lisboa

A Semana da Física é um projecto desenvolvido pelo NFIST há já 22 anos: é uma semana totalmente dedicada à divulgação da Física que traz cerca de 2500 alunos do ensino básico e secundário de todo o país ao Instituto Superior Técnico. Os alunos observam experiências, participam em *workshops*, visitam laboratórios e assistem a palestras. O sábado é aberto a todo o público!

Mais info: <http://sf.nfist.pt/>

JOVENS INVESTIGADORES

2ª EDIÇÃO



| EM BREVE |

Queres fazer parte da PULSAR?

Se és aluno do ensino secundário e queres contribuir para a próxima edição, visita <http://pulsar.nfist.pt/concurso/> para mais informações.