

# Da natureza da ciência ao ensino da ciência (\*)

JOÃO MANUEL RESINA RODRIGUES

Departamento de Física do Instituto Superior Técnico

## 1. Da natureza da ciência...

Ao contrário do que correntemente se afirma, a ciência não nasceu na Europa do séc. XVII, nasceu na Grécia Clássica. A partir dos fins do séc. VI a.C., os pitagóricos propõem uma Terra esférica, em repouso no centro do Universo, e uma esfera celeste, rodando em torno da Terra no período de 24 horas, na qual estão incrustadas as estrelas e sobre a qual o Sol se move, no período de um ano e em sentido retrógrado, ao longo do círculo máximo que é a eclíptica. Assim se *explicavam* a sucessão dos dias e das noites e as estações. Levando mais longe a abstracção, Heraclides do Ponto (séc. V a.C.) sugere que se fixe a esfera das estrelas e se atribua à Terra o movimento de rotação; e já no séc. III a.C. Aristarco de Samos propõe o sistema heliocêntrico. É significativo o destino destas ideias. A esfericidade da Terra foi aceite porque havia bons argumentos a favor e nenhuma outra hipótese explicava que, por exemplo, a altura da estrela polar acima do horizonte cresça quando se viaja para o Norte. Pelo contrário, a rotação da Terra e o sistema heliocêntrico foram rejeitados. Pareciam hipóteses gratuitas e levantavam-se objecções que os proponentes não eram capazes de resolver: a força centrífuga arrancaria os objectos do solo; os diâmetros aparentes e as coordenadas das estrelas deveriam variar ao longo do ano, «a menos que elas se encontrem a distâncias enormes, o que nada leva a supor».

No séc. IV a.C., Eudóxio, um dos grandes matemáticos gregos, cria um *modelo* cinemático para *explicar* os movimentos dos planetas tais como são vistos da Terra. Havia séculos que os babilónios e os egípcios registavam, não só os aspectos qualitativos dos céus, mas

as coordenadas dos astros mais importantes. Infelizmente, os métodos de observação e medida, demasiado rudimentares, não permitiam determinações com erro inferior a 1 grau. E os gregos, que nos tempos homéricos sabiam trabalhar com as suas mãos, desprezam agora todo o trabalho, «servil». Mesmo na ciência, são «teóricos». O modelo de Eudóxio não tem nenhuma relação simples com as órbitas de Kepler e de Newton. Mas é tolerado pela experiência enquanto o erro experimental tem aquela ordem de grandeza. Eudóxio sabe certamente que o seu modelo não pode ser apresentado como a *verdade* a respeito do movimento dos planetas, mas apenas como uma hipótese possível. Mas isso é já extremamente importante. Platão, de quem Eudóxio fora discípulo, nota que a possibilidade de *prever* as posições dos astros desfaz a superstição da astrologia; mas que a previsão seria impossível «sem ter debaixo dos olhos uma representação mecânica desse movimento» (*Timeu*, 40, c-d).

No séc. II a.C., o erro tinha baixado para 30 minutos de arco. Com essa precisão, o sistema de Eudóxio é *infirmado*. Apoiando-se na obra matemática de Apolónio, Hiparco cria o *modelo* dos epiciclos. Aperfeiçoado por Ptolomeu (séc. II), este modelo só será totalmente rejeitado no séc. XVII, com as elipses de Kepler.

É curioso que a história e a filosofia da ciência dos séc. XVIII e XIX tenham desprezado esta primeira aventura. Compreende-se porquê: julgando que a ciência era uma conquista ininterrupta de *verdades*, consideraram como sem valor a criação de modelos que o futuro não consagrou. Depois da crise dos fun-

(\*) Comunicação apresentada no 1.º Encontro Regional de Lisboa sobre o Ensino de Física.

damentos do princípio do séc. XX ficámos a saber que em ciência não há nunca certezas, há apenas *hipóteses*, aceites enquanto são *corroboradas* pela experiência, suplantadas por outras hipóteses mais adequadas quando falhar esse apoio. Há hoje um exército de físicos teóricos cujo trabalho é procurar modelos para a estrutura e o comportamento das partículas; esses modelos valem porventura tanto como os modelos de Eudócio e Hiparco, mas nem por isso se desprezam.

Ao longo da Idade Média os lentos progressos da observação (o erro vai passar de 30 para 10 minutos de arco) exige ajustamentos. O sistema dos epiciclos é no fundo uma combinação de movimentos circulares uniformes. Do mesmo modo que se ajusta um polinómio a uma curva acrescentando mais termos, ajustava-se este sistema à experiência acrescentando mais «esferas». No séc. XVI eram já cerca de 70. Com esta complicação, o modelo descrevia bastante bem a experiência; permitia nomeadamente fazer *previsões* sobre as coordenadas dos astros à escala das dezenas de anos. Mas há uma coisa que hoje cuidamos saber: quando um modelo só descreve os factos à custa de uma complicação formal muito grande, é sinal de que existe um modelo melhor. A lição da história é que os modelos sucessivos são cada vez mais adequados à experiência e cada vez mais simples do ponto de vista formal.

Copérnico (1473-1543) compreende que fixando o Sol em vez da Terra realiza um melhor ajustamento e uma simplificação do sistema (bastam-lhe 37 esferas); por outro lado, pode determinar as distâncias relativas dos planetas ao Sol e verificar que crescem com o período de revolução, o que lhe parece um bom sinal. Tem a lealdade de reconhecer que a ideia fundamental vinha já de Aristarco. Por outro lado, embora centrado no Sol, o seu sistema continua a ser de epiciclos.

O passo seguinte só pode ter acontecido depois de um progresso experimental muito notável. Tycho Brahe (1546-1601) planeia e constrói aparelhos que lhe permitem fazer observações astronómicas com erro inferior a

4 minutos de arco (em certos casos 1' ou mesmo 0,5'). É, por outro lado, um trabalhador incansável que reúne um conjunto impressionante de dados. Kepler (1571-1630), encarregado por Tycho Brahe de estudar o movimento de Marte, está já conquistado para o heliocentrismo. Abandona o pressuposto de que os movimentos dos astros deviam ser movimentos circulares uniformes ou combinações destes movimentos e procura simplesmente encontrar uma curva simples que se ajuste às observações. Apostando na ideia de que deve existir uma solução simples, experimenta a oval, que lhe parece a curva fechada mais simples a seguir à circunferência. Verifica que pode responder afirmativamente se admitir que, em alguns casos, Tycho Brahe ultrapassou o erro de 4'. Após longos meses de hesitação, resolve confiar na precisão do seu mestre, e considera que a oval é infirmada pela experiência. Tenta a elipse, e verifica que os dados a corroboram. Pela mesma época, Galileu (1564-1642) encontra a lei da queda dos graves fazendo experiências com o plano inclinado, verificando que a hipótese de que a velocidade é proporcional ao espaço percorrido não pode ser aceite, mas  $v=at$  é tolerado pela experiência.

Creio que a Física Experimental continua hoje a fazer — com possibilidades novas — o que fizeram Galileu e Kepler. Trata-se de isolar fenómenos, fazer medidas rigorosas e controlar o erro experimental, criar modelos, testar esses modelos fazendo novas medidas (se possível, dando às variáveis que intervêm no modelo valores muito diferentes). No séc. XVIII, Kant vai dizer que *conhecer é unificar o diverso da experiência*. Na verdade, o modelo unifica os dados conhecidos e permite prever novos dados. É claro que como o modelo integra um conjunto infinito de dados possíveis e a experiência nos dá apenas um conjunto *finito* de dados, *sujeitos* para mais à *indeterminação do erro*, é uma ilusão supor que a lei experimental exprime em absoluto a verdade. A velha problemática da indução só teria sentido se se tratasse de optar entre um conjunto finito e discreto de leis, e não é o caso. O físico sabe

que as leis experimentais são «verdadeiras» no sentido de que, ao menos dentro de certo intervalo de variação das variáveis, o modelo exprime de maneira simples uma relação que é pelo menos muito aproximadamente correcta.

Mas a unificação de que fala Kant admite em Física uma segunda volta, a da Física Teórica. O modelo de Newton (1642-1727) unifica as leis de Galileu e de Kepler, o modelo de Maxwell (1831-1879) unifica as leis então conhecidas da electricidade e do magnetismo. À primeira vista poderia supor-se que, estando mais distantes das medidas, os grandes modelos teóricos eram menos seguros que as leis experimentais que lhes servem de partida. Era este o julgamento de Mach e do *Círculo de Viena*. Mas a história testemunha o contrário. *Os grandes modelos teóricos suplantam as leis experimentais*. Se o sistema de Newton é correcto, as leis de Kepler são apenas aproximadas. E é isso que acontece. (Felizmente, os aparelhos só permitiram detectá-lo a partir do séc. XVIII. Se Tycho Brahe tivesse uma das nossas lunetas, Kepler teria rejeitado as elipses. E as elipses, como as restantes leis de Kepler, eram um passo quase necessário para pôr Newton a caminho). Se as equações de Maxwell são verdadeiras, as leis de Ampère são incompletas. E os exemplos são sem fim. Mais importante do que isto é o facto de que os bons modelos teóricos prevêm fenómenos até então completamente desconhecidos. Os exemplos mais célebres são o facto de que as equações de Maxwell implicam que os campos variáveis se propagam no vácuo de acordo com a equação das ondas e com a velocidade  $1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ , que é a velocidade da luz, e o facto de que a Relatividade Restrita convida a ligar a toda a massa  $m$  a energia  $E=mc^2$ . É portanto muito empobrecedor pensar, com Mach, que as leis teóricas são meras maneiras de condensar o conjunto das leis experimentais conhecidas.

Como é sabido, a Relatividade Restrita e a Relatividade Generalizada, a Mecânica Quântica, a Teoria Quântica dos Campos e as Teorias Unificadas vieram mostrar que nenhum modelo teórico é definitivo: mas, como atrás,

à medida que se progride os modelos são simultaneamente mais englobantes e formalmente mais simples.

Em suma, parece poder dizer-se que a aventura da Física consiste em descobrir, por um lado novos factos, por outro lado novas estruturas, mais gerais e mais simples. Nesta aventura há pistas, mas há sobretudo surpresas. quanto às estruturas: tudo se passa com se o Universo fosse ordenável por meio de estruturas matemáticas muito fundamentais; mas essas estruturas, que a Matemática re-cria e desenvolve com o rigor que lhe é próprio, estão já muito longe de tudo o que parecia «natural» ao pensamento dos séculos passados. Pense-se no cálculo tensorial e nos espaços de Hilbert.

Como se sabe, o progresso da Mecânica Clássica levou a introduzir conceitos cada vez mais elaborados e de interpretação intuitiva cada vez mais difícil: o momento angular, a energia cinética e potencial, o lagrangeano, o hamiltoneano,... Durante algum tempo foi possível pretender que estas entidades, embora praticamente indispensáveis, eram elimináveis do ponto de vista teórico. A Mecânica Quântica veio a torná-las essenciais, e a não permitir traduções simples. No Electromagnetismo houve um processo paralelo, a começar pelas noções do campo e continuando pela corrente de deslocamento. Disse alguém que a ciência parece ter entrado de maneira irreversível num novo «esoterismo», no sentido original de falar uma linguagem difícil e reservada a um grupo de iniciados. Com a vantagem de que o grupo é aberto e o rigor se controla.

Os enunciados teóricos que ligam entre si estes conceitos podem ser considerados como «leis». Tem-se notado que entre a *explicação* no sentido do senso comum e a *explicação científica* há uma evolução importante: as explicações do senso comum invocam «causas», concebidas muitas vezes à imagem da intervenção que nos é própria. Sem ter eliminado por completo esta ideia, as *explicações* da Física resumem-se cada vez mais ao enunciado de *leis*.

As leis fundamentais da Mecânica Clássica admitem corolários de *conservação*. Além do

seu conteúdo intuitivo importante, as leis de conservação prestam-se a ser tomadas como princípios ou axiomas. O seu papel heurístico é importante. Como se sabe, a ideia do neutrino surgiu no contexto da conservação da energia. Ainda na Mecânica Clássica foi possível mostrar que existe uma correspondência profunda entre *conservações* e *simetrias*. O papel das simetrias tornou-se muito maior na Mecânica Quântica e é hoje um dos fios condutores na Física das Partículas. Outra conquista clássica (com raízes no séc. XVII, para não descer até Herão de Alexandria, no séc. II) são os *métodos variacionais*, sucessivamente alargados às várias Teorias da Física. A propósito da Relatividade, tomou-se consciência da importância que tem em Física a *invariância*, ou melhor, a *covariância* das leis.

## 2. ... ao ensino da Ciência

Apesar de limitado, o bosquejo histórico que fiz pode fundamentar atitudes e propostas. Como ensinar ciência, em particular como ensinar Física no Liceu?

Em primeiro lugar, creio que é importante não apresentar a ciência nem como algo de definitivo, nem como algo de instável. A ciência é já muito válida, mas continua a fazer-se. É uma aventura em que os nossos alunos, se quiserem, poderão vir a colaborar. Estamos longe de conhecer todos os factos importantes, há estruturas que nos escapam, pode mesmo acontecer que os quadros mais fundamentais venham a sofrer revisão. Mas é extremamente improvável que alguém possa hoje contribuir significativamente para o avanço da ciência se não conhecer a sua formulação actual. Por outro lado, é preciso ensinar o que hoje se sabe sem matar a criatividade, antes aguçando o sentido crítico. A respeito, por exemplo, da inércia ou da estrutura atómica da matéria, um professor instruído na história das ideias pode fazer sentir aos seus alunos a importância do que está em jogo, as alternativas possíveis, as dificuldades psicológicas, as razões que

levaram à escolha final, até que ponto a questão ficou ou não encerrada.

É sem dúvida fundamental inculcar desde o princípio que toda a ciência, e nomeadamente a Física, começa com a experiência e visa explicar o Universo que, directa ou indirectamente, se experimenta. Mais ainda, que a experiência que está na base da Física tem como aspecto essencial a medida. Entendamo-nos: certamente que é preciso entender qualitativamente os fenómenos e procurar, sempre que possível, entender o *sentido físico* dos conceitos de maneira intuitiva. Mas julgo que é um erro pedagógico reduzir o ensino dos primeiros anos a uma física qualitativa. Precisamente, desde Galileu que a Física é uma ciência que articula medidas. Se se falar do quente e do frio, fale-se logo do termómetro.

Convém aqui distinguir entre *demonstrações* e *determinações experimentais*. Não vou fazer o rol das demonstrações e das determinações importantes, pois há larga bibliografia sobre o assunto. Limito-me a chamar a atenção para certos aspectos. Na demonstração, prevalece o aspecto qualitativo. É algo que deve «entrar pelos olhos» e interpelar os hábitos adquiridos. Será realizada, normalmente, pelo professor. Penso na ilustração da inércia com um carrinho numa calha de ar, na prova da rotação da Terra pelo pêndulo de Foucault, nas experiências de electrostática (que só resultam com tempo seco!), na identificação das riscas de vários elementos num espectro de emissão. Algumas destas demonstrações devem poder ser feitas em todas as escolas. Outras, como a do pêndulo de Foucault ou a ds espectros, seriam ocasião para uma visita de estudo a um Centro Universitário vizinho. (Mais uma razão para que os Centros Universitários tenham condições para o fazer!).

As *determinações experimentais* têm uma dupla finalidade: pôr os alunos em contacto com os aparelhos e fazer-lhes sentir a questão importantíssima do erro experimental. É essencial não permitir que tais determinações sejam feitas sem um mínimo de exigência: isso signi-

fica vacinar os alunos contra a física experimental. Mais vale desistir de certos trabalhos do que realizá-los em más condições. É importante estar em condições de mudar certos parâmetros de modo a impedir que os relatórios sejam cópias dos do ano anterior. Como se sabe, mais do que nenhuma outra, uma aula de laboratório exige uma presença constante e desperta do professor. Embora se possa defender que a qualidade dos aparelhos não interessa, o que interessa é pôr os alunos em condições de tirar de cada aparelho aquilo que ele pode dar, é claro que uma muito má qualidade dos aparelhos desmotiva os alunos. O professor tem de saber qual é o erro tolerável no resultado, qual a dispersão aceitável nas determinações, e só reconhecer como válido um trabalho que satisfaça esses critérios. É importantíssimo que, em aulas seguintes, se discutam os resultados e se pergunte como poderiam melhorar-se as medidas.

Mas a Física não é só experiência, é também teoria. A teoria é uma estrutura matemática muito vasta que liga conceitos fundamentais. Galileu pôde ter a ilusão de que bastavam à ciência os conceitos da vida corrente, apenas refundidos. Como já notei, o caminho das várias ciências, mas sobretudo o da Física, levou-as a elaborar conceitos que cada vez se afastam mais dos conceitos da vida diária. Apesar disso, na base continuam a existir conceitos fundamentais, como o comprimento, a massa, a força, o tempo, a temperatura, a carga eléctrica, que têm (ou parecem ter) uma explanação intuitiva.

Há que gastar aulas a precisar estas noções. E há que construir sobre elas, com o rigor possível, os conceitos de velocidade, aceleração; quantidade de movimento, momento angular, etc. A meu ver, convém explicar aos alunos dos últimos anos que conceitos como a quantidade de movimento ou a energia cinética não têm uma «justificação» intuitiva (basta ver que a Relatividade alterou as definições): a sua justificação é a fecundidade das leis em que intervêm.

Há que ensinar as leis fundamentais e há que pôr os alunos em condições de as aplicar à resolução de problemas. A questão das unidades é fundamental. E, em ciência, é muito importante que «as contas» estejam certas. A meu ver, deve ser permitido o recurso a máquinas de calcular, sem qualquer restrição. Mas é preciso que os alunos se habituem a estimar a ordem de grandeza do resultado, e a perceber assim quando é que um cálculo fornece um resultado inaceitável.

Foi com grande espanto que, há poucos anos, em vez de se dizer que a queda dos graves obedece à lei  $e = 1/2 gt^2$ , se explicava que  $e_1/e_2 = t_1^2/t_2^2$ . Acho um erro tremendo. Nada é tão transparente como uma expressão matemática. Há que não ter medo de ensinar que as leis da Física se exprimem por equações.

É importante insistir nos princípios de conservação. Em conversas e conferências, porventura de âmbito interdisciplinar, é útil levantar questões relativas à epistemologia da Física. Conversas e conferências deste tipo são a boa oportunidade para rasgar horizontes na direcção da Relatividade, da Mecânica Quântica, da Física das Partículas, das Teorias Cosmológicas, da Cinética Química, da Biologia Molecular, etc.

Respondendo a uma questão que me foi posta, digo que não contrário o «ensino integrado» no Ciclo Preparatório», mas acho necessário que a Física seja uma disciplina autónoma no Ensino Liceal.

### European Journal of Physics

O EP é uma revista editada pela Sociedade Europeia de Física destinada ao tratamento científico e original de questões não especializadas de Física e do seu ensino. Publica 4 números por ano num total de cerca de 320 páginas.

(Ver artigo na página 79)