



Física 12.º ano
Sexto teste — LASERs. Incerteza.
NIR. Física Quântica
(versão com respostas)

versão: 0,5

José Pedro do Amaral

14 de maio de 2026

Instruções. Cada pergunta tem cinco opções, identificadas por a), b), c), d) e e). Apenas uma é correcta. Assinala a tua escolha.

Aula 13 — LASERs e o princípio da incerteza dos pobres

Pergunta 1 — Significado do acrónimo LASER

A palavra *laser* é um acrónimo. O que significa?

- a) *Light Absorption by Stimulated Emission of Radiation.*
- b) *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.*
- c) *Linear Acceleration by Stimulated Energy of Radiation.*
- d) *Light Amplification by Spontaneous Emission of Radiation.*
- e) *Long-wavelength Amplification by Synchronous Emission of Radiation.*

Resposta:

Opção **b)**. LASER significa, literalmente, amplificação de luz por emissão estimulada de radiação. O nome resume o princípio físico em que assenta o dispositivo: amplificar luz recorrendo ao mecanismo de emissão estimulada, previsto teoricamente por Einstein em 1917.

Pergunta 2 — Níveis de energia atómicos

Em mecânica quântica, os electrões ligados a um átomo:

- a) podem ter qualquer valor de energia, em qualquer instante.

- b) têm sempre energia nula no estado fundamental.
- c) só podem ter valores discretos de energia.
- d) têm uma energia que aumenta linearmente com o tempo.
- e) têm energia independente do átomo a que pertencem.

Resposta:

Opção **c)**. Um dos resultados centrais da Física Quântica é a quantificação da energia: os electrões ligados a um átomo só podem ocupar um conjunto discreto (numerável) de níveis de energia, característico de cada átomo. Os valores intermédios estão proibidos — o espectro de riscas de cada elemento é a manifestação experimental directa deste facto.

Pergunta 3 — Energia do fotão emitido numa transição

Quando um electrão transita de um nível de energia E_i para um nível de energia E_f , com $E_i > E_f$, e essa transição é radiativa, o fotão emitido tem energia:

- a) $E = mc^2$.
- b) $E = \frac{1}{2}mv^2$.
- c) $E = E_i + E_f$.
- d) $E = E_i - E_f$.
- e) $E = h/\lambda$.

Resposta:

Opção **d)**. Por conservação de energia, a energia perdida pelo electrão é integralmente transportada pelo fotão emitido: $E_\gamma = E_i - E_f$. Repara que a alínea e) está dimensionalmente errada (faltava o c); a expressão correcta seria $E = hf = hc/\lambda$.

Pergunta 4 — Emissão espontânea

Numa emissão espontânea, o fotão emitido por um átomo isolado tem:

- a) direcção, fase e instante de emissão bem determinados.
- b) direcção e fase aleatórias e ocorre num instante imprevisível.
- c) obrigatoriamente a mesma direcção que outro fotão presente no meio.
- d) obrigatoriamente a mesma fase que outro fotão presente no meio.
- e) uma frequência que depende apenas da temperatura do átomo.

Resposta:

Opção **b)**. A emissão espontânea é um processo intrinsecamente probabilístico: o átomo excitado decai num instante imprevisível e o fóton emerge com direcção e fase aleatórias. É por esta razão que a luz de uma lâmpada vulgar é incoerente, em contraste com a luz de um laser.

Pergunta 5 — Emissão estimulada

Considera um átomo excitado que sofre emissão estimulada por um fóton incidente. O fóton emitido em relação ao fóton incidente tem:

- a) frequência diferente e fase aleatória.
- b) direcção oposta e mesma fase.
- c) mesma frequência, mesma direcção, mesma fase e mesma polarização.
- d) mesma frequência mas direcção e polarização aleatórias.
- e) energia dupla, por conservação do momento.

Resposta:

Opção **c)**. Na emissão estimulada o fóton emitido é uma *cópia* do fóton incidente: partilham frequência, direcção, fase e polarização. É esta clonagem coerente que permite, no meio activo de um laser, amplificar luz preservando a sua coerência.

Pergunta 6 — Coerência da luz laser

Comparada com a luz emitida por uma lâmpada incandescente comum, a luz produzida por um laser distingue-se sobretudo por:

- a) ter uma velocidade de propagação no vácuo superior.
- b) não obedecer ao princípio da sobreposição.
- c) ser monocromática, direccional e coerente.
- d) ser sempre invisível ao olho humano.
- e) não transportar energia.

Resposta:

Opção **c)**. A luz laser distingue-se da luz térmica por três propriedades simultâneas: monocromaticidade (frequência muito bem definida), direccionalidade (feixe colimado, com pouca divergência) e coerência (fase bem definida no espaço e no tempo). No vácuo, qualquer luz se propaga sempre à mesma velocidade c .

Pergunta 7 — Inversão de população

A chamada *inversão de população* num meio activo de um laser corresponde à situação em que:

- a) todos os átomos do meio se encontram no estado fundamental.
- b) existem mais átomos no nível de menor energia do que no nível superior relevante.
- c) existem mais átomos no nível superior do que no nível inferior relevante.
- d) os átomos perderam todos os seus electrões.
- e) o meio se encontra à temperatura do zero absoluto.

Resposta:

Opção **c)**. Em equilíbrio térmico há sempre mais átomos no nível inferior do que no superior (distribuição de Boltzmann). Para que a emissão estimulada predomine sobre a absorção é preciso inverter esta tendência, populando mais o nível superior do que o inferior — daí o nome «inversão de população».

Pergunta 8 — Bombeamento

O processo de bombeamento num laser tem como objectivo:

- a) arrefecer o meio activo abaixo da temperatura ambiente.
- b) fornecer energia ao meio activo para excitar os átomos.

- c) reflectir a luz dentro da cavidade óptica.
- d) filtrar comprimentos de onda indesejados à saída do feixe.
- e) desligar a emissão espontânea.

Resposta:

Opção **b)**. Bombear o meio activo significa fornecer-lhe energia — eléctrica, óptica, química — para excitar os átomos e estabelecer a inversão de população. Sem bombeamento não há ganho óptico no meio e, portanto, não há acção laser.

Pergunta 9 — Métodos de bombeamento

Qual das seguintes opções **não** corresponde a um método válido de bombeamento usado em lasers reais?

- a) Descarga eléctrica num gás.
- b) Iluminação com uma lâmpada de flash intensa.
- c) Reacção química exotérmica.
- d) Acção do campo gravítico terrestre sobre os átomos do meio.
- e) Corrente eléctrica injectada numa junção semicondutora.

Resposta:

Opção **d)**. À escala atómica, a gravidade é fraquíssima em comparação com as energias electrónicas e não pode produzir excitações apreciáveis. As outras quatro opções são, todas, métodos efectivamente utilizados: descarga eléctrica (laser de He-Ne), bombeamento óptico (laser de rubi), reacção química (laser de HF/DF) e injeção de corrente (laser de diodo).

Pergunta 10 — Cavityde óptica

A cavityde óptica de um laser é tipicamente formada por:

- a) dois espelhos totalmente reflectores.
- b) dois espelhos totalmente transparentes.
- c) um espelho totalmente reflector e outro parcialmente reflector, por onde sai parte do feixe.
- d) dois filtros de cor antiparalelos.
- e) uma única lente convergente.

Resposta:

Opção **c)**. Na cavityde de Fabry-Pérot há dois espelhos: um totalmente reflector, que devolve toda a luz ao meio activo, e outro parcialmente reflector (o «acoplador de saída»), por onde escapa a fracção de luz que constitui o feixe utilizável. Se ambos fossem totalmente reflectores, não haveria feixe à saída.

Pergunta 11 — Laser de diodo: origem da luz

Num laser de diodo, na zona da junção entre os semicondutores tipos p e n , a luz é gerada essencialmente por:

- a) absorção de fotões pela rede cristalina.

- b) recombinação radiativa entre electrões e lacunas.
- c) ionização sucessiva dos átomos do material.
- d) fusão nuclear localizada.
- e) condução térmica entre as duas regiões dopadas.

Resposta:

Opção **b)**. Na junção $p-n$ polarizada directamente, os electrões da banda de condução vindos do lado n encontram lacunas da banda de valência vindas do lado p . Em cada recombinação liberta-se uma energia próxima do hiato de banda do material, emitida sob a forma de um fotão.

Pergunta 12 — Semicondutores tipo n e tipo p

Num semicondutor de tipo n predominam, como portadores de carga móveis:

- a) lacunas (cargas positivas móveis).
- b) iões positivos da rede cristalina.
- c) electrões livres.
- d) protões livres.
- e) fotões de baixa energia.

Resposta:

Opção c). O « n » vem de *negativo*: o material foi dopado com átomos dadores de electrões (por exemplo, fósforo no silício), pelo que os portadores maioritários são electrões livres na banda de condução. No tipo p , dopado com aceitadores, predominam as lacunas.

Pergunta 13 — Óptica não-linear

A óptica não-linear estuda os fenómenos em que:

- a) a luz não se propaga em linha recta no vácuo.
- b) o índice de refração do meio é rigorosamente constante.
- c) as propriedades ópticas do meio dependem da intensidade da fonte luminosa.
- d) a velocidade da luz no vácuo varia com a frequência.
- e) a luz deixa de transportar momento.

Resposta:

Opção c). Em regime de baixa intensidade, a polarização eléctrica de um meio é proporcional ao campo eléctrico da onda — isto é a óptica linear. Com as intensidades enormes de um feixe laser focado, surgem termos de ordem superior nessa relação, abrindo caminho à geração de harmónicas, à mistura de ondas, ao efeito Kerr, etc.

Pergunta 14 — Geração de segunda harmónica (SHG)

Um laser de Nd:YVO_4 produz radiação infravermelha com comprimento de onda $\lambda = 1064$ nm. Esse feixe é depois enviado para um cristal não-linear de KTP, que realiza a geração de segunda harmónica. À saída do cristal, o comprimento de onda da radiação convertida é, aproximadamente:

- a) 2128 nm.
- b) 1064 nm (não é alterado).

- c) 808 nm.
- d) 532 nm.
- e) 266 nm.

Resposta:

Opção **d)**. Na geração de segunda harmónica, dois fótons de frequência f combinam-se num único fóton de frequência $2f$. Como $\lambda = c/f$, o novo comprimento de onda é metade do original: $1064/2 = 532$ nm (verde). É precisamente assim que se obtêm os habituais apontadores laser verdes a partir de díodos de bombeamento e cristais de $\text{Nd:YVO}_4 + \text{KTP}$.

Pergunta 15 — Número de fótons emitidos por um laser

Um pequeno laser semiconductor emite um feixe contínuo com comprimento de onda $\lambda = 650$ nm e potência óptica $P = 5,0$ mW. Considerando $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s e $c = 3,00 \times 10^8$ m/s, qual é, em ordem de grandeza, o número de fótons emitidos por segundo?

- a) Cerca de $1,6 \times 10^{13}$ fótons/s.
- b) Cerca de $1,6 \times 10^{16}$ fótons/s.
- c) Cerca de $3,1 \times 10^{19}$ fótons/s.
- d) Cerca de $5,0 \times 10^{-19}$ fótons/s.
- e) Cerca de $6,5 \times 10^{19}$ fótons/s.

Resposta:

Opção b). Energia de cada fóton:

$$E_{\gamma} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6,63 \times 10^{-34})(3,00 \times 10^8)}{650 \times 10^{-9}} \approx 3,06 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

Como a potência é energia por unidade de tempo, o número de fótons por segundo é

$$\frac{N}{t} = \frac{P}{E_{\gamma}} = \frac{5,0 \times 10^{-3}}{3,06 \times 10^{-19}} \approx 1,6 \times 10^{16} \text{ fótons/s.}$$

Aula 14 — Infra-vermelhos na guerra. Computadores quânticos.

Pergunta 16 — Visão noturna na 2.^a Grande Guerra

Numa das imagens da aula vê-se uma espingarda de assalto alemã StG 44 acoplada a um equipamento designado «Vampir» (ZG 1229). De que se trata?

- a) Uma luneta óptica passiva clássica, sem qualquer fonte luminosa associada.
- b) Um radar de microondas miniaturizado.
- c) Um sistema de visão noturna baseado em infra-vermelhos próximos (NIR), com projector activo de IV e detector sensível a esse comprimento de onda.
- d) Um detector totalmente passivo de radiação térmica de comprimento de onda longo.
- e) Uma câmara de raios-X portátil para detectar blindagem inimiga.

Resposta:

Opção c). O Vampir foi um dos primeiros sistemas operacionais de visão noturna: um projector de IV próximo (lâmpada com filtro) iluminava o alvo com radiação invisível ao

olho humano, e um detector com fotocátodo sensível ao NIR formava a imagem. Era, portanto, um sistema *activo* — diferente das câmaras térmicas modernas, passivas e sensíveis ao IV longo.

Pergunta 17 — Leibermuster e as anilinas

O padrão de camuflagem alemão Leibermuster, mostrado na aula, era impresso com tintas obtidas a partir de uma família de compostos cujo desenvolvimento se associa fortemente à indústria química alemã. De que tipo de tintas se tratava?

- a) Pigmentos minerais à base de óxido de ferro.
- b) Pigmentos vegetais de origem natural.
- c) Tintas de anilina, com uma componente preta característica.
- d) Tintas fluorescentes de uso decorativo.
- e) Tintas acrílicas sintéticas pós-1960.

Resposta:

Opção **c)**. As tintas de anilina, derivadas da química do alcatrão de hulha, foram um dos pilares industriais alemães a partir do final do século XIX (BASF, Hoechst, Bayer). O preto profundo característico do Leibermuster era obtido com estes corantes sintéticos, com uma assinatura espectral muito diferente da clorofila — razão pela qual era detectável em filme sensível ao IV.

Pergunta 18 — Reconhecimento aéreo e infra-vermelhos

A imagem da aula que mostra um sítio de lançamento de uma V1, com aspecto avermelhado, foi obtida por. . .

- a) uma câmara de raios-X aerotransportada.
- b) filme fotográfico sensível ao infra-vermelho, usado pela RAF.
- c) termografia digital moderna, posteriormente colorida.
- d) uma câmara estereoscópica colorida convencional.
- e) ressonância magnética em voo.

Resposta:

Opção **b)**. A RAF utilizou filme fotográfico com sensibilidade estendida ao infra-vermelho próximo. A vegetação saudável reflecte fortemente no NIR (efeito de Wood) e aparece muito clara nas chapas; estruturas artificiais, camuflagens à base de anilinas e movimentações de terra destacam-se contra esse fundo. Em revelações posteriores, esse contraste foi por vezes apresentado em falsa-cor com tons avermelhados.

Pergunta 19 — Placa-mãe

Qual é a função da placa-mãe («motherboard») de um computador?

- a) Armazenar permanentemente os ficheiros do utente.
- b) Executar as operações aritméticas e lógicas dos programas.
- c) Integrar e conectar todos os outros componentes do computador.
- d) Estabelecer a ligação sem fios à rede local.
- e) Gerar a imagem que é apresentada no monitor.

Resposta:

Opção **c)**. A placa-mãe é o substrato comum onde assentam CPU, RAM, placa gráfica, discos, alimentação, etc., e disponibiliza os barramentos (PCIe, SATA, USB. . .) através dos quais esses componentes comunicam. Por si só, nem calcula nem armazena — coordena e conecta.

Pergunta 20 — CPU

A CPU (Unidade Central de Processamento) é o componente responsável por:

- a) gerar a imagem para o ecrã, em tempo real.
- b) estabelecer a ligação física à rede Ethernet.

- c) guardar os dados do utente de forma persistente.
- d) executar as instruções dos programas — operações aritméticas e lógicas, controlo do fluxo de execução e gestão das transferências entre componentes.
- e) dissipar o calor gerado pelos restantes componentes.

Resposta:

Opção **d)**. A CPU é o «cérebro» do computador: lê instruções da memória, executa-as (operações aritméticas e lógicas, na ALU), controla o fluxo do programa e coordena as transferências de dados entre os vários subsistemas. As outras funções da lista são desempenhadas pela GPU, placa de rede, disco e sistema de arrefecimento, respectivamente.

Pergunta 21 — RAM e disco

Qual é a diferença essencial entre a RAM e um disco (HDD ou SSD)?

- a) A RAM mantém o conteúdo após interrupção da corrente; o disco perde-o.
- b) A RAM perde o conteúdo após interrupção da corrente; o disco mantém-no de forma persistente.
- c) Ambos perdem o conteúdo após interrupção da corrente.
- d) Ambos mantêm o conteúdo após interrupção da corrente.
- e) A RAM é apenas usada para guardar a imagem do ecrã; o disco para tudo o resto.

Resposta:

Opção **b)**. A RAM é uma memória *volátil*: as suas células precisam de alimentação eléctrica permanente para manter o estado; ao desligar a corrente, o conteúdo evapora-se. O disco — magnético ou de células flash — guarda a informação de forma persistente, sem necessidade de energia.

Pergunta 22 — ROM

A ROM (memória só de leitura) tradicionalmente serve para:

- a) guardar os ficheiros do utente.
- b) conter as instruções de arranque do computador, que preparam o sistema para carregar o sistema operativo.
- c) processar gráficos em tempo real.
- d) funcionar como memória virtual sempre que a RAM é insuficiente.
- e) estabelecer ligações sem fios.

Resposta:

Opção **b)**. A ROM aloja o programa de arranque (BIOS/UEFI nos PCs): o pequeno conjunto de instruções que, ao ligar a máquina, inicia o hardware e procura o sistema operativo no disco. Diz-se «só de leitura» porque o utente comum não a altera — nas suas versões originais, mesmo a fábrica fixava o conteúdo de forma permanente.

Pergunta 23 — GPU

Qual destas características distingue a GPU da CPU?

- a) A GPU tem um único núcleo de processamento muito rápido.
- b) A GPU não tem memória dedicada própria.

- c) A GPU tem uma arquitectura massivamente paralela, com milhares de núcleos, eficiente em executar simultaneamente muitas tarefas matematicamente semelhantes.
- d) A GPU é exclusivamente usada para processar áudio.
- e) A GPU funciona apenas em modo estritamente sequencial, instrução a instrução.

Resposta:

Opção **c)**. A CPU tem poucos núcleos, generalistas e muito rápidos; a GPU tem milhares de núcleos mais simples, otimizados para executar em paralelo a mesma operação sobre muitos dados. É essa arquitectura paralela que a torna excelente para gráficos, simulações físicas e, hoje, redes neuronais.

Pergunta 24 — Válvulas e transístores

Qual destas é uma vantagem do transístor em relação à válvula termiónica?

- a) Maior consumo de energia.
- b) Necessidade de aquecimento do cátodo.
- c) Maiores dimensões físicas.
- d) Maior eficiência energética, miniaturização e durabilidade, permitindo a integração em larga escala.
- e) Distorção harmónica suave, considerada «musical» em áudio de alta-fidelidade.

Resposta:

Opção **d)**. O transístor (Bell Labs, 1947) é incomparavelmente mais pequeno, mais frio, mais eficiente, mais duradouro e mais barato de produzir do que a válvula. Sem ele não haveria circuitos integrados e, portanto, não haveria computação moderna. As outras alíneas descrevem desvantagens (ou, no caso da e), uma curiosidade do mundo do áudio).

Pergunta 25 — ENIAC

Aproximadamente quantas válvulas tinha o ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Computer*)?

- a) 180.
- b) 1.800.
- c) 18.000.
- d) 180.000.
- e) 1.800.000.

Resposta:

Opção **c)**. O ENIAC, concluído em 1945 na Universidade da Pensilvânia, tinha cerca de 18.000 válvulas, ocupava uma sala inteira e consumia da ordem de 150 kW. A elevada taxa de avaria das válvulas obrigava a métodos estatísticos para as localizar.

Pergunta 26 — Algoritmo de Grover

O algoritmo de Grover permite procurar, numa base de dados não ordenada com N entradas, a única entrada que satisfaz uma certa condição, num número de passos da ordem de $\sqrt{N}$. Para $N = 1\,000\,000$ entradas, o algoritmo encontra a resposta em aproximadamente quantos passos?

- a) $\sim 1\,000\,000$ passos.
- b) $\sim 500\,000$ passos.
- c) $\sim 1\,000$ passos.
- d) ~ 10 passos.
- e) ~ 1 passo.

Resposta:

Opção **c)**. $\sqrt{10^6} = 10^3 = 1000$. O algoritmo de Grover oferece uma aceleração quadrática, em pesquisa não-estruturada, em relação ao melhor algoritmo clássico, que em média precisaria de $N/2 = 500\,000$ verificações. Não é uma aceleração exponencial — mas é demonstrável que, para este problema, é o melhor possível em mecânica quântica.

Pergunta 27 — Qubit

Qual destas afirmações descreve correctamente um qubit?

- a) Só pode estar nos estados $|0\rangle$ ou $|1\rangle$, nunca numa combinação dos dois.
- b) Pode existir numa superposição $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, com $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ e $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, colapsando para 0 ou 1 no momento da medição.
- c) Tem necessariamente amplitudes reais e positivas.
- d) Só pode ser implementado fisicamente como polarização de um fóton.
- e) Substitui directamente um transistor, sem alteração do modelo computacional.

Resposta:

Opção **b)**. Esta é a definição precisa: o estado de um qubit é um vector unitário num espaço de Hilbert de dimensão 2, $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, com $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Os módulos quadrados das amplitudes dão as probabilidades de obter cada resultado e a medição projecta o estado num dos dois valores clássicos. As amplitudes podem ser complexas — é a fase relativa entre α e β que dá ao qubit a sua riqueza face ao bit clássico.

Pergunta 28 — Plataformas físicas para qubits

Qual destas *não* é uma plataforma física para a implementação de qubits, das que foram referidas na aula?

- a) Iões aprisionados, manipulados por lasers.
- b) Circuitos supercondutores (transmons), operados a temperaturas de milikelvin.
- c) Centros de cor em diamante (nitrogen-vacancy).
- d) Polarização de fótons.
- e) Filamentos de tungsténio aquecidos por efeito de Joule.

Resposta:

Opção **e)**. O filamento de tungsténio incandescente é o coração de uma lâmpada eléctrica ou de uma válvula termiónica — um sistema clássico, dissipativo e à temperatura ambiente, sem qualquer relação com qubits. As outras quatro opções são, todas elas, plataformas activamente investigadas para a computação quântica.

Pergunta 29 — Complementaridade

Considere-se um q-on que pode apresentar tanto uma forma (quadrado ou círculo) como uma cor (vermelho ou azul). Ao medir-se a sua forma, o que sucede?

- a) Obtêm-se simultaneamente a forma e a cor com igual precisão.
- b) A medição não perturba o estado e ambas as informações continuam acessíveis.
- c) Obtém-se um valor definido para a forma, mas perde-se toda a informação acerca da cor.
- d) Obtém-se um valor definido para a cor, com igual probabilidade vermelha ou azul.
- e) O q-on aniquila-se após a medição, deixando de existir.

Resposta:

Opção **c)**. As grandezas «forma» e «cor» do q-on são complementares (na linguagem formal, os respectivos operadores não comutam). A medição de uma delas projecta o sistema num estado de forma bem definida, mas que é uma superposição equilibrada das duas cores — a informação prévia acerca da cor é apagada pelo acto de medir a forma. É o análogo, no jogo do q-on, da relação posição–momento na Física Quântica.

Pergunta 30 — Pares EPR

Um par EPR de dois q-ons é distribuído por dois observadores distantes, A e B. Cada um pode medir, no seu q-on, ou a cor ou a forma. Qual destas afirmações descreve correctamente os resultados que obtêm, de acordo com a teoria quântica?

- a) Se ambos medirem a cor, obterão sempre cores opostas; se ambos medirem a forma, obterão sempre formas opostas.
- b) Quando um mede cor e o outro mede forma, os resultados são sempre correlacionados.
- c) A correlação dos resultados depende da distância entre A e B, enfraquecendo com a separação.
- d) Se ambos medirem a cor, obterão sempre a mesma cor; se ambos medirem a forma, obterão sempre a mesma forma; se medirem propriedades diferentes (um cor, outro forma), não há correlação entre os resultados.
- e) Independentemente do que cada um decida medir, A e B obtêm sempre o mesmo resultado.

Resposta:

Opção **d**). No par EPR aqui considerado, os dois q-ons estão num estado emaranhado em que medições da mesma grandeza dão sempre o mesmo resultado (correlação perfeita), e medições de grandezas complementares são totalmente descorrelacionadas. As correlações não diminuem com a distância — foi precisamente este carácter «não-local» que tanto inquietou Einstein, Podolsky e Rosen, e que as experiências de Aspect e seguidores acabaram por confirmar.