

فهرست مطالب

۲	۱.۰ مقدمه
۲	۲.۰ basis superpos vs comp
۳	۱ آشنایی با مفاهیم اولیه
۳	۱.۱ کیوبیت
۴	۲.۱ basis fourier - basis computayional - vector bloch
۴	۳.۱ گیت‌های کوانتومی
۵	۱.۳.۱ انواع گیت کوانتومی
۸	۲.۳.۱ gate Swap
۸	۴.۱ مدارهای کوانتومی
۱۱	۱.۴.۱ نحوه‌ی نمایش مدارهای کوانتومی
۱۳	۲ برنامه‌نویسی کوانتومی
۱۳	۱.۲ تفاوت کامپیوتر کلاسیک و کوانتومی
۱۳	۲.۲ Qiskit and computer Quantum IBM
۱۵	۳ الگوریتم‌های کوانتومی
۱۵	۱.۳ موازی سازی کوانتومی
۱۹	۱.۱.۳ مدل محاسباتی استاندارد
۱۹	۲.۳ مدل کوثری
۲۰	۳.۳ معرفی و پیاده سازی الگوریتم دوچ
۲۰	۱.۳.۳ مسئله‌ی دوچ
۲۱	۲.۳.۳ الگوریتم دوچ

۴.۳	الگوریتم دوچ - جوزا	۲۴
۵.۳	ساخت یک اوراکل کوانتومی	۲۹
۶.۳	simulation vs comp	۳۰
۴	شبیه سازی پدیده های کوانتومی	۳۱
۱.۴	states Bell	۳۱
۲.۴	entanglement	۳۲
۳.۴	coding dense super	۳۲
۴.۴	Teleport	۳۲

۱.۰ مقدمه

در عصر حاضر بواسطه ی رشد و توسعه ی نظریه ی اطلاعات کوانتومی و سرمایه گذاری های مالی و انسانی بسیار در این زمینه، شاهد افزایش تعداد علاقمندان به این حوزه هستیم. در این پا

۲.۰ basis superpos vs comp

book chuang ۱ Chapter

Consider the circuit shown in Figure ۱۷.۱, which applies U_f to an input not in the computational basis. Instead, the data register is prepared in a superposition state $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$, which can be created with a Hadamard gate acting on the state $|0\rangle$. Then we apply U_f to the resulting state:

فصل ۱

آشنایی با مفاهیم اولیه

۱.۱ کیوبیت

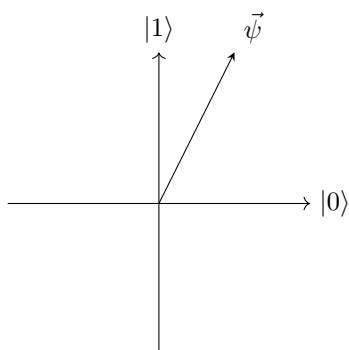
یک کیوبیت^۱، معادل یک واحد اطلاعات کوانتومی می‌باشد. این مفهوم معادل مفهوم کلاسیک بیت^۲ می‌باشد. به طور کلی هر کیوبیت حاوی دو بیت اطلاعات است. برای تبیین یک کیوبیت از خصوصیات سامانه های کوانتومی، بهره‌می‌بریم. کیوبیت یک سیستم کوانتومی با فضای دوبعدی است. برای تعیین این دوبعد می‌توان از یکی از خصوصیات سامانه های کوانتومی استفاده کرد.

برخلاف بیت ها که مقادیر ثابت ۰ یا ۱ را به خود می‌گیرند؛ یک کیوبیت می‌تواند در یک حالت «برهم‌نهی کوانتومی» باشد؛ این بدان معناست که یک کیوبیت بواسطه‌ی مشاهده ناظر به یکی از حالات ۰ یا یک تبدیل شود. این مهم‌ترین مزیت استفاده از کیوبیت‌هاست. بیان ریاضی یک کیوبیت، در حالت برهم‌نهی، به شرح زیر است:

$$\begin{cases} |\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \\ \alpha^2 + \beta^2 = 1 \end{cases}$$

^۱Qubit
^۲Bit Binary

کت‌ها $|0\rangle$ و $|1\rangle$ بیانگر پایه‌های فضای محاسباتی^۳ هستند؛ و مقادیر α^2 و β^2 بیانگر احتمال وقوع هر یک از این حالات، در صورت مشاهده، می‌باشند. نمایش بردار ψ به شرح زیر است:



در بسیاری از مواقع برای سهولت در محاسبات، عملگرها و حالات کوانتومی به کمک ماتریس‌ها نمایش داده می‌شوند. فرم ماتریسی هر یک از حالات ذکر شده در بالا به شرح زیر است:

$$|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۱.۱)$$

برای تعریف کیوبیت‌ها، راه‌های زیادی وجود دارد، حالات قطبش فوتون، اسپین الکترون، یا سطوح انرژی اتم، هر یک می‌توانند تعیین‌کننده‌ی بردارهای فضای کیوبیت باشند.

۲.۱ ba - fourier - basis computayional - vector bloch

sis

۳.۱ گیت‌های کوانتومی

گیت‌های کوانتومی^۴ یکی از اولین و مهم‌ترین اجزای مدارهای کوانتومی می‌باشند. این گیت‌ها عملگرهایی با قابلیت اثرگذاری روی کیوبیت‌ها می‌باشند. با اعمال یک گیت کوانتومی بر روی یک یا چند کیوبیت،

^۳ Computational Basis Vectors
^۴ Quantum Gates

می‌توان تغییرات مدنظر خود را روی کیوبیت اعمال کرد. با کمک این گیت‌ها می‌توان باعث درهم‌نهی کوانتومی یا رمزگذاری داده در داخل یک یا چند کیوبیت شد.

۱.۳.۱ انواع گیت کوانتومی

گیت‌های کوانتومی، دارای انواع مختلف گوناگونی می‌باشند. به طور کلی گیت‌های کوانتومی، عملگرهایی یک‌ه و بازگشت‌پذیر می‌باشند.

گیت هادامارد

مهم‌ترین گیت کوانتومی، گیت هادامارد^۵ است. با اعمال اثر این گیت روی یک کیوبیت، آن کیوبیت به یک حالت درهم‌نهی کوانتومی گذار می‌کند. به عبارت دیگر هر یک از زیرحالات این حالت درهم‌نهی، با احتمال یکسانی قابل رخ دادن هستند.

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \quad H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

این گیت کوانتومی به صورت خطی روی یک دسته‌کت اثر می‌کند. نمایش ماتریسی این گیت کوانتومی به شرح زیر است:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

^۵Hadamard gate

$$H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

این گیت کوانتومی، یک گیت بازگشت پذیر است؛ یعنی اگر این گیت روی یک حالت کوانتومی اثر کند؛ می تواند آن را از حالت برهنه بی خارج کند.

برای اعمال این گیت کوانتومی، فقط به یک کیوبیت نیاز داریم. به اصطلاح این گیت، یک-Single Qubit Quantum gate می باشد.

نمایش این گیت کوانتومی در مدار با علامت زیر است:



گیت CNOT

گیت کوانتومی CNOT^۶، به عنوان گیت منطقی، یاد می شود. این گیت کوانتومی معادل گیت NOT کلاسیک می باشد. به طور معمول، برای اعمال اثر این گیت کوانتومی نیاز به دو کیوبیت داریم. این گیت کوانتومی فقط و فقط در مواقعی که «کیوبیت کنترل^۷» دارای مقدار $|1\rangle$ باشد، باعث تغییر وضعیت «کیوبیت هدف^۸» می شود.

کیوبیت کنترل: کیوبیت هدف:

خلاصه ای از عملکرد این تابع به شرح زیر است:

ببین چرا از این نماد به جای تئوسور پراداکت استفاده شده

$ A\rangle$	$ B\rangle$		$ A\rangle$	$ B \oplus A\rangle$
$ \text{control}\rangle$	$ \text{target}\rangle$	Effect CNOT Gate	$ \text{control}\rangle$	$ \text{target}\rangle$
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	\Rightarrow	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	\Rightarrow	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	\Rightarrow	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	\Rightarrow	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$

نمایش ماتریسی این گیت کوانتومی به شکل زیر است:

gate controlled-X or gate controlled-NOT^۶

Qubit Controlled^۷

Qubit Target^۸

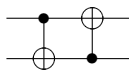
اینا باید اصلاح بشه

$$\text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

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

$$\text{CNOT} |11\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = |10\rangle$$

نمایش در داخل مدار:



از این گیت کوانتومی، برای بسیاری مدارها و شبیه‌سازی‌های کوانتومی، از جمله تلپورت، درهم‌تنیدگی و ... استفاده می‌شود.

گیت توفولی

گیت کوانتومی توفولی، یک نوع خاص از گیت CNOT است. سازوکار این گیت مشابه گیت CNOT می‌باشد؛ با این تفاوت که با در نظر گرفتن وضعیت دو کیوبیت کنترل شده، وضعیت کیوبیت سوم را

تغییر می‌دهد. خلاصه ای از عملکرد این گیت کوانتومی به شرح زیر است:

به بیان دیگر اگر دو کیوبیت کنترل شده، مقدار یک داشته باشند؛ کیوبیت هدف مقدارش تغییر می‌کند. فرم ماتریسی این عملگر به شکل زیر است:

این گیت کوانتومی در مدار کوانتومی به شکل زیر نشان داده می‌شود:

گیت تغییر فاز

گیت تغییر فاز^۹، یکی از گیت های مهم کوانتومی می‌باشد. این گیت با ضرب کردن یک عدد ثابت در فاز یک کیوبیت، باعث تغییر فاز کیوبیت می‌شود. این گیت کوانتومی در بسیاری از الگوریتم‌های سرچ کوانتومی به کار می‌رود. این گیت بدین صورت تعریف می‌شود:

فرم ماتریسی این گیت به شرح زیر است:

این گیت کوانتومی در مدار کوانتومی به شکل زیر نشان داده می‌شود:

گیت دوران

گیت دوران^{۱۰}، باعث دوران حالت کیوبیت، در فضای هیلبرت می‌شود. پایه‌های فضای هیلبرت مذکور بردارهای هستند. نمایش این گیت کوانتومی به شرح زیر است:

فرم ماتریسی این گیت به شرح زیر است: نمایش این گیت در مدار کوانتومی به شرح زیر است:

۲.۳.۱ gate Swap

۴.۱ مدارهای کوانتومی

مدارهای کوانتومی^{۱۱}، یک دسته از گیت های کوانتومی، که با یک توالی بخصوص قرار گرفته اند، می‌باشند. این کیوبیت ها، با توالی یاد شده، روی یک یا چند دسته کیوبیت، اثر داده می‌شوند.

مدارهای کوانتومی، یکی از اولین مفهوم‌های بکاررفته برای تعریف کامپیوترهای کوانتومی می‌باشند. برای تعریف و شبیه‌سازی هریک از پدیده‌ها و الگوریتم‌های کوانتومی، نیاز به یک مدار به‌خصوص داریم.

^۹gate shift Phase

^{۱۰}gate Rotation

^{۱۱}circuit quantum

شباهت ها و تفاوت های مدارهای کلاسیک و کوانتومی

gates quantum use they but circuits, classical to similar are circuits Quantum that operations reversible are gates Quantum gates. logic classical of instead qubit. a of state quantum the manipulate to used be can

circuits quantum between differences and similarities some are here Sure,

circuits: classical and

****Similarities:****

op- of sequence a of composed are circuits classical and quantum Both * represented be can circuits Both * data. of set a to applied are that erations implement to used be can circuits Both * notation. similar a using graphically algorithms.

****Differences:****

unit basic their as bits, quantum are which qubits, use circuits Quantum * of unit basic their as bits, classical are which bits, use circuits Classical data. of operations, reversible are which gates, quantum use circuits Quantum * data. irre- are which gates, logic use circuits Classical operations. basic their as exploit can circuits Quantum * operations. basic their as operations, versible entangle- and superposition as such mechanics, quantum of properties the computers. classical for impossible are that tasks perform to ment.

between differences and similarities the summarizes that table a is Here

circuits: classical and circuits quantum

data of unit Basic					Circuit Classical	Circuit Quantum	Feature
Reversibility		gates Logic	gates Quantum	operations Basic		Bit	Qubit
Possible		No	Yes	mechanics quantum	Exploits		Irreversible
Reversible		Reversible	quantum simulating databases,	unsorted searching integers,	Factoring		tasks
logical calculating,		Sorting,		systems			

questions. other any have you if know me Let helps! this hope I

اجزای مدارهای کوانتومی و ساینز آن

They qubits. on performed are that actions the are Operations Operations:
actions. other or initializations, measurements, be can

The circuit. the in gates of number the is circuit quantum a of size The
of size the of terms in measured often is algorithm quantum a of complexity
it. implement to required is that circuit quantum the

Qubits

can They computing. quantum in information of unit basic the are Qubits
be can qubit a that means This . ۱ and ۰ states, two of superposition a in be
superposi- quantum called property a is which time, same the at ۱ and ۰ both
is qubit one of state the that means which entangled, be also can Qubits tion.
qubit. another of state the on dependent

Gates

create to used be can They qubits. to applied are that operations are Gates
dif- many are There qubits. entangle and rotations, perform superpositions.
Hadamard the include ones common most the of some but gates, of types ferent
gate. Toffoli the and gate, CNOT the gate.

Operations

mea- be can They qubits. on performed are that actions the are Operations
collapse to used are Measurements actions. other or initializations, surements.
used are Initializations . ۱ or ۰ value, definite a into qubit a of state quantum the
. ۱ or ۰ value, specific a to qubit a of state the set to

Circuits Quantum

the to similar is that notation graphical a using written are circuits Quantum
quan- a of axis horizontal The computing. classical in used diagrams circuit
The qubits. the represents axis vertical the and time, represents circuit tum
the represent boxes the between lines the and boxes, by represented are gates
qubits. the between connections

Conclusion

oper- and gates, qubits, are circuit quantum a of components basic The

are which algorithms, quantum create to used are components These ations.
 cir- Quantum computer. quantum a on performed be only can that algorithms
 potential the have they and computation, quantum for tool powerful a are cuits
 and chemistry, cryptography, including fields, different many revolutionize to
 learning. machine

۱.۴.۱ نحوه‌ی نمایش مدارهای کوانتومی

the to similar is that notation graphical a using written are circuits Quantum
 quan- a of axis horizontal The computing. classical in used diagrams circuit
 The qubits. the represents axis vertical the and time, represents circuit tum
 the represent boxes the between lines the and boxes, by represented are gates
 qubits. the between connections
 can They computation. quantum for tool powerful a are circuits Quantum
 Shor's including algorithms, quantum of variety wide a implement to used be
 unsorted searching for algorithm Grover's and integers factoring for algorithm
 databases.

فصل ۲

برنامه‌نویسی کوانتومی

۱.۲ تفاوت کامپیوتر کلاسیک و کوانتومی

۲.۲ Qiskit and computer Quantum IBM

فصل ۳

الگوریتم‌های کوانتومی

چه گونه‌ای از مسائل محاسباتی قابل اجرا با مدارهای کوانتومی می‌باشند؟ تفاوت و برتری مدارهای کوانتومی نسبت به مدارهای کلاسیک چیست؟ آیا می‌توان یک حوزه‌ی خاص را تعیین کرد؛ به گونه‌ای که عملکرد کامپیوترهای کوانتومی نسبت به کامپیوترهای کلاسیک مزیت داشته باشند؟ در این بخش می‌خواهیم به طور خلاصه این سوالات را پاسخ دهیم و توضیح دهیم چگونه می‌توان از کامپیوترهای کوانتومی به شکلی سودمند استفاده کنیم.

۱.۳ موازی سازی کوانتومی

موازی سازی کوانتومی^۱، پایه و اساس بسیاری از الگوریتم‌های کوانتومی است. با گذار یک حالت کوانتومی به حالت برهمه‌ی کوانتومی، درحین محاسبات کوانتومی یک تابع نظیر $f(x)$ ، می‌تواند مقادیر مختلف x را به طور همزمان بررسی کند. این درحالیست که در محاسبات کلاسیک به دلیل ماهیت بیت‌های اطلاعات، تابع $f(x)$ فقط می‌تواند یکی از مقادیر مجاز برای x را بررسی کند. فرض کنید تابع f ، یک تابع تک-کیوبیت، به صورت زیر تعریف شده است:

$$f(x) : \{0, 1\} \rightarrow \{0, 1\}$$

روش مناسب برای محاسبه این تابع در یک کامپیوتر کوانتومی، با در نظر گرفتن دو کیوبیت که در حالت $|x, y\rangle$ شروع می‌شود. با یک توالی مناسب از گیت های منطقی می‌توان این حالت را به

^۱parallelism Quantum

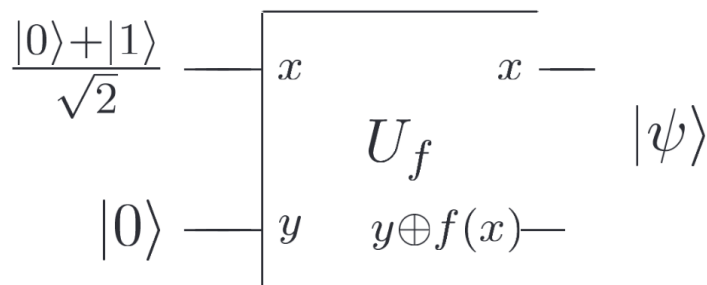
$|f(x) \oplus x, y\rangle$ تبدیل کرد که در آن \oplus بیانگر جمع مدوله با پایه ۲ می‌باشد.

۲

هریک از دسته‌های کیویت، رجیستر کوانتومی نامیده می‌شوند. اولین رجیستر، «رجیستر داده» و دومین رجیستر «رجیستر هدف» نامیده می‌شود.

ازین پس در این بخش به عامل گذار $|x, y \oplus f(x)\rangle \rightarrow |x, y\rangle$ ، عنوان «تابع U_f » را اطلاق خواهیم کرد. لازم به ذکر است که این تبدیل، یک تبدیل یک به یک به شمار می‌آید.^۳

اگر $y = 0$ آنگاه مقدار دومین کیویت بعد از اعمال تابع U_f برابر با مقدار $f(x)$ خواهد بود.



شکل ۱.۳: مدار کوانتومی برای ارزیابی $f(0)$ و $f(1)$ به طور همزمان. U_f مدار کوانتومی است که ورودی‌هایی مانند $|x, y\rangle$ را به $|x, y \oplus f(x)\rangle \rightarrow |x, y\rangle$ ، تصویر می‌کند.

در شکل بالا مقادیر ورودی داده شده به تابع U_f در پایه‌های محاسباتی قرار ندارند. رجیستر داده در حالت برهمه‌نی قرار دارد. این حالت برهمه‌نی را می‌توان با اعمال گیت هادامارد بر حالت کوانتومی $|0\rangle$

Modulo ۲ is a mathematical operation that returns the remainder of a division by ۲. For example, ۵ divided by ۲ has a remainder of ۱, so ۵ mod ۲ = ۱. This operation is useful in cryptography, including mathematics, of areas different many in operation useful a is ۲ Modulo checking when example, for life, everyday in used also is It theory, number and science, computer odd, or even is number a whether follows: as evaluated be

cryptology, including mathematics, of areas different many in operation useful a is ۲ Modulo checking when example, for life, everyday in used also is It theory, number and science, computer odd, or even is number a whether

Here are some other examples of modulo ۲:

$$1 = 1 \bmod 2, 2 = 0 \bmod 2, 3 = 1 \bmod 2, 4 = 0 \bmod 2, 5 = 1 \bmod 2$$

^۳اثبات این مطلب از حوصله‌ی بحث خارج است.

ایجاد کرد. پس از ایجاد این حالت، تابع U_f را به حالت جدید اعمال می‌کنیم:

$$\frac{|0, f(0)\rangle + |1, f(1)\rangle}{\sqrt{2}}$$

این یک حالت استثنایی است! جملات مختلف کسر بالا حاوی اطلاعاتی در مورد $f(0)$ و $f(1)$ می‌باشند؛ به نحوی که انگار $f(x)$ را برای دو مقدار x به طور همزمان ارزیابی کرده ایم، این ویژگی به ”موازی سازی کوانتومی“ موسوم می‌باشد. برخلاف موازی سازی کلاسیک، که در آن هر یک مدارهای متعددی دارند ساخته شده برای محاسبه $f(x)$ به طور همزمان اجرا می‌شوند، در اینجا برای ارزیابی تابع برای چندین مقدار x به طور همزمان، یک مدار $f(x)$ (با قابلیت برهمه‌نی کوانتومی) استفاده می‌شود. این فرآیند را می‌توان به راحتی با استفاده از یک عمل کلی به نام تبدیل هادامارد، به توابعی با تعداد بیت دلخواه تعمیم داد. این عمل فقط تعداد n گیت هادامارد است که به طور موازی روی n کیوبیت عمل می‌کنند.

برای مثال در شکل زیر؛ دو کیوبیت در حالت $|0\rangle$ آماده شده‌اند. پس از اعمال گیت‌های هادامارد بر روی این رجیستر به خروجی زیر خواهیم رسید:

$$\left(\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}\right) = \frac{|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$$

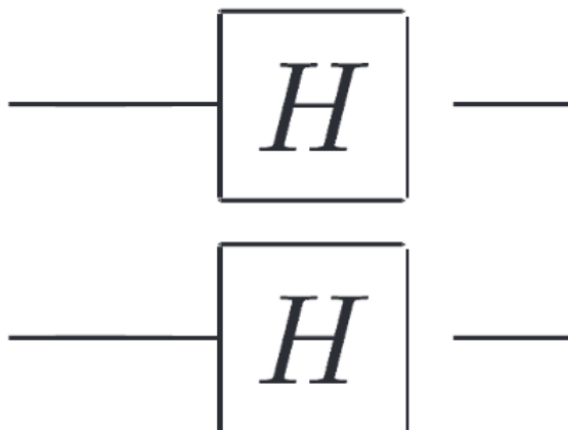
از نماد $H \otimes 2$ به عنوان نشانه‌ی عملکرد موازی دو گیت هادامارد استفاده می‌کنیم؛ از علامت \otimes به عنوان تانسور یاد می‌کنیم. به طور کلی نتایج اعمال موازی گیت هادامارد روی n کیوبیت روی حالت کوانتومی برابرست با:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sum_x |x\rangle$$

در اینجا، \sum نشان دهنده جمع بر روی همه مقادیر ممکن x است، و $H \otimes n$ را برای نشان دادن این عمل می‌نویسیم. اعمال تبدیل هادامارد روی یک بهمنهی کوانتومی برابر از همه حالت‌های محاسباتی تولید می‌کند؛ و با استفاده از فقط n گیت، یک بهمنهی از $2n$ حالت تولید می‌کند.

تبدیل هادامارد $H \otimes 2$ روی دو بیت کوانتومی پیاده می‌شود. ارزیابی موازی کوانتومی یک تابع $f(x)$ با ورودی n بیتی x و خروجی ۱ بیتی، به روش زیر قابل پیاده‌سازی می‌باشد:

۱. ابتدا حالت $n + 1$ کیوبیت $|0\rangle^{\otimes n} |0\rangle$ را آماده کنید،



شکل ۲.۳: اعمال تبدیل هادامارد $H \otimes n$ روی دو کیوبیت

۲. سپس تبدیل هادامارد را به n کیوبیت اول و به دنبال آن مدار کوانتومی اعمال کنید.

۳. اعمال تابع U_f به کیوبیت‌هایی که در حالت برهمه‌نی قرار دارند.

در نهایت حالت زیر تولید می‌شود:

$$\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_x |x\rangle |f(x)\rangle$$

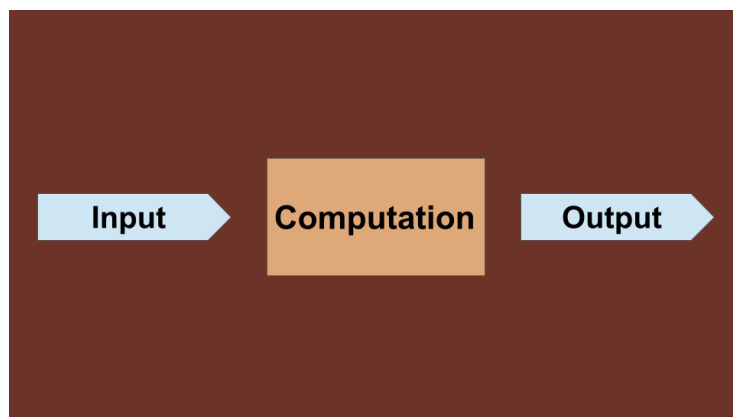
$$\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_x |x\rangle |f(x)\rangle$$

به طور کلی موازی‌سازی کوانتومی امکان ارزیابی همزمان همه مقادیر ممکن تابع f را فراهم می‌کند، حتی اگر ظاهراً فقط یک بار f را ارزیابی کرده باشیم. با این حال، این موازی‌سازی بلافاصله مفید نیست. در مثال تک کیوبیتی ما، اندازه‌گیری حالت فقط $|0, f(0)\rangle$ یا $|1, f(1)\rangle$ را می‌دهد! به طور مشابه، در حالت کلی، اندازه‌گیری حالت $\sum_x |x\rangle |f(x)\rangle$ فقط $f(x)$ را برای یک مقدار x خاص می‌دهد. البته یک کامپیوتر کلاسیک می‌تواند این کار را به راحتی انجام دهد! محاسبات کوانتومی برای مفید بودن به چیزی بیش از موازی‌سازی کوانتومی نیاز دارد؛ به توانایی استخراج اطلاعات مربوط به بیش از یک مقدار $f(x)$ از حالت‌های سوپروپوزیسیون مانند $\sum_x |x\rangle |f(x)\rangle$ نیاز دارد. در بخش‌های بعدی به مثال‌های خواهیم پرداخت که این مسائل را حل کند.

$$\sum_x |x, f(x)\rangle$$

۱.۱.۳ مدل محاسباتی استاندارد

پیش از بررسی مدل کوثری، مدل ساده و استاندارد محاسباتی را بررسی می‌کنیم. به تصویر زیر دقت کنید:



شکل ۳.۳: یک واحد محاسباتی که مقادیری را به عنوان ورودی گرفته، پردازش کرده و سپس مقدار/مقادیر خروجی را ارائه کرده است.

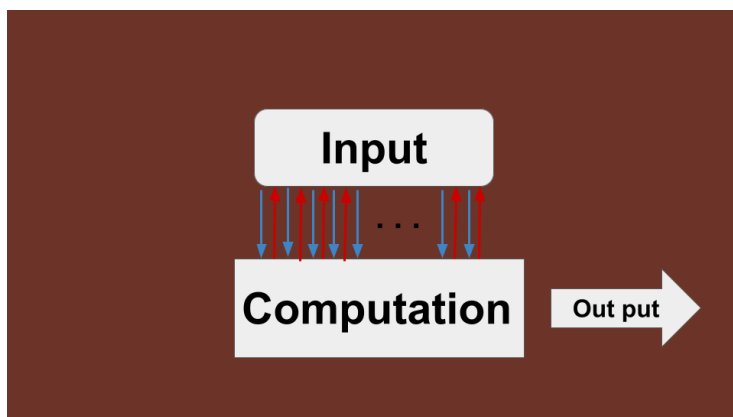
در تصویر بالا یک نمود ساده از کامپیوترهای امروزی ارائه شده است. در دنیای واقعی مقدار ورودی می‌تواند از هر منبعی تأمین شده باشد. با این وجود هدف ما بررسی منابع تولید ورودی نیست؛ بلکه هدف بررسی مقادیر ورودی (به صورت ایزوله) می‌باشد. می‌توان در نظر گرفت که ورودی داده شده و خروجی نهایی، هر دو در قالب یک رشته از اعداد باینری، ماتریس و یا هر قالب مدنظر کاربر باشند.

مهم‌ترین نکته درباره‌ی این واحد محاسباتی، **در دسترس بودن کل مقادیر ورودی برای واحد پردازش** است. به عبارت دیگر **واحد پردازش می‌تواند تمامی مقادیر ورودی را دریافت کرده و تشخیص دهد.**

۲.۳ مدل کوثری

در مدل کوثری، داده‌های ورودی توسط یک تابع تولید می‌شوند. واحد محاسباتی دسترسی به تابع تولید ورودی دارد و می‌تواند برای دریافت داده‌های جدید، از تابع یاد شده، درخواست کند.

در این مدل واحد محاسباتی دیگر داده‌ها را در قالب رشته‌ای از اطلاعات در دسترس ندارد؛ بلکه می‌تواند آن‌ها را از بخش input دریافت کند. در گاهی از مواقع به سیستم oracle، input یا جعبه‌ی سیاه می‌گویند. تابع Oracle یا جعبه‌ی سیاه یک سیستم است که ما به عنوان ناظر به سازوکار داخلی آن و تمامی اطلاعات آن دسترسی نداریم و فقط می‌توانیم مقادیر مجاز را به آن داده و مقادیر خروجی را



شکل ۴.۳: شکل بالا نمود مدل محاسباتی کوثری است. واحد محاسباتی برای دریافت داده‌های جدید نیاز به درخواست از تابع input دارد. خطوط قرمز و روبه‌بالا نشان از درخواست واحد محاسباتی و خطوط آبی روبه‌پایین نشان از پاسخ واحد input می‌باشد.

دریافت کنیم.

تابع oracle به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} f : \sum^n = \sum^m \\ \text{Which} : m, n \in \mathbb{N} \end{cases}$$

ما در این نظریه کوثری‌ها را می‌شماریم و وضعیت آن‌ها را بررسی می‌کنیم.

۳.۳ معرفی و پیاده‌سازی الگوریتم دوچ

۱.۳.۳ مسئله‌ی دوچ

الگوریتم Deutsch اولین و ساده‌ترین الگوریتم کوانتومی است. این الگوریتم برای اولین بار در سال ۱۹۸۵ در مقاله‌ای مطرح شد؛ که توسط دیوید دوچ^۴ نوشته شده بود. این الگوریتم نقطه‌ی شروعی برای اثبات برتری کامپیوترهای کوانتومی نسبت به کامپیوترهای کلاسیک است. مسئله‌ی Deutsch یکی از ساده‌ترین مفاهیم ممکن را مطرح می‌کند. اگر یک تابع به فرم زیر تعریف شود:

^۴Deutsch David

$$f: \Sigma \rightarrow \Sigma$$

هدف بررسی ثابت بودن یا متعادل^۵ بودن تابع f است. به طور کلی، در ساده ترین حالت، می توان چهار وضعیت را برای تابع $f: \Sigma \rightarrow \Sigma$ در نظر گرفت:

a	$f_1(a)$	a	$f_2(a)$	a	$f_3(a)$	a	$f_4(a)$
0	0	0	0	0	1	0	1
1	0	1	1	1	0	1	1

شکل ۵.۳:

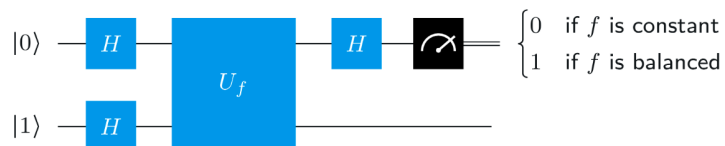
در شکل بالا توابع f_1 ، f_4 توابع ثابت و توابع f_2 و f_3 توابع متعادل هستند.

مسئله ی دوچ	
ورودی	$f: \Sigma \rightarrow \Sigma$
خروجی	صفر اگر تابع ثابت بود؛ یک اگر تابع متعادل بود.

در الگوریتم های کلاسیک برای حل این مسئله، حداقل دو حالت باید بررسی شود.

۲.۳.۳ الگوریتم دوچ

حال به بررسی الگوریتم دوچ می پردازیم. الگوریتمی که مسئله ی دوچ را با یک مدار کوانتومی حل می کند:

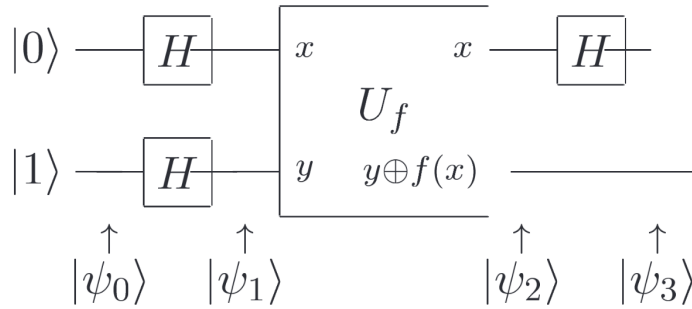


شکل ۶.۳:

^۵ balance. or Constante

یک تغییر ساده در مدار شکل ۳.۱ نشان می‌دهد که چگونه مدارهای کوانتومی می‌توانند با پیاده سازی الگوریتم Deutsch از مدارهای کلاسیک پیشی بگیرند.^۶ الگوریتم Deutsch ترکیبی از موازی سازی کوانتومی با خاصیتی از مکانیک کوانتوم به نام تداخل^۷ است. مشابه قبل، ابتدا از گیت هادامارد برای آماده سازی اولین کویت به عنوان $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ استفاده کنیم، اما اکنون کویت دوم y را با اعمال یک گیت هادامارد به حالت $|1\rangle$ به عنوان $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$ superposition آماده کنیم. به شکل زیر دقت کنید:

^۶ ما در واقع یک نسخه ساده شده و بهبود یافته از الگوریتم اصلی را ارائه می‌دهیم.
^۷ algorithm Deutsch the in used is Interference : algorithm deutsch in using is interference how
 that function a is function constant A functions. balanced and constant between distinguish to
 that function a is function balanced A input. its of regardless value, same the returns always
 half. other the for ۱ and inputs its of half for ۰ returns
 first The states. of superposition a in qubits two preparing first by works algorithm Deutsch The
 second The $|0\rangle$ and $|1\rangle$ of superposition equal the is which $|0\rangle$ state the in prepared is qubit
 opposite with $|1\rangle$ and $|0\rangle$ states the of superposition a is which $|0\rangle$ state the in prepared is qubit
 phases.
 and gate Hadamard a includes that circuit quantum a through passed then are qubits two The
 CNOT the and $|0\rangle + |1\rangle$ superposition the into $|0\rangle$ transforms gate Hadamard The gate. CNOT a
 qubit. second the to qubit first the of state the copies gate
 is qubit first the If measured. are qubits two the executed, been has circuit quantum the After
 to orthogonal is $|0\rangle$ state the because is This constant. is f function the then $|0\rangle$ be to measured
 interfere. destructively will states two the between interference the so $|0\rangle$ state the
 the because is This balanced. is f function the then $|1\rangle$ be to measured is qubit first the If
 constructively will states two the between interference the so $|1\rangle$ state the to parallel is $|0\rangle$ state
 interfere.
 solve to used be can interference quantum how of example simple a is algorithm Deutsch The
 distinguish can algorithm Deutsch the case, this In classically. solve to difficult is that problem a
 need would computer classical a while step, single a in functions balanced and constant between
 steps. of number exponential an take to



شکل ۷.۳: پیاده سازی مدار کوانتومی الگوریتم دوچ

حالت ورودی:

$$|\psi_0\rangle = |01\rangle$$

سیستم دو کیوبیتی تشکیل شده، پس از اعمال اثر دو گیت هادامارد می دهد:

$$|\psi_1\rangle = \left[\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right]$$

با کمی تأمل می توان دریافت که اگر U_f را به حالت $|x\rangle(|0\rangle - |1\rangle)$ اعمال کنیم، سپس به حالت $(-1)^{f(x)}|x\rangle(|0\rangle - |1\rangle)$ می رسیم. بنابراین اعمال U_f به $|x\rangle(|0\rangle - |1\rangle)$ ما را با یکی از دو امکان زیر مواجه می کند:

$$|\psi_2\rangle = \begin{cases} \pm \left[\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] & \text{if } f(0) = f(1) \\ \pm \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] & \text{if } f(0) \neq f(1) \end{cases}$$

با اعمال آخرین گیت هادامارد روی کیوبیت اول به حالت زیر خواهیم رسید:

$$|\psi_3\rangle = \begin{cases} \pm |0\rangle \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] & \text{if } f(0) = f(1) \\ \pm |1\rangle \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right] & \text{if } f(0) \neq f(1) \end{cases}$$

با در نظر گرفتن شرایط زیر می توان $|\psi_3\rangle$ را به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{cases} f(0) = f(1) \implies & f(0) \oplus f(1) = 0 \\ f(0) \neq f(1) \implies & f(0) \oplus f(1) = 1 \end{cases}$$

از این رو:

$$|\psi_3\rangle = \pm |f(0) \oplus f(1)\rangle \left[\frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \right]$$

بنابراین با اندازه‌گیری کیوبیت اول می‌توانیم $f(0) \oplus f(1)$ را تعیین کنیم. واقعاً جالب است! مدار کوانتومی به ما توانایی تعیین یک ویژگی جهانی از $f(x)$ ، یعنی $f(0) \oplus f(1)$ را داده است، با استفاده از تنها یک ارزیابی از $f(x)$! این سریعتر از آن چیزی است که با یک دستگاه کلاسیک امکان‌پذیر است، یک دستگاه کلاسیک حداقل به دو ارزیابی نیاز دارد. این مثال تفاوت بین موازی‌سازی کوانتومی و الگوریتم‌های تصادفی کلاسیک را برجسته می‌کند. به سادگی، ممکن است تصور شود که حالت $|0\rangle|f(0)\rangle + |1\rangle|f(1)\rangle$ مطابقت نزدیکی با یک رایانه کلاسیک تصادفی دارد که هرکدام از حالات $f(0)$ یا $f(1)$ با احتمال $1/2$ اندازه‌گیری می‌کند. تفاوت این است که در یک رایانه کلاسیک این دو گزینه همیشه یکدیگر را حذف می‌کنند. در یک رایانه کوانتومی، امکان دارد که دو گزینه با یکدیگر تداخل داشته باشند تا برخی از خواص کلی تابع f را با استفاده از چیزی شبیه به گیت هادامارد برای بازترکیب گزینه‌های مختلف، مانند آنچه در الگوریتم دوچ انجام شد، به دست آورند. اساس طراحی بسیاری از الگوریتم‌های کوانتومی این است که یک انتخاب هوشمندانه از تابع و تبدیل نهایی اجازه می‌دهد تا اطلاعات جهانی مفیدی در مورد تابع تعیین شود - اطلاعاتی که نمی‌توان به سرعت در یک رایانه کلاسیک به دست آورد.

۴.۳ الگوریتم دوچ - جوزا

algorithm, quantum general more a of case simple a is algorithm Deutsch's known application, The algorithm. Deutsch-Jozsa the as to refer shall we which Ams- in Alice, game. following the as described be may problem, Deutsch's as in Bob, to letter a in it mails and, $1 - 2^n$ to 0 from x number a selects terdam, which result, the with replies and (x) f function some calculates Bob Boston. of one of is which f function a use to promised has Bob Now, 1 or 0 either is balanced, is (x) f else or x , of values all for constant is (x) f either kinds: two half. other the for 0 and x , possible the all of half exactly for 1 to equal is, that constant a chosen has Bob whether certainty with determine to is goal Alice's fast How possible. as little as him with corresponding function, balanced a or succeed? she can

الگوریتم دوچ توضیح ساده از یک الگوریتم کوانتومی عمومی تر است که به عنوان الگوریتم دوچ-جوزا شناخته می شود. کاربرد این الگوریتم، که به عنوان مشکل دوچ شناخته می شود، به شرح زیر است: آلیس، در آمستردام، یک عدد x را از بازه $[0, 2^n - 1]$ انتخاب می کند و آن را در یک نامه به باب، در بوستون، می فرستد. باب یک تابع $f(x)$ را محاسبه می کند و نتیجه را که ۰ یا ۱ است، ارسال می کند. اکنون، باب قول داده است که از یک مدل تابع استفاده خواهد کرد؛ این تابع یا $f(x)$ که برای همه مقادیر x ثابت است، یا $f(x)$ متعادل است، یعنی حاصل آن برای دقیقاً نیمی از همه های x ممکن برابر با ۱ است و برای نیمی دیگر برابر با ۰ است.

هدف آلیس این است که با اطمینان و بکار بستن کمترین گام های ممکن تعیین کند که باب یک تابع ثابت یا متعادل را انتخاب کرده است. او چگونه می تواند به سرعت موفق شود؟ در حالت کلاسیک، آلیس ممکن است فقط یک مقدار x را در هر نامه به باب ارسال کند. بدترین حالت، الی باید حداقل $1 + \frac{2^n}{2}$ بار از باب سوال کند، زیرا ممکن است قبل از دریافت یک، $\frac{2^n}{2}$ مرتبه پاسخ ۰ را دریافت کند. آلیس باید یک را دریافت کند؛ تا بتواند به او بگوید که تابع باب متعادل است.

یعنی در بهترین الگوریتم کلاسیک که می تواند استفاده کند بنابراین به $1 + \frac{2^n}{2}$ پرسش نیاز دارد. توجه داشته باشید که در هر نامه، آلیس n بیت اطلاعات را به باب ارسال می کند. علاوه بر این، در این مثال، فاصله فیزیکی باب و آلیس و به تبع آن افزایش هزینه محاسبه $f(x)$ و دشواری های احتمالی اجرای تابع $f(x)$ در نظر گرفته نشده است.

اگر باب و آلیس بتوانند کویت ها را به جای بیت های کلاسیک مبادله کنند، و اگر باب موافقت کند $f(x)$ را با استفاده از تبدیل یک به U_f محاسبه کند، سپس آلیس می تواند هدف خود را در یک مکاتبه با باب و با استفاده از الگوریتم زیر به دست آورد.

با توجه به الگوریتم دوچ، آلیس یک رجیستر n کویتی را برای ذخیره پرس و جو خود آماده می کند و یک رجیستر کویت واحد را که به باب می دهد تا پاسخ را در آن ذخیره کند. او هر دو رجیستر پرس و جو و پاسخ خود را در یک حالت برهمه ای آماده می کند. باب $f(x)$ را با استفاده از موازی سازی کوانتومی ارزیابی می کند و نتیجه را به آلیس برمی گرداند. آلیس سپس با استفاده از اعمال تبدیل هادامارد روی رجیستر پرس و جو (n -کیوبیتی)، حالات برهمه ای تداخل می دهد و با انجام یک اندازه گیری مناسب، تعیین می کند که آیا f ثابت یا متعادل است.

گام های خاص الگوریتم در شکل ۲۰.۱ نشان داده شده است. بیایید با دنبال کردن این مدار، به بررسی حالات ایجاد شده بپردازیم. حالت ورودی $|0\rangle^{\otimes n} |1\rangle = |0\rangle^{\otimes n} |0\rangle$ ؛ شبیه حالت معادله (۴۱.۱) است، اما در اینجا رجیستر پرس و جو وضعیت n کویت را توصیف می کند که همه در حالت $|0\rangle$ آماده شده اند. پس از اعمال تبدیل هادامارد روی رجیستر پرس و جو و روی رجیستر پاسخ، می توان نوشت:

$$[\sqrt{q} \cdot | - q \cdot | \sum x^q \cdot , \cdot | n | x^q \sqrt{q} n] = | q \cdot | q$$

reg- answer the and values. all of superposition a now is register query The
 is f function the Next. $\frac{1}{\sqrt{2}}$ and $\frac{1}{\sqrt{2}}$ of superposition weighted evenly an in is ister
 now Alice ($\frac{1}{\sqrt{2}}$) giving $(x) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}$ f $\otimes y \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}$ $|x\rangle \otimes y \otimes |x\rangle : U_f$ using Bob) (by evaluated
 stored is evaluation function Bob's of result the which in qubits of set a has
 terms interferes now She state. superposition qubit the of amplitude the in
 To register. query the on transform Hadamard a using position super- the in
 the calculate first to helps it transform Hadamard the of result the determine
 $\frac{1}{\sqrt{2}} = x$ cases the checking By $|x\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}$ state a on transform Hadamard the of effect
 $\frac{1}{\sqrt{2}} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} (|0\rangle + |1\rangle) \otimes (|0\rangle + |1\rangle) = \frac{1}{4} (|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle)$ qubit single a for that see we separately $\frac{1}{\sqrt{2}} = x$ and
 equa- useful very the in succinctly more summarized be can This ($\frac{1}{\sqrt{2}}$) Thus
 Using $\frac{1}{\sqrt{2}}$ modulo z , and x of product inner bitwise the is $z \cdot x$ where tion($\frac{1}{\sqrt{2}}$)
 observes now Alice $\frac{1}{\sqrt{2}} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}$ ($\frac{1}{\sqrt{2}}$) evaluate now can we ($\frac{1}{\sqrt{2}}$) and equation this
 $x(-1)f \sum$ is $\frac{1}{\sqrt{2}} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}$ state the for amplitude the that Note register. query the
 $(x)/\sqrt{2}$.

رجیستر پرس و جو اکنون یک برهمنهی از همه مقادیر ممکن به‌شمار می‌آید؛ درحالی که رجیستر پاسخ در یک برهمنهی به‌طور مساوی وزن شده از ۰ و ۱ محسوب می‌شود.^۸

در مرحله بعد، تابع f توسط باب و به شکل Uf : $\langle y \rangle \mapsto \langle f(y) \rangle$ ارزیابی می شود، که (۴۸.۱) را می دهد.

آلیس اکنون یک مجموعه کویت دارد که در آن نتیجه اعمال تابع باب در دامنه کویت حالت برهمنهی ذخیره می شود. او اکنون با استفاده از تبدیل هادامارد روی رجیستر پرس و جو، عبارات را در حالت برهمنهی کوانتومی تداخل می کند.

برای تعیین نتیجه تبدیل هادامارد، بهترین روش ابتدا اثر تبدیل هادامارد را روی یک حالت $|x\rangle$ محاسبه کنیم. با بررسی موارد $x = 0$ و $x = 1$ به صورت جداگانه می بینیم که برای یک کویت واحد $|x\rangle$ $H|x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + (-1)^x |1\rangle)$ می باشد. بنابراین (۴۹.۱)

این را می توان به طور خلاصه در معادله بسیار مفید زیر خلاصه کرد:

(5.1)

جایی که $z \cdot x$ product inner bitwise z و x است، به modulo ۲.

با استفاده از این معادله و (۴۸.۱) اکنون می‌توانیم $\Delta \epsilon_{\text{۳۹}}^{\text{۹۹}}$ را ارزیابی کنیم:

^۸ یعنی احتمال رخدادن صفر و یک یکسان است.

آلیس اکنون رجیستر پرس و جو را مشاهده می کند. توجه داشته باشید که دامنه برای حالت $1 \leq n \leq 10^5$ است.

discern to – balanced f and constant f – cases possible two the at look Let's
or ψ is $\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x \in \{0,1\}^n} (-1)^{f(x)} |x\rangle$ for amplitude the constant is f where case the In happens. what
length unit of is $\frac{1}{\sqrt{2^n}}$ Because takes. (x) f value constant the on depending, ψ –
will observation an and zero. be must amplitudes other the all that follows it
and positive the then balanced is f If register. query the in qubits all for ψ 's yield
amplitude an leaving cancel. $\frac{1}{\sqrt{2^n}}$ for amplitude the to contributions negative
one least at on ψ than other result a yield must measurement a and zero. of
the then ψ 's all measures Alice if Summarizing. register. query the in qubit
Deutsch–Jozsa The balanced. is function the otherwise constant: is function
below. summarized is algorithm

از آنجایی که $\frac{1}{2} \leq \frac{1}{3}$ طول واحد است، نتیجه می‌گیریم که تمام دامنه‌های دیگر باید صفر باشند، و یک مشاهده ۰ را برای همه کت‌ها در رجستر بس و جو به همراه خواهد داشت.

به طور خلاصه، اگر α_i همه α_i را اندازه گیری کند، تابع ثابت است؛ در غیر این صورت تابع متعادل است.

الگوریتم Deutsch-Jozsa در زیر خلاصه شده است:

the performs which Uf box black A (\) Inputs: Deutsch–Jozsa Algorithm:
 \bullet \mathbb{F}_2^n (x) f and $\forall x \in \mathbb{F}_2^n, f(x) = 0$ or $f(x) = 1$ for (x) \mathbb{F}_2^n f \mathbb{F}_2^n \mathbb{F}_2^n \mathbb{F}_2^n transformation
 (x) f else or x_i of values all for constant either is (x) f that promised is It . \ \mathbb{F}_2^n
 for \bullet and x_i possible the all of half exactly for \forall to equal is, that balanced, is
 evalu- One Runtime: constant. is f if only and if \bullet Outputs: half. other the
 \mathbb{F}_2^n . \mathbb{F}_2^n state initialize \mathbb{F}_2^n \mathbb{F}_2^n \ \mathbb{F}_2^n . \ Procedure: succeeds. Always . Uf of ation

Hadamard using superposition create $\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} |x\rangle$. ۱. ۲. ۳. gates. ۴. Uf using f function calculate $\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} (-1)^{f(x)} |x\rangle$. ۵. transform Hadamard perform $\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} (-1)^{x \cdot z + f(x)} |x\rangle$. computer quantum a that shown We've z output final obtain to measure z compared f function the of ation evalu- one with problem Deutsch's solve can impres- appears This evaluations. $1 + 2^n/2$ for requirement classical the to is lem prob- Deutsch's First, caveats. important several are there but sive. Second, applications. known no has it problem: important especially an not an ways some in is algorithms quantum and classical between comparison the is function the evaluating for method the as comparison, oranges and apples probabilistic a use to allowed is Alice if Third, cases. two the in different quite randomly few a for (x) f evaluate to Bob asking by then computer, classical is f whether probability high with determine quickly very can she x chosen than realistic more perhaps is scenario probabilistic This balanced. or constant caveats, these Despite considering. been have we scenario deterministic the quan- impressive more for seeds the contains algorithm Deutsch-Jozsa the principles the understand to attempt to enlightening is it and algorithms, tum operation. its behind Deutsch-Jozsa ورودی‌ها: (۱) یک جعبه سیاه Uf که تبدیل زیر را انجام می‌دهد $|x\rangle|y\rangle \rightarrow |x\rangle|y \oplus f(x)\rangle$ ، برای $x = 0, \dots, 2^n - 1$ و $f(x) \in \{0, 1\}$. قول داده شده است که f (x) برای همه مقادیر x ثابت است یا f (x) متعادل است، یعنی برای دقیقاً نیمی از همه‌های x ممکن برابر با ۱ و برای نیمی دیگر ۰ است. خروجی: ۰ اگر و فقط اگر f ثابت باشد. زمان اجرا: یک ارزیابی Uf. همیشه موفق می‌شود. روش:

initialize کنید $\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} |x\rangle$ حالت را با استفاده از دروازه‌های Hadamard $\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} (-1)^{f(x)} |x\rangle$ تابع f را با استفاده از Uf محاسبه کنید $\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} (-1)^{x \cdot z + f(x)} |x\rangle$ تبدیل Hadamard را انجام دهید z اندازه گیری کنید تا خروجی نهایی z را بدست آورید ما نشان داده‌ایم که یک کامپیوتر کوانتومی می‌تواند مشکل Deutsch را با یک ارزیابی حل کند - ارزیابی تابع f در مقایسه با نیاز کلاسیک برای $1 + 2^n/2$ ارزیابی. این به نظر چشمگیر است، اما چند نکته مهم وجود دارد. اول، مشکل Deutsch نیست یک مشکل مهم است؛ هیچ کاربرد شناخته شده ای ندارد. دوم، مقایسه بین الگوریتم‌های کلاسیک و کوانتومی تا حدودی مقایسه سیب و پرتقال است، زیرا روش برای ارزیابی تابع در دو مورد بسیار متفاوت است. سوم، اگر آلیس مجاز باشد از یک کامپیوتر کلاسیک

احتمالی استفاده کند، سپس با درخواست از باب برای ارزیابی $f(x)$ برای چند x به صورت تصادفی می تواند بسیار سریع تعیین کند با احتمال بالا اینکه f ثابت یا متعادل است. این سناریو احتمالی است شاید واقع بینانه تر از سناریوی deterministic که ما در نظر گرفته ایم. علیرغم این ظرافت ها، الگوریتم Deutsch-Jozsa حاوی بذره های الگوریتم های کوانتومی بیشتر و چشمگیرتر است، و درک اصول پشت آن روشنتر است. عملکرد آن.

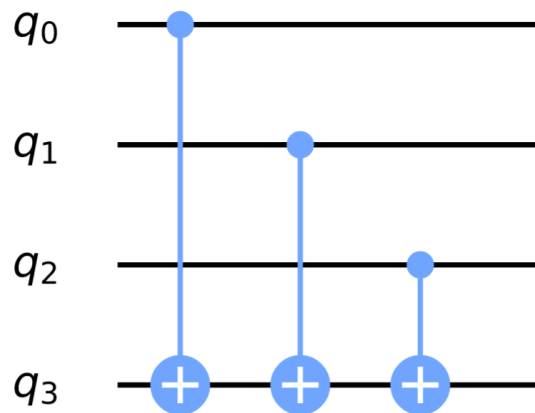
۵.۳ ساخت یک اوراکل کوانتومی

بیایید راه های مختلفی را ببینیم که می توانیم یک اوراکل کوانتومی ایجاد کنیم.

برای یک تابع ثابت، ساده است:

اگر $f(x) = 0$ ، گیت را به کیوبیت در ثبات ۲ اعمال کنید. اگر $f(x) = 1$ ، گیت را به کیوبیت در ثبات ۲ اعمال کنید.

برای عملکرد متعادل، مدارهای مختلفی وجود دارد که می توانیم ایجاد کنیم. یکی از راه هایی که می توانیم متوازن بودن مدار خود را تضمین کنیم، انجام یک CNOT برای هر کیوبیت در ثبات ۱، با کیوبیت موجود در ثبات ۲ به عنوان هدف است. مثلاً:



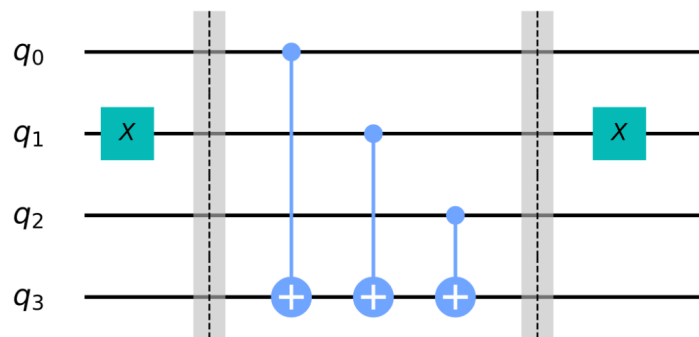
شکل ۵.۳:

در تصویر بالا، سه کیوبیت بالا، رجیستر ورودی را تشکیل می دهند و کیوبیت پایین، ثبات خروجی است. در جدول زیر می توانیم ببینیم کدام حالت های ورودی کدام خروجی را می دهند: ما می توانیم نتایج

حالاتی ورودی که به خروجی صفر منجر می‌شوند	حالاتی ورودی که به خروجی صفر منجر می‌شوند
۰۰۱	۰۰۰
۱۰۰	۰۱۱
۰۱۰	۱۰۱
۱۱۱	۱۱۰

جدول ۱.۳: This is a simple table.

را تغییر دهیم و در عین حال تعادل آنها را با قرار دادن کنترل‌های انتخاب شده در X-Gates حفظ کنیم. برای مثال، مدار و جدول نتایج آن را در زیر ببینید:



شکل ۹.۳:

حالاتی ورودی که به خروجی صفر منجر می‌شوند	حالاتی ورودی که به خروجی صفر منجر می‌شوند
۰۰۰	۰۰۱
۰۱۱	۰۱۰
۱۰۱	۱۰۰
۱۱۰	۱۱۱

جدول ۲.۳: This is a simple table.

۶.۳ simulation vs comp

فصل ۴

شبیه‌سازی پدیده‌های کوانتومی

در این بخش قصد داریم به بررسی پروتکل‌های ابتدایی در نظریه‌ی اطلاعات کوانتومی بپردازیم. تمامی این پروتکل‌ها به تعداد کمی کیوبیت نیاز دارند؛ و در آزمایشگاه به صورت تجربی پیاده‌سازی شده‌اند.

۱.۴ states Bell

در اغلب موارد، سیستم از دو کیوبیت درهم‌تنیده تشکیل شده‌است. تابع حالت این سیستم‌ها به شکل زیر تعریف می‌شوند:

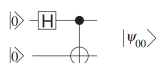
$$|\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

برای آماده‌سازی این حالت کوانتومی، در حالت $|0\rangle$ داریم. با اعمال یک گیت هدامارد روی یکی از کیوبیت‌ها و سپس با کنترل آن با گیت CNOT، (به نحوی که کیوبیت دوم هدف قرارگیرد.) می‌توان به یک حالت درهم‌تنیده رسید. می‌توان این مراحل را به شکل زیر شرح داد:

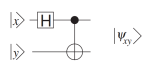
$$|\psi_{00}\rangle = C_{10}H_1|00\rangle$$

$$|\psi_{xy}\rangle = C_{10}H_1|xy\rangle$$

از آنجایی که چهار حالت $|xy\rangle$ یک مجموعه متعامد هستند و گیت‌های هدامارد و cNOT یک هستند، چهار حالت درهم‌تنیده $|\psi_{xy}\rangle$ نیز یک مجموعه متعامد هستند، که به نام پایه Bell نامگذاری شده‌اند. می‌توان رابطه‌ی بالا را یک حالت کلی تعمیم داد:



(a)

شکل ۱.۴: $y = x$ 

(b)

(b)

شکل ۲.۴: $y = 3 \sin x$

شکل ۳.۴: (a) circuit A that creates the entangled state $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ from the unentangled computational-basis states $|0\rangle$ and $|1\rangle$. (b) circuit A that creates the entangled states $|xy\rangle$ from the unentangled computational-basis states $|x\rangle$ and $|y\rangle$.

$$|\psi_{xy}\rangle = C10H1X_1^x X_0^y |00\rangle$$

در نظر داشته باشید که حالات بل قابل تبدیل به یکدیگرند؛ با کمک رابطهی تعمیم یافته می‌توان از هر حالت بل به حالت $|00\rangle$ رسید. توضیحات درباره‌ی تبدیلات بنویس این روابط به شکل‌های متعدد قابل بیان است که از حوصله‌ی بحث خارج است.

۲.۴ entanglement

۳.۴ coding dense super

Although an infinite amount of information is needed to specify the state $|\psi\rangle$, it is not possible to acquire this information in a single shot. If we have a system in state $|\psi\rangle$ and we perform a measurement, we obtain a classical bit of information. If we repeat the experiment many times, we can learn more about the state. In quantum mechanics, the state of a system is described by a vector in a Hilbert space. The state of a system can be changed by a unitary transformation. The state of a system can be measured, and the result is a classical bit of information. The state of a system can be entangled with another system. The state of a system can be superimposed on another state. The state of a system can be coded. The state of a system can be dense. The state of a system can be super.

measure- further no and $|0\rangle$ or $|1\rangle$ either is Qbit the of state the that After
can Alice most The $|00\rangle$. state original its about anything him teach can ment
informa- of bit single a is Qbit single a him sending by Bob to communicate
the in Qbits of pair entangled an of member one has Alice however, If tion.
suitably by then other, the has Bob and $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|00\rangle + |11\rangle)$ $\sqrt{2} = 2$ state
convey can she Bob, to it sending then and pair the of member her preparing
information. of bits two him to

Qbit, her to ZX or Z, X, σ_x transformation the applying first by this does She
If $|00\rangle$ or $|11\rangle$ message the Bob send to wants she whether on depending
into pair the of state the transform these $(\frac{1}{\sqrt{2}})$ in left the on Qbit the is hers
 $+ |00\rangle + |11\rangle$ $\sqrt{2} = 2$ $|00\rangle$ $|11\rangle$ states Bell orthogonal mutually four the of one
 $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|00\rangle - |11\rangle)$ $\sqrt{2} = 2$ $|00\rangle$ $|11\rangle$ $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|01\rangle + |10\rangle)$ $\sqrt{2} = 2$ $|01\rangle$ $|10\rangle$
 $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|01\rangle - |10\rangle)$ $\sqrt{2} = 2$ $|01\rangle$ $|10\rangle$

controlled- the through pair the sends He Bob, to over Qbit her sends then She
 $|00\rangle$ Cab get to control, as Alice from received he Qbit the using, Cab gate NOT
 $= 2$ $|00\rangle$ $|11\rangle$ $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|00\rangle + |11\rangle)$ $\sqrt{2} = 2$ $|00\rangle$ $|11\rangle$ $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|01\rangle + |10\rangle)$ $\sqrt{2} = 2$
 $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|01\rangle - |10\rangle)$ $\sqrt{2} = 2$ $|01\rangle$ $|10\rangle$

Ha $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|00\rangle + |11\rangle) = 2$ $|00\rangle$ $|11\rangle$ Ha get to transform Hadamard a applies he then and
 $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|00\rangle - |11\rangle) = 2$ $|00\rangle$ $|11\rangle$ $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|01\rangle + |10\rangle) = 2$ $|01\rangle$ $|10\rangle$
the precisely – $|00\rangle$ or $|11\rangle$ him gives then Qbits two the Measuring
Bell the transforming of process This send, to wished Alice message two-bit
by $(\frac{1}{\sqrt{2}})$ process the undoing i.e. – basis computational the into back basis
then and – basis computational the from constructed was basis Bell the which
demon- directly can One basis.” Bell the in “measuring called is measuring
the of any through going without diagrams, circuit with works this that strate
 $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|00\rangle - |11\rangle)$ in analysis

transmit to wishes she y and x bits two the represents Alice that Suppose
wires, two top (the Qbits two of $|x\rangle|y\rangle$ state computational-basis the as Bob to
bottom (the $|00\rangle$ state the in initially Qbits two has Bob If $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|00\rangle + |11\rangle)$ Figure
bits two the gets $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|00\rangle - |11\rangle)$ Figure in circuit the then $(\frac{1}{\sqrt{2}})(|01\rangle + |10\rangle)$ Figure in wires two
 $|x\rangle|y\rangle$ state the transforming way, classical straightforward a in Bob to

cou- Qbit-to-Qbit direct of means by left the on $|x\rangle|y\rangle|x\rangle|y\rangle$ to right the on
on operations classical only involves procedure The gates. cNOT two via pling
states. meaningful classically

her between interactions explicit by Bob to Alice from bits two the gets It
this transform can One Cbits. for well equally work would It his. and Qbits
expanding by protocol quantum exotic more the into procedure classical direct
the of one expands first One gates. quantum of products into gates cNOT the
Qbit control the on acting Z Because (b)۴.۶ Figure in HCZH into gates C
expand further can we inverse, own its is C because and C with commutes
either on gates C and H the bring then can We (c)۴.۶ Figure to (b)۴.۶ Figure
(d)۴.۶ Figure get to right and left extreme the to CZ the of side

the into (d)۴.۶ Figure of left the on gates C two the expand also can We
flip to is set either of action the since (e)۴.۶ Figure of left the on gates C three
control two the of states computational-basis the if only and if Qbit target the
Be- unaltered. Qbits control the of states the leaving while different, are Qbits
the X, of action the under invariant is $(\frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle)(\frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle) = H|0\rangle$ state the cause
(e)۴.۶ Figure and identity, the as acts (e)۴.۶ Figure of left extreme the on C
as action same the has (f)۴.۶ Figure that fact The (f)۴.۶ Figure to simplifies
pair The protocol. dense-coding the of content the all contains (a)۴.۶ Figure
produce to $\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$ state the on acts (f)۴.۶ Figure of left the on $C \otimes H$ gates of
Bob to given is $\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$ Qbit pair, the of Qbit bottom The (۱۵.۶) state entangled the
two, upper the possesses also who Alice, to given is $\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$ Qbit one, upper the and
۳ and ۲ Qbits

on depending ۱ Qbit on ZX or Z, X, as acts $C \otimes H$ CZ gates of pair The
This $\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$ or $\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$, $\frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle$, $\frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle$ are ۲ and ۳ Qbits of states the whether
entangled the of member the to applies Alice transformation the reproduces
to wishes she bits two the of values the on depending possession, her in pair
Bob. to transmit

pre- is right the on $H \otimes C$ pair final The Bob. to ۱ Qbit sends then Alice
entangled reunited the on performs Bob that (۱۸.۶) transformation the cisely
Alice that y x, values the yields which measurement, his making before pair

information quantum of tricks many coding, dense Like transmit. to wished more or two on rely teleportation, next, examine we one the including theory, in stored carefully ago, time some prepared Qbits, entangled sharing people prepa- the While use. their for occasion an awaiting locations remote their to transmission their and photons) of form the (in Qbits entangled of ration entanglement -preserving, into them putting achieved, been has places distant challenge. difficult a remains storage long-term local.

۴.۴ Teleport

book isac فرض کنید آلیس یک کیوبیت در حالت زیر دارد:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

کارول ممکن است با اعمال یک عملگر یکه به یک کیوبیت در حالت استاندارد، کیوبیت را از حالت $|0\rangle$ به حالت $|\psi\rangle$ تبدیل کرده باشد. کارول بدون اعلام نوع عملگر یکه به آلیس، کیوبیت را برای او ارسال می‌کند. حال آلیس می‌خواهد بدون دسترسی داشتن به کیوبیت باب، تغییراتی را در کیوبیت او ایجاد کند؛ این تنها در صورتی ممکن است که کیوبیت باب و آلیس درهمتنیده باشند. هرچند آلیس و باب می‌توانند از طریق راه‌های کلاسیک (نظیر تلفنی صحبت کردن و ...) با یکدیگر ارتباط برقرار کنند؛ ولی نمی‌توانند دسترسی مستقیم به کیوبیت یکدیگر داشته باشند.

$$|\phi\rangle = 1/\sqrt{2}(|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle)$$

===== اکنون تکنیک های چند صفحه آخر را برای درک چیزی غیر معمول به کار خواهیم برد. پیش پا افتاده، غافلگیر کننده و بسیار سرگرم کننده - دوربری کوانتومی! تله پورت کوانتومی یک است تکنیک حرکت حالات کوانتومی به اطراف، حتی در غیاب ارتباط کوانتومی کانال nications که فرستنده حالت کوانتومی را به گیرنده پیوند می دهد. در اینجا نحوه عملکرد دوربری کوانتومی آمده است. آلیس و باب مدت ها پیش با هم آشنا شدند اما اکنون زندگی می کنند دور از هم. در حالی که آنها با هم یک جفت EPR تولید کردند که هر کدام یک کیوبیت از EPR را می گرفتند وقتی از هم جدا شدند جفت شوند سال ها بعد، باب مخفی است و ماموریت آلیس باید انجام شود او تصمیم می گیرد آن را بپذیرد، یعنی یک کیوبیت [۹۹] به باب تحویل دهد. او وضعیت را نمی داند کیوبیت، و علاوه بر این فقط می تواند اطلاعات کلاسیک را برای باب ارسال کند. آیا آلیس باید قبول کند ماموریت؟ به طور شهودی، همه چیز برای آلیس بسیار بد به نظر می رسد. او وضعیت [۹۹] آن را نمی داند کیوبیت او باید برای باب بفرستد و قوانین مکانیک کوانتومی او را از این کار باز می دارد تعیین وضعیت زمانی که

او فقط یک نسخه از $|\psi\rangle$ در اختیار دارد. چه بدتر از آن، حتی اگر او حالت $|\psi\rangle$ را می‌دانست، توصیف دقیق آن به مقدار بی‌نهایت نیاز دارد. اطلاعات کلاسیک از آنجایی که $|\psi\rangle$ مقادیر را در یک فضای پیوسته می‌گیرد. بنابراین حتی اگر او انجام دهد بدانید، $|\psi\rangle$ همیشه طول می‌کشد تا آلیس وضعیت را برای باب توصیف کند. نگاه نمی‌کند برای آلیس خوبه خوشبختانه برای آلیس، انتقال از راه دور کوانتومی راهی برای استفاده از آن است جفت EPR در هم به منظور ارسال $|\psi\rangle$ به باب، تنها با سر بار کوچک کلاسیک ارتباط به طور کلی، مراحل حل به شرح زیر است: آلیس با کیوبیت $|\psi\rangle$ با نصف او از جفت EPR و سپس دو کیوبیت در اختیارش را اندازه‌گیری می‌کند و به دست می‌آورد یکی از چهار نتیجه کلاسیک ممکن، ۰۰، ۰۱، ۱۰، و ۱۱. او این اطلاعات را به باب بسته به پیام کلاسیک آلیس، باب یکی از چهار عمل خود را انجام می‌دهد نیمه از جفت EPR به طرز شگفت‌انگیزی، با انجام این کار او می‌تواند حالت اولیه را بازیابی کند! $|\psi\rangle$ مدار کوانتومی نشان داده شده در شکل ۱۳.۱ توصیف دقیق تری از کوانتوم ارائه می‌دهد دوربری حالتی که باید از راه دور منتقل شود عبارت است از $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + \alpha|01\rangle + \alpha|10\rangle + |11\rangle)$ و α ناشناخته هستند. دامنه‌ها حالت ورودی مدار $|\psi\rangle$ است $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + \alpha|01\rangle + \alpha|10\rangle + |11\rangle)$ ، $2\sqrt{1} [(|01\rangle + |10\rangle) + (\alpha|01\rangle + \alpha|10\rangle)]$ ، (29.1)

که در آن از این قرارداد استفاده می‌کنیم که دو کیوبیت اول (در سمت چپ) متعلق به آلیس هستند و کیوبیت سوم به باب. همانطور که قبلاً توضیح دادیم، کیوبیت دوم آلیس و کیوبیت باب در حالت EPR شروع کنید. آلیس کیوبیت‌های خود را از طریق دروازه می‌فرستد و به دست می‌آورد $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [(|01\rangle + |10\rangle) + (\alpha|01\rangle + \alpha|10\rangle)]$. (۳۰.۱) سپس اولین کیوبیت را از طریق دروازه هادامارد می‌فرستد و به دست می‌آورد $|\psi\rangle = \frac{1}{2} [(|01\rangle + |10\rangle) + (\alpha|01\rangle + \alpha|10\rangle)]$. (۳۱.۱) این حالت را می‌توان به روش زیر بازنویسی کرد، به سادگی با گروه بندی مجدد عبارات: $|\psi\rangle = \frac{1}{2} [(\alpha|01\rangle + |10\rangle) + (\alpha|10\rangle + |01\rangle)]$. (۳۲.۱) این عبارت به طور طبیعی به چهار اصطلاح تقسیم می‌شود. عبارت اول دارای کیوبیت‌های آلیس است در حالت $|01\rangle$ و کیوبیت باب در حالت $|\alpha|01\rangle + |10\rangle$ - که حالت اصلی است. $|\psi\rangle$ اگر آلیس یک اندازه‌گیری را انجام دهد و نتیجه ۰۰ را به دست آورد، سیستم باب این کار را انجام می‌دهد در حالت بودن $|\psi\rangle$ به طور مشابه، از عبارت قبلی می‌توانیم پست باب را بخوانیم حالت اندازه‌گیری، با توجه به نتیجه اندازه‌گیری آلیس: ۰۰ - $|\psi\rangle = \frac{1}{2} [(\alpha|01\rangle + |10\rangle) + (\alpha|10\rangle + |01\rangle)]$. (۳۳.۱) $|\psi\rangle = \frac{1}{2} [(\alpha|01\rangle + |10\rangle) + (\alpha|10\rangle + |01\rangle)]$. (۳۴.۱) $|\psi\rangle = \frac{1}{2} [(\alpha|01\rangle + |10\rangle) + (\alpha|10\rangle + |01\rangle)]$. (۳۵.۱) $|\psi\rangle = \frac{1}{2} [(\alpha|01\rangle + |10\rangle) + (\alpha|10\rangle + |01\rangle)]$. (۳۶.۱) بسته به نتیجه اندازه‌گیری آلیس، کیوبیت باب به یکی از این موارد ختم می‌شود چهار حالت ممکن البته برای اینکه بدانیم در کدام حالت است باید نتیجه را به باب گفت اندازه‌گیری آلیس - بعداً نشان خواهیم داد که این واقعیت است که از دوربری جلوگیری می‌کند

رام برای انتقال اطلاعات سریعتر از نور استفاده می شود. وقتی باب این معنی را یاد گرفت در نتیجه، باب می تواند وضعیت خود را «تثبیت» کند، و با استفاده از روش مناسب [۴۹] بهبود یابد. دروازه کوانتومی به عنوان مثال، در موردی که اندازه گیری ۰۰ را به دست می آورد، باب این کار را نمی کند نیاز به انجام هر کاری اگر اندازه گیری ۰۱ باشد، باب می تواند با اعمال کردن حالت خود را اصلاح کند دروازه X اگر اندازه گیری ۱۰ باشد، باب می تواند وضعیت خود را با اعمال Z ثابت کند دروازه. اگر اندازه گیری ۱۱ باشد، باب می تواند با اعمال ابتدا یک X و حالت خود را اصلاح کند سپس یک دروازه Z. به طور خلاصه، باب باید تبدیل ZM_1 XM_2 را اعمال کند (به چگونگی آن توجه کنید زمان در نمودارهای مداری از چپ به راست می رود، اما در سمت راست در محصولات ماتریسی می رود اول اتفاق می افتد) به کیوبیت او، و او حالت [۴۹] را بازیابی می کند. بسیاری از ویژگی های جالب تله پورت وجود دارد که به برخی از آنها اشاره خواهیم کرد به بعد در کتاب. در حال حاضر به اظهار نظر در مورد چند مورد بسنده می کنیم جنبه های. اولاً، آیا تله پورتاسیون به فرد اجازه نمی دهد حالت های کوانتومی را سریعتر از آن ارسال کند سبک؟ این امر نسبتاً عجیب و غریب خواهد بود، زیرا نظریه نسبیت نشان می دهد که سریعتر از انتقال اطلاعات نور می توان برای ارسال اطلاعات به عقب در زمان استفاده کرد. خوشبختانه، تله پورت کوانتومی امکان ارتباط سریعتر از نور را فراهم نمی کند. زیرا برای تکمیل دوربری، آلکس باید نتیجه اندازه گیری خود را به آن ارسال کند باب از طریق یک کانال ارتباطی کلاسیک.

ما در بخش ۳.۴.۲ نشان خواهیم داد که بدون این ارتباط کلاسیک، از راه دور هیچ اطلاعاتی را منتقل نمی کند. کانال کلاسیک با سرعت نور محدود می شود، بنابراین نتیجه می شود که تله پورت کوانتومی نمی تواند سریعتر از سرعت نور انجام شود و پارادوکس ظاهری را حل کند. معمای دوم در مورد تله پورتاسیون این است که به نظر می رسد یک کپی از حالت کوانتومی در حال انتقال از راه دور ایجاد می کند، که آشکارا قضیه عدم شبیه سازی مورد بحث در بخش ۵.۳.۱ را نقض می کند. این نقض فقط توهمی است زیرا پس از فرآیند انتقال از راه دور فقط کیوبیت هدف در حالت [۴۹] باقی می ماند و کیوبیت داده اصلی بسته به نتیجه اندازه گیری به یکی از حالت های پایه محاسباتی ۰ یا ۱ می رسد. در کیوبیت اول از تله پورت کوانتومی چه چیزی می توانیم یاد بگیریم؟ خیلی زیاد! این خیلی بیشتر از یک ترفند ساده است که می توان با حالت های کوانتومی انجام داد. تله پورت کوانتومی بر قابلیت تعویض منابع مختلف در مکانیک کوانتومی تاکید می کند و نشان می دهد که یک جفت EPR مشترک به همراه دو بیت کلاسیک ارتباط، منبعی حداقل برابر با یک کیوبیت ارتباط است. محاسبات کوانتومی و اطلاعات کوانتومی روش های زیادی را برای تبادل منابع نشان داده اند که بسیاری از آنها بر اساس تله پورت کوانتومی ساخته شده اند. به طور خاص، در فصل ۱۰ توضیح می دهیم که چگونه می توان از تله پورت برای ساخت دروازه های کوانتومی مقاوم در برابر اثرات نویز استفاده کرد و در فصل ۱۲ نشان دادیم که انتقال از راه دور با ویژگی های کدهای تصحیح خطای کوانتومی ارتباط نزدیکی دارد. علیرغم این ارتباط با موضوعات دیگر، منصفانه است که بگوییم که ما تازه در حال درک این موضوع

هستیم که چرا انتقال از راه دور کوانتومی در مکانیک کوانتومی امکان پذیر است. در فصل‌های بعدی سعی می‌کنیم برخی از بیش‌هایی را توضیح دهیم که چنین درکی را ممکن می‌سازد. ۱

oracle a determine to how