

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 976 285**

51 Int. Cl.:

G06N 10/20 (2012.01)

G06N 10/60 (2012.01)

G06N 5/01 (2013.01)

G06N 10/40 (2012.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.06.2019 PCT/EP2019/066916**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.12.2020 WO20259813**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.06.2019 E 19734063 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.02.2024 EP 3991104**

54 Título: **Método de cálculo de una solución a un problema computacional utilizando un sistema cuántico y aparato para calcular soluciones a problemas computacionales**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
29.07.2024

73 Titular/es:

**PARITY QUANTUM COMPUTING GMBH (100.0%)
Rennweg 1/ Top 314
6020 Innsbruck, AT**

72 Inventor/es:

**LECHNER, WOLFGANG y
HARTMANN, ANDREAS**

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

ES 2 976 285 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método de cálculo de una solución a un problema computacional utilizando un sistema cuántico y aparato para calcular soluciones a problemas computacionales

CAMPO

- 5 Las realizaciones descritas en el presente documento se refieren a aparatos y procedimientos para calcular soluciones a problemas computacionales utilizando un sistema cuántico, y más específicamente un sistema cuántico que incluye una pluralidad de bits cuánticos (qubits).

ANTECEDENTES

- 10 Los dispositivos de computación cuántica son dispositivos informáticos que hacen uso de los efectos de la mecánica cuántica para resolver problemas computacionales. En un dispositivo de computación cuántica, u ordenador cuántico, la información es transportada por sistemas cuánticos, como por ejemplo bits cuánticos ("qubits"). Esto contrasta con los ordenadores convencionales, que funcionan con bits clásicos, es decir, 0 y 1. Durante un cálculo cuántico, los bits cuánticos pueden procesarse evolucionando el sistema cuántico. Por ejemplo, grupos de qubits del sistema cuántico pueden acoplarse entre sí según una interacción especificada. Al evolucionar el sistema cuántico, la información que
- 15 transporta puede procesarse para realizar un cálculo, es decir, para resolver un problema computacional. En muchos casos, un ordenador cuántico puede ser asistido por un ordenador clásico, es decir, un ordenador que funciona con bits clásicos. El ordenador clásico puede dar instrucciones al ordenador cuántico sobre cómo procesar los qubits del sistema.

- 20 Los ordenadores cuánticos pueden utilizarse para resolver problemas computacionales, como por ejemplo problemas de optimización. El rendimiento de una computación cuántica para resolver un problema computacional puede medirse considerando el escalado del tiempo de ejecución de la computación cuántica con el aumento del tamaño del problema computacional. Otra forma de evaluar el rendimiento del cálculo cuántico es considerar si el ordenador cuántico es capaz de proporcionar una solución exacta al problema computacional (por ejemplo, un mínimo absoluto, en caso de que el problema computacional sea un problema de minimización) o sólo una solución aproximada, y si una solución
- 25 aproximada proporcionada por el ordenador cuántico se aproxima lo suficiente a la solución real.

Para problemas computacionales de interés, muchas aproximaciones a la computación cuántica implican un escalado exponencial del tiempo de ejecución en función del tamaño del problema computacional. Otros enfoques pueden proporcionar un tiempo de ejecución mejor, es decir, menor, pero sólo son capaces de proporcionar una aproximación a la solución real del problema computacional, lo que puede no ser suficiente para las aplicaciones prácticas.

- 30 El documento EP 3 113 084 A1 (UNIVERSITÄT INNSBRUCK [AT]; ÖSTERREICHISCHE AKADEMIE DER WSS [AT]) 4 de enero de 2017 (2017-01-04) divulga aparatos y procedimientos para computar soluciones a problemas computacionales utilizando un sistema cuántico que incluye una pluralidad de qubits evolucionando, mediante recocido cuántico, un Hamiltoniano inicial del sistema cuántico en un Hamiltoniano final del sistema cuántico.

- 35 Por lo tanto, existe la necesidad de procedimientos y dispositivos mejorados para resolver problemas computacionales utilizando un sistema cuántico.

SUMARIO

La invención se define por las reivindicaciones independientes.

Las ventajas realizaciones se definen mediante las reivindicaciones dependientes.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

- 40 En el resto de la especificación, incluida la referencia a los dibujos adjuntos, se expone de forma más detallada una divulgación completa y habilitadora para un experto en la materia, en la que:

La figura 1 muestra un aparato para calcular soluciones a problemas computacionales utilizando un sistema cuántico;

La figura 2 muestra un ejemplo de sistema informático clásico;

- 45 La figura 3 ilustra la evolución de un Hamiltoniano inicial a un Hamiltoniano final a través de un Hamiltoniano intermedio;

Las figuras 4-6 muestran ejemplos de posibles disposiciones de una pluralidad de qubits;

La figura 7 ilustra la noción de Hamiltoniano de un solo cuerpo;

Las figuras 8-9 ilustran la noción de Hamiltoniano de corto alcance;

Las figuras 10-17 ilustran codificaciones específicas de un problema computacional en un Hamiltoniano del problema y el correspondiente Hamiltoniano final.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

5 A continuación se hará referencia en detalle a las diversas realizaciones ejemplares, uno o más ejemplos de las cuales se ilustran en cada figura. Cada ejemplo se proporciona a modo de explicación y no pretende ser una limitación. Por ejemplo, las características ilustradas o descritas como parte de una realización se pueden utilizar en o junto con otras realizaciones para obtener otras realizaciones. Se pretende que la presente divulgación incluya tales modificaciones y variaciones.

10 Dentro de la siguiente descripción de los dibujos, los mismos números de referencia se refieren a los mismos componentes. Por lo general, sólo se describen las diferencias con respecto a las realizaciones individuales. Las estructuras mostradas en los dibujos no están necesariamente representadas a escala y pueden contener detalles dibujados de forma exagerada para permitir una mejor comprensión de las realizaciones.

15 Las realizaciones descritas en el presente documento se refieren a un sistema cuántico que incluye una pluralidad de qubits. Un qubit, tal y como se describe en el presente documento, puede entenderse como un sistema mecánico cuántico de dos niveles. Un qubit puede incluir dos estados cuánticos base $|0\rangle$ y $|1\rangle$ que representan posibles estados cuánticos del qubit. Según el principio de superposición de la mecánica cuántica, toda superposición de la forma $a|0\rangle + b|1\rangle$ es un posible estado cuántico del qubit. En este caso, a y b son números complejos. Matemáticamente, un qubit puede representarse mediante un espacio vectorial bidimensional. Una pluralidad de qubits puede tener estados cuánticos de base correspondientes a configuraciones en las que cada qubit de la pluralidad de qubits está en el estado cuántico $|0\rangle$ o en el estado cuántico $|1\rangle$. Considerando, por ejemplo, una pluralidad de cinco qubits, un estado base cuántico ejemplar para los 5 qubits puede ser $|00101\rangle$. El estado cuántico $|00101\rangle$ representa una configuración en la que el primer, segundo y cuarto qubit están en el estado cuántico $|0\rangle$ y el tercer y quinto qubit están en el estado cuántico $|1\rangle$. Para una pluralidad de m qubits, existen 2^m estados cuánticos base. Teniendo en cuenta el principio de superposición, dados dos estados cuánticos para una pluralidad de qubits, una superposición de los estados cuánticos base es también un estado cuántico para la pluralidad de qubits. Por ejemplo, una superposición de la forma $a|00101\rangle + b|11110\rangle + c|11111\rangle$, con a , b y c números complejos, es un estado cuántico para la pluralidad de qubits. Matemáticamente, un sistema cuántico formado por una pluralidad de m qubits puede representarse mediante un espacio vectorial de 2^m dimensiones.

20 La pluralidad de qubits puede incluir o consistir en una pluralidad de qubits superconductores, por ejemplo, qubits de transmón o de flujo. Un qubit superconductor puede incluir un bucle superconductor primario y otro secundario. Las corrientes superconductoras que se propagan en sentido horario y antihorario, respectivamente, en el bucle superconductor primario pueden formar los estados de base cuántica $|1\rangle$ y $|0\rangle$ del qubit superconductor. Además, un sesgo de flujo magnético a través del bucle superconductor secundario puede acoplar los estados básicos cuánticos $|0\rangle$ y $|1\rangle$.

35 Alternativamente, el sistema cuántico puede realizarse utilizando un sistema de iones atrapados. En este caso, los estados de base cuántica $|0\rangle$ y $|1\rangle$ de un qubit están formados por dos niveles de un colector Zeeman o hiperfino o a través de una transición óptica prohibida de iones alcalinotérreos, o alcalinotérreos con carga positiva, como Ca^{40+} .

40 Como alternativa adicional, el sistema cuántico puede realizarse utilizando átomos ultrafríos, por ejemplo, átomos alcalinos neutros ultrafríos, que están atrapados en un entramado óptico o en entramados de gran separación de campos láser. Los átomos pueden evolucionar hacia un estado básico mediante el enfriamiento por láser. Los estados de base cuántica de un qubit están formados por el estado fundamental de un átomo y un estado Rydberg de alto nivel. Los qubits pueden direccionarse mediante luz láser.

45 Como alternativa adicional, el sistema cuántico puede realizarse con puntos cuánticos. Los Quantum Dot Qubits pueden fabricarse a partir de heteroestructuras GaAs/AlGaAs. Los qubits se codifican en estados de espín, que pueden prepararse sintonizando adiabáticamente el potencial de un pozo simple a un potencial de doble pozo.

50 Como alternativa adicional, el sistema cuántico puede realizarse con impurezas en cristales de estado sólido, como los Centros NV, que son defectos puntuales en cristales de diamante. Se están investigando otras impurezas, por ejemplo, centros de color ligados a impurezas de cromo, iones de tierras raras en cristales de estado sólido o centros de defectos en carburo de silicio. Los centros NV tienen dos electrones no apareados, lo que proporciona un estado básico de espín 1 que permite la identificación de dos niveles de defecto agudos con grandes tiempos de vida que pueden utilizarse para realizar un qubit, posiblemente en conjunción con los espines nucleares circundantes.

55 Según realizaciones, el sistema cuántico puede incluir uno o más, o una pluralidad de sistemas cuánticos individuales de nivel q , donde q puede ser una constante. Por ejemplo, q puede estar en el rango de 2 a 8, por ejemplo, 3, 4, 5 o 6. Un sistema cuántico individual de nivel q puede incluir una base consistente en q estados $|0\rangle$, $|1\rangle$, ..., $|q-1\rangle$. Un sistema cuántico individual de 3 niveles se denominará "qutrit".

Un Hamiltoniano de un sistema cuántico puede representar una interacción o una pluralidad de interacciones para el sistema cuántico. Un Hamiltoniano es un operador que actúa sobre el sistema cuántico. Los valores propios de un

Hamiltoniano corresponden a un espectro de energía del sistema cuántico. Un estado básico de un Hamiltoniano es un estado cuántico del sistema cuántico con una energía mínima. Un estado básico de un Hamiltoniano puede ser un estado cuántico a temperatura cero.

5 Un sistema informático clásico, tal como se describe en el presente documento, puede entenderse como un sistema informático que funciona con bits clásicos. Un sistema informático clásico puede incluir una unidad central de procesamiento (CPU) para procesar información con bits clásicos y/o una memoria para almacenar información con bits clásicos. Un sistema informático clásico puede incluir uno o más ordenadores convencionales y/o una red de ordenadores convencionales, como ordenadores personales (PC).

10 Antes de proporcionar una descripción detallada de las realizaciones, algunos aspectos de la presente divulgación se explicarán con referencia a las figuras 1-3.

15 La figura 1 ilustra un aparato 400 ejemplar para calcular soluciones a problemas computacionales. El aparato 400 está adaptado para calcular soluciones a problemas computacionales utilizando un sistema cuántico 420. El sistema cuántico 420 incluye una pluralidad de qubits 100, cada uno de los cuales está representado en la figura 1 por un punto negro. Como se muestra en la figura 1, la pluralidad de qubits 100 puede disponerse según un entramado bidimensional 120, en particular un entramado bidimensional cuadrado.

La figura 1 muestra además un sistema informático clásico 450. El sistema informático clásico 450 está configurado para recibir, como entrada, un problema computacional 452 a resolver. El problema computacional 452 puede, por ejemplo, ser un problema NP-duro, como, por ejemplo, el problema del viajante de comercio o el problema del modelo de espín de Ising. En este caso, "NP" significa "tiempo polinómico no determinista".

20 El sistema de computación clásico 450 está configurado para codificar el problema computacional 452 en un Hamiltoniano del problema del sistema cuántico 420. La figura 2 ilustra esquemáticamente un sistema de computación clásico 450 que codifica el problema computacional 452 en un Hamiltoniano del problema 482.

25 Según las realizaciones descritas en el presente documento, el Hamiltoniano del problema 482 es un Hamiltoniano de cuerpo único que tiene una pluralidad de parámetros ajustables. Por ejemplo, el Hamiltoniano 482 del problema puede tener la forma $H^{\text{problema}} = \sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$, donde cada $\sigma_z^{(k)}$ es un operador de Pauli que actúa sobre un k-ésimo qubit de la pluralidad de qubits 100, y donde cada J_k es un parámetro ajustable determinado por una o más entidades externas, por ejemplo campos magnéticos, que pueden ajustarse en cada qubit k individualmente. Por ejemplo, J_k puede ser la intensidad de un campo magnético ajustable que influye en el k-ésimo qubit. Puede proporcionarse una pluralidad de entidades externas ajustables, por ejemplo, campos magnéticos, en los que cada entidad externa ajustable influye en un único qubit de la pluralidad de qubits. Mediante el ajuste de las entidades externas, los parámetros J_k pueden ajustarse en función del problema computacional 452.

30 La codificación del problema computacional 452 en el Hamiltoniano del problema 482, como se realiza por el sistema de computación clásico 450, incluye determinar, a partir del problema computacional 452, una configuración de codificación de problema para la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema. Por ejemplo, el sistema de computación clásico 450 puede calcular valores adecuados de los parámetros J_k que codifican el problema computacional 452. Para cada uno de los parámetros ajustables, puede determinarse un valor de parámetro en función del problema computacional 452. En consecuencia, la configuración de codificación del problema de la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema 482 depende del problema computacional 452.

35 Refiriéndose de nuevo a la figura 1, el aparato 400 incluye una unidad de evolución hamiltoniana 430. La unidad de evolución Hamiltoniana 430 está adaptada para permitir que los qubits del sistema cuántico 420 interactúen entre sí, donde las interacciones están representadas por un Hamiltoniano del sistema cuántico 420.

De acuerdo con las realizaciones descritas en el presente documento, la unidad de evolución Hamiltoniana 430 está configurada para evolucionar un Hamiltoniano inicial del sistema cuántico 420 a un Hamiltoniano final del sistema cuántico 420 a través de un Hamiltoniano intermedio del sistema cuántico 420.

40 La figura 3 ilustra la evolución de un Hamiltoniano inicial 460 a un Hamiltoniano final 480 a través de un Hamiltoniano intermedio 470, como lo realiza la unidad de evolución de Hamiltonianos 430. La figura 3 muestra un eje temporal en el que se indican un tiempo inicial 46, un tiempo intermedio 47 y un tiempo final 48. El tiempo intermedio 47 se sitúa entre el tiempo inicial 46 y el tiempo final 48. En el eje temporal de la figura 3, el tiempo corre hacia abajo. En el momento inicial 46, la unidad de evolución hamiltoniana 430 puede proporcionar el Hamiltoniano inicial 460, es decir, la unidad de evolución hamiltoniana 430. En consecuencia, en el tiempo inicial 46, los qubits del sistema cuántico 420 pueden interactuar entre sí, o con una o más entidades externas (por ejemplo, campos magnéticos) de una manera definida por el Hamiltoniano inicial 460. En el tiempo intermedio 47, la unidad de evolución del Hamiltoniano 430 proporciona el Hamiltoniano intermedio 470. En consecuencia, en el tiempo intermedio 47, los qubits pueden interactuar entre sí o con una o más entidades externas de una manera definida por el Hamiltoniano intermedio 470.

45 En el tiempo final 48, la unidad de evolución del Hamiltoniano 430 proporciona el Hamiltoniano final 480. En consecuencia, en el tiempo final 48, los qubits pueden interactuar entre sí o con una o más entidades externas de una manera definida por el Hamiltoniano final 480.

La unidad de evolución hamiltoniana 430 puede evolucionar el Hamiltoniano inicial 460 hacia el Hamiltoniano final 480 a través del Hamiltoniano intermedio 470 cambiando gradualmente el Hamiltoniano inicial 460 hacia el Hamiltoniano intermedio 470, seguido de cambiar gradualmente el Hamiltoniano intermedio 470 hacia el Hamiltoniano final 480.

5 En algunas implementaciones, el Hamiltoniano inicial 460 es un Hamiltoniano de cuerpo único. El Hamiltoniano inicial puede tener la forma $H^{\text{inicial}} = \sum_k a_k \sigma_x^{(k)}$, donde cada a_k es un coeficiente y donde cada $\sigma_x^{(k)}$ es un operador de Pauli que actúa sobre el k -ésimo qubit de la pluralidad de qubits 100. Los operadores de Pauli $\sigma_z^{(k)}$ y $\sigma_x^{(k)}$ son operadores de Pauli no conmutantes, en particular anticonmutantes. El Hamiltoniano inicial 460 puede ser independiente del problema computacional 452.

10 Como se ilustra en la figura 3, el Hamiltoniano intermedio 470 es una combinación lineal del Hamiltoniano inicial 460, el Hamiltoniano final 480 y un primer Hamiltoniano de corto alcance 475. Representando el Hamiltoniano inicial 460 como H^{inicial} , el Hamiltoniano final 480 como H^{final} y el primer Hamiltoniano de corto alcance 475 como H^{SR1} , una combinación lineal (o suma ponderada) de estos tres Hamiltonianos tiene la forma $a H^{\text{inicial}} + b H^{\text{final}} + c H^{\text{SR1}}$, donde a , b y c son coeficientes (números reales), como se ilustra en la figura 3. En el Hamiltoniano intermedio 470, los coeficientes a , b y c pueden ser diferentes de cero.

15 En algunas implementaciones, el primer Hamiltoniano de corto alcance 475 puede ser un Hamiltoniano de cuerpo único. En particular, el primer Hamiltoniano de corto alcance 475 puede tener la forma $\sum_k b_k \sigma_y^{(k)}$, donde cada b_k es un coeficiente y donde $\sigma_y^{(k)}$ es un operador de Pauli que actúa sobre el k -ésimo qubit de la pluralidad de qubits 100. Los operadores de Pauli $\sigma_x^{(k)}$, $\sigma_y^{(k)}$ y $\sigma_z^{(k)}$ son operadores de Pauli mutuamente no conmutativos, en particular mutuamente anticonmutativos.

20 Como se ilustra en la figura 3, el Hamiltoniano final 480 es la suma del Hamiltoniano del problema 482 y un segundo Hamiltoniano de corto alcance 484. Por ejemplo, el segundo Hamiltoniano de corto alcance 484 puede ser un Hamiltoniano de plaqueta que representa interacciones entre grupos de qubits correspondientes a plaquetas. Las plaquetas pueden ser, por ejemplo, cuadrados elementales de un entramado cuadrado bidimensional según el cual se disponen los qubits.

25 Por ejemplo, el Hamiltoniano inicial 460 puede evolucionar al Hamiltoniano final 480 a través del Hamiltoniano intermedio 470 de acuerdo con un Hamiltoniano de interpolación $H(t)$ que depende de un parámetro de tiempo t . El Hamiltoniano de interpolación puede tener la forma $H(t) = A(t) H^{\text{inicial}} + B(t) H^{\text{final}} + H^{\text{SR}}(t)$, donde $A(t)$ y $B(t)$ son coeficientes de interpolación que dependen de la variable temporal t , y donde $H^{\text{SR}}(t)$ es un Hamiltoniano de corto alcance que también depende de la variable temporal t . Para t igual al tiempo inicial t_{inicial} , el coeficiente de interpolación $A(t_{\text{interpolación}})$ puede ser (exactamente o aproximadamente) igual al valor inicial 1, los coeficientes de interpolación $B(t_{\text{inicial}})$ pueden ser (exactamente o aproximadamente) iguales al valor inicial 0, y el Hamiltoniano de corto alcance $H^{\text{SR}}(t_{\text{inicial}})$ puede ser (exactamente o aproximadamente) igual al operador cero. En consecuencia, para el parámetro temporal t que es el tiempo inicial t_{inicial} , el Hamiltoniano de interpolación $H(t_{\text{interpolación}})$ puede ser igual al Hamiltoniano inicial H^{inicial} . Para t igual al tiempo final t_{final} , el coeficiente de interpolación $B(t_{\text{final}})$ puede ser (exactamente o aproximadamente) igual al valor final 1, los coeficientes de interpolación $A(t_{\text{final}})$ pueden ser (exactamente o aproximadamente) iguales al valor final 0, y el Hamiltoniano de corto alcance $H^{\text{SR}}(t_{\text{final}})$ puede ser (exactamente o aproximadamente) igual al operador cero. En consecuencia, para el parámetro temporal t que es el tiempo final t_{final} , el Hamiltoniano de interpolación $H(t_{\text{final}})$ puede ser igual al Hamiltoniano final H^{final} . Para t igual al tiempo intermedio $t_{\text{intermedio}}$, los coeficientes de interpolación $A(t_{\text{intermedio}})$ y $B(t_{\text{intermedio}})$ pueden ser cada uno distinto de cero, y el Hamiltoniano de interpolación $H(t_{\text{intermedio}})$ puede ser igual al primer Hamiltoniano de corto alcance 475 como se ha descrito. En consecuencia, para el parámetro de tiempo t que es el tiempo intermedio $t_{\text{intermedio}}$, el Hamiltoniano de interpolación $H(t_{\text{intermedio}})$ puede ser una combinación lineal del Hamiltoniano inicial 460, el Hamiltoniano final 480 y el primer Hamiltoniano de corto alcance 475.

45 Se entenderá que el ejemplo anteriormente mencionado de un Hamiltoniano de interpolación que tiene la forma $H(t) = A(t) H^{\text{inicial}} + B(t) H^{\text{final}} + H^{\text{SR}}(t)$ se utiliza con fines ilustrativos y no se interpretará como una limitación del alcance. Existen otros ejemplos de hamiltonianos de interpolación.

50 Como se ha mencionado anteriormente, el problema computacional 452 se codifica en los parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema 482, por ejemplo, los parámetros J_k del Hamiltoniano del problema ejemplar $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$. De acuerdo con las realizaciones descritas en el presente documento, la codificación es tal que el Hamiltoniano final 480, siendo la suma del Hamiltoniano del problema 482 y el segundo Hamiltoniano de corto alcance 484, tiene un estado fundamental que contiene información sobre una solución al problema computacional 452. En consecuencia, si el sistema cuántico 420 se encuentra en el estado fundamental del Hamiltoniano final 480, o en un estado cercano al estado fundamental, entonces la información sobre el problema computacional 452 puede ser revelada midiendo el sistema cuántico 420.

55 Según las realizaciones descritas en el presente documento, la unidad de evolución Hamiltoniana 430 está configurada para evolucionar el sistema cuántico 420 hacia un estado de tierra del Hamiltoniano final 480, en el que la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema 482 están en la configuración de codificación del problema.

La figura 1 muestra además una unidad de refrigeración 410 configurada para refrigerar el sistema cuántico 420. La

unidad de refrigeración 410 puede estar adaptada para enfriar el sistema cuántico 420 a una temperatura de funcionamiento del aparato 400. El sistema cuántico 420 puede inicializarse en un estado cuántico inicial enfriando el sistema cuántico 420 hacia un estado de tierra del Hamiltoniano inicial 460. La unidad de evolución del Hamiltoniano 430 puede entonces evolucionar el Hamiltoniano inicial 460 en el Hamiltoniano final 480 a través del Hamiltoniano intermedio 470, como se describe en el presente documento. La evolución del Hamiltoniano inicial 460 en el Hamiltoniano final 480 a través del Hamiltoniano intermedio 470 puede realizarse mientras el sistema cuántico 420 se mantiene, por la unidad de refrigeración 410, a o por debajo de sustancialmente la temperatura de funcionamiento del aparato 400.

La figura 1 muestra además un dispositivo de medición 440 adaptado para medir el sistema cuántico 420. Como se muestra, el dispositivo de medición 440 puede estar adaptado para medir una porción 425 de los qubits de la pluralidad de qubits 100. Utilizando el dispositivo de medición 440, la porción 425 puede medirse para obtener una lectura del estado cuántico final. El estado cuántico final, al estar bien aproximado por el estado fundamental del Hamiltoniano final, contiene información sobre la solución al problema computacional 452. La lectura del estado cuántico final puede revelar la información sobre la solución. La lectura puede proporcionarse desde el dispositivo de medición 440 al sistema informático clásico 450, como se indica en la figura 1 mediante la flecha 445. El sistema de computación clásico 450 puede determinar la solución 490 al problema computacional a partir de la lectura. El sistema de computación clásico 450 puede al menos determinar una solución de prueba al problema computacional, y verificar si la solución de prueba es realmente una solución al problema computacional. Para los problemas NP, la verificación es un cálculo que puede llevarse a cabo en tiempo polinómico, y normalmente puede calcularse fácilmente. Si resulta que no se ha encontrado una solución al problema computacional, se repite el proceso hasta que se encuentre una solución al problema computacional.

A la luz de lo anterior, según una realización, se proporciona un procedimiento de cálculo de una solución a un problema computacional utilizando un sistema cuántico que comprende una pluralidad de qubits. El procedimiento incluye codificar el problema computacional en un Hamiltoniano del problema del sistema cuántico, en el que el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de cuerpo único que comprende una pluralidad de parámetros ajustables, y en el que la codificación comprende determinar, a partir del problema computacional, una configuración de codificación de problema para la pluralidad de parámetros ajustables. El procedimiento incluye evolucionar un Hamiltoniano inicial del sistema cuántico en un tiempo inicial a un Hamiltoniano final del sistema cuántico en un tiempo final a través de un Hamiltoniano intermedio del sistema cuántico en un tiempo intermedio, donde el tiempo intermedio está entre el tiempo inicial y el tiempo final. El Hamiltoniano intermedio es una combinación lineal del Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y un primer Hamiltoniano de corto alcance. El Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y un segundo Hamiltoniano de corto alcance, donde la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema está en la configuración de codificación del problema, donde el segundo Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano de cuerpo d y d es independiente del problema computacional. El procedimiento incluye la medición de al menos una porción de la pluralidad de qubits para obtener una lectura del sistema cuántico. El procedimiento incluye determinar una solución al problema computacional a partir de la lectura.

Las realizaciones descritas en el presente documento permiten, por tanto, determinar una solución a un problema computacional, por ejemplo, un problema NP-duro, utilizando el sistema cuántico. En comparación con la determinación de una solución a un problema computacional utilizando únicamente un sistema de computación clásico, es decir, sin un sistema cuántico, las realizaciones descritas en el presente documento pueden proporcionar una disminución en el tiempo de cálculo necesario para resolver el problema computacional. En otras palabras, en comparación con los sistemas informáticos clásicos, las realizaciones descritas en el presente documento pueden permitir resolver problemas informáticos más rápidamente, o incluso pueden permitir encontrar dicha solución en absoluto, ya que el cálculo de la solución puede llevar demasiado tiempo en un sistema informático clásico.

Otra ventaja se refiere al aspecto según el cual el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo. Mientras que otros tipos de problemas hamiltonianos, en particular los problemas hamiltonianos que implican interacciones entre grandes grupos de qubits o interacciones entre qubits distantes entre sí (interacciones de largo alcance), pueden ser inviables o al menos requieren una configuración muy complicada del sistema cuántico y de los componentes que dirigen el cálculo cuántico, un problema Hamiltoniano de un solo cuerpo, como el descrito en este documento, se puede realizar utilizando una configuración mucho más simple, es decir, un dispositivo de procesamiento cuántico mucho más simple. Además, el Hamiltoniano del problema de las realizaciones descritas en el presente documento con sus parámetros ajustables proporciona un sistema totalmente programable con el que se puede codificar una amplia gama de problemas computacionales. Los dispositivos y procedimientos según las realizaciones descritas en el presente documento permiten, por tanto, computar una solución a una amplia gama de problemas computacionales, tales como problemas NP-duros. En comparación con los sistemas en los que sólo se puede codificar un número limitado de problemas, ya que determinadas interacciones requeridas por el Hamiltoniano del problema están cableadas en el sistema, se proporciona así una mayor flexibilidad y un dispositivo y procedimiento mucho más potentes.

Otra ventaja se refiere al aspecto según el cual el Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y un Hamiltoniano de corto alcance (concretamente el segundo Hamiltoniano de corto alcance). El segundo Hamiltoniano de corto alcance puede ser una suma de Hamiltonianos sumandos, donde los Hamiltonianos sumandos pueden ser Hamiltonianos de restricción como se describe en el presente documento. Tener un Hamiltoniano de corto alcance

ofrece la ventaja de que no es necesario diseñar interacciones entre qubits distantes. Esto contrasta de nuevo con los hamiltonianos que requieren interacciones de largo alcance que pueden ser inviables de realizar en el sistema cuántico o que, al menos, pueden requerir una configuración muy complicada del dispositivo de procesamiento cuántico.

5 Otra ventaja se refiere al aspecto según el cual el Hamiltoniano intermedio es una combinación lineal del Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y el primer Hamiltoniano de corto alcance. En particular, dicho aspecto proporciona ventajas en comparación con los enfoques que implican Hamiltonianos intermedios que son combinaciones lineales del Hamiltoniano inicial y el Hamiltoniano final solamente, es decir, sin el primer Hamiltoniano de corto alcance. Estos últimos tipos de hamiltonianos intermedios pueden surgir, por ejemplo, en protocolos de optimización cuántica adiabática (por ejemplo, protocolos de recocido cuántico) en los que el Hamiltoniano inicial evoluciona hacia el Hamiltoniano final mediante un Hamiltoniano de interpolación lineal de la forma $H(t) = (1-t) H_{\text{inicial}} + t H_{\text{final}}$. Al disponer de un Hamiltoniano intermedio según las realizaciones descritas en el presente documento, se dispone de un mayor espacio de posibles "trayectorias" para evolucionar del Hamiltoniano inicial al final. Este mayor espacio puede aprovecharse para reducir el tiempo necesario para convertir el Hamiltoniano inicial en el Hamiltoniano final. En consecuencia, se puede proporcionar un tiempo de ejecución más rápido para resolver el problema computacional.

15 En particular, pasando a través de un Hamiltoniano intermedio que es una combinación lineal del Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y el primer Hamiltoniano de corto alcance, es posible evolucionar el Hamiltoniano inicial hacia el Hamiltoniano final según un proceso diabático (o proceso no-adiabático, o proceso contradiabático) permaneciendo suficientemente cerca del estado de masa del sistema cuántico a lo largo de la evolución.

20 Sin querer atarse a ninguna teoría en particular, según el teorema adiabático de la mecánica cuántica, un sistema cuántico que comienza en un estado terreno de un Hamiltoniano inicial y se somete a una evolución del Hamiltoniano dependiente del tiempo permanecerá en un estado terreno instantáneo del sistema cuántico (o muy próximo a él) siempre que la evolución temporal del Hamiltoniano se realice con suficiente lentitud. Mediante tales procesos cuánticos adiabáticos, es posible resolver problemas computacionales, a saber, evolucionando adiabáticamente un Hamiltoniano inicial a un Hamiltoniano final con el fin de preparar un estado terreno del Hamiltoniano final. Sin embargo, dado que la velocidad permitida de tales procesos adiabáticos (también llamados procesos de recocido cuántico) está limitada a la luz del teorema adiabático, el tiempo de ejecución del cálculo cuántico será normalmente elevado, en particular puede escalar exponencialmente con el tamaño del problema computacional. Por el contrario, las realizaciones descritas en el presente documento permiten eludir las limitaciones de velocidad impuestas por el teorema adiabático, utilizando un Hamiltoniano intermedio que es una combinación lineal del Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y el primer Hamiltoniano de corto alcance. Por ejemplo, puede utilizarse un primer Hamiltoniano de corto alcance que tenga la forma $\sum_k b_k \sigma_y^{(k)}$, donde $\sigma_y^{(k)}$ es un operador de Pauli de un k -ésimo qubit. Los inventores han descubierto que, pasando por un Hamiltoniano intermedio según las realizaciones descritas en el presente documento, la evolución desde el Hamiltoniano inicial hasta el Hamiltoniano final puede llevarse a cabo diabáticamente, es decir, más rápido que la velocidad permitida por el teorema adiabático, sin dejar de alcanzar un estado fundamental que se aproxime al estado fundamental del Hamiltoniano final. De este modo, se puede mejorar el tiempo de ejecución del cálculo.

35 Las realizaciones descritas en el presente documento proporcionan una arquitectura escalable para soluciones informáticas a problemas computacionales. Para un sistema cuántico dado, pueden calcularse soluciones a una amplia variedad de problemas computacionales de un cierto tamaño máximo, en el que el tamaño máximo viene determinado por el número de qubits del sistema cuántico. Para calcular soluciones de problemas computacionales más allá de este tamaño máximo, se puede proporcionar un sistema cuántico más grande, es decir, un sistema cuántico que contenga un mayor número de qubits, con, por ejemplo, un Hamiltoniano del problema correspondiente, un Hamiltoniano de corto alcance y un Hamiltoniano final según las realizaciones descritas en el presente documento, para tratar problemas computacionales de mayor tamaño. Si se elige un sistema cuántico con un número adecuado de qubits, se pueden calcular soluciones para problemas de cálculo de cualquier tamaño. Independientemente del número de qubits del sistema cuántico, el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de cuerpo único, el Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y un segundo Hamiltoniano de corto alcance, y el Hamiltoniano intermedio es una combinación lineal del Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y un primer Hamiltoniano de corto alcance, según las realizaciones descritas en el presente documento. En consecuencia, se proporciona una arquitectura escalable para el cálculo de soluciones a problemas computacionales.

45 Según algunas realizaciones, el problema computacional puede ser un problema de decisión. Un problema de decisión puede referirse a un problema computacional formulado como una pregunta sí/no. La solución a un problema de decisión puede ser "sí" o "no". Alternativamente, la solución a un problema de decisión puede ser un único bit clásico, es decir, o bien 0 o bien 1. Según otras realizaciones, el problema computacional puede formularse de manera diferente a un problema de decisión.

50 El problema computacional puede ser cualquiera de una variedad de problemas computacionales considerados en, por ejemplo, los campos de la informática, la física, la química o la ingeniería. A modo de explicación, pero sin pretender limitar el alcance, a continuación, se exponen tres ejemplos de problemas computacionales. Los tres ejemplos que se exponen a continuación son ejemplos de problemas de decisión.

60 Un primer ejemplo de problema computacional según las realizaciones descritas en el presente documento es el

"problema del viajante de comercio". El problema del viajante de comercio implica una primera lista de ciudades y una segunda lista de distancias entre cada par de ciudades de la primera lista. El problema del viajante de comercio plantea la siguiente pregunta: "Dada la primera lista, la segunda lista y una constante K , ¿existe un recorrido de longitud a lo sumo K , en el que el recorrido (i) visita cada ciudad de la primera lista exactamente una vez y (ii) vuelve a la ciudad en la que comienza el recorrido?"

Un segundo ejemplo de problema computacional según las realizaciones descritas en el presente documento es el "problema de la tricolorabilidad" relativo a la coloración de grafos matemáticos. Un grafo matemático puede incluir un conjunto de vértices y un conjunto de aristas que representan conexiones entre pares de vértices. La tricoloración de un grafo matemático consiste en asignar a cada vértice del grafo matemático uno de los tres colores posibles (por ejemplo, "rojo", "verde" o "azul"), asignando colores diferentes a cualquier par de vértices conectados por una arista. Para algunos grafos matemáticos, puede no existir una tricoloración. El problema de la tricolorabilidad plantea la pregunta: "Dado un grafo matemático, ¿existe una tricoloración?"

Un tercer ejemplo de problema computacional según las realizaciones descritas en el presente documento se refiere al modelo de espín de Ising. El modelo de espín de Ising es un modelo físico que representa las interacciones entre una pluralidad de espines s_1, s_2, \dots, s_n , en el que cada espín s_i es una variable que puede tener el valor 1 o el valor -1, con i comprendido entre 1 y n . Para la pluralidad de espines, puede considerarse una función de energía de Ising $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$, en la que la función de energía de Ising tiene la forma

$$H(s_1, s_2, \dots, s_n) = \sum_{ij} c_{ij} s_i s_j + \sum_i c_i s_i$$

donde cada c_{ij} es un coeficiente de acoplamiento y cada c_i es un coeficiente de campo. La función de energía de Ising implica interacciones de pares, en las que una interacción de pares entre los espines s_i y s_j se representa mediante el término $c_{ij} s_i s_j$ en la función de energía de Ising. El valor absoluto del coeficiente de acoplamiento c_{ij} refleja la fuerza de la interacción por pares entre los espines s_i y s_j . El signo del coeficiente de acoplamiento c_{ij} refleja la naturaleza de la interacción entre pares, por ejemplo, interacciones ferromagnéticas o antiferromagnéticas. El modelo de espín de Ising puede ser un modelo de espín de Ising de largo alcance. Un modelo de espín de Ising de largo alcance puede incluir interacciones entre pares de espines distantes entre sí según una medida de distancia. Un modelo de espín de Ising de largo alcance puede incluir interacciones entre pares de espines distantes entre sí por una distancia que sea al menos el logaritmo de la distancia máxima entre dos espines. Algunos modelos de espín de Ising de largo alcance, por ejemplo, los modelos de espín de Ising de todo a todo pueden implicar interacciones entre todos los pares de espines. Por ejemplo, un modelo de espín de Ising en el que cada uno de los coeficientes de acoplamiento c_{ij} es distinto de cero puede considerarse un modelo de espín de Ising de largo alcance.

La función de energía de Ising incluye además términos $c_i s_i$ que representan una interacción entre un espín s_i y un campo externo que influye en el espín s_i pero no influye en los otros espines. La intensidad y la dirección del campo que influye en el espín s_i están representadas por el valor absoluto y el signo del coeficiente de campo c_i , respectivamente. Un problema computacional asociado con el modelo de espín de Ising, referido aquí como el problema del modelo de espín de Ising, puede formularse como sigue: "Dado un conjunto de coeficientes de acoplamiento c_{ij} , un conjunto de coeficientes de campo c_i y una constante K , ¿existe una configuración (s_1, s_2, \dots, s_n) de los espines tal que $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$ sea menor que K ?"

Según las realizaciones descritas en el presente documento, el problema computacional puede incluir una pluralidad de variables de entrada. La pluralidad de variables de entrada puede representar información relativa al problema computacional a resolver. Por ejemplo, en referencia a los tres ejemplos de problemas computacionales descritos anteriormente, la pluralidad de variables de entrada puede incluir: la primera lista de ciudades y la segunda lista de distancias (para el problema del viajante de comercio); los conjuntos de vértices y aristas de un grafo (para el problema de 3 colores); los conjuntos de coeficientes de acoplamiento c_{ij} y coeficientes de campo c_i (para el problema del modelo de espín de Ising).

El tamaño de un problema computacional puede entenderse como una medida del número de unidades de información clásicas necesarias para especificar el problema computacional. El tamaño de un problema computacional puede depender del número de variables de entrada del problema computacional. El tamaño de un problema computacional puede aumentar a medida que aumenta el número de variables de entrada. El tamaño del problema computacional puede ser igual al número de variables de entrada. Por ejemplo, para el problema del viajante de comercio, el tamaño puede referirse a la suma de las longitudes de la primera lista y la segunda lista. Como ejemplo adicional, para el problema del modelo de espín de Ising, el tamaño puede referirse al número n de espines s_i .

Un problema computacional, tal y como se describe en el presente documento, puede estar relacionado con la clase de complejidad NP considerada en el campo de la informática, donde "NP" significa "tiempo polinómico no determinista". El problema computacional puede pertenecer a la clase de complejidad NP. La clase de complejidad NP comprende los problemas de decisión. De manera informal, para un problema computacional perteneciente a la clase de complejidad NP, existe un conjunto de variables testigo a partir de las cuales es posible verificar que la solución del problema computacional es "sí". De este modo, para los problemas computacionales en NP, el proceso de verificar que la solución es "sí" puede llevarse a cabo mediante un algoritmo de verificación que tiene un tiempo de ejecución que escala sólo polinomialmente con el tamaño del problema computacional. En otras palabras, el conjunto

de variables testigo contiene información sobre la solución, en la que la información puede ser procesada en tiempo de ejecución polinómico por el algoritmo de verificación para verificar que la solución es "sí". Para una definición formal de la clase de complejidad NP, se hace referencia a la literatura de ciencias de la computación pertinente.

5 Por ejemplo, el problema del viajante de comercio, el problema de la tricoloración y el problema del modelo de espín de Ising, tal y como se describen aquí, son ejemplos de problemas de decisión de la clase de complejidad NP. Por ejemplo, consideremos el problema del modelo de espín de Ising. Si la solución al problema del modelo de espín de Ising para un conjunto dado de coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo y para una constante K dada es "sí", entonces una configuración de espines (s_1, s_2, \dots, s_n) para la que la función de energía de Ising asociada $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$ es menor que K puede considerarse como un conjunto de variables testigo. Dadas las variables testigo (s_1, s_2, \dots, s_n) , puede verificarse en tiempo polinómico que la energía $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$ es efectivamente menor que K , calculando el número $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$ y comparándolo con K . En consecuencia, el problema del modelo de espín de Ising está contenido en la clase de complejidad NP.

15 Para algunos problemas computacionales en NP, la tarea de calcular una solución (que es "sí" o "no" para un problema de decisión) puede no tener un algoritmo de tiempo polinómico o puede incluso tener un tiempo de ejecución exponencial, mientras que el algoritmo de verificación tiene un tiempo de ejecución polinómico. Se considera que algunos problemas computacionales de la clase de complejidad NP son computacionalmente intratables para los sistemas de computación clásicos. En este sentido, la terminología de un problema computacional "computacionalmente intratable" puede referirse a un problema computacional para el que no existe un algoritmo, que se ejecute en un sistema de computación clásico con un tiempo de ejecución polinómico, para determinar si la solución al problema computacional es "sí" o "no". En particular, el problema del viajante de comercio, el problema de la tricolorabilidad y el problema del modelo de espín de Ising, se consideran intratables para los sistemas de computación clásicos, o al menos no se conoce ningún algoritmo que resuelva alguno de estos problemas en tiempo de ejecución polinómico.

25 El problema computacional para el que se calcula una solución utilizando el sistema cuántico, como se describe en el presente documento, puede ser un problema NP-completo o un problema NP-duro. Los problemas NP-completos pertenecen a la clase NP y se consideran computacionalmente intratables para los sistemas informáticos clásicos. Aunque no todos los problemas NP-duros pertenecen a NP, los problemas NP-duros también se consideran computacionalmente intratables para los sistemas informáticos clásicos.

30 El procedimiento según las realizaciones descritas en el presente documento incluye codificar un problema computacional en un Hamiltoniano del problema del sistema cuántico, donde la codificación comprende determinar, a partir del problema computacional, una configuración de codificación de problema para la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema. El problema computacional puede mapearse en una configuración de codificación de problemas correspondiente de la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema. La configuración de la codificación del problema puede contener información sobre el problema computacional. El acto de determinar la configuración de codificación de problemas puede incluir determinar y/o calcular un valor para cada uno de la pluralidad de parámetros ajustables.

35 El procedimiento según las realizaciones descritas en el presente documento puede incluir proporcionar el problema computacional, o al menos información relativa al problema computacional, a un sistema de computación clásico, como por ejemplo el sistema de computación clásico 450 mostrado en la figura 1. Por ejemplo, una pluralidad de variables de entrada del problema computacional, como se describe en el presente documento, puede ser proporcionada al sistema de computación clásico. El sistema informático clásico puede estar configurado para calcular la configuración de codificación del problema a partir del problema computacional, por ejemplo, a partir de una pluralidad de variables de entrada del problema computacional.

45 Diferentes problemas computacionales pueden ser codificados en el Hamiltoniano del problema determinando diferentes configuraciones de codificación del problema. Por ejemplo, un primer problema computacional y un segundo problema computacional pueden codificarse en el Hamiltoniano del problema, dando lugar a una primera configuración de codificación del problema y una segunda configuración de codificación del problema para la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema. Si el segundo problema computacional es diferente del primer problema computacional, la segunda configuración de codificación del problema de los parámetros ajustables puede ser diferente de la primera configuración de codificación del problema.

Determinar la configuración de codificación del problema de la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema puede incluir mapear el problema computacional en un problema computacional auxiliar. El mapeo puede ser realizado por un sistema informático clásico como el descrito en el presente documento.

55 El problema computacional auxiliar puede incluir la determinación de un estado base de un modelo de espín, particularmente un modelo de espín de largo alcance. El modelo de espín de largo alcance puede ser un modelo de espín de largo alcance con interacciones de cuerpo m , donde m es 1, 2 o 3. El problema computacional auxiliar descrito en el presente documento puede ser el problema del modelo de espín de Ising.

El problema computacional auxiliar depende del problema computacional. El mapeo del problema computacional en

el problema computacional auxiliar puede incluir el mapeo de los parámetros de entrada del problema computacional en los parámetros de entrada del problema computacional auxiliar. El mapeo del problema computacional en el problema auxiliar puede ser tal que una solución para el problema computacional puede determinarse a partir de una solución al problema computacional auxiliar.

5 Como se ha descrito anteriormente, el problema computacional puede ser un problema de la clase de complejidad NP, por ejemplo, el problema del viajante de comercio. Dado que el problema del modelo de espín de Ising es un problema NP-completo, todos los problemas de la clase de complejidad NP, como por ejemplo el problema del viajante de comercio, se pueden trasladar al problema del modelo de espín de Ising. Por ejemplo, para el problema del viajante de comercio que incluye una primera lista y una segunda lista, como se describe en el presente documento, la primera lista y la segunda lista pueden mapearse en un conjunto de coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo para el problema del modelo de espín de Ising. Una solución para el problema del viajante de comercio puede calcularse a partir de una solución para el problema del modelo de espín de Ising con los correspondientes coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo. Estas correspondencias son conocidas.

15 La determinación de la configuración de codificación del problema de la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema puede incluir la determinación de la configuración de codificación del problema a partir del problema computacional auxiliar, en el que el problema computacional auxiliar es un modelo de espín, por ejemplo, un modelo de espín de Ising. La configuración de codificación del problema puede determinarse a partir del problema computacional auxiliar mediante un sistema informático clásico, tal como se describe en el presente documento.

20 Una forma específica de determinar la configuración de codificación del problema de la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema se describe con más detalle más adelante con respecto a las figuras 10-17.

El procedimiento según las realizaciones descritas en el presente documento puede incluir la determinación, por ejemplo mediante un sistema informático clásico como el descrito en el presente documento, del segundo Hamiltoniano de corto alcance a partir de una pluralidad de bucles cerrados de espines en el modelo de espín de largo alcance. Una forma específica de realizar esta determinación se describe más adelante en relación con las figuras 10-17.

25 Según las realizaciones descritas en el presente documento, se calcula una solución al problema computacional utilizando el sistema cuántico que comprende la pluralidad de qubits. La pluralidad de qubits puede comprender al menos 3 qubits, en particular al menos 8 qubits. Adicional o alternativamente, la pluralidad de qubits puede incluir N qubits, donde N está entre 100 y 10.000 qubits, preferiblemente incluso más de 10.000 qubits. Debe entenderse que la pluralidad de qubits 100 mostrados en las figuras descritas aquí se muestran con fines ilustrativos y explicativos, y el número real de qubits puede diferir de los mismos.

30 Los qubits del sistema cuántico pueden disponerse sobre una superficie bidimensional o sobre una superficie tridimensional, que puede ser plana o incluir curvatura. Las figuras 4-6 muestran diferentes disposiciones espaciales de la pluralidad de qubits 100 según las realizaciones descritas en el presente documento. Estas disposiciones espaciales pueden ser los diseños de los dispositivos de computación cuántica, por ejemplo, los chips cuánticos en los que pueden estar incorporados los qubits y/u otros sistemas cuánticos individuales (sistemas de nivel q, como los qutrits). Como se muestra en la figura 4, la pluralidad de qubits 100 puede estar dispuesta según una superficie plana bidimensional 110, como se indica en la figura 4 mediante las líneas discontinuas. Se entenderá que la superficie bidimensional 110 mostrada en la figura 4 se dibuja con el propósito de representar visualmente una disposición espacial bidimensional de la pluralidad de qubits, pero la superficie bidimensional 110 no tiene por qué ser una superficie física, tangible, en la que la pluralidad de qubits 100 estén dispuestos. Consideraciones similares se aplican a las realizaciones según las cuales la pluralidad de qubits está dispuesta según un entramado bidimensional o un entramado tridimensional, como se describe a continuación.

35 Según otras realizaciones, y como se muestra en la figura 5, la pluralidad de qubits 100 puede estar dispuesta según un entramado bidimensional 120, como indican las líneas discontinuas. Un entramado, como por ejemplo un entramado bidimensional o un entramado tridimensional, puede incluir una pluralidad de nodos dispuestos espacialmente según una cuadrícula regular. En la figura 5, la pluralidad de qubits 100, representados por la pluralidad de puntos negros, corresponden a los nodos del entramado bidimensional 120. Como se muestra, cada qubit de la pluralidad de qubits 100 puede disponerse en un nodo del entramado bidimensional 120. En la realización ejemplar mostrada en la figura 5, el entramado bidimensional 120 es un entramado cuadrado bidimensional. Según realizaciones alternativas, el entramado bidimensional 120 puede ser, por ejemplo, un entramado hexagonal o triangular, o cualquier otro tipo de entramado bidimensional.

45 Según realizaciones, la pluralidad de qubits puede estar dispuesta según un entramado tridimensional. De forma similar a la discusión proporcionada en referencia a la figura 5, la pluralidad de qubits puede corresponder a los nodos del entramado tridimensional. Cada qubit de la pluralidad de qubits puede estar dispuesto en un nodo del entramado tridimensional. El entramado tridimensional puede ser un entramado cuadrado tridimensional. Al igual que en el caso de los entramados bidimensionales, también pueden considerarse otros tipos de entramados tridimensionales.

Un entramado bidimensional es una estructura plana, que puede proporcionar una disposición espacial más simple

de los qubits en comparación con, por ejemplo, un entramado tridimensional o alguna disposición espacial irregular.

Según realizaciones, la pluralidad de qubits puede estar dispuesta según una porción de un entramado bidimensional o según una porción de un entramado tridimensional. La figura 6 ilustra una realización ejemplar según la cual la pluralidad de qubits 100 está dispuesta según una porción de forma triangular 121 de un entramado bidimensional. La figura 6 muestra una vista superior de la porción triangular 121. Una porción de forma triangular corresponde a la disposición de un dispositivo de computación cuántica según algunas realizaciones que están configuradas para llevar a cabo los procedimientos descritos en el presente documento. También se pueden considerar porciones de entramados que tengan una forma diferente.

Algunos de los Hamiltonianos considerados en la presente divulgación son Hamiltonianos de un solo cuerpo. Por ejemplo, el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de cuerpo único y, en algunas implementaciones, el Hamiltoniano inicial y/o el primer Hamiltoniano de corto alcance pueden ser Hamiltonianos de cuerpo único.

Un Hamiltoniano de cuerpo único del sistema cuántico, como se describe en el presente documento, puede entenderse como un Hamiltoniano en el que no se producen interacciones entre grupos de dos o más qubits. Un Hamiltoniano de un solo cuerpo puede ser la suma de una pluralidad de Hamiltonianos sumandos. Cada Hamiltoniano sumando puede actuar sobre un solo qubit de la pluralidad de qubits. Un Hamiltoniano de un solo cuerpo puede tener la forma $H = \sum_i H_i$, donde cada H_i es un Hamiltoniano sumando que actúa únicamente sobre el qubit i -ésimo. Un Hamiltoniano de cuerpo único puede representar interacciones entre la pluralidad de qubits y una entidad externa, por ejemplo, un campo magnético o un campo eléctrico, en el que cada qubit interactúa individualmente con la entidad externa.

La figura 7 muestra una ilustración esquemática de un Hamiltoniano de un solo cuerpo según las realizaciones descritas en el presente documento. En aras de la concreción, pero sin pretender limitar el alcance, la pluralidad de qubits mostrada en la figura 7 incluye 10 qubits, a saber, los qubits 201 a 210, dispuestos en una porción de un entramado cuadrado bidimensional que forma un triángulo, similar a la de la figura 6. El Hamiltoniano de un solo cuerpo descrito con referencia a la figura 7 es la suma de 10 Hamiltonianos sumandos 221 a 230. En la figura 7, cada uno de los Hamiltonianos sumandos 221 a 230 se dibuja esquemáticamente como un cuadrado que rodea un único qubit, indicando que cada Hamiltoniano sumando actúa sobre un único qubit. Por ejemplo, el Hamiltoniano sumando 221 se representa como un cuadrado que rodea al qubit 201 y solo al qubit 201, indicando que el Hamiltoniano sumando 221 actúa sobre el qubit 201 pero no actúa sobre ninguno de los restantes qubits 202 a 210.

Para un sistema cuántico que incluye una pluralidad de qubits superconductores, se puede realizar un Hamiltoniano de cuerpo único mediante una pluralidad de flujos magnéticos que interactúan con la pluralidad de qubits superconductores. Un flujo magnético o un sesgo de flujo magnético puede extenderse a través del bucle superconductor primario y a través del bucle superconductor secundario de un qubit superconductor. Por ejemplo, en relación con el Hamiltoniano del problema, la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema puede ajustarse ajustando la pluralidad de flujos magnéticos o sesgos de flujo magnético.

Para un sistema cuántico realizado con iones atrapados, los iones individuales pueden ser tratados por separación espacial o separación en energía. El caso de la separación espacial implica el uso de un rayo láser que ha pasado a través y/o ha sido reflejado desde un deflector acusto-óptico, un modulador acusto-óptico, dispositivos de microespejos o similares. El caso de la separación en energía implica el uso de un gradiente de campo magnético que cambie las frecuencias de transición internas, permitiendo la selección mediante diferencias de energía, es decir, desafinaciones de los campos aplicados. Un Hamiltoniano de un solo cuerpo puede realizarse mediante campos láser o microondas resonantes o no resonantes con la transición interna o mediante diferencias espaciales de campo magnético.

Para un sistema cuántico realizado con puntos cuánticos, se puede realizar un Hamiltoniano de cuerpo único con campos eléctricos.

Para un sistema cuántico realizado con centros NV, utilizando resonancia magnética mediante la aplicación de pulsos de microondas, los estados qubit pueden ser manipulados coherentemente en escalas de tiempo de nanosegundos. También se puede lograr una manipulación selectiva de los estados de los qubits en función del estado de los espines nucleares cercanos.

El Hamiltoniano del problema, siendo un Hamiltoniano de cuerpo único, puede tener la forma $H = \sum_i H_i$ donde cada H_i es un Hamiltoniano sumando que actúa únicamente sobre el i -ésimo qubit. La pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema puede incluir una pluralidad de parámetros ajustables de los Hamiltonianos sumandos. Uno o más Hamiltonianos sumandos del Hamiltoniano de cuerpo único, en particular cada uno de los Hamiltonianos sumandos, puede incluir uno o más parámetros ajustables.

Por ejemplo, el Hamiltoniano del problema puede tener la forma $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$, donde $\sigma_z^{(k)}$ es un operador de Pauli de un k -ésimo qubit de la pluralidad de qubits, donde cada J_k es un coeficiente, y donde los coeficientes J_k forman la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano de cuerpo único. El operador de Pauli $\sigma_z^{(k)}$ puede ser un operador de Pauli asociado a una primera dirección espacial ("dirección z ").

Un parámetro ajustable del Hamiltoniano del problema, como se describe en el presente documento, puede ser un parámetro que representa una fuerza y/o una dirección de una interacción entre un qubit de la pluralidad de qubits y

una entidad externa. La entidad externa puede, por ejemplo, incluir al menos uno de los siguientes: uno o más campos magnéticos; uno o más campos eléctricos, y/o uno o más campos Láser, Microondas, o cambios de fase por deformaciones mecánicas. El ajuste de un parámetro ajustable del Hamiltoniano del problema puede realizarse ajustando la entidad externa y/o ajustando la fuerza y/o el tipo de interacción entre el qubit y la entidad externa. En consecuencia, el parámetro ajustable puede representar una interacción ajustable, por ejemplo, una interacción que no está cableada en el sistema cuántico.

La pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema puede incluir una pluralidad de intensidades de campo y/o una pluralidad de direcciones de campo de campos de cuerpo único que actúan sobre la pluralidad de qubits. Los campos que actúan sobre la pluralidad de qubits pueden incluir uno o más campos magnéticos y/o uno o más campos eléctricos, por ejemplo en realizaciones relativas a qubits superconductores.

Un campo de cuerpo único puede entenderse como un campo que influye en un único qubit de la pluralidad de qubits. Según las realizaciones, la pluralidad de campos de un solo cuerpo puede incluir diferentes campos de un solo cuerpo que influyen en los qubits correspondientes según posiblemente diferentes intensidades de campo y/o posiblemente diferentes direcciones de campo. Por ejemplo, un primer campo de un solo cuerpo y un segundo campo de un solo cuerpo pueden influir en un primer qubit y un segundo qubit, respectivamente, de la pluralidad de qubits. En este caso, el primer campo de un solo cuerpo y el segundo campo de un solo cuerpo, siendo ambos, por ejemplo, campos magnéticos, pueden tener diferentes intensidades de campo y/o direcciones de campo.

En algunas implementaciones, el Hamiltoniano inicial puede ser un Hamiltoniano de un solo cuerpo. Disponer de un Hamiltoniano inicial que es un Hamiltoniano de cuerpo único permite una configuración sencilla para realizar el Hamiltoniano inicial, por ejemplo, para un sistema cuántico de qubits superconductores.

El Hamiltoniano inicial puede ser un Hamiltoniano de cuerpo único que tiene la forma $H^{\text{inicial}} = \sum_k a_k \sigma_x^{(k)}$. En ella, a_k puede ser un coeficiente para un k-ésimo qubit en la pluralidad de qubits y $\sigma_x^{(k)}$ puede ser el operador de Pauli que actúa sobre el k-ésimo qubit. En particular, $\sigma_x^{(k)}$ puede ser un operador de Pauli correspondiente a una segunda dirección espacial ("dirección x"). La segunda dirección espacial puede ser ortogonal a la primera dirección espacial, tal como se describe en el presente documento. El operador de Pauli $\sigma_x^{(k)}$ y el operador de Pauli $\sigma_z^{(k)}$ pueden ser operadores no conmutativos, en particular anticonmutativos. Según las realizaciones, cada uno de los coeficientes a_k es igual a un único coeficiente común h . El Hamiltoniano inicial puede ser un Hamiltoniano de cuerpo único que tiene la forma $H^{\text{inicial}} = h \sum_k \sigma_x^{(k)}$.

Para un qubit superconductor, un sesgo de flujo magnético a través del bucle superconductor primario del qubit superconductor puede establecerse de tal manera que los estados base $|0\rangle$ y $|1\rangle$ tengan la misma energía, es decir, que la diferencia de energía para estos estados base sea cero. Además, un sesgo de flujo magnético a través del bucle superconductor secundario puede acoplar los estados base $|0\rangle$ y $|1\rangle$. En consecuencia, se puede realizar un Hamiltoniano sumando de la forma $h\sigma_x^{(k)}$ para el qubit superconductor. En consecuencia, puede realizarse un Hamiltoniano inicial de la forma $H^{\text{inicial}} = h \sum_k \sigma_x^{(k)}$ para una pluralidad de qubits superconductores. Se puede ocupar con casi certeza un estado básico del Hamiltoniano inicial fijando el coeficiente h en un valor mucho mayor que la escala de energía determinada por la temperatura del sistema cuántico.

Para un sistema cuántico realizado con iones atrapados, los iones pueden inicializarse mediante bombeo óptico utilizando un láser, que transfiere de manera determinista los iones a uno de los dos estados cuánticos base de un qubit. Esto reduce la entropía y, por tanto, supone un enfriamiento de los estados internos.

Para un sistema cuántico realizado con átomos fríos, el estado cuántico inicial puede prepararse excitando átomos que se encuentran en su estado básico a un estado Rydberg con una gran desintonía.

Para un sistema cuántico realizado con Centros NV, los Centros NV pueden ser abordados individualmente utilizando técnicas estándar de microscopía óptica confocal. La inicialización y la medición pueden realizarse mediante excitación óptica resonante o no resonante.

Un Hamiltoniano de corto alcance tal como se describe en el presente documento, como por ejemplo el primer Hamiltoniano de corto alcance o el segundo Hamiltoniano de corto alcance, puede entenderse como un Hamiltoniano que representa interacciones de la pluralidad de qubits, en el que no se producen interacciones entre qubits que están distanciados entre sí por una distancia mayor que una distancia de corte de interacción. La distancia de corte de la interacción puede ser una distancia constante. La distancia de corte de interacción puede ser mucho menor que una distancia qubit máxima entre los qubits de la pluralidad de qubits. Por ejemplo, la distancia de corte de interacción puede ser igual o inferior al 30 % de la distancia máxima entre qubits, en particular igual o inferior al 20 %, más particularmente igual o inferior al 10 %. Para una pluralidad de qubits dispuestos según un entramado, un Hamiltoniano de corto alcance puede ser un Hamiltoniano de alcance r , en el que no se producen interacciones entre los qubits que están distanciados entre sí por una distancia mayor que r veces una distancia elemental (constante de entramado) del entramado. En ella, r puede ser de 1 a 5, por ejemplo, $r = \sqrt{2}, 2, 3, 4$ o 5. La noción de distancia elemental de un entramado según las realizaciones descritas en el presente documento se ilustra a continuación en referencia, por ejemplo, a las figuras 8 y 9.

Independientemente del número de qubits del sistema cuántico, un Hamiltoniano de plaqueta y un Hamiltoniano de par vecino más cercano del sistema cuántico, como se describe en el presente documento, se considerarán Hamiltonianos de corto alcance.

5 Un ejemplo de Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano de un solo cuerpo. Para un Hamiltoniano de cuerpo único, la distancia de corte de interacción puede considerarse cero, ya que no hay interacciones entre grupos de dos o más qubits, sino sólo interacciones entre qubits individuales y una entidad externa, por ejemplo, un campo magnético o un campo eléctrico.

El Hamiltoniano inicial, como se describe en el presente documento, puede ser un Hamiltoniano de corto alcance.

10 Las figuras 8 y 9 muestran otros ejemplos de Hamiltonianos de corto alcance para realizaciones en las que la pluralidad de qubits 100 está dispuesta según un entramado cuadrado bidimensional 120, y se encuentran en posiciones de nodos del entramado cuadrado bidimensional que forman una porción triangular del entramado cuadrado bidimensional. En aras de la concreción, pero sin pretender limitar el alcance, el entramado cuadrado bidimensional ejemplar 120 mostrado en las figuras 8 y 9 incluye 55 qubits dispuestos en triángulo dentro de un entramado cuadrado de 10 x 10 que comprende 10 filas y 10 columnas. Cuando se atraviesa cualquier fila de qubits del entramado bidimensional 120 a lo largo de la dirección x 310, por ejemplo, la fila 391 indicada por las líneas de puntos, los qubits consecutivos de la fila se disponen a una distancia elemental D entre sí, que también se denomina constante de entramado en la dirección x. La distancia elemental D se indica con el número de referencia 350. De forma similar, cuando se atraviesa cualquier columna de qubits del entramado bidimensional 120 a lo largo de la dirección y 320, por ejemplo la columna 392, los qubits consecutivos de la columna están a una distancia elemental, que también se denomina constante de entramado en la dirección y. En las figuras. 8 y 9, las distancias elementales (constantes de entramado) en la dirección x y en la dirección y son las mismas. Sin embargo, las constantes de entramado en la dirección x y en la dirección y también podrían ser diferentes. Como se muestra, la dirección x 310 es perpendicular a la dirección y 320. La distancia qubit máxima de la pluralidad de qubits 100 mostrada en las figura 8 y figura 9 es la distancia entre los qubits 301 y 302. La distancia máxima entre qubits es igual a $(9\sqrt{2})D$.

25 Un ejemplo de Hamiltoniano de corto alcance descrito con referencia a la figura 8 es un Hamiltoniano de par vecino más cercano. Un Hamiltoniano de par vecino más cercano puede implicar sólo interacciones entre pares de qubits vecinos en el entramado bidimensional 120, donde un par de qubits vecinos puede referirse a un par de qubits distanciados entre sí a la distancia elemental D. Los qubits 362 y 364 mostrados en la figura 8 forman un ejemplo de par de qubits vecinos. Los qubits 362 y 364 mostrados en la figura 8 forman un ejemplo de un par de qubits vecinos.

30 Un Hamiltoniano de par vecino más cercano puede ser la suma de una pluralidad de Hamiltonianos de sumando, donde cada Hamiltoniano de sumando representa una interacción entre un par de qubits vecinos. Para un Hamiltoniano de par vecino más cercano descrito en referencia a la figura 8, la distancia de corte de interacción es igual a la distancia elemental D. En consecuencia, la distancia de corte de interacción es mucho menor en comparación con la distancia máxima de qubit, a saber, la distancia de corte de interacción D es inferior al 10 % de la distancia máxima de qubit.

35 Un ejemplo de Hamiltoniano de corto alcance descrito con referencia a la figura 9 es un Hamiltoniano de plaqueta. En la figura 9, 55 qubits mostrados como círculos negros están de nuevo dispuestos en un entramado cuadrado bidimensional 120 y forman un triángulo en él. Una plaqueta del entramado cuadrado bidimensional 120 es un cuadrado elemental del entramado cuadrado bidimensional 120, como se ilustra en la figura 9 con el número de referencia 370. La plaqueta 370 comprende qubits 371, 372, 373 y 374, en los que el qubit 371 está dispuesto a la distancia elemental D del qubit 372 y del qubit 374, y en los que el qubit 373 también está dispuesto a la distancia elemental D de los qubits 372 y 374. Además, los qubits auxiliares mostrados con rectángulos negros se añaden en otra línea para completar las plaquetas de los qubits. Por ejemplo, el qubit auxiliar 305 completa la plaqueta de qubits 302, 303 y 304. Los qubits auxiliares pueden prepararse en un estado cuántico específico, por ejemplo, $|1\rangle$. Para esta geometría de entramado, un Hamiltoniano de plaqueta puede implicar únicamente interacciones entre grupos de cuatro qubits, o grupos de tres qubits y un qubit auxiliar, correspondientes a plaquetas del entramado cuadrado bidimensional 120. Un Hamiltoniano de plaqueta puede ser la suma de una pluralidad de Hamiltonianos de sumando. Cada Hamiltoniano sumando puede representar una interacción correspondiente a una plaqueta de qubits y un qubit auxiliar. Otra posibilidad es no utilizar qubits auxiliares, y entonces el Hamiltoniano de la plaqueta incluye Hamiltonianos de sumandos que describen interacciones entre sólo tres qubits. Para un Hamiltoniano de plaqueta descrito con referencia a la figura 9, la distancia de corte de interacción es $\sqrt{2}D$ ya que la distancia máxima entre dos qubits en una plaqueta es $\sqrt{2}D$. Por ejemplo, la distancia entre los qubits 371 y 373 es $\sqrt{2}D$. En consecuencia, la distancia de corte de la interacción es mucho menor en comparación con la distancia máxima de los qubits, a saber, la distancia de corte de la interacción $\sqrt{2}D$ es inferior al 12 % de la distancia máxima de los qubits.

La pluralidad de qubits puede disponerse según un entramado bidimensional. Un Hamiltoniano de corto alcance como el descrito en el presente documento, como por ejemplo el primer Hamiltoniano de corto alcance y/o el segundo Hamiltoniano de corto alcance, puede implicar interacciones entre grupos de cuatro qubits correspondientes a plaquetas del entramado bidimensional. Un Hamiltoniano de corto alcance puede ser un Hamiltoniano de plaqueta.

60 Para un sistema cuántico que incluye una pluralidad de qubits superconductores, se puede realizar un Hamiltoniano

de plaqueta utilizando una pluralidad de qubits auxiliares, en el que un qubit auxiliar puede estar dispuesto dentro de cada plaqueta, por ejemplo, en el centro de cada plaqueta. Las interacciones entre qubits de la forma $K_{km} \sigma_z^{(k)} \sigma_z^{(m)}$ pueden realizarse mediante una unidad de acoplamiento, por ejemplo, una unidad de acoplamiento inductivo, según se describe en el presente documento. La unidad de acoplamiento incluye un dispositivo superconductor de interferencia cuántica. La aplicación de un sesgo de flujo magnético ajustable al dispositivo superconductor de interferencia cuántica permite sintonizar el coeficiente K_{km} . Un Hamiltoniano del sumando del Hamiltoniano de la plaqueta puede entonces realizarse por $H_{sr,p} = C(\sigma_z^{(1)} + \sigma_z^{(2)} + \sigma_z^{(3)} + \sigma_z^{(4)} - 2\sigma_z^{(p)} - 1)^2$, que incluye sólo interacciones por pares de la forma $\sigma_z^{(k)} \sigma_z^{(m)}$ y términos de cuerpo único $\sigma_z^{(1)}$ correspondientes a las diferencias de energía impuestas entre los estados de base cuántica $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Aquí, $\sigma_z^{(p)}$ representa el qubit ancilla. El Hamiltoniano de corto alcance es una suma de los Hamiltonianos sumandos $H_{sr,p}$. En las realizaciones que incluyen qubits auxiliares, se añade al Hamiltoniano inicial un Hamiltoniano de cuerpo único de la forma $h \sum_p \sigma_x^{(p)}$ para la pluralidad de qubits auxiliares.

Alternativamente, se puede realizar un Hamiltoniano de plaqueta sin qubits auxiliares, por ejemplo, utilizando dispositivos superconductores de tres islas como qubits de transmón. Integrando dos dispositivos de interferencia cuántica superconductores adicionales en la unidad de acoplamiento y acoplando capacitivamente los cuatro qubits de una plaqueta a un resonador coplanar, se puede realizar un Hamiltoniano sumando de la forma $-C\sigma_z^{(1)}\sigma_z^{(2)}\sigma_z^{(3)}\sigma_z^{(4)}$. El coeficiente de acoplamiento C puede sintonizarse mediante polarizaciones de flujo magnético dependientes del tiempo a través de los dos dispositivos de interferencia cuántica superconductores adicionales.

Para un sistema cuántico realizado con iones atrapados, las interacciones entre dos iones se transmiten a través de un bus de fonones. Para ello, se utilizan láseres o microondas desintonizados con respecto a la transición de banda azul y/o roja de los fonones. La potencia del láser y la desintonización permiten ajustar la intensidad de la interacción. También pueden utilizarse interacciones directas a través de excitaciones Rydberg.

Para un sistema cuántico realizado con átomos fríos, las interacciones entre qubits pueden ser controladas por desintonización de un láser que excita por láser átomos d . En este caso, el Hamiltoniano es un Hamiltoniano de cuerpo d . Los Hamiltonianos de Plaquette pueden implementarse a partir de interacciones d -cuerpo o a partir de qubits auxiliares con interacciones de dos cuerpos.

Para un sistema cuántico realizado con puntos cuánticos, una interacción entre dos qubits está regulada por un gradiente de campo eléctrico y un campo magnético. Un Hamiltoniano de corto alcance puede realizarse con secuencias de pulsos y campos magnéticos. Se puede realizar un Hamiltoniano de plaqueta utilizando un qubit auxiliar adicional con el Hamiltoniano de corto alcance actuando sobre todos los pares de la plaqueta.

Para un sistema cuántico realizado con centros NV, las interacciones entre los centros NV pueden transmitirse acoplándolos a campos de luz.

Las realizaciones descritas en el presente documento incluyen la noción de un Hamiltoniano d -cuerpo. Un Hamiltoniano de cuerpo d puede entenderse como un Hamiltoniano que representa las interacciones de la pluralidad de qubits, en el que no se producen interacciones conjuntas entre grupos que comprenden $d+1$ o más qubits. Un Hamiltoniano d -cuerpo puede implicar interacciones entre grupos que comprenden d o menos qubits. Un Hamiltoniano de cuerpo d puede ser la suma de una pluralidad de Hamiltonianos de sumandos, donde cada Hamiltoniano de sumandos representa una interacción conjunta entre un grupo de d qubits o menos.

Es ventajoso tener un Hamiltoniano que sea un Hamiltoniano d -cuerpo con d pequeño, por ejemplo $d = 4$, ya que las interacciones correspondientes entre los qubits pueden ser diseñadas más fácilmente comparadas con Hamiltonianos d -cuerpo con d más grandes.

Por ejemplo, un Hamiltoniano de un solo cuerpo, como se describe en el presente documento, puede ser considerado como un Hamiltoniano d -cuerpo con $d = 1$. Como ejemplo adicional, un Hamiltoniano de par vecino más cercano, como se describe en el presente documento, puede ser considerado como un Hamiltoniano de cuerpo d con $d = 2$. Como ejemplo adicional, un Hamiltoniano de plaqueta, como se describe en el presente documento, puede ser considerado como un Hamiltoniano de cuerpo d con $d = 4$.

Un Hamiltoniano de corto alcance como el descrito aquí, tal como por ejemplo el primer Hamiltoniano de corto alcance y/o el segundo Hamiltoniano de corto alcance, puede ser un Hamiltoniano de cuerpo d , donde d puede ser 2, 3, 4, 5, 6, 7 u 8. Al menos uno del primer y segundo Hamiltonianos de corto alcance puede ser un Hamiltoniano de cuerpo d , donde $d = 4$. El valor de d puede depender de la geometría del entramado. Por ejemplo, para un entramado hexagonal, una plaqueta implicaría seis qubits, y un Hamiltoniano de plaqueta podría ser un Hamiltoniano de 6 cuerpos.

El Hamiltoniano inicial, como se describe en el presente documento, puede ser un Hamiltoniano d -cuerpo con d siendo 1, 2, 3 o 4.

Al menos uno del primer y segundo Hamiltonianos de corto alcance puede ser un Hamiltoniano de cuerpo d , donde d puede ser independiente del problema computacional. La distancia de corte de interacción del segundo Hamiltoniano de corto alcance puede ser independiente del problema computacional. Al menos uno del primer y segundo hamiltonianos de corto alcance puede ser independiente del problema computacional.

5 Cuando el parámetro d del primer Hamiltoniano de corto alcance y del segundo Hamiltoniano de corto alcance es independiente del problema computacional, esto significa que el cómputo puede realizarse con el mismo dispositivo de procesamiento cuántico independientemente del problema computacional codificado. Si un Hamiltoniano de corto alcance es independiente del problema computacional, se proporciona la ventaja adicional de que las interacciones entre los qubits determinadas por el Hamiltoniano de corto alcance no necesitan cambiarse para diferentes problemas computacionales.

10 Como se describe en el presente documento, el problema computacional puede tener un tamaño. El Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y el segundo Hamiltoniano de corto alcance. Para otro problema de cálculo, el Hamiltoniano final correspondiente puede ser la suma de otro Hamiltoniano del problema y otro segundo Hamiltoniano de corto alcance. Si el tamaño del problema computacional es el mismo que el tamaño del problema computacional adicional, el segundo Hamiltoniano de corto alcance adicional puede ser el mismo que el segundo Hamiltoniano de corto alcance. Si el tamaño del problema computacional es diferente del tamaño del problema computacional adicional, el segundo Hamiltoniano de corto alcance puede ser diferente del segundo Hamiltoniano de corto alcance adicional. Por ejemplo, con referencia al modelo de espín de Ising descrito anteriormente, el problema computacional puede referirse a un primer problema de modelo de espín de Ising para N espines con un primer conjunto de coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo, y el problema computacional adicional puede referirse a un segundo problema de modelo de espín de Ising, también para N espines, con un segundo conjunto de coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo diferentes del primer conjunto de coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo. En este caso, los tamaños del primer y segundo problema del modelo de espín de Ising pueden considerarse iguales al número N . Según las realizaciones, el segundo Hamiltoniano de corto alcance para el primer problema del modelo de espín de Ising es el mismo que el segundo Hamiltoniano de corto alcance para el segundo problema del modelo de espín de Ising.

15 Las realizaciones descritas en el presente documento incluyen la noción de un Hamiltoniano intermedio. El Hamiltoniano intermedio es una combinación lineal del Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y el primer Hamiltoniano de corto alcance. El coeficiente del primer Hamiltoniano de corto alcance de la combinación lineal (por ejemplo, el coeficiente "c" mostrado en la figura 3) puede ser distinto de cero. Adicional o alternativamente, el coeficiente del Hamiltoniano inicial en la combinación lineal (por ejemplo, el coeficiente "a" mostrado en la figura 3) puede ser distinto de cero. Adicional o alternativamente, el coeficiente del Hamiltoniano final en la combinación lineal (por ejemplo, el coeficiente "b" mostrado en la figura 3) puede ser distinto de cero.

20 El Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y el primer Hamiltoniano de corto alcance pueden ser operadores linealmente independientes. En particular, el primer Hamiltoniano de corto alcance puede no ser expresable como una combinación lineal del Hamiltoniano inicial y el Hamiltoniano final.

25 El primer Hamiltoniano de corto alcance puede tener la forma $H^{SR1} = \sum_j X_j$, donde cada sumando X_j es un Hamiltoniano que actúa sobre un grupo respectivo de qubits o un qubit individual respectivo. Cada sumando Hamiltoniano X_j representa una interacción entre un grupo correspondiente de qubits o, en caso de que X_j sea un Hamiltoniano que actúa sobre un solo qubit, una interacción entre el qubit individual respectivo y una entidad externa (por ejemplo, un campo magnético). Del mismo modo, el Hamiltoniano inicial y el Hamiltoniano final pueden escribirse como una suma de Hamiltonianos sumandos, donde cada Hamiltoniano sumando representa una interacción entre un grupo de qubits o entre un único qubit y una entidad externa. Según las realizaciones descritas en el presente documento, el primer Hamiltoniano de corto alcance puede incluir uno o más Hamiltonianos sumandos X_j que no están presentes ni en el Hamiltoniano inicial ni en el Hamiltoniano final. El primer Hamiltoniano de corto alcance puede incluir un primer Hamiltoniano sumando, en el que ni el Hamiltoniano inicial ni el Hamiltoniano final tienen un Hamiltoniano sumando que sea igual o proporcional al primer Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano de primer corto alcance. El primer Hamiltoniano de corto alcance puede representar una o más interacciones, ya sea entre un grupo de qubits o entre un único qubit y una entidad externa, que no están presentes ni en el Hamiltoniano inicial ni en el Hamiltoniano final.

30 Por ejemplo, como se describe en el presente documento, el Hamiltoniano inicial puede tener la forma $h \sum_k \sigma_x^{(k)}$ y el Hamiltoniano final puede tener la forma $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)} + \sum_1 C_i$, donde cada C_i es un producto de cuatro operadores $\sigma_z^{(k)}$ correspondientes a una respectiva plaqueta de un entramado bidimensional. En particular, los únicos hamiltonianos sumandos presentes en el Hamiltoniano inicial y en el Hamiltoniano final son hamiltonianos sumandos de la forma $\sigma_x^{(k)}$, de la forma $\sigma_z^{(k)}$ o de la forma C_i (prescindiendo de los coeficientes h y J_k de los hamiltonianos $\sigma_x^{(k)}$ y $\sigma_z^{(k)}$, respectivamente). En tal caso, el primer Hamiltoniano de corto alcance puede ser, por ejemplo, $H^{SR1} = \sum_k b_k \sigma_y^{(k)}$. En consecuencia, ninguno de los Hamiltonianos sumandos $\sigma_y^{(k)}$ del segundo Hamiltoniano de corto alcance está presente como (o proporcional a) un Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial o del Hamiltoniano final. En otro ejemplo, el primer Hamiltoniano de corto alcance puede tener la forma $H^{SR1} = \sum_j b_j Y_j$, donde cada Y_j es un operador de plaqueta que incluye un producto de cuatro operadores de Pauli $\sigma_y^{(k)}$, y cada b_j es un coeficiente. También en este caso, ninguno de los Hamiltonianos sumandos Y_j del segundo Hamiltoniano de corto alcance está presente como (o proporcional a) un Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial o del Hamiltoniano final.

35 El primer Hamiltoniano de corto alcance, como se describe en el presente documento, puede ser un Hamiltoniano de un solo cuerpo. El primer Hamiltoniano de corto alcance puede ser un Hamiltoniano de cuerpo único que no conmuta con el Hamiltoniano del problema y/o que no conmuta con el Hamiltoniano inicial. El primer Hamiltoniano de corto alcance puede tener la forma $\sum_k b_k \sigma_y^{(k)}$, donde cada $\sigma_y^{(k)}$ es un operador de Pauli que actúa únicamente sobre el qubit

k y donde cada b_k es un coeficiente. El operador de Pauli $\sigma_y^{(k)}$ no conmuta, sobre todo anticonmuta, con cada uno de los operadores de Pauli $\sigma_z^{(k)}$ y $\sigma_x^{(k)}$. El operador de Pauli $\sigma_y^{(k)}$ puede ser un operador de Pauli correspondiente a una tercera dirección espacial ("dirección y"). La tercera dirección espacial puede ser ortogonal a la primera dirección espacial y a la segunda dirección espacial, tal como se describe en el presente documento.

5 Un primer Hamiltoniano de corto alcance de la forma $\sum_k b_k \sigma_y^{(k)}$ proporciona la ventaja de que $\sigma_y^{(k)}$ anticomparte con los términos $\sigma_z^{(k)}$ y $\sigma_x^{(k)}$ del Hamiltoniano inicial y del Hamiltoniano final, respectivamente. En consecuencia, el primer Hamiltoniano de corto alcance añade un nuevo grado de libertad. Se dispone de un espacio más amplio de posibles "trayectorias" para evolucionar del Hamiltoniano inicial al final.

10 En sistemas atómicos y trampas de iones, puede realizarse un Hamiltoniano de corto alcance de la forma $\sum_k b_k \sigma_y^{(k)}$, por ejemplo, proporcionando pulsos láser dependientes del tiempo. En los qubits superconductores, como por ejemplo los qubits de flujo o los qubits de transmon, este Hamiltoniano de corto alcance puede realizarse experimentalmente con conducción de microondas.

15 El procedimiento según las realizaciones descritas en el presente documento puede incluir inicializar el sistema cuántico en un estado cuántico inicial enfriando el sistema cuántico hacia un estado de tierra del Hamiltoniano inicial. El enfriamiento puede realizarse mediante una unidad de refrigeración como la descrita en el presente documento. El estado básico del Hamiltoniano inicial es un estado cuántico del sistema cuántico que minimiza la energía para el Hamiltoniano inicial. El estado fundamental del Hamiltoniano inicial es un estado propio del Hamiltoniano inicial, en particular un estado propio con un valor propio mínimo. El estado fundamental del Hamiltoniano inicial es un estado del sistema cuántico a temperatura cero. El enfriamiento del sistema cuántico hacia el estado fundamental del Hamiltoniano inicial puede permitir acercarse al estado fundamental del Hamiltoniano inicial. El estado cuántico inicial puede aproximarse al estado fundamental del Hamiltoniano inicial.

El Hamiltoniano inicial puede ser independiente del problema computacional.

25 El procedimiento descrito en el presente documento incluye la evolución del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio, que puede realizarse después de inicializar el sistema cuántico en el estado cuántico inicial. La evolución del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio puede realizarse mediante una unidad de evolución de hamiltonianos, tal como se describe en el presente documento.

El Hamiltoniano inicial puede evolucionar al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio según un Hamiltoniano de interpolación.

30 Un Hamiltoniano de interpolación puede ser un Hamiltoniano dependiente del tiempo. En el momento inicial, el Hamiltoniano de interpolación puede ser igual al Hamiltoniano inicial. En el tiempo intermedio, el Hamiltoniano de interpolación puede ser igual al Hamiltoniano intermedio. En el momento final, el Hamiltoniano de interpolación puede ser igual al Hamiltoniano final.

35 Un Hamiltoniano de interpolación puede proporcionar una evolución gradual o continua desde el Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final. La evolución gradual o continua puede incluir el cambio gradual de un parámetro ajustable, por ejemplo, un parámetro de tiempo t como se describe en el presente documento, del Hamiltoniano de interpolación desde un valor inicial del parámetro ajustable hasta un valor final del parámetro ajustable.

Un Hamiltoniano de interpolación puede ser tal que, para cada valor del parámetro de tiempo t del Hamiltoniano de interpolación entre el tiempo inicial y el tiempo final, el Hamiltoniano de interpolación es un Hamiltoniano de corto alcance, particularmente un Hamiltoniano de cuerpo d , más particularmente un Hamiltoniano de cuerpo único.

40 Por ejemplo, un Hamiltoniano de interpolación puede tener la forma $H(t) = A(t) H^{\text{inicial}} + B(t) H^{\text{final}} + H^{\text{SR}}(t)$, donde $A(t)$ y $B(t)$ son coeficientes de interpolación y donde $H^{\text{SR}}(t)$ es un Hamiltoniano de corto alcance dependiente del tiempo, particularmente un Hamiltoniano de cuerpo d dependiente del tiempo, más particularmente un Hamiltoniano de cuerpo único dependiente del tiempo. Por ejemplo, $H^{\text{SR}}(t)$ puede ser un Hamiltoniano de cuerpo único dependiente del tiempo que tenga la forma $H^{\text{SR}}(t) = \sum_k H_k(t)$, donde cada sumando $H_k(t)$ es un Hamiltoniano dependiente del tiempo que actúa únicamente sobre el qubit k .

50 El Hamiltoniano inicial puede evolucionar hacia el Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio para evolucionar el sistema cuántico hacia un estado terreno del Hamiltoniano final. Un estado básico del Hamiltoniano final es un estado cuántico del sistema cuántico que minimiza la energía para el Hamiltoniano final. Un estado básico del Hamiltoniano final es un estado propio del Hamiltoniano final, en particular un estado propio con un valor propio mínimo. Puesto que el problema computacional está codificado en el Hamiltoniano del problema y puesto que el Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y el segundo Hamiltoniano de corto alcance, un estado terreno del Hamiltoniano final contiene información sobre el problema computacional y/o puede codificar una solución del problema computacional.

55 Un estado terreno del Hamiltoniano final puede ser un estado del sistema cuántico a temperatura cero. Sin querer ceñirnos a ninguna teoría en particular, según consideraciones en el campo de la física cuántica, se considera

- imposible que un sistema cuántico alcance una temperatura de cero absoluto. Sin embargo, la evolución del sistema cuántico hacia el estado fundamental del Hamiltoniano final, incluyendo, por ejemplo, el enfriamiento del sistema cuántico a una temperatura de funcionamiento $T_{\text{máx}}$, puede permitir acercarse al estado fundamental del Hamiltoniano final. La temperatura de funcionamiento $T_{\text{máx}}$ puede depender en gran medida del tipo de qubits utilizados en el sistema cuántico. Por ejemplo, para qubits superconductores, $T_{\text{máx}}$ puede ser 50 mK o inferior, preferiblemente 1 mK o inferior. El Hamiltoniano inicial puede evolucionar hacia el Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio para aproximarse a un estado fundamental del Hamiltoniano final. Tras haber evolucionado el Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio, el sistema cuántico puede encontrarse en un estado cuántico final. El estado cuántico final puede ser un estado del sistema cuántico a la temperatura de funcionamiento $T_{\text{máx}}$ o a una temperatura inferior, es decir, puede ser un estado térmico del Hamiltoniano final a la temperatura de funcionamiento o a una temperatura inferior. En consecuencia, el estado cuántico final puede aproximarse al estado fundamental del Hamiltoniano final. El estado cuántico final puede contener información sobre el estado fundamental del Hamiltoniano final. El estado cuántico final puede contener información sobre la solución del problema computacional.
- El sistema cuántico puede enfriarse, por ejemplo, mediante una unidad de refrigeración como la descrita en el presente documento, a la temperatura de funcionamiento $T_{\text{máx}}$ o a una temperatura inferior. La temperatura de funcionamiento puede ser una temperatura distinta de cero. El sistema cuántico puede mantenerse a una temperatura de 50 mK o inferior, en particular 1 mK o inferior mientras el Hamiltoniano inicial evoluciona hacia el Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio.
- El Hamiltoniano inicial puede evolucionar al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio por un proceso cuántico diabático.
- El término "proceso cuántico diabático" se utiliza aquí para distinguirlo de los procesos o evoluciones cuánticos adiabáticos. Un proceso cuántico diabático puede entenderse como un proceso cuántico que no es adiabático. Se entiende que ningún proceso físico de la vida real es adiabático en un sentido exacto y teórico, ya que la noción teórica "adiabático" se refiere a una situación idealizada de un proceso infinitamente lento. Es decir, al adoptar la definición teórica del término "adiabático", todo proceso físico puede considerarse un proceso no adiabático, o diabático. Sin embargo, en el contexto de la presente divulgación, los términos "adiabático" y "diabático" se entenderán, no en un sentido teórico, sino en un sentido técnico experimentalmente realista, a saber, para distinguir entre las evoluciones cuánticas que se realizan a una velocidad que respeta el límite de velocidad impuesto por el teorema adiabático y las evoluciones cuánticas que se realizan más rápido que dicho límite de velocidad.
- Un proceso adiabático, o evolución, de un primer Hamiltoniano de un sistema cuántico a un segundo Hamiltoniano del sistema cuántico puede entenderse como una evolución que procede a una velocidad inferior al límite de velocidad impuesto por el teorema adiabático de la mecánica cuántica para asegurar que el estado del sistema cuántico está bien aproximado por el estado fundamental instantáneo del sistema cuántico en todo momento de la evolución. Una evolución adiabática puede ser una evolución del sistema cuántico según un Hamiltoniano dependiente del tiempo, en el que la tasa de cambio del Hamiltoniano dependiente del tiempo es mucho menor que la brecha de energía entre el estado básico y el primer estado excitado del Hamiltoniano dependiente del tiempo en todos los momentos de la evolución. Sin querer ceñirnos a ninguna teoría en particular, según la teoría de la mecánica cuántica la probabilidad de que un sistema cuántico se encuentre en un estado fundamental de un Hamiltoniano dependiente del tiempo viene dada, al menos en un sentido aproximado, por la fórmula de Landau-Zener. Según esta fórmula, la probabilidad de una transición de un estado básico a un estado excitado del Hamiltoniano aumenta exponencialmente con la velocidad de la evolución temporal y disminuye exponencialmente con la brecha energética entre el estado básico y el primer estado excitado. Las evoluciones adiabáticas pueden surgir en enfoques para realizar computación cuántica, como por ejemplo el recocido cuántico.
- Un proceso o evolución cuántica diabática de un primer Hamiltoniano a un segundo Hamiltoniano puede entenderse como una evolución que procede a una velocidad superior al límite de velocidad impuesto por el teorema adiabático de la mecánica cuántica, por ejemplo, en al menos un 10 %. Una evolución diabática puede ser una evolución del sistema cuántico según un Hamiltoniano dependiente del tiempo, en el que la tasa de cambio del Hamiltoniano dependiente del tiempo es aproximadamente igual o mayor que la brecha de energía entre el estado básico y el primer estado excitado del Hamiltoniano dependiente del tiempo en todos los momentos de la evolución. Un proceso o evolución cuántica diabática puede entenderse como un proceso en el que la probabilidad de transición de un estado básico a un estado de salida es del 5 % o superior, en particular del 10 % o superior. Incluso si tal transición ocurriera, por ejemplo al evolucionar el Hamiltoniano inicial 460 diabáticamente en el Hamiltoniano final 480 a través del Hamiltoniano intermedio 470, el estado de tierra del Hamiltoniano final 480 todavía puede ser alcanzado debido a una transición de vuelta al estado de tierra instantáneo.
- En algunas implementaciones, un proceso o evolución cuántica diabática puede ser un proceso o evolución cuántica contradiabática. Un proceso contradiabático puede entenderse como un proceso diabático en el que un Hamiltoniano inicial evoluciona a un Hamiltoniano final de acuerdo con un Hamiltoniano de interpolación, en el que el Hamiltoniano de interpolación es una combinación lineal del Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y un Hamiltoniano adicional. El Hamiltoniano adicional, también llamado "Hamiltoniano contradiabático", puede seleccionarse de forma que la probabilidad de encontrar el sistema cuántico en un estado fundamental del Hamiltoniano final (la "probabilidad de

estado fundamental") al final del proceso sea grande en comparación con un proceso en el que no se incluya el Hamiltoniano adicional. En virtud del Hamiltoniano contradiabático, un proceso contradiabático puede alcanzar el estado fundamental del Hamiltoniano final más rápidamente que un proceso adiabático, es decir, el estado fundamental del Hamiltoniano final puede alcanzarse evolucionando a una velocidad superior al límite de velocidad impuesto por el teorema adiabático. Los inventores han descubierto que el Hamiltoniano intermedio descrito en el presente documento, por ejemplo, un Hamiltoniano de cuerpo único de la forma $\sum_k b_k \sigma_y^{(k)}$, proporciona una elección adecuada, al menos en un sentido aproximado, para realizar un Hamiltoniano contradiabático.

El Hamiltoniano inicial puede evolucionar diabáticamente hacia el Hamiltoniano intermedio. El Hamiltoniano intermedio puede evolucionar diabáticamente hacia el Hamiltoniano final. El Hamiltoniano inicial puede evolucionar al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio según un Hamiltoniano de interpolación. La evolución determinada por el Hamiltoniano de interpolación puede ser una evolución diabática.

El procedimiento según las realizaciones descritas en el presente documento incluye la medición de al menos una porción de la pluralidad de qubits para obtener una lectura del sistema cuántico. Según algunas realizaciones, se mide una parte de la pluralidad de qubits, de modo que no se miden todos los qubits de la pluralidad de qubits. La porción de la pluralidad de qubits puede comprender 70 % o menos de la pluralidad de qubits, en particular 60 % o menos, más particularmente 50 % o menos. Según algunas realizaciones, si el número total de qubits en la pluralidad de qubits se denota por N , entonces el número de qubits en la porción escala según \sqrt{N} .

La medición de al menos una porción de la pluralidad de qubits puede incluir la medición de cada qubit en la al menos una porción individualmente. La medición de la al menos una porción puede incluir la medición de un operador de Pauli, por ejemplo, el operador de Pauli σ_z , para cada uno de los qubits en la al menos una porción de los qubits. La medición de al menos una porción puede incluir la realización de una medición de dos resultados para cada qubit en la al menos una porción de la pluralidad de qubits. Una medición de dos resultados puede proporcionar uno de los dos resultados posibles, por ejemplo, 0 o 1. Al menos una parte de los qubits puede medirse mediante un dispositivo de medición como el descrito en el presente documento.

La medición de al menos una porción puede proporcionar la lectura del sistema cuántico. La lectura puede tener forma de información clásica, representada por una pluralidad de bits clásicos. La lectura puede revelar información sobre el estado fundamental del Hamiltoniano final. La lectura puede proporcionar información sobre una solución, por ejemplo, una solución de prueba, una solución verdadera o un conjunto de variables testigo, al problema computacional. La lectura puede ser una solución al problema computacional.

La al menos una porción de la pluralidad de qubits puede medirse para obtener una lectura del sistema cuántico en o después del tiempo final.

Para un sistema cuántico que incluye una pluralidad de N qubits superconductores, los estados de qubit $|0\rangle$ y $|1\rangle$ para la pluralidad de qubits pueden medirse con alta fidelidad utilizando un dispositivo de medición que incluye una pluralidad de dispositivos de interferencia cuántica superconductores, en particular N dispositivos de interferencia cuántica superconductores de CC hysteréticos y N cierres de dispositivos de interferencia cuántica superconductores de RF controlados por líneas de polarización, en los que el número de líneas de polarización escala según \sqrt{N} .

Para un sistema cuántico realizado con iones atrapados, puede realizarse una medición del sistema cuántico mediante espectroscopia de fluorescencia. De este modo, los iones son conducidos a una transición de corta duración si se encuentran en uno de los dos estados de espín. Como resultado, los iones en el estado impulsado emiten muchos fotones, mientras que los otros iones permanecen oscuros. Los fotones emitidos pueden ser registrados por cámaras CCD comerciales. La medición en cualquiera de las direcciones de la esfera de Bloch se consigue mediante pulsos qubit únicos apropiados antes de la espectroscopia de fluorescencia.

Para un sistema cuántico realizado con átomos fríos, los qubits pueden ser medidos realizando un barrido selectivo de átomos en estado básico e imágenes de fluorescencia con resoluciones de sitio único.

Para un sistema cuántico realizado con puntos cuánticos, los qubits pueden ser leídos a partir de una secuencia de impulsos por paso adiabático rápido.

El procedimiento según las realizaciones descritas en el presente documento incluye la determinación de una solución al problema computacional a partir de la lectura. La lectura puede proporcionarse a un sistema informático clásico, tal como se describe en el presente documento. El sistema informático clásico puede determinar o calcular la solución al problema computacional a partir de la lectura.

Computar una solución al problema computacional puede incluir computar una solución de prueba al problema computacional. Una solución de prueba puede ser o no una verdadera solución al problema computacional. Para las realizaciones según las cuales el problema computacional pertenece a la clase de complejidad NP, el cálculo de una solución al problema computacional puede incluir el cálculo de un conjunto de variables testigo, como se describe en el presente documento.

Para un problema computacional perteneciente a la clase de complejidad NP, por ejemplo un problema NP-completo,

la lectura de la medida puede incluir un conjunto de variables testigo del problema computacional.

5 El Hamiltoniano inicial puede evolucionar al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio según un primer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_1(t)$, donde t es una variable de tiempo. La lectura obtenida del sistema cuántico puede ser una primera lectura. La solución determinada al problema computacional puede ser una primera solución. El procedimiento según las realizaciones descritas en el presente documento puede incluir además la evolución (por ejemplo, mediante una unidad de evolución hamiltoniana como se describe en el presente documento) del Hamiltoniano inicial en el Hamiltoniano final según un segundo Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_2(t)$.

10 Evolucionando el Hamiltoniano inicial en el Hamiltoniano final según el segundo Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_2(t)$ puede ser seguido por: midiendo (por ejemplo, por un dispositivo de medida como descrito aquí) al menos una porción de la pluralidad de qubits para obtener una segunda lectura del sistema cuántico; determinando (por ejemplo, por un sistema de computación clásico como descrito aquí) una segunda solución al problema computacional de la segunda lectura; comparando (por ejemplo, por un sistema de computación clásico como descrito aquí) la primera solución con la segunda solución. mediante un sistema de computación clásico como el descrito en el presente documento) una segunda solución al problema computacional a partir de la segunda lectura; comparando (por ejemplo, mediante un sistema de computación clásico como el descrito en el presente documento) la primera solución con la segunda solución; y, basándose en la comparación, seleccionando un tercer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_3(t)$ para evolucionar el sistema cuántico hacia el Hamiltoniano final.

15 Las nociones "Hamiltoniano de interpolación" y "Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo" se utilizan aquí como sinónimos.

20 El segundo Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_2(t)$ es diferente del primer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_1(t)$.

25 La evolución del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final de acuerdo con el segundo Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo puede incluir la evolución del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través de otro Hamiltoniano intermedio. El Hamiltoniano intermedio adicional puede ser una combinación lineal del Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y otro Hamiltoniano de corto alcance, por ejemplo, otro Hamiltoniano de cuerpo único. El Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y el Hamiltoniano adicional de corto alcance pueden ser operadores linealmente independientes.

30 El primer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_1(t)$ puede tener uno o más parámetros ajustables. El segundo Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_2(t)$ puede obtenerse a partir del primer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_1(t)$ ajustando uno o más parámetros ajustables. El tercer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_3(t)$ puede obtenerse a partir del primer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_1(t)$ o del segundo Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_2(t)$ ajustando uno o más parámetros ajustables. Los hamiltonianos de interpolación dependientes del tiempo primero, segundo y tercero pueden pertenecer a una misma familia de hamiltonianos dependientes del tiempo que están relacionados entre sí por un cambio de uno o más parámetros. Por ejemplo, puede proporcionarse una familia hamiltoniana $H_\alpha(t)$, en la que α es un parámetro ajustable. Para un primer valor del parámetro α , el Hamiltoniano $H_\alpha(t)$ puede ser igual al primer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo. Para un segundo valor del parámetro α , el Hamiltoniano $H_\alpha(t)$ puede ser igual al segundo Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo. Para un tercer valor del parámetro α , el Hamiltoniano $H_\alpha(t)$ puede ser igual al tercer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo.

35 Comparar la primera solución del problema computacional con la segunda solución del problema computacional puede incluir determinar cuál de la primera solución y la segunda solución es una mejor aproximación de una solución verdadera del problema computacional. Por ejemplo, si el problema computacional es un problema de modelo de espín de Ising, la primera solución y la segunda solución pueden proporcionarse en forma de una primera configuración de espines y una segunda configuración de espines, respectivamente, ambas de las cuales pueden ser soluciones candidatas para el estado fundamental del modelo de espín de Ising. La comparación de la primera solución con la segunda solución puede incluir la determinación de la energía de la primera configuración de espines, la determinación de la energía de la segunda configuración de espines y la comparación de la energía de la primera configuración de espines con la energía de la segunda configuración de espines. Por ejemplo, si la energía de la segunda configuración de espines es menor que la energía de la primera configuración de espines se puede considerar que la segunda configuración de espines es una mejor aproximación del estado básico del modelo de espín de Ising que la primera configuración de espines.

45 Basado en la comparación de la primera solución con la segunda solución, el tercer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo puede ser seleccionado. Por ejemplo, si se determina que la segunda solución es una mejor aproximación de una solución verdadera del problema computacional que la primera solución, el tercer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo puede seleccionarse de tal manera que el tercer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo se encuentre en la vecindad del segundo Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo. Por ejemplo, en el ejemplo relativo a la familia hamiltoniana $H_\alpha(t)$ comentado anteriormente, se puede elegir

que el tercer valor del parámetro α sea próximo al segundo valor del parámetro α .

El procedimiento según las realizaciones descritas en el presente documento puede incluir la evolución (por ejemplo, mediante una unidad de evolución hamiltoniana como se describe en el presente documento) del Hamiltoniano inicial en el Hamiltoniano final según el tercer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo $H_3(t)$.

5 El proceso de selección de un nuevo Hamiltoniano de interpolación basado en la comparación de soluciones del problema computacional resultante de Hamiltonianos de interpolación anteriores y la implementación del Hamiltoniano de interpolación seleccionado puede continuar iterativamente. En consecuencia, se proporciona un procedimiento iterativo para calcular soluciones al problema computacional, en el que el procedimiento incluye una optimización sobre el parámetro o parámetros ajustables de los Hamiltonianos de interpolación dependientes del tiempo
10 considerados. Por ejemplo, el procedimiento puede incluir una optimización sobre el parámetro α de la familia hamiltoniana $H_\alpha(t)$. En comparación con los enfoques que sólo implican un único Hamiltoniano de interpolación fijo, las realizaciones descritas en el presente documento proporcionan la ventaja de que permiten encontrar una mejor aproximación de una solución verdadera del problema computacional, o incluso encontrar la solución verdadera en sí.

15 Otro aspecto de las realizaciones descritas en el presente documento es que se proporciona una desconexión no homogénea (o "conducción no homogénea") del Hamiltoniano inicial, como se describe a continuación.

Como se describe en el presente documento, el Hamiltoniano inicial es un Hamiltoniano de cuerpo único que tiene la forma $H^{\text{inicial}} = \sum_k H^{(k)}$, donde cada término $H^{(k)}$ es un Hamiltoniano que actúa sobre el qubit k solamente. El procedimiento según las realizaciones descritas en el presente documento incluye la selección de uno de los qubits, digamos el qubit $k1$, por ejemplo mediante selección aleatoria. Se considera un Hamiltoniano intermedio que es, por
20 ejemplo, igual a

$$H^{\text{intermedio}} = H^{\text{inicial}} + b H^{\text{final}} - H^{(k1)}$$

donde b es un coeficiente. El Hamiltoniano intermedio $H^{\text{intermedio}}$ es, por tanto, una combinación lineal del Hamiltoniano inicial H^{inicial} , el Hamiltoniano final H^{final} y un primer Hamiltoniano de corto alcance (siendo el Hamiltoniano de corto alcance igual a $-H^{(k1)}$). El Hamiltoniano inicial evoluciona hacia el Hamiltoniano intermedio de modo que, en el $t_{\text{intermedio}}$
25 de tiempo intermedio, el Hamiltoniano es $H^{\text{intermedio}}$. Por ejemplo, el Hamiltoniano inicial evoluciona gradualmente hacia el Hamiltoniano intermedio de acuerdo con un Hamiltoniano de interpolación, tal como se describe en el presente documento. El Hamiltoniano intermedio $H^{\text{intermedio}}$ mostrado arriba es igual a $\sum_{k \neq k1} H^{(k)} + b H^{\text{final}}$, donde la suma corre sobre todos los qubits k que son diferentes de $k1$. En consecuencia, el Hamiltoniano $H^{(k1)}$ que actúa sobre el qubit $k1$ ya no está presente en el Hamiltoniano intermedio, mientras que todos los demás Hamiltonianos $H^{(k)}$ siguen estando
30 presentes. En otras palabras, en el tiempo intermedio $t_{\text{intermedio}}$, el Hamiltoniano $H^{(k1)}$ que actúa sobre el qubit $k1$ se ha desconectado selectivamente.

Continuando de esta manera, es posible desconectar individualmente, uno por uno, todos los Hamiltonianos sumandos $H^{(k)}$ del Hamiltoniano inicial. Para conseguirlo, el Hamiltoniano intermedio puede evolucionar hasta el Hamiltoniano final a través de varios hamiltonianos intermedios más, en los que se desconecta un conjunto cada vez mayor de
35 hamiltonianos sumandos $H^{(k)}$.

El Hamiltoniano inicial puede ser un Hamiltoniano de cuerpo único de la forma $\sum_k H^{(k)}$, donde cada sumando Hamiltoniano $H^{(k)}$ actúa sobre el qubit k solamente. La evolución del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio incluye la desconexión individual de un primer Hamiltoniano sumando $H^{(k1)}$ del Hamiltoniano inicial. El Hamiltoniano del primer sumando se desconecta gradualmente.

40 La evolución del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio incluye la desconexión inhomogénea del Hamiltoniano inicial. La desactivación no homogénea del Hamiltoniano inicial incluye: seleccionar un primer qubit de la pluralidad de qubits; desactivar gradualmente el Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el primer qubit; seleccionar un segundo qubit de la pluralidad de qubits, donde el segundo qubit es diferente del primer qubit; y desactivar gradualmente el Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el
45 segundo qubit. El primer qubit y/o el segundo qubit pueden seleccionarse aleatoriamente. El Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el primer qubit se desconecta individualmente. El Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el segundo qubit se desconecta individualmente.

La desconexión no homogénea del Hamiltoniano inicial puede incluir: seleccionar aleatoriamente qubits individuales de la pluralidad de qubits hasta que todos los qubits de la pluralidad de qubits hayan sido seleccionados; y, para cada qubit seleccionado, desconectar gradualmente el Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el qubit seleccionado, en el que el Hamiltoniano sumando puede desconectarse individualmente.

Las aproximaciones a la computación cuántica que no implican el Hamiltoniano intermedio como se describe en el presente documento pueden no permitir una desconexión individual de los Hamiltonianos sumandos del Hamiltoniano inicial. En particular, al realizar una interpolación de la forma $H(t) = (1-t) H^{\text{inicial}} + t H^{\text{final}}$, no se puede lograr una
55 desconexión individual de los hamiltonianos sumandos.

Una ventaja de conmutar individualmente los Hamiltonianos sumandos del Hamiltoniano inicial es que así se puede

evitar una transición de fase de primer orden. Esto da lugar a una brecha de energía mínima mayor durante la evolución del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final, en comparación con la desconexión simultánea de todos los hamiltonianos sumandos del Hamiltoniano inicial. Debido a la mayor brecha energética, aumenta el límite de velocidad impuesto por el teorema adiabático de la mecánica cuántica. Por consiguiente, una evolución (en particular una evolución adiabática) del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final puede realizarse más rápidamente permaneciendo en (o cerca de) un estado terreno del sistema cuántico en todo momento desde el tiempo inicial hasta el tiempo final. En consecuencia, el estado básico del Hamiltoniano final puede alcanzarse más rápidamente, de modo que la solución del problema computacional también puede determinarse más rápidamente.

De acuerdo con otra realización, se proporciona un aparato para computar soluciones a problemas computacionales, como por ejemplo el aparato 400 mostrado en la figura 1. El aparato incluye un sistema cuántico que comprende una pluralidad de qubits. El aparato incluye una unidad de enfriamiento, como por ejemplo la unidad de enfriamiento 410 mostrada en la figura 1, adaptada para enfriar el sistema cuántico hacia un estado de masa del sistema cuántico. El aparato incluye una unidad de evolución hamiltoniana, como por ejemplo la unidad de evolución hamiltoniana 430 mostrada en la figura 1, adaptada para evolucionar un Hamiltoniano inicial del sistema cuántico a un Hamiltoniano final del sistema cuántico a través de un Hamiltoniano intermedio del sistema cuántico. El Hamiltoniano intermedio es una combinación lineal del Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y un primer Hamiltoniano de corto alcance. El Hamiltoniano final es una suma de un Hamiltoniano del problema y un segundo Hamiltoniano de corto alcance, donde el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo que comprende una pluralidad de parámetros ajustables. El aparato incluye un dispositivo de medición, como por ejemplo el dispositivo de medición 440 mostrado en la figura 1, adaptado para medir al menos una parte de la pluralidad de qubits. El aparato incluye un sistema informático clásico, como por ejemplo el sistema informático clásico 450 mostrado en la figura 1, conectado a la unidad de evolución hamiltoniana y al dispositivo de medición.

La unidad de enfriamiento puede estar configurada para enfriar el sistema cuántico hacia un estado fundamental del Hamiltoniano inicial, como se describe en el presente documento. La unidad de refrigeración puede estar configurada para mantener el sistema cuántico a una temperatura de funcionamiento. La temperatura de funcionamiento adecuada depende en gran medida del tipo de qubits utilizados en el aparato. Por ejemplo, para los qubits superconductores, la temperatura de funcionamiento es de 50 mK o inferior, en particular de 1 mK o inferior. La unidad de refrigeración puede estar configurada para mantener el sistema cuántico a la temperatura de funcionamiento mientras el Hamiltoniano inicial evoluciona hacia el Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio.

El sistema de computación clásico puede estar configurado para recibir, como entrada, un problema computacional como se describe en el presente documento. El sistema de computación clásico puede estar configurado para codificar el problema computacional en el Hamiltoniano del problema. La codificación comprende determinar, a partir del problema computacional, una configuración de codificación del problema para la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema. El sistema informático clásico puede estar configurado para comunicar la configuración de codificación del problema a la unidad de evolución hamiltoniana.

La unidad de evolución Hamiltoniana puede estar configurada para recibir la configuración de codificación del problema desde el sistema de computación clásico. La unidad de evolución hamiltoniana puede estar configurada para evolucionar el Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio, en el que, en el Hamiltoniano final, la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema está en la configuración de codificación del problema.

El sistema de computación clásico puede estar configurado para recibir una lectura del sistema cuántico desde el dispositivo de medición. El sistema informático clásico puede estar configurado para determinar una solución al problema computacional a partir de la lectura.

La unidad de evolución hamiltoniana puede ser una unidad de evolución hamiltoniana diabática configurada para evolucionar el Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio mediante un proceso cuántico diabático.

La unidad de enfriamiento puede estar configurada para inicializar el sistema cuántico en un estado cuántico inicial enfriando el sistema cuántico hacia un estado de tierra del Hamiltoniano inicial.

La unidad de evolución del Hamiltoniano puede estar configurada para evolucionar el Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio de acuerdo con un primer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo. La lectura obtenida del sistema cuántico, tal como se describe en el presente documento, puede ser una primera lectura. La solución determinada al problema computacional puede ser una primera solución. La unidad de evolución del Hamiltoniano puede estar configurada para evolucionar el Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final de acuerdo con un segundo Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo. La unidad de medida puede estar configurada para medir al menos una porción de la pluralidad de qubits para obtener una segunda lectura del sistema cuántico. El sistema de computación clásico puede estar configurado para: determinar una segunda solución al problema computacional a partir de la segunda lectura; comparar la primera solución con la segunda solución; y, basándose en la comparación, seleccionar un tercer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo para evolucionar el Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final.

El aparato según las realizaciones descritas en el presente documento puede configurarse para resolver un problema computacional NP-duro.

Otros aspectos de la presente divulgación se describen con respecto a las figuras 10-17. Se describe una codificación específica de un problema computacional en un Hamiltoniano del problema y el correspondiente Hamiltoniano final, a saber, una codificación de un problema de modelo de espín de Ising con posibles interacciones de largo alcance en un Hamiltoniano cuántico final que es la suma de un Hamiltoniano del problema de un solo cuerpo y un Hamiltoniano de plaqueta. El problema del modelo de espín de Ising (clásico) con interacciones de largo alcance es NP-completo, y su cuantización es trivial, por lo que en este documento no se hará distinción entre el modelo de espín de Ising clásico y cuántico. Se conocen las correspondencias de otros problemas computacionales clásicos con el problema del modelo de espín de Ising. El estado fundamental del Hamiltoniano cuántico final, o un estado térmico a baja temperatura de funcionamiento, puede por tanto contener información sobre una solución del problema del modelo de espín de Ising, y, por mapeo inverso, de muchos problemas computacionales clásicos de dificultad NP. El mapeo específico al Hamiltoniano cuántico final permite una realización de un dispositivo de procesamiento cuántico (procesador cuántico) en una superficie bidimensional, específicamente un enrejado bidimensional, si el problema del modelo de espín de Ising incluye sólo interacciones d-cuerpo con d menor o igual a dos, y permite una realización del dispositivo de procesamiento cuántico en un espacio tridimensional, específicamente en un enrejado tridimensional, si el problema del modelo de espín de Ising incluye sólo interacciones d-cuerpo con d menor o igual a tres. El mapeo puede extenderse a problemas del modelo de espín de Ising con interacciones d-cuerpo y d arbitrario. Los dispositivos de procesamiento cuántico son totalmente programables a través del Hamiltoniano del problema de cuerpo único, y son arquitecturas escalables.

Primero se considera el caso del problema del modelo de espín de Ising que incluye sólo interacciones d-cuerpo con d menor o igual a dos. La codificación específica parte del problema del modelo de espín de Ising para n espines, como se describe en el presente documento, con interacciones de dos cuerpos como máximo y los correspondientes coeficientes de acoplamiento c_{ij} . Los índices i y j pueden ir de 1 a n, siendo j menor que i. En un primer caso, todos los coeficientes de campo c_i son iguales a cero. La figura 10 ilustra un problema de modelo de espín de Ising para n = 6 espines, en el que los espines están etiquetados de 1 a 6. Hay $n(n - 1)/2 = 15$ interacciones por pares entre los espines, como se indica en la figura 10 mediante las líneas que conectan pares de espines. Por ejemplo, la línea indicada con 12 representa una interacción por pares entre los espines 1 y 2. Las 15 interacciones por pares corresponden a 15 coeficientes de acoplamiento c_{ij} . Las interacciones son de largo alcance.

Para cada par de espines en el modelo de espín Ising, se proporciona un qubit correspondiente en el sistema cuántico. Por ejemplo, para los 6 espines con 15 interacciones por pares mostrados en la figura 10, el sistema cuántico correspondiente incluye 15 qubits. Una configuración de espines en el modelo de espín de Ising se asigna a una configuración de los qubits correspondientes. En este caso, la configuración de los qubits depende de la orientación relativa de los espines. Un par de espines que apuntan en la misma dirección (alineación paralela) se mapean a un qubit en el estado base cuántico $|1\rangle$. Además, un par de espines que apuntan en direcciones opuestas (alineación antiparalela) se asignan a un qubit en el estado de base cuántica $|0\rangle$. Esta asignación se ilustra en la figura 11. En la figura 11, las etiquetas 0 y 1 corresponden a los estados de base cuántica $|0\rangle$ y $|1\rangle$, respectivamente.

Los coeficientes de acoplamiento c_{ij} se mapean a una pluralidad de parámetros ajustables J_k de un Hamiltoniano del problema que codifica el problema computacional, en este caso el problema del modelo de espín de Ising. El Hamiltoniano del problema tiene la forma $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$, donde $k = n*i + j$ y donde k va de 1 a M con $M=n(n-1)/2$. El problema del modelo de espín de Ising se mapea al Hamiltoniano del problema de tal manera que los parámetros ajustables J_k del Hamiltoniano del problema representan las interacciones entre los espines en el modelo de espín de Ising, correspondientes a los coeficientes de acoplamiento c_{ij} .

El número de qubits necesarios para codificar el problema del modelo de espín de Ising en el Hamiltoniano del problema aumenta cuadráticamente en comparación con el problema del modelo de espín de Ising para n espines, porque el número de interacciones de dos cuerpos entre los espines es igual a $M = n(n - 1)/2$. Según algunas realizaciones, pueden considerarse grados de libertad adicionales. El número total de qubits en el sistema cuántico puede ser $M + n - 2$ o más, donde n-2 qubits auxiliares adicionales y/o qubits auxiliares adicionales pueden añadirse por razones que se explican más adelante. Por consiguiente, el número de qubits puede ser mayor que el número de espines n. En particular, el número de qubits puede ser el número de espines n más M - 2 grados de libertad adicionales. El Hamiltoniano del problema permite una programación del dispositivo de procesamiento cuántico con sólo interacciones locales, en particular interacciones de un solo cuerpo con campos externos.

El mayor número de grados de libertad del sistema cuántico en comparación con el modelo de espín de Ising se compensa con un Hamiltoniano de corto alcance (el segundo Hamiltoniano de corto alcance descrito en el presente documento) que es la suma de M - n Hamiltonianos de sumandos de 4 cuerpos C_l , denominados Hamiltonianos de restricción que representan restricciones para fijar una parte de los qubits. El Hamiltoniano de corto alcance tiene la forma $\sum_l C_l$, en la que el índice l oscila entre 1 y $(n^2 - 3n)/2$ y en la que cada Hamiltoniano de sumando C_l es un Hamiltoniano de restricción que puede tener la forma

$$C_l = -C \left(\sum_{m=n,e,s,w} \tilde{\sigma}_z^{(l,m)} + S_z^l \right)^2$$

$$= -C \tilde{\sigma}_z^{(l,n)} \tilde{\sigma}_z^{(l,e)} \tilde{\sigma}_z^{(l,s)} \tilde{\sigma}_z^{(l,w)}.$$

En referencia a la ecuación anterior, se pueden considerar dos posibles implementaciones de los Hamiltonianos de restricción. La suma en la ecuación anterior puede representar una aplicación basada en la ancilla. La suma recorre los cuatro miembros de una plaqueta (norte, este, sur, oeste) de un entramado bidimensional según el cual se disponen los qubits. Además, cada S_z^l es un operador que actúa sobre un qubit auxiliar incluido en el sistema cuántico. Un qubit auxiliar tiene una base que consiste en tres estados de base que, en esta realización, serán etiquetados $|0\rangle$, $|2\rangle$, y $|4\rangle$. La segunda implementación de los Hamiltonianos de corto alcance es una implementación basada en la interacción que no requiere qubits auxiliares. Según la implementación basada en la interacción, C_l es una interacción de cuatro cuerpos entre qubits que forman una plaqueta de la entramado. Además, en la ecuación anterior, C representa una fuerza de restricción, por ejemplo, una fuerza de restricción constante.

Como se ha descrito anteriormente, la codificación del modelo de espín de Ising en el Hamiltoniano del problema implica mapear configuraciones de espines del modelo de espín de Ising en configuraciones de qubits en el sistema cuántico, donde una configuración de qubits depende de la orientación relativa de pares de espines en la correspondiente configuración de espines. Para proporcionar una cartografía coherente, se tienen en cuenta aspectos relacionados con los bucles cerrados en el modelo de espín de Ising, como se expone a continuación. En cada bucle cerrado de espines en el modelo de espín de Ising, el número de pares de espines que tienen una alineación antiparalela es un número par. Por ejemplo, con referencia a la figura 10, considérese, por ejemplo, el bucle cerrado formado por las conexiones 14, 24, 23 y 13, como indican las líneas discontinuas. El bucle cerrado incluye los giros 1, 2, 3 y 4. Cualquier configuración de los espines 1, 2, 3 y 4 incluye cero, dos o cuatro pares de espines antiparalelos. Ninguna configuración de los espines 1, 2, 3 y 4 tiene uno o tres pares de espines antiparalelos. Por consiguiente, cada configuración de los espines 1, 2, 3 y 4 tiene un número par de espines antiparalelos.

Dado que los pares de espines antiparalelos se mapean a qubits que están en el estado base cuántico $|0\rangle$, cada conjunto de qubits en el sistema cuántico correspondiente a un bucle cerrado de espines en el modelo de espín de Ising tiene un número par de estados base cuánticos $|0\rangle$. Esto proporciona un conjunto de restricciones para al menos una parte de los qubits del sistema cuántico. Por ejemplo, para el bucle cerrado comentado anteriormente con referencia a la figura 10, el grupo correspondiente de cuatro qubits se muestra en la figura 12, indicado con los números de referencia 14, 24, 23 y 13 en vista de la correspondencia entre pares de espines en el modelo Ising y qubits en el sistema cuántico. A mostrados en la figura 12, los qubits 14, 24, 23 y 13 corresponden a una plaqueta de la entramado bidimensional 120. En vista de la restricción del bucle cerrado descrita anteriormente, cualquier configuración de estados de base cuánticos para los qubits 14, 24, 23 y 13 incluye cero, 2 o cuatro estados de base cuánticos $|0\rangle$, como se ilustra en la figura 13.

Para garantizar que se satisfacen las restricciones correspondientes a todos los bucles cerrados, basta con hacer cumplir las restricciones asociadas a un subconjunto adecuado de bucles cerrados. Según esta realización, los bloques de construcción particulares de bucles cerrados que implican grupos de cuatro espines como máximo son suficientes para garantizar que se satisfacen todas las restricciones, de modo que se proporciona un mapeo coherente desde el modelo de espín de Ising al sistema cuántico. Los bloques de construcción incluyen bucles cerrados formados por cuatro espines conectados por cuatro conexiones, en los que una conexión tiene una distancia índice s , dos conexiones tienen una distancia índice $s + 1$ y una conexión tiene una distancia índice $s + 2$. En este caso, s oscila entre 1 y $N - 2$ y la noción de "distancia de índice" entre los espines s_i y s_j se refiere al número $|i - j|$. El conjunto de bucles cerrados de bloques de construcción con $s = 1$ proporciona $n - 2$ restricciones. Por ejemplo, el bucle cerrado que incluye las conexiones 14, 24, 23 y 13 entre los espines 1, 2, 3 y 4, como se muestra en la figura 10 y como se ha descrito anteriormente, es un bucle cerrado de bloque de construcción con $s = 1$.

Otro aspecto se refiere al límite del sistema cuántico. Algunos bucles cerrados de bloques de construcción implican un grupo de tres espines conectados con tres conexiones, en lugar de cuatro espines conectados con cuatro conexiones. Por ejemplo, en referencia a la figura 10, el bucle cerrado que incluye las conexiones 12, 23 y 13 entre los giros 1, 2 y 3 puede considerarse a este respecto. El grupo correspondiente de qubits en el sistema cuántico incluye tres qubits 12, 23 y 13 dispuestos según la plaqueta triangular de la entramado bidimensional. Para hacer cumplir la restricción correspondiente al bucle cerrado de tres espines, se puede considerar un Hamiltoniano de restricción de 3 cuerpos C_l actuando sobre el correspondiente grupo de tres qubits. Alternativamente, puede incluirse en el sistema cuántico una línea adicional de $n-2$ qubits auxiliares fijados en el estado base cuántico $|1\rangle$, como se muestra en la figura 12 mediante los círculos con líneas discontinuas. Para imponer una restricción correspondiente a un bucle cerrado de tres espines, por ejemplo, el bucle cerrado correspondiente a los qubits 12, 23 y 13, se puede considerar un Hamiltoniano de restricción C_l que actúe sobre los tres qubits correspondientes y sobre uno de los qubits auxiliares, concretamente el qubit auxiliar 1101 mostrado en la figura 12. En consecuencia, el Hamiltoniano de restricción C_l es un Hamiltoniano de 4 cuerpos que actúa sobre una plaqueta de un entramado bidimensional ampliada, teniendo la misma forma que la descrita anteriormente. Esta última realización tiene la ventaja de que todos los hamiltonianos de restricción pueden tratarse en pie de igualdad, ya que todos los hamiltonianos de restricción son hamiltonianos de 4

cuerpos correspondientes a plaquetas de un entramado bidimensional.

Los Hamiltonianos de restricción C_i aseguran que las restricciones correspondientes a los bucles cerrados del bloque de construcción, y por lo tanto las restricciones correspondientes a todos los bucles cerrados, sean satisfechas. Por consiguiente, el Hamiltoniano de corto alcance proporciona una correspondencia coherente entre las restricciones impuestas a los espines en el modelo de espín de Ising y las restricciones impuestas al sistema cuántico.

Para proporcionar la lectura, puede medirse una porción de los qubits, como por ejemplo la porción 425 mostrada en la figura 12. Si el sistema cuántico se encuentra en el estado fundamental del Hamiltoniano final, los qubits de la porción 425 estarán en una configuración de estados base cuánticos correspondientes a una configuración de espines en el estado fundamental del modelo de espín de Ising. Si el sistema cuántico se encuentra en un estado térmico del Hamiltoniano final cercano al estado fundamental, es decir, a una temperatura suficientemente baja, esto es cierto con alta probabilidad. En consecuencia, la medición de la porción 425 permite determinar una solución al problema del modelo de espín de Ising, al menos con una alta probabilidad. Si el sistema cuántico se encuentra en el estado final, como se describe en el presente documento, en el que el estado final está bien aproximado por el estado fundamental del Hamiltoniano final, la medición de la porción 425 proporcionará al menos información sobre el estado fundamental del modelo de Ising, a partir del cual se puede calcular una solución de prueba. A continuación, se puede comprobar mediante cálculo clásico en tiempo polinómico si la solución de prueba es una solución verdadera y, en caso contrario, se puede repetir el cálculo hasta encontrar una solución verdadera.

Como ventaja adicional de las realizaciones descritas en el presente documento, dado que la información sobre el modelo de espín de Ising está codificada de manera redundante en el sistema cuántico, pueden medirse una variedad de posibles grupos de qubits para proporcionar una lectura a partir de la cual puede determinarse una solución al problema computacional.

A la luz de lo anterior, la construcción del segundo Hamiltoniano de corto alcance según esta realización es tal que (i) las restricciones cubren todas las interacciones entre los espines, (ii) el número de restricciones es $(n^2 - 3n)/2$ y (iii) el segundo Hamiltoniano de corto alcance puede realizarse en una geometría simple de 2 dimensiones con interacciones d -cuerpo, donde $d = 4$, y donde las interacciones corresponden a plaquetas de la entramado de 2 dimensiones. Además, esta realización permite una implementación escalable, ya que añadir un espín en el modelo de espín Ising equivale a añadir una línea de n espines al sistema cuántico.

La realización descrita con referencia a las figuras 10-13 se refiere a un modelo de espín de Ising que implica interacciones por pares entre n espines, en el que los coeficientes de campo son cero. Se puede considerar una codificación similar para un modelo de espín de Ising con coeficientes de campo distintos de cero. Se puede incluir un espín adicional s_{n+1} en el modelo de Ising, en el que s_{n+1} se fija en el valor $+1$. Los coeficientes de campo distintos de cero pueden entonces reformularse como coeficientes de acoplamiento entre los n espines y el espín adicional s_{n+1} . El modelo de espín de Ising con coeficientes de campo distintos de cero se convierte así en un modelo de espín de Ising en el que los coeficientes de campo son cero. De este modo, se puede aplicar un mapeo a un sistema cuántico del modo descrito anteriormente. Añadir el espín adicional s_{n+1} implica incluir una línea adicional de n qubits al sistema cuántico.

Además, también se puede considerar una codificación para un modelo de espín Ising que implique interacciones entre grupos de tres espines. En este caso, la función de energía de Ising puede tener la forma

$$H(s_1, s_2, \dots, s_n) = \sum_{ijk} c_{ijk} s_i s_j s_k$$

donde los coeficientes c_{ijk} representan interacciones de 3 cuerpos entre los espines s_i , s_j y s_k , y donde $i > j > k$. En las figuras se ilustra un mapeo de dicho modelo de Ising de 3 cuerpos en un sistema cuántico y una codificación del correspondiente problema del modelo de espín de Ising en un Hamiltoniano del problema del sistema cuántico. 14-17. En esta encarnación, los qubits del sistema cuántico corresponden a triples de espines en el modelo Ising de 3 cuerpos. En el modelo Ising de 3 cuerpos, hay $R = n(n-1)(n-2)/6$ triples de espines. En consecuencia, el número de qubits es R o más, pudiéndose incluir qubits adicionales, por ejemplo, qubits auxiliares y/o qubits auxiliares en analogía con el mapeo para el modelo de espín Ising de 2 cuerpos descrito anteriormente. En esta realización, la pluralidad de qubits está dispuesta según un entramado cuadrado tridimensional 1601 mostrado en la figura 17. El Hamiltoniano del problema puede tener la forma $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$, similar al caso de un modelo de espín de Ising que implica a lo sumo interacciones de 2 cuerpos entre los espines. El segundo Hamiltoniano de corto alcance puede tener la forma $\sum_i C_i$ donde los Hamiltonianos de restricción C_i corresponden a plaquetas de la entramado cuadrada tridimensional. El número de hamiltonianos de restricción puede ser $2(R - n)$. Consideraciones similares relativas a la frontera del sistema cuántico, que implican Hamiltonianos de restricción de 3 cuerpos y/o la inclusión de qubits auxiliares y/o qubits auxiliares, se aplican también a esta realización.

Aunque lo anterior se refiere a algunas realizaciones de la invención, pueden concebirse otras realizaciones sin apartarse del alcance determinado por las reivindicaciones que siguen.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de cálculo de una solución a un problema computacional (452) utilizando un sistema cuántico (420) que comprende una pluralidad de qubits (100), el procedimiento comprende:

5 codificar el problema computacional en un Hamiltoniano del problema (482) del sistema cuántico, donde el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de cuerpo único que comprende una pluralidad de parámetros ajustables, y donde la codificación comprende determinar, a partir del problema computacional, una configuración de codificación de problema para la pluralidad de parámetros ajustables;
 10 refrigerar el sistema cuántico (420) mediante una unidad de refrigeración (410);
 10 evolucionar un Hamiltoniano inicial (460) del sistema cuántico en un tiempo inicial (46) a un Hamiltoniano final (480) del sistema cuántico en un tiempo final (48) a través de un Hamiltoniano intermedio (470) del sistema cuántico en un tiempo intermedio (47), donde el tiempo intermedio está entre el tiempo inicial y el tiempo final,

15 en el que el Hamiltoniano intermedio es una combinación lineal del Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y un primer Hamiltoniano de corto alcance (475), donde el Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y un segundo Hamiltoniano de corto alcance (484), donde la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema está en la configuración de codificación del problema,
 15 en el que el Hamiltoniano inicial es un Hamiltoniano de cuerpo único de la forma $\sum_k H^{(k)}$, en el que cada $H^{(k)}$ es un Hamiltoniano sumando que actúa únicamente sobre el qubit k , en el que la evolución del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio comprende la desconexión no homogénea del Hamiltoniano inicial, en el que la desconexión no homogénea del Hamiltoniano inicial incluye:

20 seleccionar un primer qubit de la pluralidad de qubits;
 20 desconectar gradualmente un Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el primer qubit, en el que el Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el primer qubit se desconecta individualmente;
 25 seleccionar un segundo qubit de la pluralidad de qubits, donde el segundo qubit es diferente del primer qubit; y
 25 desconectar gradualmente un Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el segundo qubit, en el que el Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el segundo qubit se desconecta individualmente;

30 medir al menos una porción (425) de la pluralidad de qubits para obtener una lectura del sistema cuántico; y
 30 determinar una solución (490) al problema computacional a partir de la lectura.

2. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que el primer Hamiltoniano de corto alcance (475) es un Hamiltoniano de cuerpo único.

3. El procedimiento de la reivindicación 1 o de la reivindicación 2, en el que el Hamiltoniano inicial (460) evoluciona hacia el Hamiltoniano final (480) a través del Hamiltoniano intermedio (470) mediante un proceso cuántico diabático.

35 4. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende además inicializar el sistema cuántico (420) en un estado cuántico inicial enfriando el sistema cuántico hacia un estado terreno del Hamiltoniano inicial (460).

40 5. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que el Hamiltoniano inicial (460) evoluciona hacia el Hamiltoniano final (480) a través del Hamiltoniano intermedio (470) según un primer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo, en el que la lectura obtenida del sistema cuántico (420) es una primera lectura, en el que la solución determinada del problema computacional es una primera solución, en el que el procedimiento comprende además: evolucionar el Hamiltoniano inicial (460) hacia el Hamiltoniano final (480) según un segundo Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo, seguido de:

45 medir al menos una parte de la pluralidad de qubits para obtener una segunda lectura del sistema cuántico (420);
 45 determinar una segunda solución al problema computacional a partir de la segunda lectura;
 45 comparar la primera solución con la segunda solución; y
 45 basándose en la comparación, seleccionar un tercer Hamiltoniano de interpolación dependiente del tiempo para evolucionar el Hamiltoniano inicial (460) al Hamiltoniano final (480).

6. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que la pluralidad de qubits están dispuestos según un entramado bidimensional (120) o según un entramado tridimensional (1601).

50 7. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema (482) comprende una pluralidad de intensidades de campo y/o una pluralidad de direcciones de campo de campos de cuerpo único que actúan sobre la pluralidad de qubits (100).

55 8. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que al menos uno del primer Hamiltoniano de corto alcance (475) y del segundo Hamiltoniano de corto alcance (484) es un Hamiltoniano de cuerpo d , en el que $d = 4$.

9. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que el Hamiltoniano del problema (482) tiene la forma $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$, en el que cada $\sigma_z^{(k)}$ es un operador de Pauli que actúa únicamente sobre el qubit k , en el que cada J_k es un coeficiente, y en el que los coeficientes J_k forman la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema.
- 5 10. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, en el que el primer Hamiltoniano de corto alcance (475) tiene la forma $\sum_k b_k \sigma_y^{(k)}$, en el que cada $\sigma_y^{(k)}$ es un operador de Pauli que actúa únicamente sobre el qubit k , y en el que cada b_k es un coeficiente.
11. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, en el que la pluralidad de qubits están dispuestos según un entramado bidimensional (120) y en el que al menos uno de los Hamiltonianos de corto alcance (475) y el Hamiltoniano de corto alcance (484) implica interacciones entre grupos de cuatro qubits correspondientes a plaquetas (370) del entramado bidimensional.
- 10 12. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en el que el problema computacional (452) es un problema NP-duro.
13. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, en el que la determinación de la configuración de codificación de problemas comprende:
- 15 mapear el problema computacional (452) en un problema computacional auxiliar, donde el problema computacional auxiliar comprende determinar un estado fundamental de un modelo de espín de largo alcance, particularmente un modelo de espín de largo alcance con interacciones de cuerpo m , donde m es 1, 2 o 3; y determinar la configuración de codificación del problema a partir del modelo de espín de largo alcance.
- 20 14. Un aparato para computar soluciones a problemas computacionales, que comprende:
- un sistema cuántico (420) que comprende una pluralidad de qubits (100);
 una unidad de enfriamiento (410) adaptada para enfriar el sistema cuántico hacia un estado de masa del sistema cuántico;
 una unidad de evolución hamiltoniana (430) adaptada para hacer evolucionar un Hamiltoniano inicial (460) del sistema cuántico hacia un Hamiltoniano final (480) del sistema cuántico a través de un Hamiltoniano intermedio (470) del sistema cuántico,
- 25 en el que el Hamiltoniano intermedio es una combinación lineal del Hamiltoniano inicial, el Hamiltoniano final y un primer Hamiltoniano de corto alcance (475),
 en el que el Hamiltoniano final es una suma de un Hamiltoniano del problema y un segundo Hamiltoniano de corto alcance (484), donde el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de cuerpo único que comprende una pluralidad de parámetros ajustables,
 en el que el Hamiltoniano inicial es un Hamiltoniano de cuerpo único de la forma $\sum_k H^{(k)}$, en el que cada $H^{(k)}$ es un Hamiltoniano sumando que actúa únicamente sobre el qubit k , en el que la evolución del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través del Hamiltoniano intermedio comprende la desconexión no homogénea del Hamiltoniano inicial, en el que la desconexión no homogénea del Hamiltoniano inicial incluye:
- 30 seleccionar un primer qubit de la pluralidad de qubits;
 desconectar gradualmente un Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el primer qubit, en el que el Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el primer qubit se desconecta individualmente;
 40 seleccionar un segundo qubit de la pluralidad de qubits, donde el segundo qubit es diferente del primer qubit; y
 desconectar gradualmente un Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el segundo qubit, en el que el Hamiltoniano sumando del Hamiltoniano inicial que actúa sobre el segundo qubit se desconecta individualmente;
- 45 un dispositivo de medición (440) adaptado para medir al menos una porción de la pluralidad de qubits; y un sistema informático clásico (450) conectado a la unidad de evolución hamiltoniana y al dispositivo de medición.

Fig. 1

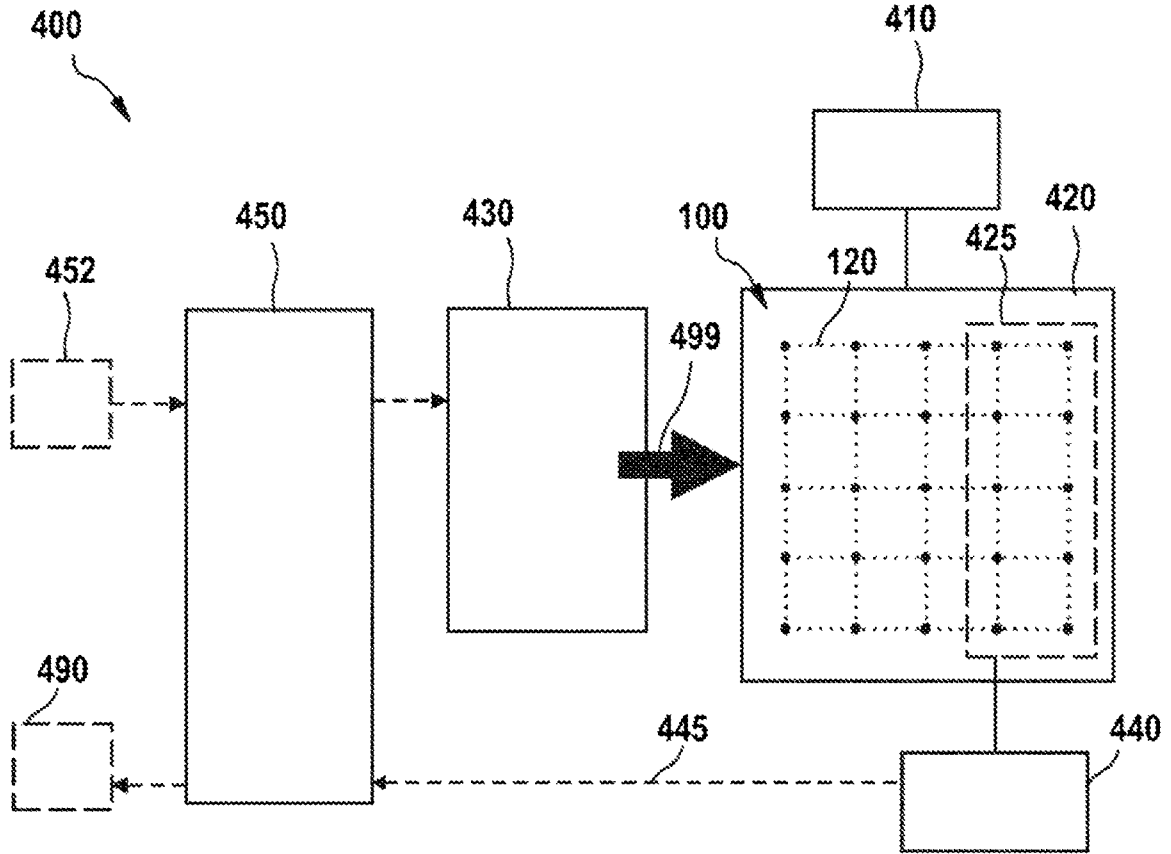


Fig. 2

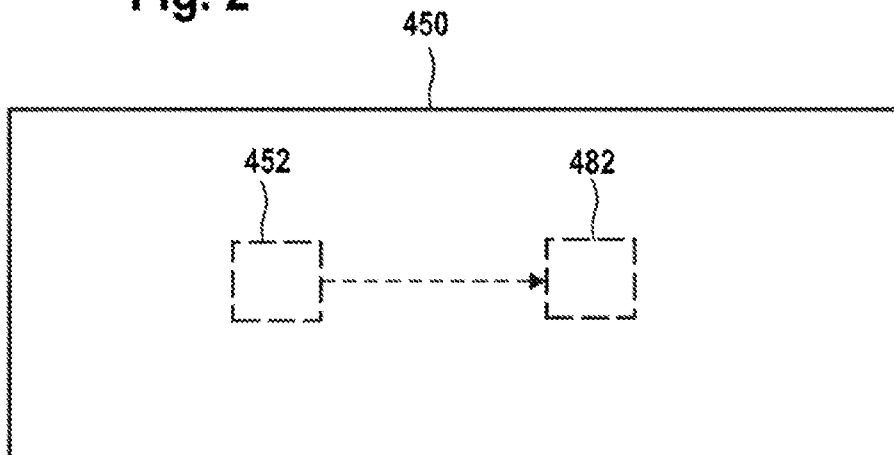


Fig. 3

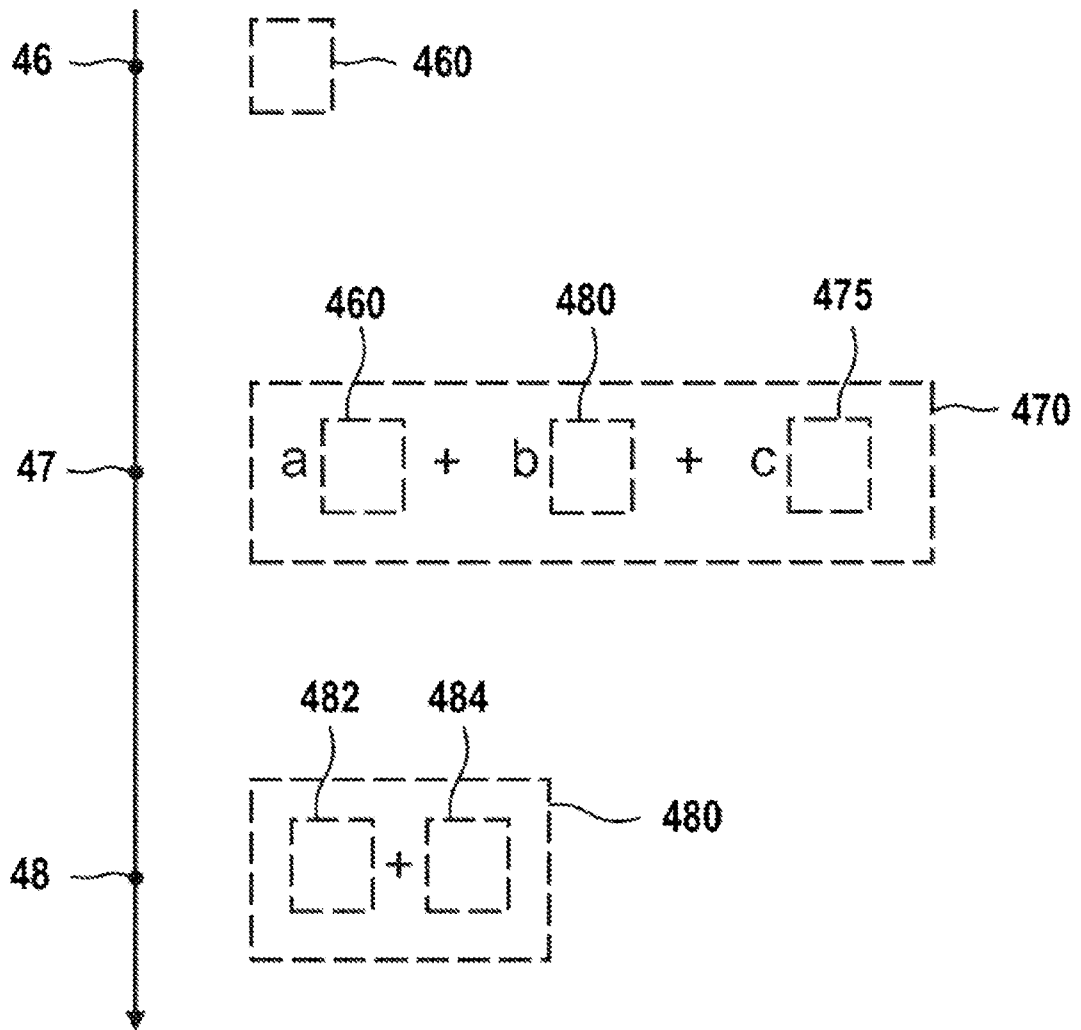


Fig. 4

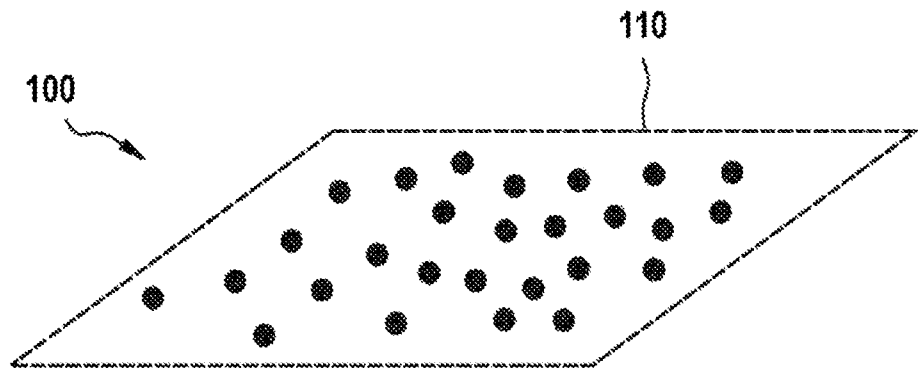


Fig. 5

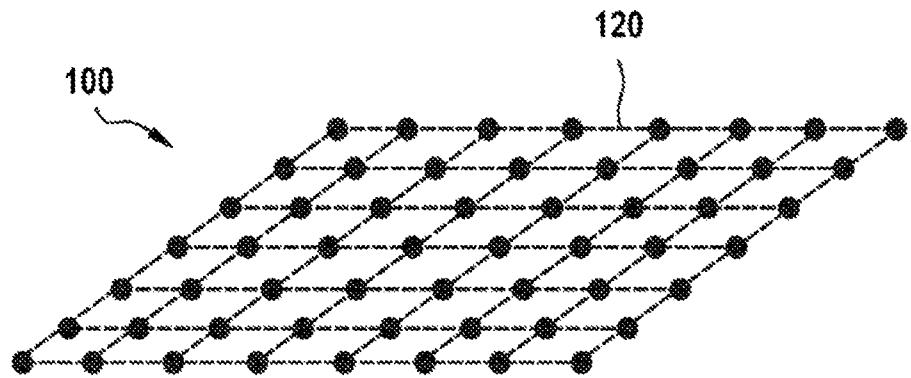


Fig. 6

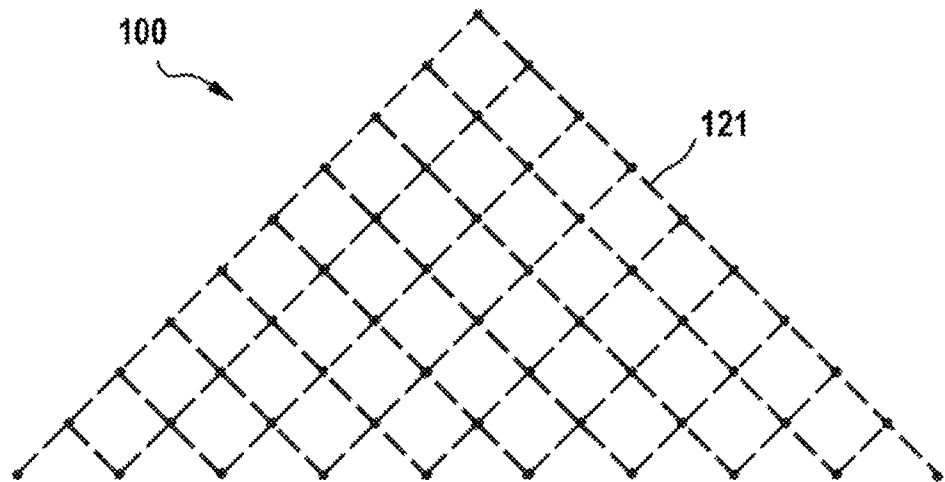


Fig. 7

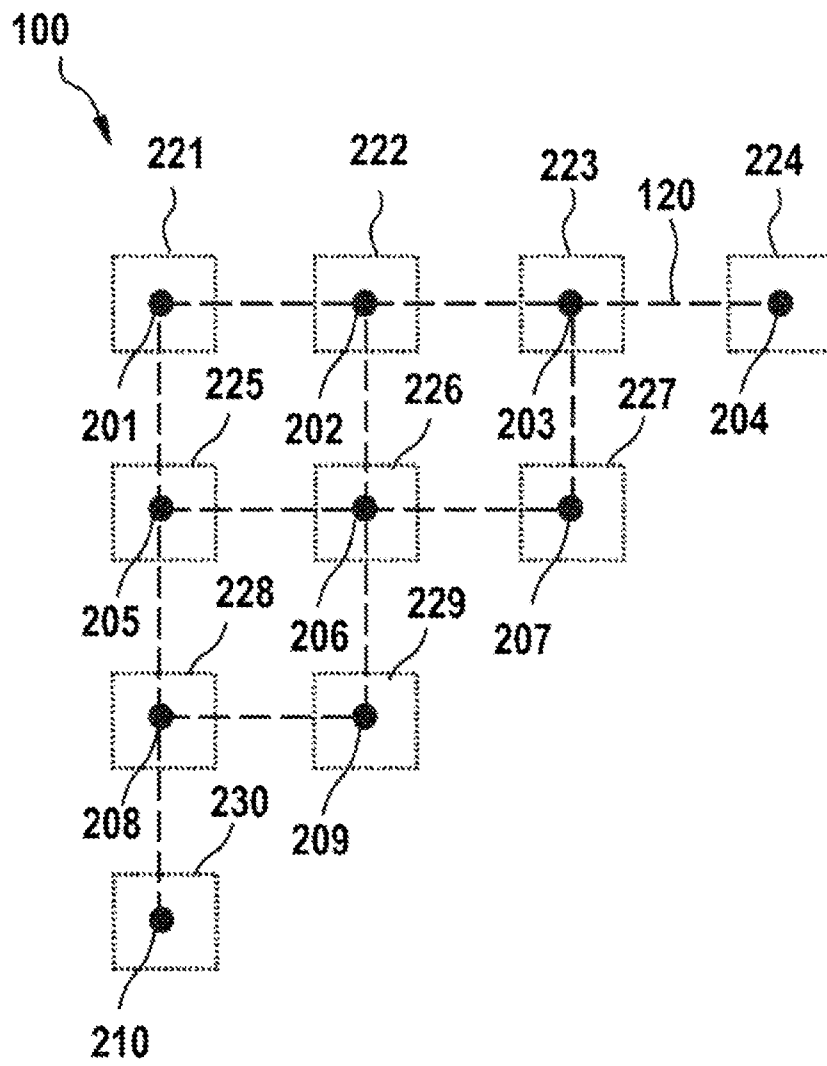


Fig. 8

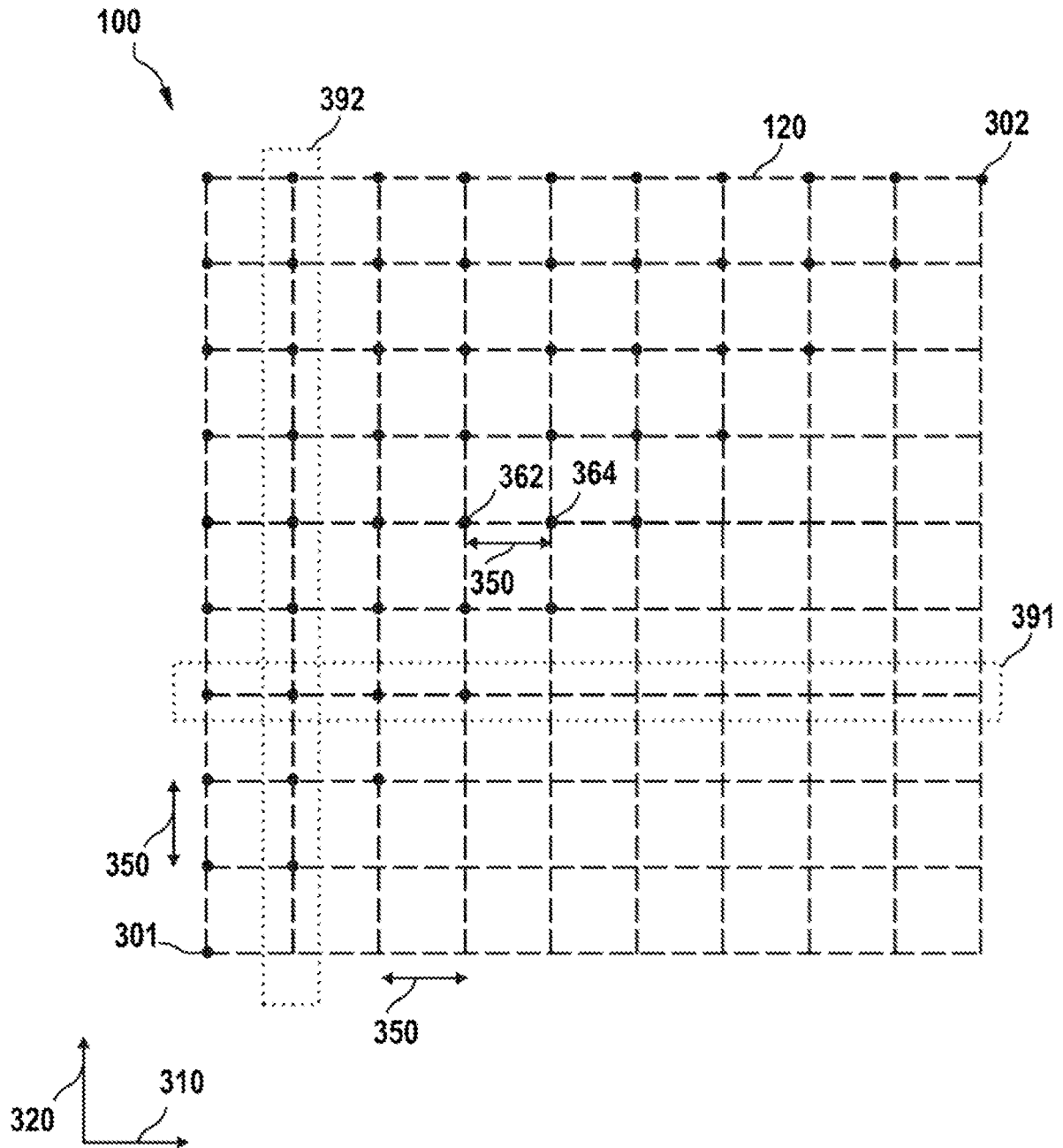


Fig. 9

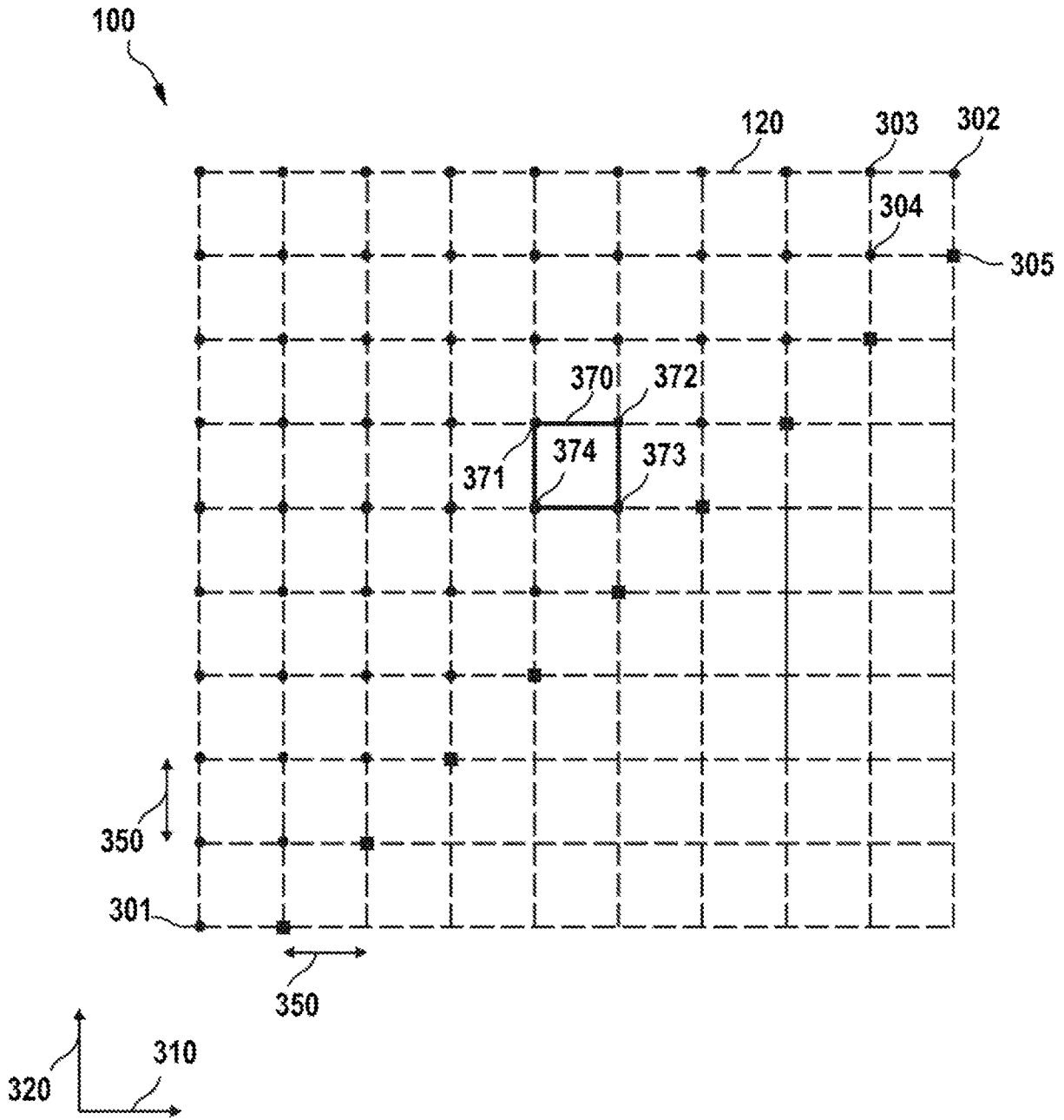


Fig. 10

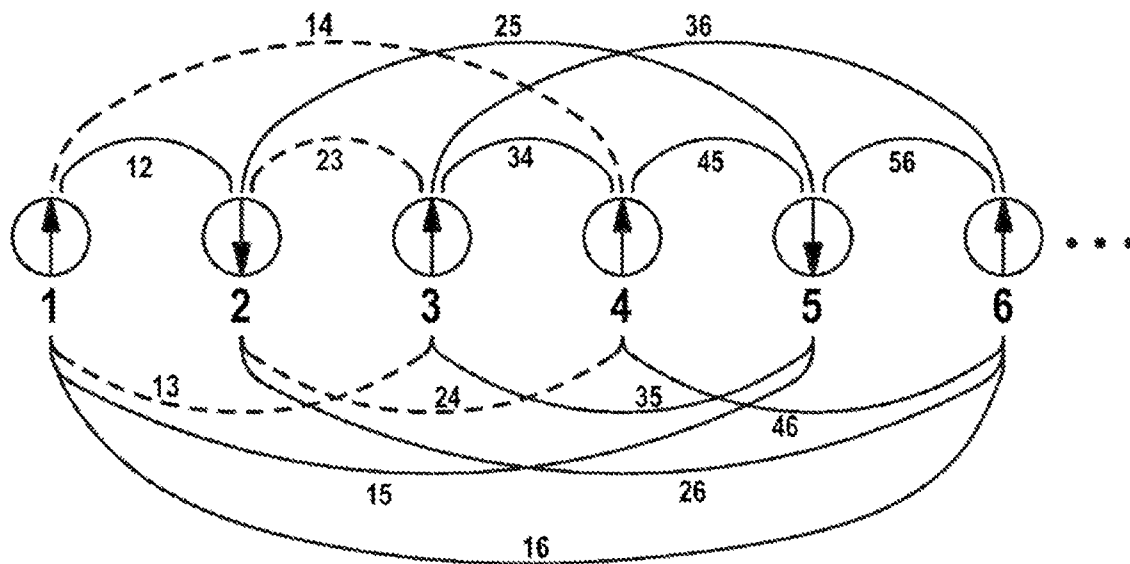


Fig. 11

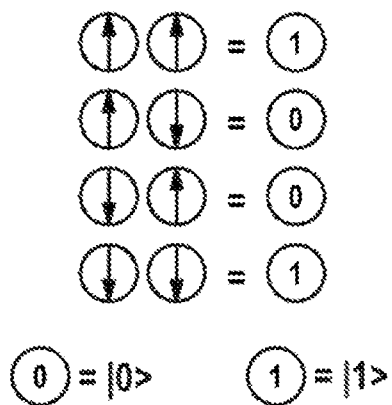


Fig. 12

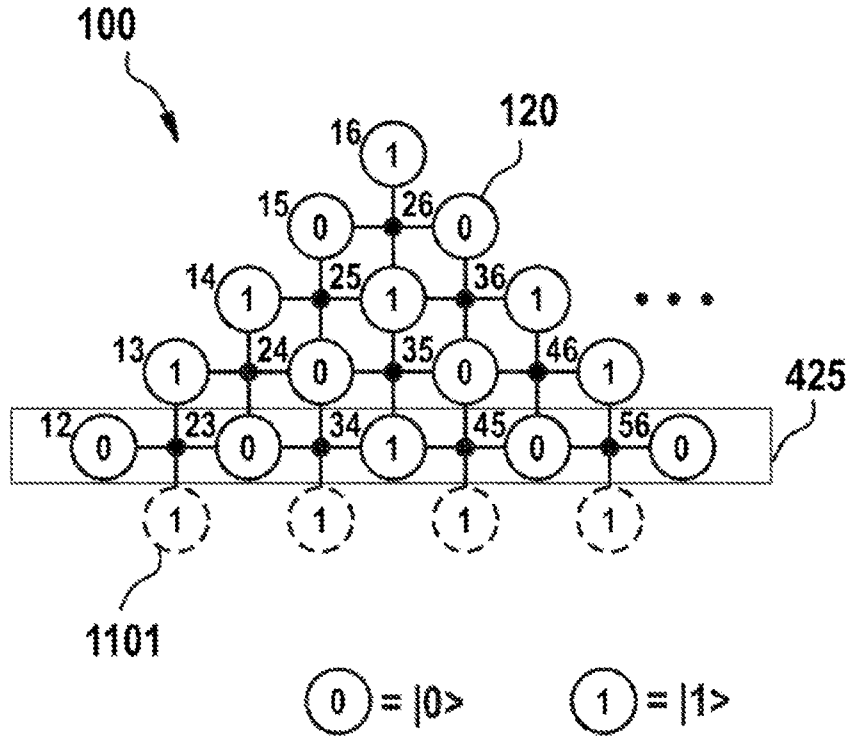


Fig. 13

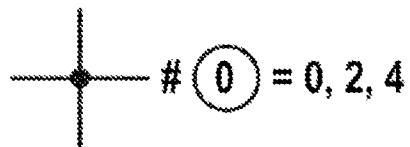


Fig. 14



Fig. 15

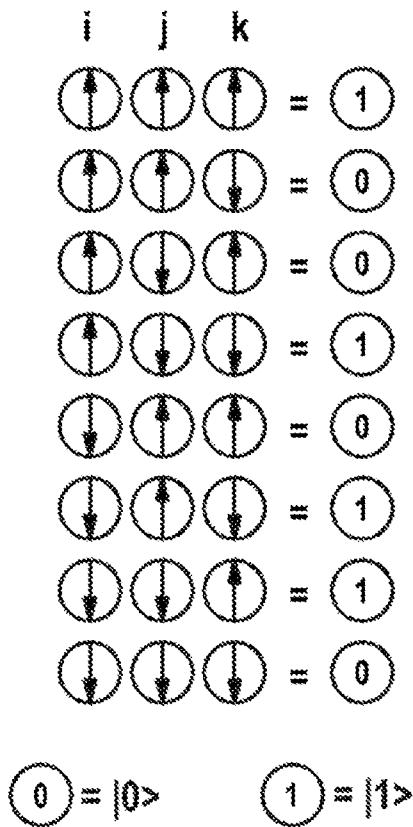


Fig. 16

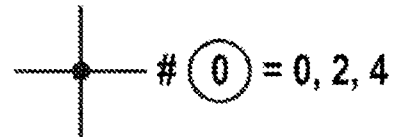


Fig. 17

