

Projecto Faraday

Textos de Apoio

Reino de Newton

12^o Ano de Escolaridade



casa das ciências

Porto, Outubro de 2009

Ficha Técnica

Projecto de intervenção no ensino da Física no secundário.

Financiamento

Fundação Calouste Gulbenkian.

Execução

Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Escolas Participantes

- ES Filipa de Vilhena
- ES Fontes Pereira de Melo
- ES Garcia de Orta
- ES da Maia
- ES de Santa Maria da Feira

Coordenação

- J. M. B. Lopes dos Santos
- Manuel Joaquim Marques

Portal

URL: <http://www.fc.up.pt/faraday>

Texto do 12^o Ano

Redactor Principal

J. M. B. Lopes dos Santos

Colaboração e revisão

- Elisa Arieiro
- Carlos M. Carvalho
- Manuel Joaquim Marques
- Maria de Fátima Mota

Capítulo 1

O Reino de Newton

1.1 As revoluções da Física do Século XX

O Mundo adora heróis. Mas adora ainda mais vê-los cair em desgraça. Por isso os anúncios periódicos de que Einstein estaria errado¹ recebem honras de *prime time* nos noticiários com muito mais facilidade de que uma nova experiência que confirme as suas teorias.

Não admira que, para muitos, Newton passe por um rei destronado pelos avanços da Física do século XX. De facto, como iremos estudar este ano, as descobertas das Teorias da Relatividade Restrita e Relatividade Geral (Teoria da Gravitação) de Einstein, abalaram profundamente os alicerces da visão Newtoniana do mundo. Como se isso não bastasse, a revolução quântica iniciada por Planck no último ano do século de XIX, continuada por Einstein e levada a cabo por Heisenberg, Schrödinger, Bohr, Dirac, etc, pôs em causa o universo newtoniano de um modo ainda mais radical do que a Relatividade.

Neste ano, um pouco mais para a frente, teremos oportunidade de iniciar o estudo destas duas revoluções da Física do século XX. Contudo, antes disso, iremos alargar consideravelmente a nossa exploração da Física Newtoniana.

A questão que nos ocupa neste capítulo é:

por que é que todo o estudo sério de Física começa pela teoria Newtoniana? Os médicos não começam por estudar as obras de Galeno; nem os engenheiros

¹Estes anúncios têm-se revelado muito prematuros e temerários!

mecânicos estudam carroças! Será que os físicos têm uma predileção especial pela história?

A resposta curta, como iremos ver, é:

desde o início da Física como ciência moderna no século XVII, **nenhuma** das suas teorias fundamentais se tornou obsoleta. O progresso em Ciência tem características diferentes do de muitas outras actividades humanas.

1.2 Relatividade e a velocidade da luz

▷ A importância da velocidade da luz no vácuo está reflectida até no sistema de unidades, SI. O seu valor é definido: a unidade de comprimento é definida a partir do valor de c .

Na Física Newtoniana a escala de velocidades é democrática. Não há nenhum valor especial de velocidade. Em Relatividade a velocidade da luz no vácuo,

$$c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1},$$

é especial.

Em primeiro lugar, porque é a máxima velocidade possível para qualquer corpo.

Em segundo lugar, porque é uma constante universal: tem o mesmo valor para qualquer observador, independentemente do seu estado de movimento.

Este simples facto implicou uma profunda e inesperada revisão dos conceitos de espaço e de tempo e abalou profundamente alguns pressupostos da Física Newtoniana. Mas a Relatividade não alterou o facto de a Física Newtoniana prever e explicar uma enorme gama de fenómenos. Por isso, forçosamente, para essa gama de fenómenos, teria que dar as mesmas respostas e previsões. De outro modo estaria em desacordo com a experiência.

O que acontece então é que a mecânica relativista de Einstein **inclui** a Física Newtoniana, como caso limite, quando as velocidades dos corpos são muito mais pequenas que a da luz. Esquemáticamente,

Se $v \ll c$, Relatividade Restrita \rightarrow Física Newtoniana.

A gama de fenómenos que cabem no quadro de explicação racional da Relatividade é muito mais vasta que para o caso da teoria de Newton. Para isso, foram necessárias modificações profundas dos

conceitos de espaço e de tempo. Mas o mundo onde Newton reina permanece: o mundo de velocidades muito inferiores à da luz.

Algo semelhante aconteceu com a revolução quântica do século XX. As modificações foram ainda mais radicais. O próprio conceito de grandeza, ou mesmo de objecto ou de propriedade física, foi alterado. Partículas podem estar em muitos sítios ao mesmo tempo, os fenómenos são ditados pelo acaso, as ondas são partículas e as partículas são ondas, etc, etc. Sem estas “complicações” não teria sido possível compreender fenómenos às escalas atómica e sub-atómica: o espectro dos átomos, a ligação química, a energia nuclear, as propriedades dos sólidos, a electrónica, a radioactividade, as partículas sub-atómicas, a interacção radiação-matéria, ...

Neste contexto sobrevive ainda um reino newtoniano? Certamente que sim. Todavia, o critério que nos permite saber se um dado fenómeno é bem descrito por leis pré-quânticas é um pouco mais complexo que no caso da relatividade.

1.3 Quântico ou clássico?

Na Física quântica surge, tal como em Relatividade, uma nova constante universal, a constante de Planck

$$h = (6,6260688 \pm 0,0000005) \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}.$$

Mas que grandeza é esta, com estas unidades esquisitas?

Os físicos chamam-lhe **Acção**, por razões que demoraria muito a explicar. Não é uma grandeza que já tenhamos encontrado. Mas, mesmo sem saber o que é, podemos notar que as suas unidades são as que se obtêm multiplicando três grandezas que usamos para caracterizar fenómenos mecânicos: massa, M (kg), comprimento, L (m), e velocidade, V (m s⁻¹). Isto é, um produto

$$M \times L \times V$$

tem exactamente as unidades de uma acção, ou seja de h .

Podemos agora formular a receita que nos permite saber se os efeitos quânticos de um dado fenómeno são importantes, ou, pelo contrário, podem ser ignorados. Infelizmente, neste momento, não é possível explicar por que razão funciona. Isso exigiria um conhecimento mais detalhado da física quântica.

A receita é, então, a seguinte.

- Para um determinado fenómeno encontramos valores típicos de massa, M , de distância, L , e de velocidade, V ;
- fazemos o produto destas três grandezas e comparamos com a constante de Planck, $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$. Se $MLV \gg h$, os efeitos quânticos não são importantes e podem ser ignorados. Se $MLV \sim h$ ou $MLV < h$ os efeitos quânticos são fundamentais.

Alguns exemplos tornam isto mais claro.

1.3.1 Futebol é clássico

Vejamos o exemplo da trajectória de uma bola de futebol.

A respectiva massa é $m \approx 430 \text{ g}$. Não precisamos, certamente, de definir a posição da bola à escala atómica, do angstrom; a própria superfície da bola tem irregularidades com dimensões muito superiores a 1 \AA . Os árbitros não conseguem dizer se a bola está 1 \AA para lá ou para cá da linha de golo (às vezes nem um metro). Digamos que em situações de movimento de bolas de futebol raramente teremos que considerar distâncias inferiores a um milímetro, ou seja, $L \sim 10^{-3} \text{ m}$.

A bola pode atingir velocidades perto dos $100 \text{ km h}^{-1} \approx 30 \text{ m s}^{-1}$. Dificilmente teremos que considerar velocidades inferiores a $1 \text{ mm s}^{-1} = 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. Punhamos então $V \sim 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. Se a velocidade típica for maior, o produto MLV será ainda maior. Temos então as seguintes escalas de massa, distância e velocidade:

- $M \sim 4 \times 10^{-1} \text{ kg}$;
- $L \sim 10^{-3} \text{ m}$;
- $V \sim 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$;

A **acção** característica deste fenómeno é o produto

$$M \times L \times V \sim 4 \times 10^{-7} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1} \gg h$$

O movimento de uma bola de futebol é clássico (embora às vezes o desacordo entre adeptos leve a parecer que a incerteza quântica desempenha um papel no futebol).

A escolha das escalas de comprimento ou velocidade pode ter parecido um pouco arbitrária. Mas repare-se que um factor de dez para cima ou para baixo não teria qualquer consequência na nossa conclusão.

1.3.2 O átomo de hidrogénio é quântico

O segundo exemplo é o do movimento do electrão no átomo de hidrogénio. A massa do electrão é

$$m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg.}$$

O tamanho do átomo, região onde se move o electrão, é da ordem do angstrom:

$$L \sim 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m.}$$

Qual é velocidade do electrão dentro do átomo?

Sabemos que é necessária uma energia de $13,6 \text{ eV} = 2,18 \times 10^{-18} \text{ J}$ para tirar um electrão ao átomo. A energia do electrão no átomo é potencial e cinética. Imaginando que não são muito diferentes uma da outra (isto é, que uma não é um milhão de vezes inferior à outra), podemos **estimar**

$$\frac{1}{2} m_e v^2 \sim 2 \times 10^{-18} \text{ J}$$

e, usando o valor de $m_e \sim 10^{-30} \text{ kg}$,

$$v \sim \sqrt{\frac{4 \times 10^{-18}}{10^{-30}}} \sim 2 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}.$$

Sendo assim, a acção típica é

$$m_e \times L \times v \sim 10^{-30} \times 10^{-10} \times 2 \times 10^6 \sim 2 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1} \sim \frac{h}{3}$$

O movimento do electrão no átomo é, seguramente, quântico.

1.4 A vizinhança é Newtoniana

Um ser humano tem uma massa de algumas dezenas de quilogramas, mede entre um a dois metros e move-se a cerca de metro por segundo. Não é um acidente que a nossa massa, dimensões e velocidades sejam grandezas da ordem da unidade, **no nosso sistema de unidades!** Foi por isso que escolhemos este sistema. É o mais conveniente para nós.

É importante notar que, neste contexto, quando dizemos que uma grandeza é da ordem da unidade não queremos dizer que seja 1,01 ou 0,98: estamos a referir-nos à **ordem de grandeza**. Escrevendo os valores das grandezas em notação científica, com um algarismo

	$v/\text{km h}^{-1}$	$v/\text{m s}^{-1}$
Andar	6	1,7
Correr	36	10
Fórmula 1	350	97
Avião Comercial	900	250
Som (ar)	1224	340
<i>Voyager</i> I	$6,0 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$
Luz (vazio)	$1,1 \times 10^9$	$3,0 \times 10^8$

Tabela 1.1: Algumas velocidades típicas.

significativo à esquerda da vírgula decimal, o expoente de base dez é a medida da ordem de grandeza. Quando dizemos que uma massa, ou uma distância ou velocidade, tem um valor da ordem da unidade quando expresso no SI, estamos a afirmar que o respectivo expoente é pequeno, 0, ± 1 , $\pm 2 \dots$, e não ± 20 , $\pm 30 \dots$.

Assim sendo, quando estimamos um produto $M \times L \times V$ com valores típicos de fenómenos à nossa escala, obtemos valores em geral muito superiores à constante de Planck que, no nosso sistema de unidades habitual, tem um valor pequeníssimo, quase zero:

$$h = 0,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,6\text{ kg m}^2\text{ s}^{-1}.$$

Isto é, os fenómenos à nossa escala não são quânticos.

O mesmo se passa em relação à velocidade da luz, como mostra a tabela 1.1. O mais rápido dos veículos humanos, a *Voyager* I, tem uma velocidade inferior a um décimo milésimo da velocidade da luz.

Em resumo, a nossa vizinhança é Newtoniana. Podemos imaginar um espaço com três eixos, L , M e V , em que um determinado fenómeno é representado por coordenadas que são as respectivas escalas de comprimento, massa e velocidade. Como mostra a figura 1.1, a validade da física Newtoniana não é universal. A superfície curva limita uma região à volta da origem e dos eixos em que os efeitos quânticos não podem ser desprezados. O plano perpendicular ao eixo de velocidades, indica que, para velocidades elevadas, temos correcções relativistas. Mas o valor elevado de c e o valor muito pequeno de h , quando expressos nas nossas unidades, significam que o reino de Newton é ainda vastíssimo e merece a nossa completa atenção. A Física Newtoniana não está obsoleta, e, provavelmente, nunca estará.

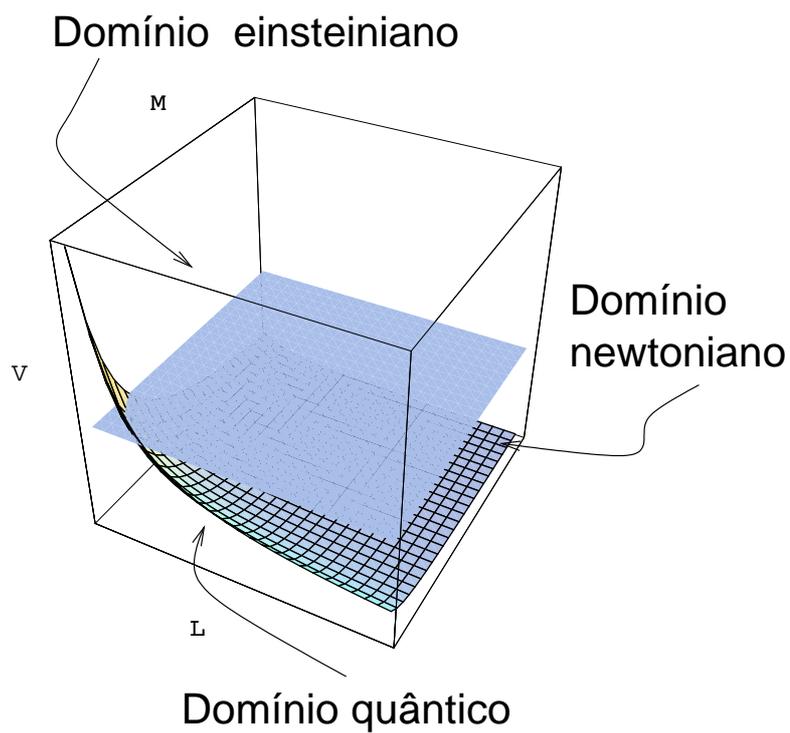


Figura 1.1: Se caracterizarmos os fenômenos em termos de valores típicos de massa, M , de distância, L , e de velocidade, V a Física Newtoniana só funciona na região limitada pela superfície curva ($MLV \gg h$) e pelo plano horizontal ($V \ll c$).

1.5 Actividades, questões e problemas

1.5.1 Questões

- 1.1. Na última frase deste capítulo afirma-se que a Física Newtoniana, provavelmente, nunca será obsoleta. Concordas? Escreve um pequeno ensaio a defender a tua posição.

1.5.2 Problemas

- 1.1. Estimar a acção característica da órbita da Terra e verificar se é necessário considerar correcções quânticas.
- 1.2. No tubo de um monitor CRT os electrões embatem no écran com energias cinéticas da ordem do 20 keV . A sua posição tem que estar definida à escala de distâncias de um pixel. Um monitor de $17''$ (de diagonal) pode ter um número de pixéis da ordem dos 1024×768 . ($1'' = 2,54 \text{ cm}$; os pixéis são elementos de imagem quadrados, em geral).
- (a) Usando estes dados, verificar se o movimento do electrão é relativista.
- (b) Estimar a acção típica de um electrão num monitor CRT e verificar se o respectivo movimento pode ser descrito classicamente, sem correcções quânticas.
- 1.3. A velocidade típica de movimento de uma molécula de água pode ser estimada a partir da temperatura, T , em kelvin, usando a seguinte relação:

$$E_c \sim \frac{3}{2} k_B T$$

em que E_c é a energia cinética da molécula e k_B a constante de Boltzmann. Uma escala de distâncias, L , pode ser obtida a partir do volume por molécula,

$$V_{\text{mol}} \sim L^3,$$

o qual pode ser calculado a partir da massa volúmica da água e da massa de uma molécula.

- (a) Será que o movimento das moléculas de água, à temperatura ambiente tem efeitos quânticos apreciáveis?

1.4. Mostrar que o critério para que o movimento de uma partícula de massa m seja não relativista, é equivalente a afirmar que a sua energia cinética tem que ser muito menor que a sua energia relativista em repouso, $E = mc^2$.

- (a) Um feixe de partículas α com energia cinética de 5 MeV é relativista?
- (b) E um feixe de electrões com a mesma energia cinética?

Conteúdo

Ficha Técnica	2
1 O Reino de Newton	5
1.1 As revoluções da Física do Século XX	5
1.2 Relatividade e a velocidade da luz	6
1.3 Quântico ou clássico?	7
1.3.1 Futebol é clássico	8
1.3.2 O átomo de hidrogénio é quântico	9
1.4 A vizinhança é Newtoniana	9
1.5 Actividades, questões e problemas	12
1.5.1 Questões	12
1.5.2 Problemas	12