

Pauli component erasing (PCE) quantum channels

Jose Alfredo de Leon^{1,2}, Alejandro Fonseca^{3,2}, Francois Leyvraz⁴, David Davalos⁵, Carlos Pineda²

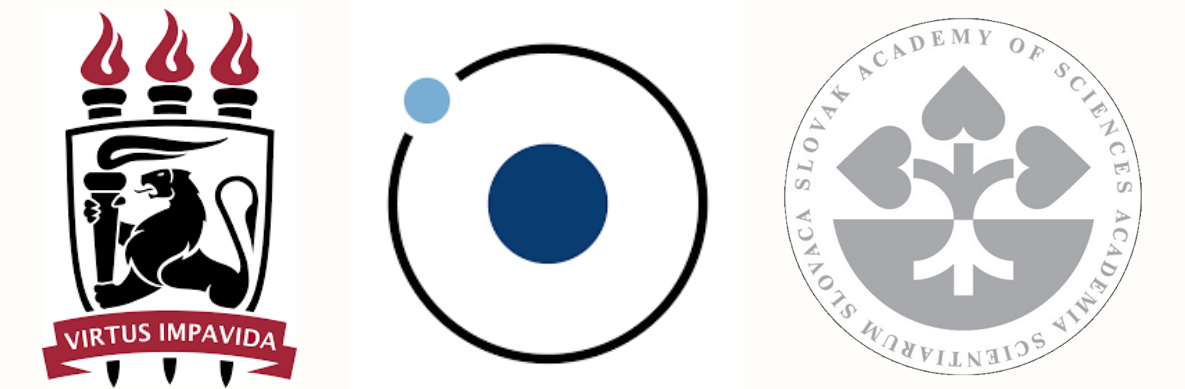
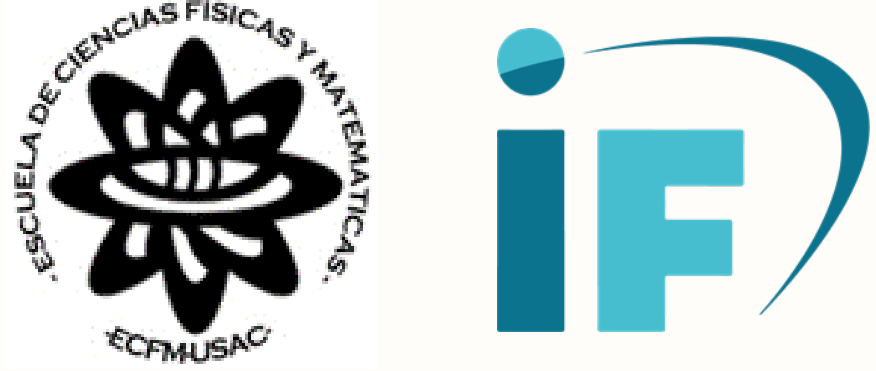
¹Instituto de Investigación en Ciencias Físicas, ECFM, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

²Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, México

³Departamento de Física, CCEN, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

⁴Instituto de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México, México

⁵Institute of Physics, Slovak Academy of Sciences, Slovakia



Resumen

Procesos de disipación, como la decoherencia de los sistemas cuánticos, pueden describirse con la teoría de los canales cuánticos. En ese contexto, proponemos los mapeos *Pauli component erasing* (PCE), que preservan o borran por completo las componentes de la matriz de densidad de un sistema de muchos qubits. Mostramos que el subconjunto de mapeos PCE que describen evoluciones físicas, es decir, los *canales cuánticos PCE*, se corresponden con subespacios vectoriales. Finalmente, derivamos los generadores de este subconjunto a partir de su estructura de semigrupo y, con esto, determinamos implementaciones físicas para conectar a los canales cuánticos PCE con procesos Markovianos.

Motivación

Algunos procesos de decoherencia de 1 partícula de 2 niveles se describen como proyecciones de la esfera de Bloch. Sin embargo, no todas las proyecciones describen evoluciones físicas [vea la Fig. 1].

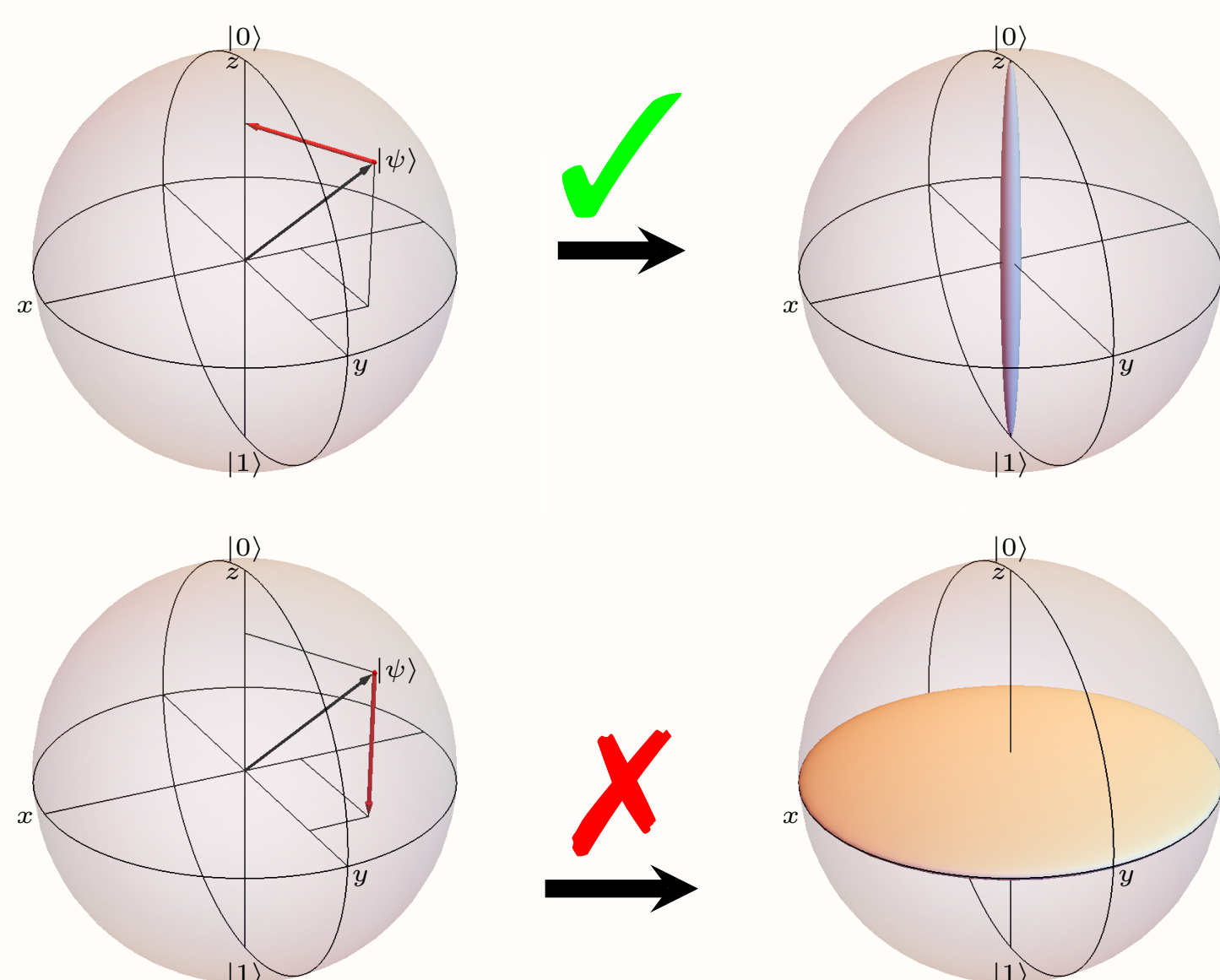


Figura 1: No todas las proyecciones de la esfera de Bloch describen evoluciones físicas.

Canales cuánticos

Los canales cuánticos son un marco teórico dentro del cual se pueden estudiar la dinámica de sistemas cuánticos, como las transformaciones de la esfera de Bloch en la Fig. 1. Un canal cuántico es un mapeo de matrices de densidad a matrices de densidad. Es decir, $\rho \mapsto \mathcal{E}(\rho)$, donde \mathcal{E} es un mapeo completamente positivo que preserve la traza de ρ . Un mapeo \mathcal{E} está unívocamente caracterizado por su matriz de Choi $\mathcal{D} \propto (\mathbb{1} \otimes \mathcal{E}) \left[\sum_{j,k} |j\rangle\langle j| \otimes |k\rangle\langle k| \right]$. \mathcal{D} es una matriz positiva semidefinida si y sólo si \mathcal{E} es completamente positivo.

Planteamiento del problema: mapeos PCE

La forma más general de escribir a la matriz de densidad de N qubits es

$$\rho = \frac{1}{2^N} \sum_{\vec{\alpha}} r_{\vec{\alpha}} \sigma_{\vec{\alpha}}, \quad (1)$$

donde $\vec{\alpha}$ denota un multi índice $(\alpha_1, \dots, \alpha_N)$, $\alpha_j = 0, 1, 2, 4$, y $\sigma_{\vec{\alpha}} = \sigma_{\alpha_1} \otimes \sigma_{\alpha_2} \otimes \dots \otimes \sigma_{\alpha_N}$. La condición de normalización de ρ restringe que $r_{\vec{0}} = 1$.

Definimos a un mapeo *Pauli component erasing* (PCE) como un mapeo que actúa sobre ρ , de la forma (1), como

$$r_{\vec{\alpha}} \mapsto \tau_{\vec{\alpha}} r_{\vec{\alpha}}, \quad \tau_{\vec{\alpha}} = 0, 1. \quad (2)$$

Para que un mapeo PCE preserve la traza de ρ por definición imponemos $\tau_{\vec{0}} = 1$. Nos vamos a referir a un mapeo

de la forma (2), pero sin la restricción sobre los valores de $\tau_{\vec{\alpha}}$, como un mapeo diagonal de Pauli. En la Fig. 2 introducimos diagramas para representar a los mapeos PCE de 1 y 2 qubits.

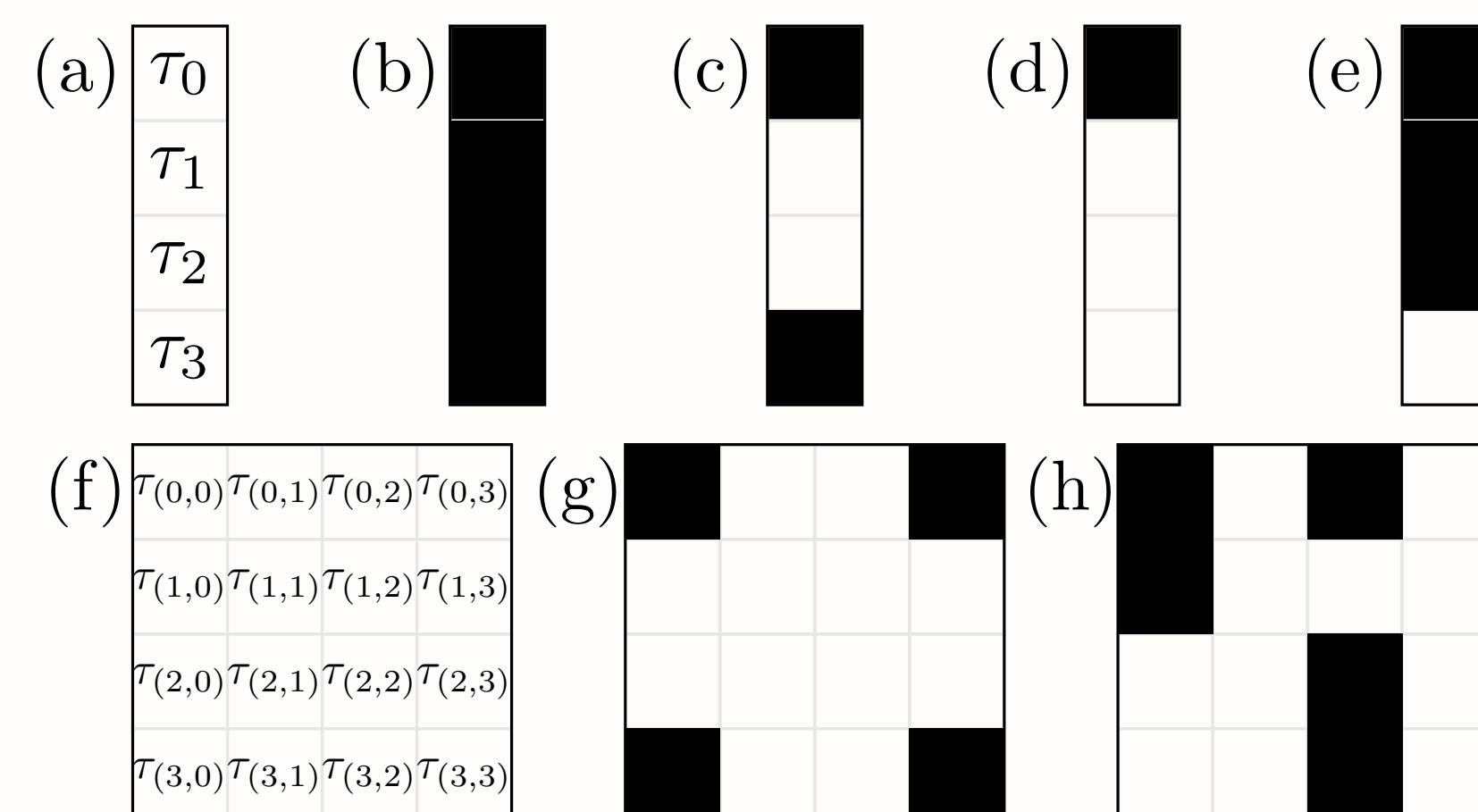


Figura 2: En (a) y (f) introducimos la correspondencia entre las $\tau_{\vec{\alpha}}$ de un mapeo PCE [vea Eq. (2)] y las posiciones de los cuadros en los diagramas. Un cuadro negro (blanco) se corresponde con $\tau_{\vec{\alpha}} = 1$ ($\tau_{\vec{\alpha}} = 0$). En (b) se muestra la identidad de 1 qubit, en (c) y (e) los canales ilustrados en la Fig. 1, en (d) el completamente depolarizante, (g) corresponde a un canal cuántico que es el producto tensorial del canal (c) en cada qubit y en (h) mostramos un mapeo PCE de 2 qubits que no es un canal cuántico.

En general, un mapeo PCE [vea Eq. (2)] no es completamente positivo y, por consiguiente, no todos los mapeos PCE son canales cuánticos. Para determinar si un mapeo PCE es completamente positivo investigamos la diagonalización de la matriz de Choi de un mapeo diagonal de Pauli.

Diagonalización de la matriz de Choi \mathcal{D}

Diagonalizamos exactamente la matriz de Choi \mathcal{D} de un mapeo diagonal de Pauli de N qubits y mostramos que los eigenvalores de \mathcal{D} se pueden escribir como

$$\lambda_{\vec{\alpha}} = \frac{1}{2^N} \sum_{\vec{\beta}} A_{\vec{\alpha}\vec{\beta}} \tau_{\vec{\beta}}, \quad (3)$$

donde

$$A = a^{\otimes N}, \quad a = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Para que un mapeo PCE sea completamente positivo y, por consiguiente un canal cuántico, los eigenvalores (3) deben satisfacer $\lambda_{\vec{\alpha}} \geq 0$.

Canales cuánticos PCE como espacios vectoriales

Los canales cuánticos PCE tienen una estructura algebraica bella y simple a partir de la cual se pueden derivar sus propiedades.

Si reescribimos $\vec{\alpha}$ con dos índices binarios como $\vec{\alpha} = \{(\mu_1, \dots, \mu_N), (\nu_1, \dots, \nu_N)\}$ y $\mu_j, \nu_j = 0, 1$, es fácil de mostrar la propiedad algebraica

$$\tau_{\vec{\alpha}} \tau_{\vec{\beta}} = \tau_{\vec{\alpha} \oplus \vec{\beta}}, \quad \forall \vec{\alpha}, \vec{\beta} : \alpha \neq \beta \wedge \tau_{\vec{\alpha}} = \tau_{\vec{\beta}} = 1. \quad (5)$$

Es decir, el conjunto $\{\vec{\alpha} : \tau_{\vec{\alpha}} = 1\}$ junto con la operación \oplus forman un grupo. Si además, uno equipa a este grupo con el campo $\{0, 1\}$ se deduce que cada canal cuántico PCE está asociado con un subespacio vectorial, y viceversa.

Generadores

Si los canales cuánticos PCE forman un grupo, entonces existe un subconjunto de canales PCE generadores $\mathcal{G}_{\vec{\alpha}}$. Los

diagramas (c)-(e) de la Fig. 3 son ejemplos de generadores PCE de 2 qubits, cualquier intersección entre dos de ellos (concatenación de canales) da como resultado el canal en (b).

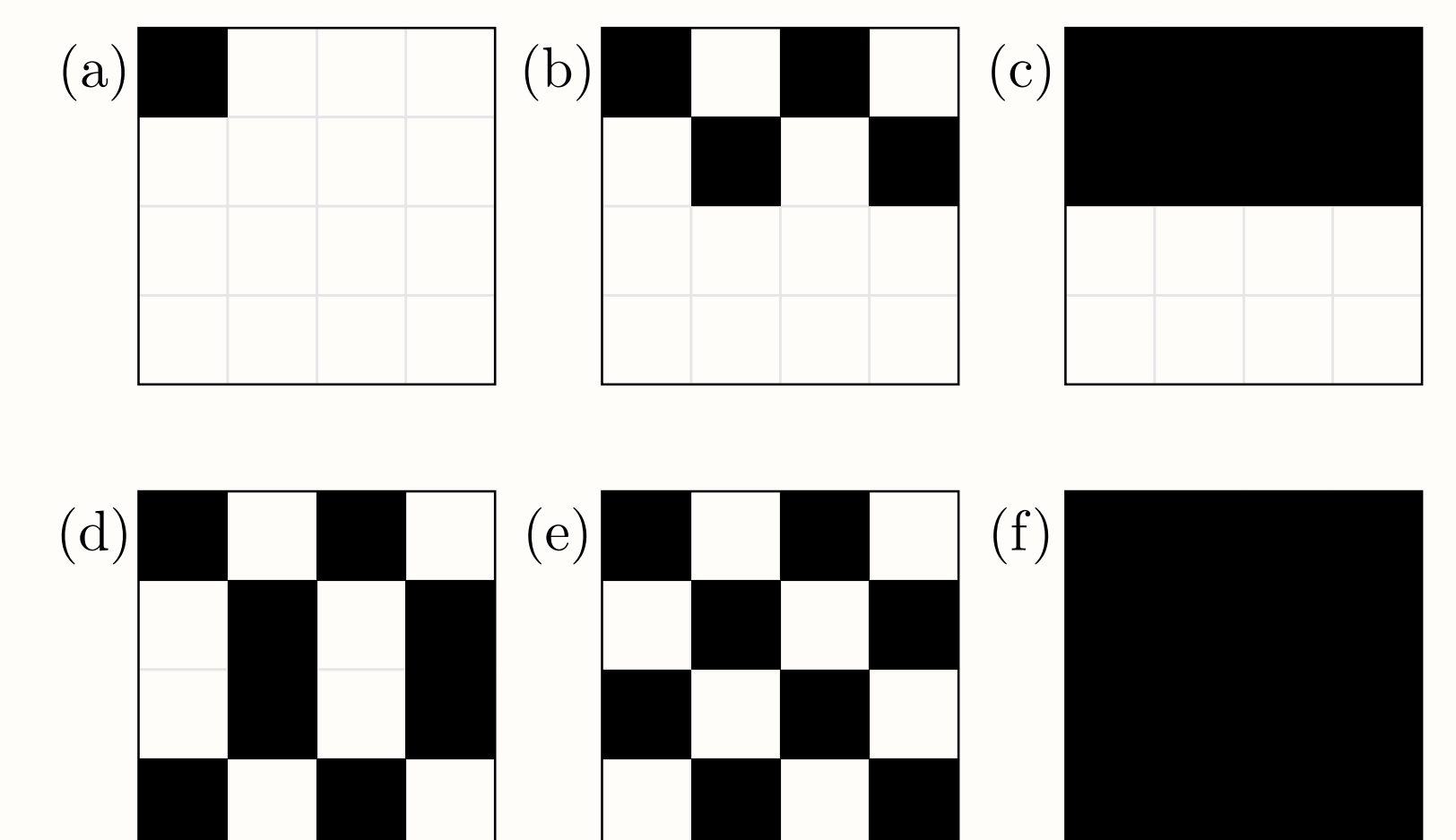


Figura 3: Ejemplos de diagramas para varios canales cuánticos PCE de 2 qubits: (a) el canal completamente depolarizante, (b) un canal PCE que preserva cuatro componentes, la componente de normalización, una componente local del qubit 1 y dos correlaciones entre los dos qubits. En (c), (d) y (e) mostramos los tres generadores $\mathcal{G}_{(1,0)}$, $\mathcal{G}_{(3,2)}$ y $\mathcal{G}_{(2,2)}$, respectivamente; y en (f) mostramos el mapeo de la identidad.

Más aún, como mostramos en la Fig. 4, existe una relación entre los generadores PCE y la matriz a en (4) que establece la simetría de reflexión respecto a una partícula.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \longleftrightarrow \begin{matrix} \mathcal{G}_0 & \mathcal{G}_1 & \mathcal{G}_2 & \mathcal{G}_3 \end{matrix}$$

Figura 4: Conexión entre las filas y columnas de la matriz a en (4) y de los generadores PCE \mathcal{G}_{α} de 1 qubit.

Canales PCE y decoherencia

Los canales PCE pueden identificarse como procesos de disipación en el límite $t \rightarrow \infty$ y como puntos particulares de un modelo de colisiones sin memoria. Ambas implementaciones antes mencionadas se derivan a partir de la forma de Kraus de los generadores PCE, que tienen la forma simple siguiente,

$$K_0 = \frac{\mathbb{1}}{\sqrt{2}}, \quad K_1 = \frac{\sigma_{\vec{\alpha}}}{\sqrt{2}}. \quad (6)$$

Conclusiones

- Introducimos los mapeos PCE.
- Diagonalizamos exactamente a la matriz de Choi de un mapeo diagonal de Pauli de N qubits.
- Caracterizamos a los canales cuánticos PCE mediante su estructura de espacio vectorial.
- Estudiamos que los canales cuánticos PCE pueden implementarse como puntos límite de procesos Markovianos.

Referencia

- [1] Pauli component erasing quantum channels. Jose Alfredo de Leon, Alejandro Fonseca, Francois Leyvraz, David Davalos, Carlos Pineda. arXiv:2205.05808. [Aceptado para publicarse en *Physical Review A*]

Contacto

josedleon@estudiantes.fisica.unam.mx