

“Due to the lucidity and apparently incontestable character of the argument, the paper of Einstein, Podolsky and Rosen created a stir among physicists and has played a large role in general philosophical discussion. Certainly the issue is of a very subtle character and suited to emphasize how far, in quantum theory, we are beyond the reach of pictorial visualization.” - N. Bohr.

1 Teorema de no-clonado

El teorema de no-clonado establece que no es posible crear una copia idéntica de un estado cuántico desconocido arbitrario. Este teorema se expresa diciendo que no existe un operador unitario U actuando sobre $\mathcal{H} \times \mathcal{H}$ tal que resulte

$$U(|\phi\rangle \otimes |\psi\rangle) = |\phi\rangle \otimes |\phi\rangle,$$

para todos los $|\phi\rangle$ y $|\psi\rangle$ en \mathcal{H} . Demostrar este teorema (ver por ejemplo Ballentine, p. 209).

- 2 Considere dos partículas con espín $1/2$. Calcule todos los coeficientes de Clebsch-Gordan escribiendo los kets correspondientes a los posibles estados de espín en la base de autoestados de S^2 y S_z total (triplete y singlete)

$$\{|s = 1, m = 1\rangle, |s = 1, m = -1\rangle, |s = 1, m = 0\rangle\}, \quad \{|s = 0, m = 0\rangle\},$$

en función de los kets en la representación $\{m_1, m_2\}$, usando los operadores S_{\pm} y ortogonalidad.

3 Paradoja EPR¹

Considere un sistema formado por dos partículas de espín $1/2$. Un observador A se especializa en medir las componentes de espín de una de las partículas (S_{1x}, S_{1y}, S_{1z}), mientras que el observador B mide las componentes de espín de la otra partícula. Suponga que se sabe que el sistema está en un estado singlete de espín, es decir que $S_{total} = 0$.

- ¿Cuál es la probabilidad de que el observador A obtenga $S_{1z} = \hbar/2$ cuando el observador B no efectúa mediciones? Repita el cálculo para $S_{1x} = \hbar/2$.
- El observador B mide $S_{2z} = \hbar/2$. ¿Qué puede decir sobre el resultado de la medición posterior de A si: (i) A mide S_{1z} , (ii) A mide S_{1x} ? Justifique su respuesta.
- Compare las dos situaciones de los items anteriores. Note que el aparato de medición de A obtiene resultados correlacionados con los de B sólo si B mide en la misma dirección que A . Por esto, la elección de la dirección de medición de A y B influye en el grado de correlación de las mediciones, aún si A y B están separados años luz de distancia (ver por ejemplo la sección 3.10 del Sakurai).

- 4 Considere una partícula de espín $1/2$ en un estado con $l = 1$.

- Encuentre el estado con j_{max} y $m_{j_{max}}$ en términos de los estados $|l, s, m_l, m_s\rangle$.
- Use $J_- = L_- + S_-$ para generar todos los estados $|j_{max}, m\rangle$.
- Use ortonormalidad para encontrar el estado $|j_{max} - 1, j_{max} - 1\rangle$.
- Use J_- para generar todos los estados $|j_{max} - 1, m\rangle$.
- ¿Cuál es el valor de expectación de L_z en el estado con $j = 1/2$ y $m = 1/2$? ¿Cuál es el valor de expectación de S_z en ese estado?

¹El paper original que presentó esta paradoja se encuentra disponible en la sección “Material Adicional” de la página web de la materia.

- 5] Se intenta sumar impulsos angulares $j_1 = 1$ y $j_2 = 1$ para formar estados con $j = 2, 1$, y 0 . Usando las relaciones de recurrencia,

$$\sqrt{(j \mp m)(j \pm m + 1)} \langle m_1, m_2 | j, m \pm 1 \rangle =$$

$$\sqrt{(j_1 \mp m_1 + 1)(j_1 \pm m_1)} \langle m_1 \mp 1, m_2 | j, m \rangle + \sqrt{(j_2 \mp m_2 + 1)(j_2 \pm m_2)} \langle m_1, m_2 \mp 1 | j, m \rangle$$

expresé todos los autoestados $\{|j, m\rangle\}$ (nueve) en términos de los $|m_1, m_2\rangle$. Escriba su respuesta en la forma

$$|j = 1, m = 1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |1, 0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |0, 1\rangle, \dots$$

- 6] Una partícula A de espín $3/2$, en un estado con momento angular nulo, se desintegra mediante una reacción

$$A \rightarrow B + C$$

que conserva el momento angular total, siendo B y C partículas de espín $1/2$ y 0 respectivamente.

- (a) ¿Qué valores puede tomar el momento angular orbital total del par de partículas B y C ?
- (b) ¿Cuáles son los autovalores de la proyección en el eje z del espín de la partícula A ? Si se conoce que la partícula A se encontraba en un estado con máxima proyección de espín en el eje z antes de decaer, y luego de la reacción se encuentra que a la partícula B en el estado con mínima proyección de espín en el eje z , ¿cuál es el momento angular orbital total del par $B - C$?
- (c) Para cada valor de la proyección de espín en z de la partícula A y todos los correspondientes valores de momento angular orbital total del par $B - C$, determinar la probabilidad de encontrar a la partícula B con proyección de espín z máxima en la dirección z .

- 7] Incluyendo el acoplamiento espín-órbita, el hamiltoniano electrónico para el átomo de hidrógeno sin campos externos es

$$H = H_0 + \frac{2\mu_B^2}{r^3} \frac{\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}}{\hbar^2},$$

donde $H_0 = p^2/2m - e^2/r$, y \mathbf{S} representa el espín del electrón.

- (a) Evalúe los conmutadores

$$[H, L^2], [H, S^2], [H, J^2], [H, L_z], [H, S_z], [H, J_z],$$

donde $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$. ¿Cuál es el conjunto más grande de estos operadores (incluyendo H) que conmutan mutuamente?

- (b) Ahora se enciende un campo magnético externo $\mathbf{B} = B\hat{z}$, de modo que se agrega al hamiltoniano el término

$$H_B = \frac{\mu_B}{\hbar} B (L_z + 2S_z).$$

Para este caso, repita el punto (a).

- 8] Considere una partícula de espín $1/2$ y masa m , que está sometida a un potencial tipo oscilador armónico tridimensional isótropo al que se le añade un potencial de interacción espín-órbita $\gamma \mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$, donde \mathbf{L} es el momento angular orbital y \mathbf{S} el espín de la partícula. El hamiltoniano total está dado entonces por

$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega^2 r^2}{2} + \gamma \mathbf{L} \cdot \mathbf{S}.$$

- (a) Halle exactamente las energías y autoestados de H correspondientes al nivel fundamental y al primer excitado. Ayuda: pruebe que los estados con $N = 1$ ($N = n_x + n_y + n_z$) tienen $l = 1$. Una opción es probar que $L^2 = \hbar^2 N(N + 1) - \hbar^2 a_i^\dagger a_i^\dagger a_j a_j$.
- (b) Si en $t = 0$ el sistema está en el estado $|\varphi\rangle = |N = 1, L_z = \hbar, S_z = \hbar/2\rangle$, halle $|\varphi(t)\rangle$. Si en $t = 0$ se mide la energía, ¿qué resultado se obtiene? ¿Y si se mide L^2 o L_z ? ¿Qué ocurre si las mediciones se realizan a $t > 0$?
- (c) Repita el ítem anterior para el estado a $t = 0$ dado por $|\psi\rangle = |N = 1, L_z = -\hbar, S_z = \hbar/2\rangle$

9 Cierta sistema cuántico de tres partículas (distinguidas), todas de espín 1/2, tiene un hamiltoniano dado por

$$H_0 = -\gamma (\bar{S}_1 \cdot \bar{S}_2 + \bar{S}_2 \cdot \bar{S}_3 + \bar{S}_3 \cdot \bar{S}_1) ,$$

donde γ es una constante positiva y \bar{S}_i es el operador espín de la partícula i -ésima ($i = 1, 2, 3$).

- (a) ¿Cuál es la dimensión del espacio de Hilbert del sistema?
- (b) Hallar los niveles de energía y su correspondiente degeneración.
- (c) Se agrega a H_0 otro término de interacción

$$H' = \bar{b} \cdot (\bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \bar{S}_3) ,$$

siendo \bar{b} un vector constante. Hallar el nuevo estado fundamental del sistema y compararlo con el asociado a H_0 .

10 (a) * Evalúe

$$\sum_{m=-j}^j \left| d_{m,m'}^{(j)}(\beta) \right|^2 m ,$$

para cualquier j (entero o semi-entero)². Verifique su respuesta para $j = 1/2$.

(b) * Pruebe que para cualquier j

$$\sum_{m=-j}^j m^2 \left| d_{m,m'}^{(j)}(\beta) \right|^2 = \frac{1}{2} j(j+1) \sin^2 \beta + m'^2 \frac{1}{2} (3 \cos^2 \beta - 1) .$$

11 * Escriba $d^{(3/2)}$ a partir de $d^{(1)}$, $d^{(1/2)}$, y los coeficientes de Clebsh-Gordan.

12 Los tensores irreducibles de rango k transforman, por definición, según una rotación representada por momento angular k .

$$R(\hat{n}, \phi) T_q^{(k)} R^{-1}(\hat{n}, \phi) = \sum_{q'=-k}^k D_{q'q}^{(k)}(\hat{n}, \phi) T_{q'}^{(k)} ,$$

donde $T_q^{(k)}$ es la descomposición del tensor en una *base esférica* con $q = -k, \dots, k$. Esto es equivalente, en su forma infinitesimal, a

$$[J_z, T_q^{(k)}] = \hbar q T_q^{(k)} , \quad [J_{\pm}, T_q^{(k)}] = \hbar \sqrt{(k \mp q)(k \pm q + 1)} T_{q \pm 1}^{(k)}$$

Mostrar que $V_{\pm 1} = \mp \frac{1}{2}(x \pm iy)$ y $V_0 = z$ son una base esférica de tensores irreducibles de rango 1.

²Recordar que $d_{m,m'}^{(j)}(\beta) = \langle j, m' | e^{-i\beta J_y} | j, m \rangle$ (ver por ejemplo: Ballentine, p. 179).

- 13 (a) Considere una partícula sin espín ligada a un centro fijo mediante un potencial central. Estudie los elementos de matriz

$$\left\langle n', l', m' \left| \frac{1}{\sqrt{2}}(x + iy) \right| n, l, m \right\rangle \quad \text{y} \quad \langle n', l', m' | z | n, l, m \rangle ,$$

utilizando únicamente el teorema de Wigner-Eckart. Esté seguro de establecer correctamente qué elementos de matriz son no nulos.

- (b) Repita el punto (a) usando funciones de onda $\Phi(x) = R_{nl}(r)Y_l^m(\theta, \phi)$.

- 14 (a) Escriba xy , xz , y $(x^2 - y^2)$ como combinaciones lineales de componentes de un tensor esférico (irreducible) de rango 2.

- (b) El valor de expectación

$$Q = e \langle \alpha, j, m = j | (3z^2 - r^2) | \alpha, j, m = j \rangle$$

es conocido como el momento cuadrupolar. Evalúe

$$e \langle \alpha, j, m' | (x^2 - y^2) | \alpha, j, m = j \rangle ,$$

(donde $m' = j, j - 1, j - 2, \dots$) en función de Q y los coeficientes de Clebsch-Gordan apropiados.

- 15 El tensor cuadrupolar de un sistema se define como

$$Q_{ik} = e (3x_i x_k - \delta_{ik} r^2) .$$

Si el sistema está en un estado con un valor de impulso angular total j , el momento cuadrupolar definido en el ejercicio anterior corresponde al valor de expectación de Q_{zz} en el estado con $m = j$. Evalúe los valores de expectación restantes de Q_{ik} sobre los estados $|\alpha, j, m = j\rangle$. Interprete el resultado.

- 16 Decidir si cada una de las siguientes afirmaciones es verdadera o falsa. Justificar.

- (a) Se tiene un oscilador armónico isotrópico de frecuencia ω en d dimensiones. Entonces, el nivel asociado a la energía $\hbar\omega \left(N + \frac{d}{2}\right)$ (siendo N un entero no negativo) tiene degeneración $\frac{(N + d - 1)!}{N! (d - 1)!}$.
- (b) La función de onda de un estado con $j = 1$ formado mediante el acoplamiento de dos partículas con espín 0 provenientes de orbitales p , resulta antisimétrica ante el intercambio de las partículas.
- (c) Un núcleo atómico de espín $1/2$ puede tener momento cuadrupolar eléctrico no nulo.