



IBM2021 量子挑戰賽

作者：黃琮暉、張仁瑀、徐育兆、林祐睿、林橋毅

作者簡介

黃琮暉是臺灣大學物理學博士，現任職於中原大學資訊工程系與中原大學量子資訊中心，研究的領域是量子計算、量子資訊。

張仁瑀、徐育兆、林祐睿、林橋毅是學生量子電腦交流會的成員。

1981 年麻省理工學院與 IBM 舉辦的一場物理計算會議開啟了量子計算元年 [1]。在 2021 年 5 月 IBM 爲了慶祝量子計算 40 年舉辦線上量子挑戰賽，其中提及了量子計算中 5 個非常重要的議題，如下圖 1。而這 5 題也代表了量子電腦從理論邁入實作進而進入即將應用於實際課題的重要轉捩點，因此格外有意義。

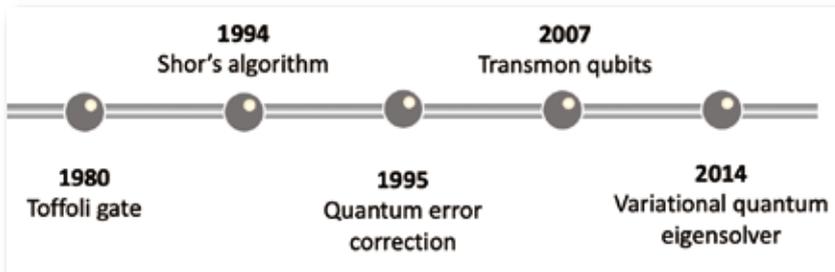


圖 1：2021 年 IBM 挑戰賽的 5 大題。

第一題：利用單位閘 (CX, RZ, SX, X 閘) 組成托弗里閘

1980 年代，美籍教授托弗里 (Tommaso Toffoli) 建構托弗里閘 (Toffoli gate) [2-3]，其重要性是因為量子計算中可以藉由托弗里閘組成古典電腦中的 NAND 和 AND 閘，這些邏輯閘是建構古典邏輯運算的根基。除此之外在設計量子演算法最核心又重要的「神諭」(oracle) 時，常常會有托弗里閘的存在，因此托弗里閘是非常重要的量子邏輯閘。除此之外根據數學理論，量子邏輯閘的通用閘 (universal gate) 只需要所有的單閘與 CNOT 閘 (所謂的所有單閘爲可以實現布洛赫球面上任一點，

CNOT 閘爲控制否閘，而通用量子邏輯閘也可以是所有的單閘加上 SWAP 閘：交換閘)。因此 IBM 挑戰賽的第一題便是利用單位閘 (CX, RZ, SX, X 閘) 組成托弗里閘。

這一題不僅是一個數學題，我們當然可以找出每一個矩陣並算出如何符合這個 8×8 矩陣的最佳解 (其實在維基百科就可以找到解答)，只需要做些許的修改便能通過挑戰，這並不代表沒有深度，它的價值在於將我們帶回 50 年前的量子電腦初期，用當時科學家手邊有的資訊來創建這一個邏輯閘，學到的知識有限，卻帶給我們深刻的歷史之旅。而此題我們的解法如下圖 2：



圖 2：第一題解答。可知所需的量子邏輯閘只有 R_Z 、 \sqrt{x} 與 CNOT 閘。

而這題帶給我們更多的知識，當我們回顧托弗里的背景時，才知此閘是由研究可逆計算發展而來的，可逆運算是量子力學的基本定理，因為最後的機率合必爲 1，設計邏輯閘要符合量子力學的可逆原理來設計，才能發揮量子電腦的量子特性；從 1960 年代人們研究可逆邏輯閘時便想減少計算過程的熱量產生，因為根據熵理論，信息的散失會以熱的形式耗散在環境中，而可逆邏輯閘能實現只將

——— 本文特別致謝科技部的支持，其計畫編號為 MOST111-2119-M-033-001-。 ———