

O princípio da equivalência (PE) é uma das pedras basais da teoria da relatividade geral (TRG). Ele postula, muito simplesmente, a identidade da massa inerte (a que aparece na 2.<sup>a</sup> lei de Newton,  $F=ma$ ) com a massa gravítica (a que aparece na lei de atracção gravitacional,  $F= GmM/r^2$ ). É por esta razão que corpos de massa diferente caem com a mesma aceleração, como têm mostrado experiências sucessivamente realizadas desde o tempo de Galileu. Se recordarmos que a TRG está na base da moderna cosmologia, facilmente percebemos a importância que teria a descoberta de uma violação do PE. Contudo, a igualdade já foi testada com uma precisão de 1 parte em  $10^{12}$ .

A invariância CPT (Charge-Parity-Time) apareceu com a equação de Dirac, e faz hoje parte integrante das teorias quânticas de campo, base dos modelos de comportamento das partículas elementares. Ela já foi testada inúmeras vezes, tendo passado um dos mais exigentes exames quando se verificou (com a precisão de 5 partes em  $10^{18}$ ) a igualdade das massas (inertes) dos bósons  $K_0$  (= ds) e  $\bar{K}_0$ . A invariância CPT é o produto de 3 operações de simetria — a conjugação de carga (C), que a cada sistema físico associa outro com as cargas (eléctricas) das partículas trocadas (e correspondentes alterações nos números de bariões e de leptões); a paridade (P), que consiste em inverter (relativamente a uma origem arbitrária) os vectores de posição de cada partícula do sistema; e, finalmente, a inversão do tempo (T), que troca o passado com o futuro pondo o «filme a andar para trás», isto é, inverte as velocidades das partículas do sistema. Cada uma destas operações, considerada isoladamente, não é, necessariamente, uma operação de simetria dos sistemas físicos — por exemplo, a violação da paridade foi uma notável previsão de Lee e Yang, confirmada por T. Wu, ao observar a assimetria na distribuição do spin dos electrões emitidos na desintegração do cobalto na presença de um campo magnético. Também, a inversão do tempo não é (infelizmente?) uma operação de simetria real, como, obviamente, se constata na irreversibilidade do comportamento macroscópico («o futuro é para onde cresce a entropia») e, a nível microscópico, na desintegração do  $K_0$ .

Mas serão simultaneamente compatíveis as duas simetrias PE e CPT? A obsecação cósmica sugere que o universo é feito de matéria e não de antimatéria — por que razão foi quebrada a simetria CPT à escala onde reina o PE? Será que a antimatéria satisfaz ao PE — por exemplo, sabendo que o protão satisfaz o PE, serão idênticas as massas inerte e gravitacional do antiprotão? E se fizéssemos antihidrogénio (H) — ligando um

antiprotão (p) com um positrão (e) — quem nos garante que a constante de Rydberg (conhecida com uma precisão de 1 parte em  $10^{11}$ ) seja a mesma? Se, por exemplo, só o positrão violar o PE, então a sua massa gravítica e, portanto a massa do antihidrogénio variará com a posição da Terra em relação ao Sol, devendo observar-se, uma flutuação sazonal da frequência da linha emitida na transição (dupla)  $1S \rightarrow 2S$ , fenómeno que não se verifica no hidrogénio.

Se tivéssemos antihidrogénio muitas outras experiências poderiam ser feitas gerando resposta conclusivas sobre a universalidade ou compatibilidade de princípios fundamentais. Mas fazê-lo não é fácil — é preciso criar protões e em grandes quantidades, arrefecê-los das energias dos MeV para eV, ou inferiores, fazê-los reagir com eficiência, de modo a criar átomos em estados não muito excitados e sempre com o cuidado de não deixar que estas antipartículas toquem nas paredes do recipiente, para evitar a aniquilação instantânea. Só depois poderemos fazer espectroscopia de alta precisão e verificar se as massas (e outras propriedades) das antipartículas podem ser obtidas das massas das correspondentes partículas por CPT e se, para uma e outra família, as massas inertes e gravitacionais são iguais, como requer o PE.

Mas se não é fácil produzir hidrogénio, tal não parece impossível. As técnicas necessárias atingem extremos muito elevados, colocando desafios inimagináveis aos investigadores, como nos dá conta o excelente artigo, em apreço que nos relata também vários dos problemas técnicos a resolver e apresenta algumas das experiências previstas. Do que ninguém parece duvidar, porém, é que desta procura, tão ideal quanto desinteressada, de testes para os grandes princípios da Física sairá fortalecida a ciência, mais poderosa a técnica e mais ricos os países envolvidos.

*Physics World*, p. 44, Julho 1993

E. L.

---

### Números aleatórios... Que não o são

---

Já alguém, por anedota, disse que um livro com uma listagem de números aleatórios apresenta uma propriedade importante: não necessita de errata, porque está sempre certo! Basta, para isso, que qualquer erro tipográfico tenha sido feito ao acaso...

Existem livros desses. No entanto, são inúteis hoje em dia, com o advento de máquinas de calcular e computadores rápidos, baratos e que fornecem milhões de números aleatórios. Estes números são necessários nos

cálculos de Monte Carlo, algoritmos que resolvem certos problemas por meio da manipulação repetida de números ao acaso. A simplicidade e o poder de tais métodos é bem ilustrada pelo problema da determinação da área de um lago situado no interior de uma quinta com um grande muro à volta: basta tirar pedras ao acaso para dentro da quinta, contar o número de pedras que caem na água (fazem «splash»!) e dividir o número obtido pelo número total de pedras arremessadas. Tem-se assim rapidamente a fracção total da quinta que está ocupada pelo lago. Quanto mais pedras forem lançadas melhor será, em princípio, a determinação da área. O factor decisivo é que as pedras sejam lançadas ao acaso e não apenas só para um canto.

Os geradores de números aleatórios utilizados nos computadores são em geral obtidos por algoritmo chamados «geradores congruenciais lineares»

$$x_{n+1} = ax_n + b \pmod{m},$$

com  $a$ ,  $b$  e  $m$  constantes convenientemente escolhidas. De facto, os números assim obtidos não são totalmente aleatórios, pois a sua sequência é afinal determinista (obtida por uma regra bem definida) e mostra um período, ainda que grande. Quanto maior o período, tanto melhor. É preferível chamar-lhes números pseudo-aleatórios. Na década de 60, foi mesmo descoberto que, se se representarem os pares  $(x(n), x(n+1))$  num plano, aparece um padrão de linhas verticais. Existe uma certa ordem escondida, e foram propostos algoritmos modificados que evitavam o referido defeito.

Em artigo recente, o norte-americano Alan Ferrenberg e colaboradores (Physical Review Letters 69 (1992) 3382), num tratamento de Monte Carlo de uma rede magnética cujas propriedades termodinâmicas são conhecidas exactamente, verificou-se que os algoritmos supostamente melhores forneciam uma resposta errada, ao passo que os antigos algoritmos «congruenciais» davam a resposta correcta. Embora não se saiba bem porque é que os melhores números pseudo-aleatórios não são afinal melhores, a conclusão só pode ser que todos os cuidados são poucos com a aleatoriedade dos números usados repetidamente em métodos de Monte Carlo.

A «Bíblia» dos métodos numéricos utilizada pelos físicos modernos intitula-se «Numerical Recipes», sendo seus autores Press, Teukolsky, Vetterling e Flannery. Saiu há pouco a segunda edição (Cambridge University Press, 1992), que é cerca de 50% maior do que a anterior e que incorpora o conteúdo de toda uma série de artigos publicados na coluna «Numerical Recipes» da revista «Computers in Physics» da Sociedade Americana da

Física. O capítulo sobre números aleatórios foi bastante melhorado (os autores declaram mesmo no número da «Computers in Physics» de Sep. / Oct. de 1992, p. 522, que se envergonham do escrito anterior sobre esse tópico). Com a descoberta de Farrenberg, qualquer dia têm de fazer uma terceira edição!

*Europhysics News*

C. F.

### Medidas precisas do tempo

Qualquer relógio baseia-se, evidentemente na regularidade de um qualquer fenómeno periódico. Mas um bom relógio tem que satisfazer três importantes critérios relativos à frequência utilizada:

- *Estabilidade* — A frequência deve permanecer constante ao longo de um dado intervalo de tempo;
- *Reproductibilidade* — Relógios identicamente constituídos devem reproduzir os mesmos resultados;
- *Precisão* — Um segundo (por exemplo) do relógio deve reproduzir um segundo padrão.

A precisão pode ser medida por um factor de qualidade  $Q$  tal como habitualmente se faz para circuitos eléctricos ressonantes: a ressonância apresenta uma frequência característica ( $\nu$ ) e uma largura ( $\Delta\nu$ ) ou erro, determinando a «agudeza» da curva de ressonância. Nestas condições,  $Q = \nu/\Delta\nu$  e, em geral, este factor cresce (não linearmente) com a frequência.

A história dos métodos de medição do tempo nos últimos 500 anos espelha as crescentes necessidades da tecnologia em relógios cada vez mais exigentes relativamente às propriedades referidas. Que progresso, dos relógios de pêndulo (de Galileu e Huyghens) e de corda aos relógios de «quartzo» e «atómicos»! Por exemplo, o ubíquo «quartzo» baseia-se na frequência de vibração de um pequeno cristal de quartzo, cortado, muitas vezes, com a forma de um diapasão ( $\nu = 32768$  Hz) — o quartzo é piezoeléctrico (as vibrações mecânicas produzem campos eléctricos e vice-versa) de modo que um circuito eléctrico ressonante, para a mesma frequência, fica «escravizado» pelas vibrações do cristal, garantindo-lhe estabilidade (erro menor que 0,1 ms por dia) e precisão ( $Q = 10^5$ ).

Os melhores relógios são, porém, os «atómicos». O fenómeno periódico corresponde à transição entre dois níveis atómicos separados pela interacção entre os momentos magnéticos electrónico e nuclear). À transição está associada a emissão ou absorção de um fóton, com