Procesamiento Cuántico de Información

Ariel Bendersky[1]

[1]Departamento de Computación - FCEyN - Universidad de Buenos Aires

Clase 3

Clase 3

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.

Clase 3

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.

Clase 3

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.

Clase 3

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.

Clase 3

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.

Clase 3

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.

Los estados cuánticos - Repaso

Definición

El estado de un sistema cuántico está representado por un vector $|\psi\rangle$ perteneciente a un espacio de Hilbert $\mathcal{H}$ con $\langle\psi|\psi\rangle = 1$.

$|\psi\rangle$ es un vector columna complejo de módulo 1

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} ; \quad |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ \frac{1+i}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$\langle\psi|$ es el transpuesto conjugado de $|\psi\rangle$, también notado como $|\psi\rangle^\dagger$.

Los qubits - Repaso

El qubit - Definición

Se llama *qubit* a cualquier sistema de dimensión 2. Es el equivalente cuántico del bit.

La base computacional

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Notemos que es una base ortonormal: $\langle 0|1\rangle = 0$ y $\langle k|k\rangle = 1$ para $k \in \{0, 1\}$. La computación clásica sólo admite estados de esta base canónica.

Los qubits - Repaso

El qubit - Definición

Se llama *qubit* a cualquier sistema de dimensión 2. Es el equivalente cuántico del bit.

La base computacional

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Notemos que es una base ortonormal: $\langle 0|1\rangle = 0$ y $\langle k|k\rangle = 1$ para $k \in \{0, 1\}$. La computación clásica sólo admite estados de esta base canónica.

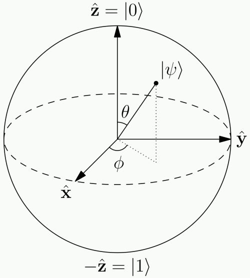
Los qubits - Repaso

Estado más general

$$|\psi\rangle = cos\,(\theta/2)\,|0\rangle + sen\,(\theta/2)\,e^{i\phi}\,|1\rangle$$

El estado de un qubit puede ser cualquier vector de módulo 1.
Están definidos a menos de una fase global.

La esfera de Bloch



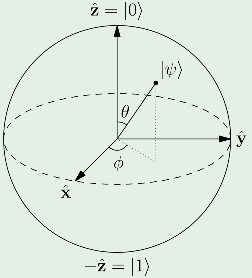
Los qubits - Repaso

Estado más general

$$|\psi\rangle = cos\,(\theta/2)\,|0\rangle + sen\,(\theta/2)\,e^{i\phi}\,|1\rangle$$

El estado de un qubit puede ser cualquier vector de módulo 1.
Están definidos a menos de una fase global.

La esfera de Bloch



Los qubits

Dos qubits

La base computacional es:

$$\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$$

donde $|ij\rangle = |i\rangle \otimes |j\rangle$.

$$\langle ij|kl\rangle = \delta_{ik}\delta_{jl}$$

n-qubits

La base computacional está formada por todas las n-uplas binarias:

$$\{|0...00\rangle, |0...01\rangle, |0...10\rangle, |1...11\rangle\}$$

El espacio de Hilbert de n qubits $\mathcal{H}_n$ tiene dimensión 2^n.

Los qubits

Dos qubits

La base computacional es:

$$\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$$

donde $|ij\rangle = |i\rangle \otimes |j\rangle$.

$$\langle ij|kl\rangle = \delta_{ik}\delta_{jl}$$

n-qubits

La base computacional está formada por todas las n-uplas binarias:

$$\{|0...00\rangle, |0...01\rangle, |0...10\rangle, |1...11\rangle\}$$

El espacio de Hilbert de n qubits $\mathcal{H}_n$ tiene dimensión 2^n.

Los qubits

El estado más general posible es una combinación lineal de los elementos de la base computacional normalizado.

Estados producto

Sea un sistema multipartito. Se denomina estado producto a un estado que se puede factorizar como:

$$|\psi_{1,2,3,\ldots n}\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle \otimes |\psi_3\rangle \otimes \ldots$$

Estados producto

Medición

Si la persona K mide los proyectores $\left\{\Pi_j^K\right\}$ la probabilidad multipartita es:

$$prob(j_1, ..., j_n) = \langle\psi_{1,2,...,n}| \Pi_{j_1}^1 \otimes \Pi_{j_2}^2 \otimes ...\Pi_{j_n}^n |\psi_{1,2,...,n}\rangle$$

Luego:

$$prob(j_1, ..., j_n) = \langle\psi_1|\otimes\langle\psi_2|\otimes...\otimes\langle\psi_n| \Pi_{j_1}^1\otimes\Pi_{j_2}^2\otimes...\Pi_{j_n}^n |\psi_1\rangle\otimes|\psi_2\rangle\otimes...\otimes|\psi_n\rangle$$

$$prob(j_1, ..., j_n) = \langle\psi_1| \Pi_{j_1}^1 |\psi_1\rangle \langle\psi_2| \Pi_{j_2}^2 |\psi_2\rangle ... \langle\psi_n| \Pi_{j_n}^n |\psi_n\rangle$$

$$prob(j_1, ..., j_n) = p_1(j_1)p_2(j_2)...p_n(j_n)$$

Estados producto

Son estados en los que las partes son independientes.

El resto de los estados

¿Y esto?

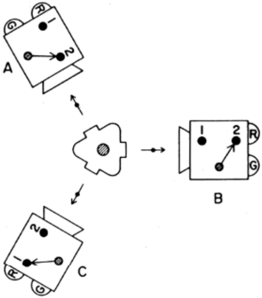
$$|\psi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0_A\rangle \otimes |0_B\rangle + |1_A\rangle \otimes |1_B\rangle\right)$$

¿Qué pasa si ambos miden σ_z? Pizarra.

Estados entrelazados

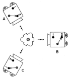
Los estados que no pueden escribirse como producto tensorial entre estados de sus partes se denominan entrelazados. Exhiben correlaciones cuánticas.

Quantum Mysteries Revisited. (N. D. Mermin, 1990)



1. Si sólo un detector está en 1, siempre hay un número impar de luces rojas.
2. Si los tres detectores están en 1, nunca se observa un número impar de luces rojas.

Quantum Mysteries Revisited. (N. D. Mermin, 1990)



Se puede pensar cada partícula como instrucciones sobre qué debe hacer el detector en cada caso.

$$\begin{pmatrix} RGR \\ GGG \end{pmatrix}$$

Enumerando todas las posibilidades se ve que esas dos reglas no se pueden cumplir nunca.

Quantum Mysteries Revisited. (N. D. Mermin, 1990)

- Si las tres partículas están en un estado cuántico particular, y los detectores miden ciertas propiedades cuánticas de las partículas, sí se puede construir esa máquina.
- Qué raro... o no tanto. Si los detectores pudieran hablarse entre ellos no habría nada sorprendente (si cada detector sabe qué midieron los otros).
- Evitemos que se hablen, aunque no sepamos muy bien qué mecanismo usa la naturaleza para que se hablen.

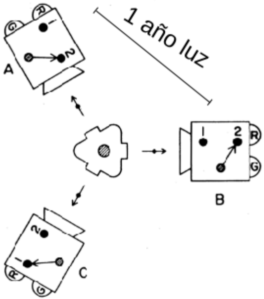
Quantum Mysteries Revisited. (N. D. Mermin, 1990)

- Si las tres partículas están en un estado cuántico particular, y los detectores miden ciertas propiedades cuánticas de las partículas, sí se puede construir esa máquina.
- Qué raro... o no tanto. Si los detectores pudieran hablarse entre ellos no habría nada sorprendente (si cada detector sabe qué midieron los otros).
- Evitemos que se hablen, aunque no sepamos muy bien qué mecanismo usa la naturaleza para que se hablen.

Quantum Mysteries Revisited. (N. D. Mermin, 1990)

- Si las tres partículas están en un estado cuántico particular, y los detectores miden ciertas propiedades cuánticas de las partículas, sí se puede construir esa máquina.
- Qué raro... o no tanto. Si los detectores pudieran hablarse entre ellos no habría nada sorprendente (si cada detector sabe qué midieron los otros).
- Evitemos que se hablen, aunque no sepamos muy bien qué mecanismo usa la naturaleza para que se hablen.

Quantum Mysteries Revisited Revisitado



La decisión de qué medir se toma a último minuto.

Quantum Mysteries Revisited

Consideremos los siguientes observables:

$$O_1 = \sigma_x \otimes \sigma_y \otimes \sigma_y$$
$$O_2 = \sigma_y \otimes \sigma_x \otimes \sigma_y$$
$$O_3 = \sigma_y \otimes \sigma_y \otimes \sigma_x$$

- Los tres operadores conmutan (usar que $[\sigma_x, \sigma_y] = 2i\sigma_z$).
- Por lo tanto, tienen una base común de autovectores.
- Sea $|\psi\rangle$ tal que $O_k |\psi\rangle = |\psi\rangle$ (autoestado de autovalor $+1$ de los tres observables).
- Consideremos que el detector en posición 1 es medir σ_x y en posición 2 es medir σ_y.
- Luz roja es resultado $+1$, luz verde es resultado -1.

Quantum Mysteries Revisited

Consideremos los siguientes observables:

$$O_1 = \sigma_x \otimes \sigma_y \otimes \sigma_y$$
$$O_2 = \sigma_y \otimes \sigma_x \otimes \sigma_y$$
$$O_3 = \sigma_y \otimes \sigma_y \otimes \sigma_x$$

- Los tres operadores conmutan (usar que $[\sigma_x, \sigma_y] = 2i\sigma_z$).
- Por lo tanto, tienen una base común de autovectores.
- Sea $|\psi\rangle$ tal que $O_k |\psi\rangle = |\psi\rangle$ (autoestado de autovalor $+1$ de los tres observables).
- Consideremos que el detector en posición 1 es medir σ_x y en posición 2 es medir σ_y.
- Luz roja es resultado $+1$, luz verde es resultado -1.

Quantum Mysteries Revisited

Consideremos los siguientes observables:

$$O_1 = \sigma_x \otimes \sigma_y \otimes \sigma_y$$
$$O_2 = \sigma_y \otimes \sigma_x \otimes \sigma_y$$
$$O_3 = \sigma_y \otimes \sigma_y \otimes \sigma_x$$

- Los tres operadores conmutan (usar que $[\sigma_x, \sigma_y] = 2i\sigma_z$).
- Por lo tanto, tienen una base común de autovectores.
- Sea $|\psi\rangle$ tal que $O_k |\psi\rangle = |\psi\rangle$ (autoestado de autovalor $+1$ de los tres observables).
- Consideremos que el detector en posición 1 es medir σ_x y en posición 2 es medir σ_y.
- Luz roja es resultado $+1$, luz verde es resultado -1.

Quantum Mysteries Revisited

Consideremos los siguientes observables:

$$
\begin{aligned}
O_1 &= \sigma_x \otimes \sigma_y \otimes \sigma_y \\
O_2 &= \sigma_y \otimes \sigma_x \otimes \sigma_y \\
O_3 &= \sigma_y \otimes \sigma_y \otimes \sigma_x
\end{aligned}
$$

- Los tres operadores conmutan (usar que $[\sigma_x, \sigma_y] = 2i\sigma_z$).
- Por lo tanto, tienen una base común de autovectores.
- Sea $|\psi\rangle$ tal que $O_k |\psi\rangle = |\psi\rangle$ (autoestado de autovalor $+1$ de los tres observables).
- Consideremos que el detector en posición 1 es medir σ_x y en posición 2 es medir σ_y.
- Luz roja es resultado $+1$, luz verde es resultado -1.

Quantum Mysteries Revisited

Consideremos los siguientes observables:

$$O_1 = \sigma_x \otimes \sigma_y \otimes \sigma_y$$
$$O_2 = \sigma_y \otimes \sigma_x \otimes \sigma_y$$
$$O_3 = \sigma_y \otimes \sigma_y \otimes \sigma_x$$

- Los tres operadores conmutan (usar que $[\sigma_x, \sigma_y] = 2i\sigma_z$).
- Por lo tanto, tienen una base común de autovectores.
- Sea $|\psi\rangle$ tal que $O_k |\psi\rangle = |\psi\rangle$ (autoestado de autovalor $+1$ de los tres observables).
- Consideremos que el detector en posición 1 es medir σ_x y en posición 2 es medir σ_y.
- Luz roja es resultado $+1$, luz verde es resultado -1.

Quantum Mysteries Revisited

Consideremos los siguientes observables:

$$
\begin{aligned}
O_1 &= \sigma_x \otimes \sigma_y \otimes \sigma_y \\
O_2 &= \sigma_y \otimes \sigma_x \otimes \sigma_y \\
O_3 &= \sigma_y \otimes \sigma_y \otimes \sigma_x
\end{aligned}
$$

- Los tres operadores conmutan (usar que $[\sigma_x, \sigma_y] = 2i\sigma_z$).
- Por lo tanto, tienen una base común de autovectores.
- Sea $|\psi\rangle$ tal que $O_k |\psi\rangle = |\psi\rangle$ (autoestado de autovalor $+1$ de los tres observables).
- Consideremos que el detector en posición 1 es medir σ_x y en posición 2 es medir σ_y.
- Luz roja es resultado $+1$, luz verde es resultado -1.

Quantum Mysteries Revisited

Si sólo un detector está en 1 (uno mide σ_x y los otros dos σ_y), estamos midiendo uno de los tres operadores O_k, por lo tanto el producto de las tres mediciones es $+1$ (el autovalor correspondiente al estado en ese operador). Es decir, hay un número impar de luces rojas (o un número par de verdes).

Quantum Mysteries Revisited

Si los tres detectores están en 1 (todos miden σ_x), notemos que $\sigma_x \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x = -O_1 O_2 O_3$ y también conmuta con los tres. Por lo tanto, al medirlo a ese estado tengo que obtener -1 (el estado es autovector de $\sigma_x \otimes \sigma_x \otimes \sigma_x$ con autovalor -1). En ese caso, el producto de las tres mediciones locales tiene que ser -1, por lo tanto nunca hay un número impar de luces rojas (para dar -1, tiene que haber una cantidad impar de luces verdes, que valen -1).

Ejercicio:
Encuentre la representación del estado $|\psi\rangle$ que acabamos de usar en la base computacional.

Aplicación del Entrelazamiento: Codificación Superdensa

El Problema

Alice (A) quiere enviar dos bits clásicos ($b_1 b_2$) a Bob (B).

Enfoque Clásico

Alice debe enviar dos señales físicas (pulsos de luz, niveles de voltaje, etc.) que Bob pueda interpretar como los dos bits. Es decir, requiere transmitir 2 bits de información.

Pregunta Cuántica

Si Alice y Bob comparten un par de qubits entrelazados de antemano, ¿puede Alice enviar los dos bits a Bob transmitiendo *menos* de dos bits clásicos?

Respuesta: Sí, enviando **un solo qubit**.

Aplicación del Entrelazamiento: Codificación Superdensa

El Problema

Alice (A) quiere enviar dos bits clásicos ($b_1 b_2$) a Bob (B).

Enfoque Clásico

Alice debe enviar dos señales físicas (pulsos de luz, niveles de voltaje, etc.) que Bob pueda interpretar como los dos bits. Es decir, requiere transmitir 2 bits de información.

Pregunta Cuántica

Si Alice y Bob comparten un par de qubits entrelazados de antemano, ¿puede Alice enviar los dos bits a Bob transmitiendo *menos* de dos bits clásicos?

Respuesta: Sí, enviando **un solo qubit**.

Aplicación del Entrelazamiento: Codificación Superdensa

El Problema

Alice (A) quiere enviar dos bits clásicos ($b_1 b_2$) a Bob (B).

Enfoque Clásico

Alice debe enviar dos señales físicas (pulsos de luz, niveles de voltaje, etc.) que Bob pueda interpretar como los dos bits. Es decir, requiere transmitir 2 bits de información.

Pregunta Cuántica

Si Alice y Bob comparten un par de qubits entrelazados de antemano, ¿puede Alice enviar los dos bits a Bob transmitiendo *menos* de dos bits clásicos?

Respuesta: Sí, enviando **un solo qubit**.

Aplicación del Entrelazamiento: Codificación Superdensa

El Problema

Alice (A) quiere enviar dos bits clásicos ($b_1 b_2$) a Bob (B).

Enfoque Clásico

Alice debe enviar dos señales físicas (pulsos de luz, niveles de voltaje, etc.) que Bob pueda interpretar como los dos bits. Es decir, requiere transmitir 2 bits de información.

Pregunta Cuántica

Si Alice y Bob comparten un par de qubits entrelazados de antemano, ¿puede Alice enviar los dos bits a Bob transmitiendo *menos* de dos bits clásicos?

Respuesta: Sí, enviando **un solo qubit**.

Codificación Superdensa: El Protocolo (Caso Base)

1. **Preparación:** Alice y Bob comparten un par de qubits en el estado de Bell $|\Phi^+\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A 0_B\rangle + |1_A 1_B\rangle)$. Alice tiene el qubit A, Bob tiene el qubit B.
2. **Codificación (Alice):** Alice quiere enviar los bits $b_1 b_2$. Aplica una compuerta unitaria $U_{b_1 b_2}$ *sólo a su qubit (A)*:
   - Si quiere enviar 00 $\implies$ aplica I (identidad). Estado global: $|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$.
   - Si quiere enviar 01 $\implies$ aplica X (NOT). Estado global: $(X_A \otimes I_B)|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|10\rangle + |01\rangle) = |\Psi^+\rangle$.
   - Si quiere enviar 10 $\implies$ aplica Z (Phase Flip). Estado global: $(Z_A \otimes I_B)|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) = |\Phi^-\rangle$.
   - Si quiere enviar 11 $\implies$ aplica ZX. Estado global: $(Z_A X_A \otimes I_B)|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(-|10\rangle + |01\rangle) = |\Psi^-\rangle$.

   Observe que aplicó una de 4 operaciones locales resultando en uno de los 4 estados de Bell ortonormales.
3. **Transmisión:** Alice envía su qubit (A) a Bob a través de un

Codificación Superdensa: El Protocolo (Caso Base)

1. **Preparación:** Alice y Bob comparten un par de qubits en el estado de Bell $|\Phi^+\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A 0_B\rangle + |1_A 1_B\rangle)$. Alice tiene el qubit A, Bob tiene el qubit B.
2. **Codificación (Alice):** Alice quiere enviar los bits $b_1 b_2$. Aplica una compuerta unitaria $U_{b_1 b_2}$ *sólo a su qubit (A)*:
   - Si quiere enviar 00 $\implies$ aplica I (identidad). Estado global: $|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$.
   - Si quiere enviar 01 $\implies$ aplica X (NOT). Estado global: $(X_A \otimes I_B)|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|10\rangle + |01\rangle) = |\Psi^+\rangle$.
   - Si quiere enviar 10 $\implies$ aplica Z (Phase Flip). Estado global: $(Z_A \otimes I_B)|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) = |\Phi^-\rangle$.
   - Si quiere enviar 11 $\implies$ aplica ZX. Estado global: $(Z_A X_A \otimes I_B)|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(-|10\rangle + |01\rangle) = |\Psi^-\rangle$.

   Observe que aplicó una de 4 operaciones locales resultando en uno de los 4 estados de Bell ortonormales.
3. **Transmisión:** Alice envía su qubit (A) a Bob a través de un canal cuántico.

Codificación Superdensa: El Protocolo (Caso Base)

1. **Preparación:** Alice y Bob comparten un par de qubits en el estado de Bell $|\Phi^+\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A 0_B\rangle + |1_A 1_B\rangle)$. Alice tiene el qubit A, Bob tiene el qubit B.
2. **Codificación (Alice):** Alice quiere enviar los bits $b_1 b_2$. Aplica una compuerta unitaria $U_{b_1 b_2}$ *sólo a su qubit (A)*:
   - Si quiere enviar 00 $\implies$ aplica I (identidad). Estado global: $|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$.
   - Si quiere enviar 01 $\implies$ aplica X (NOT). Estado global: $(X_A \otimes I_B)|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|10\rangle + |01\rangle) = |\Psi^+\rangle$.
   - Si quiere enviar 10 $\implies$ aplica Z (Phase Flip). Estado global: $(Z_A \otimes I_B)|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) = |\Phi^-\rangle$.
   - Si quiere enviar 11 $\implies$ aplica ZX. Estado global: $(Z_A X_A \otimes I_B)|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(-|10\rangle + |01\rangle) = |\Psi^-\rangle$.

   Observe que aplicó una de 4 operaciones locales resultando en uno de los 4 estados de Bell ortonormales.
3. **Transmisión:** Alice envía su qubit (A) a Bob a través de un canal cuántico.

Codificación Superdensa: Decodificación (Bob) - Parte 1

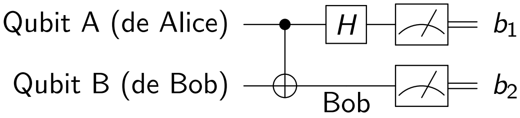
4. **Recepción y Medición (Bob):** Bob ahora posee ambos qubits (el suyo original B, y el A recibido de Alice). El par está en uno de los 4 estados de Bell: $|\Phi^+\rangle, |\Psi^+\rangle, |\Phi^-\rangle, |\Psi^-\rangle$.
5. Para distinguir entre estos 4 estados ortonormales, Bob realiza una **medición en la base de Bell**. Esto se implementa comúnmente con el siguiente circuito:
   - Aplicar una compuerta CNOT, usando el qubit de Alice (A) como control y el qubit de Bob (B) como objetivo.
   - Aplicar una compuerta Hadamard (H) al qubit de Alice (A).
   - Medir ambos qubits en la base computacional $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$.

Codificación Superdensa: Decodificación (Bob) - Parte 1

4. **Recepción y Medición (Bob):** Bob ahora posee ambos qubits (el suyo original B, y el A recibido de Alice). El par está en uno de los 4 estados de Bell: $|\Phi^+\rangle, |\Psi^+\rangle, |\Phi^-\rangle, |\Psi^-\rangle$.
5. Para distinguir entre estos 4 estados ortonormales, Bob realiza una **medición en la base de Bell**. Esto se implementa comúnmente con el siguiente circuito:
   - Aplicar una compuerta CNOT, usando el qubit de Alice (A) como control y el qubit de Bob (B) como objetivo.
   - Aplicar una compuerta Hadamard (H) al qubit de Alice (A).
   - Medir ambos qubits en la base computacional $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$.

Codificación Superdensa: Decodificación (Bob) - Parte 2

6. **Circuito de Decodificación de Bob:**



El resultado de la medición (m_1, m_2) corresponde directamente a los bits (b_1, b_2) que Alice quería enviar:

- Si mide 00 $\implies$ El estado era $|\Phi^+\rangle$, Alice envió 00.
- Si mide 01 $\implies$ El estado era $|\Psi^+\rangle$, Alice envió 01.
- Si mide 10 $\implies$ El estado era $|\Phi^-\rangle$, Alice envió 10.
- Si mide 11 $\implies$ El estado era $|\Psi^-\rangle$, Alice envió 11.

Codificación Superdensa: Ventaja y Consideraciones

Ventaja Cuántica

Alice logró enviar **2 bits clásicos** a Bob transmitiendo físicamente **sólo 1 qubit**.

Comparación

Clásicamente, se necesitaría enviar 2 señales/bits independientes. La codificación superdensa duplica la capacidad de información clásica de un canal cuántico, si se dispone de entrelazamiento previo.

Codificación Superdensa: Ventaja y Consideraciones

Ventaja Cuántica

Alice logró enviar **2 bits clásicos** a Bob transmitiendo físicamente **sólo 1 qubit**.

Comparación

Clásicamente, se necesitaría enviar 2 señales/bits independientes. La codificación superdensa duplica la capacidad de información clásica de un canal cuántico, si se dispone de entrelazamiento previo.

Codificación Superdensa: Ventaja y Consideraciones

Consideraciones Importantes

- Requiere un **canal cuántico** capaz de transmitir un qubit sin decoherencia significativa.
- Requiere **entrelazamiento pre-compartido**. El entrelazamiento es un recurso que se consume (1 par EPR por cada 2 bits enviados). No se crea durante la transmisión.
- **No permite comunicación más rápida que la luz (FTL):** [...] Limitada por c.

Hoy vimos

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.
- Codificación superdensa.

Hoy vimos

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.
- Codificación superdensa.

Hoy vimos

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.
- Codificación superdensa.

Hoy vimos

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.
- Codificación superdensa.

Hoy vimos

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.
- Codificación superdensa.

Hoy vimos

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.
- Codificación superdensa.

Hoy vimos

- Sistemas de muchos qubits.
- Producto tensorial.
- Estados producto.
- Entrelazamiento.
- No señalización.
- *Quantum misteries revisited* revisitado.
- Codificación superdensa.

La que viene

- Evolución temporal.
- Compuertas universales.
- El modelo de circuitos.