

## A EXPANSÃO COSMOLÓGICA E O EFEITO DOPPLER

A física do efeito Doppler baseia-se na velocidade relativa entre uma fonte e um observador. Tal ocorreria num contexto Newtoniano, onde espaço e tempo seriam absolutos e imutáveis, povoados por uma grelha de réguas identicamente calibradas e relógios absolutamente sincronizados. O movimento das galáxias nesse espaço absoluto, afastando-se do observador, desviaria então, por efeito Doppler, os comprimentos de onda para o vermelho, e estes manter-se-iam constantes durante o percurso até serem medidos por nós. A ideia é simples, intuitiva, e fácil de explicar. É também, fisicamente, obviamente errada. Não é assim que o Universo funciona, e esta suposta grelha de coordenadas, que se desenha nos exercícios de cinemática, não existe.<sup>1</sup>

Na expansão cosmológica, não há velocidades relativas: as galáxias estão em repouso quando emitem os fotões. A expansão do universo é uma expansão do próprio espaço (ou, mais rigorosamente, da componente espacial espaço-tempo), que estica todas as distâncias co-móveis com a mesma, e em particular desvia gradualmente os comprimentos de onda para o vermelho, até chegarem até nós. Para cada galáxia, o desvio para o vermelho medido é em geral diferente do que resultaria do efeito Doppler.

Uma possível razão para a confusão de conceitos é que para distâncias e desvios para o vermelho baixos, a fórmula matemática que descreve esta expansão cosmológica coincide com a fórmula do efeito Doppler, mas tal não significa nada. A matemática não é física: a matemática é uma ciência, mas não é uma ciência natural, e o facto de uma mesma fórmula matemática ser aplicável em dois contextos físicos diferentes não implica de forma alguma que a sua interpretação física nos dois casos seja a mesma.<sup>2</sup> É por isso que é impossível aprender física tentando memorizar fórmulas matemáticas.

A relação entre a Relatividade Geral e a física Newtoniana é ela própria um exemplo desta diferença conceptual. Há uma relação matemática entre as duas, no sentido em que tomando um limite específico da Relatividade Geral (pequena curvatura, velocidade baixa, etc.) podem recuperar-se as equações da física Newtoniana. No entanto, as interpretações físicas das duas teorias são não apenas diferentes, mas mutuamente incompatíveis, e novamente a interpretação Newtoniana é demonstravelmente (experimentalmente) errada.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Mais ainda, é demonstravelmente errada, e bons alunos do ensino secundário conseguem demonstrar experimentalmente que é errada. A forma mais simples de o fazerem é construindo uma câmara de Wilson e medindo a variação do fluxo de muões com a altitude.

<sup>2</sup> Este é um bom exemplo de uma oportunidade perdida pelo sistema de ensino: na minha avaliação e experiência pessoal, alunos do 11<sup>o</sup> ano conseguem perceber estas diferenças, se lhes forem adequadamente explicadas.

<sup>3</sup> Neste caso é consideravelmente mais difícil a alunos do ensino secundário fazê-lo, mas ainda assim não é impossível. Uma oportunidade ideal serão os eclipses totais do Sol visíveis em Portugal e Espanha em 2026 e 2027.

