鬍子拉拉物理教室

高中生也聽得懂的
量子電腦

中國文化大學 鬍子拉拉鄒忠毅老師

量子資訊的發展及
物理系在其中的角色

為什麼量子電腦會變得很重要

中國文化大學 鬍子拉拉鄒忠毅老師

傳統電腦遇到的麻煩事

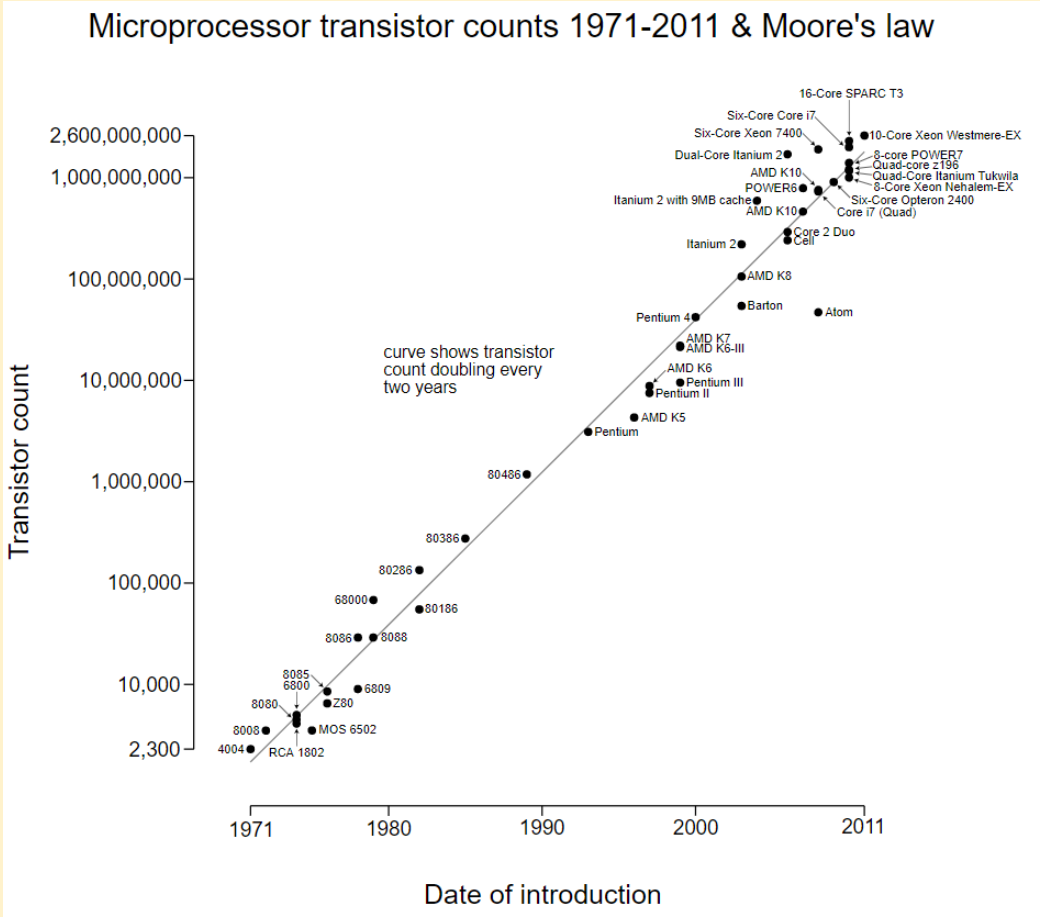
- **傳統電腦發展的瓶頸：**
  - 摩爾定律
  - 奈米製程的極限
  - 量子穿隧效應
- **量子電腦的出現**
  - 基於量子力學的計算設備
  - 與傳統電腦的差異
  - 技術的提升與雛形的出現

摩爾定律

- 摩爾定律
  - 戈登·摩爾提出（英特爾（Intel）創始人之一）
  - 關於：積體電路的奈米製程的極限
  - 內容：積體電路上可容納的電晶體數目，約每隔兩年（一說18個月）便會增加一倍

摩爾定律

圖中電腦處理器中電晶體數目的指數增長曲線符合摩爾定律



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transistor_Count_and_Moore%27s_Law_-_2011.svg

Wgsimon / CC BY-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0)

奈米製程的極限

- 台積電很厲害
  - 5奈米製程

資料來源：維基百科
半導體器件製造
https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%8A%E5%AF%BC%E4%BD%93%E5%99%A8%E4%BB%B6%E5%88%B6%E9%80%A0

半導體製程

10 μm – 1971年
6 μm – 1974年
3 μm – 1977年
1.5 μm – 1982年
1 μm – 1985年
800 nm – 1989年
600 nm – 1994年
350 nm – 1995年
250 nm – 1997年

600 nm – 1994年
350 nm – 1995年
250 nm – 1997年
180 nm – 1999年
130 nm – 2001年
90 nm – 2004年
65 nm – 2006年
45 nm – 2008年
32 nm – 2010年
22 nm – 2012年
14 nm – 2014年
10 nm – 2017年
7 nm – 2018年
5 nm – *2020年*
3 nm – *~2022年*
2 nm – *~2024年*

奈米製程的極限

奈米(nanometer)是個什麼概念？

1奈米 (nm) = 10 埃 (Å) = 10^{-9}m

１奈米：

- 2 ~ 3 個金屬原子排排坐的寬度
- 10 個氫原子排排坐的寬度，
- 一根頭髮的寬度，大約是 30,000 ~ 50,000 奈米

奈米製程的極限

問題出來了：

- 散熱問題
- 電路學理論需要重新考慮
  - 量子穿隧效應

量子電腦的故事

歡迎來到
蟻人的世界

漫威很厲害。
雖然它講的量子世界和我知道的很不一樣，
但是很有趣。

量子電腦的出現

- 概念：
  - 硬體：「基於量子力學的計算設備」史蒂芬·威斯納(1969)
  - 軟體：「基於量子力學的資訊處理」亞歷山大·豪勒夫（1973）

量子電腦的出現

- 發展：
  - 軟體（理論與演算法）：1990 漸漸發展。規劃出了美好前景？

量子電腦的出現

- 發展：
  - 硬體：2010左右，突飛猛進。2015左右，大廠（ IBM、google、NASA、中國科學院、Amazon…）取得關鍵性的進展
  - 台灣：鴻海、台大、成大…

量子資訊的發展及
物理系在其中的角色

量子電腦的光明未來？

中國文化大學 鬍子拉拉鄒忠毅老師

量子電腦的出現

- 與傳統電腦的差異
  - 硬體架構：量子位元（qubits）
  - 軟體特色：量子物理理論的應用

量子電腦的厲害

- 硬體架構：量子位元（qubits）
  - 量子態的儲存單元(量子位元（qubits））
  - 單元間的量子關係

量子電腦的厲害

- 軟體特色：量子物理理論的應用
  - 疊加態的使用
  - 測不準原理的應用
  - 量子相干或量子糾纏的應用
  - 矩陣力學方法的應用

量子電腦的厲害

- 夢幻的計算能力
- 蟻人世界中的穿越與糾纏

量子電腦的麻煩

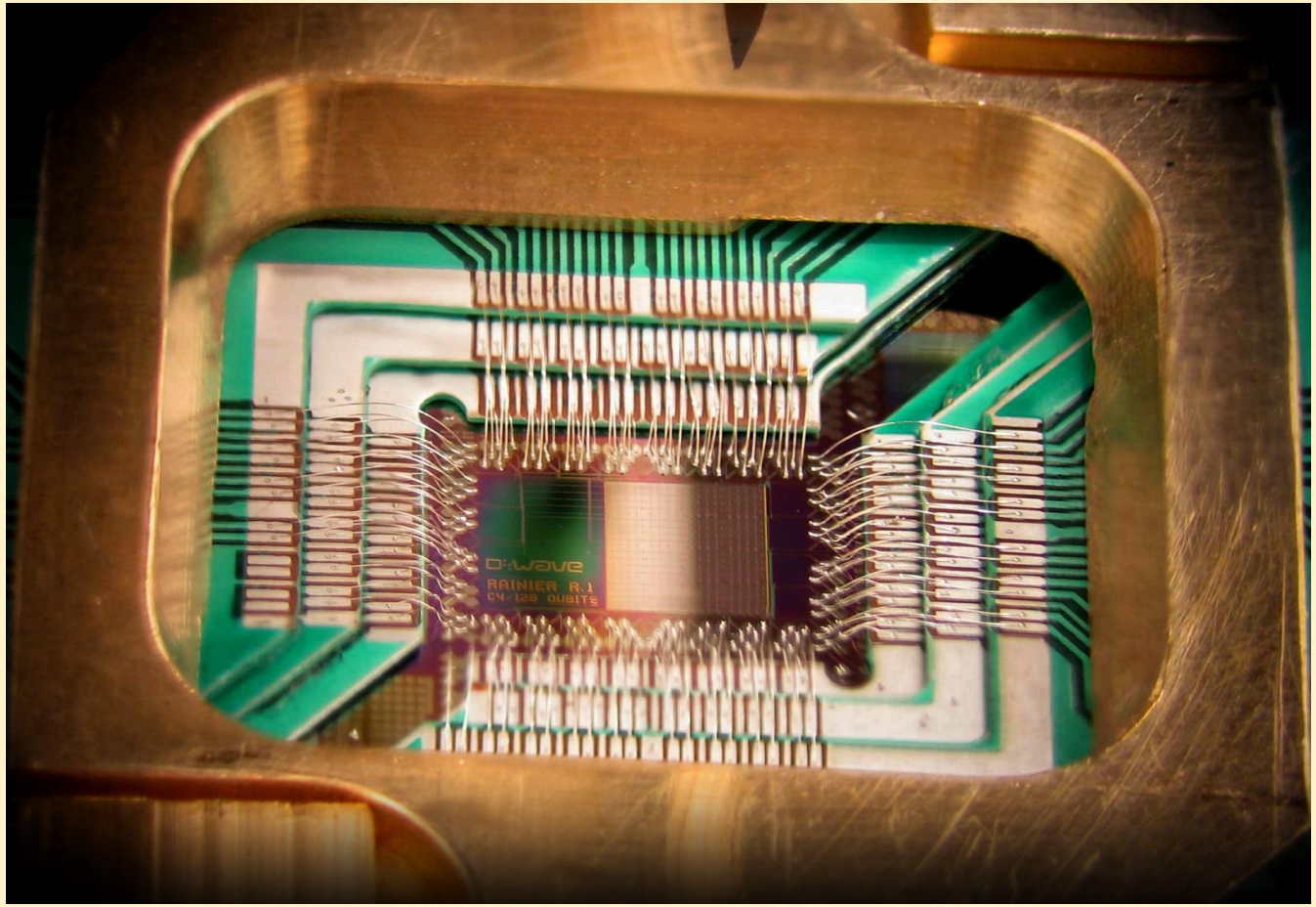
- 位元數還太少
- 技術需求高
- 體積太大

量子電腦的競爭

實踐量子位元的技術競賽

- 超導環（Superconducting ring）
- 光子晶體（Photonic crystal）
- 離子阱（Ion trap）
- 矽量子點（Si quantum dots）
- 拓撲量子位元（Topological qubits）
- 鑽石空缺（Diamond defect）
- 石墨烯量子點（Graphene quantum dots）

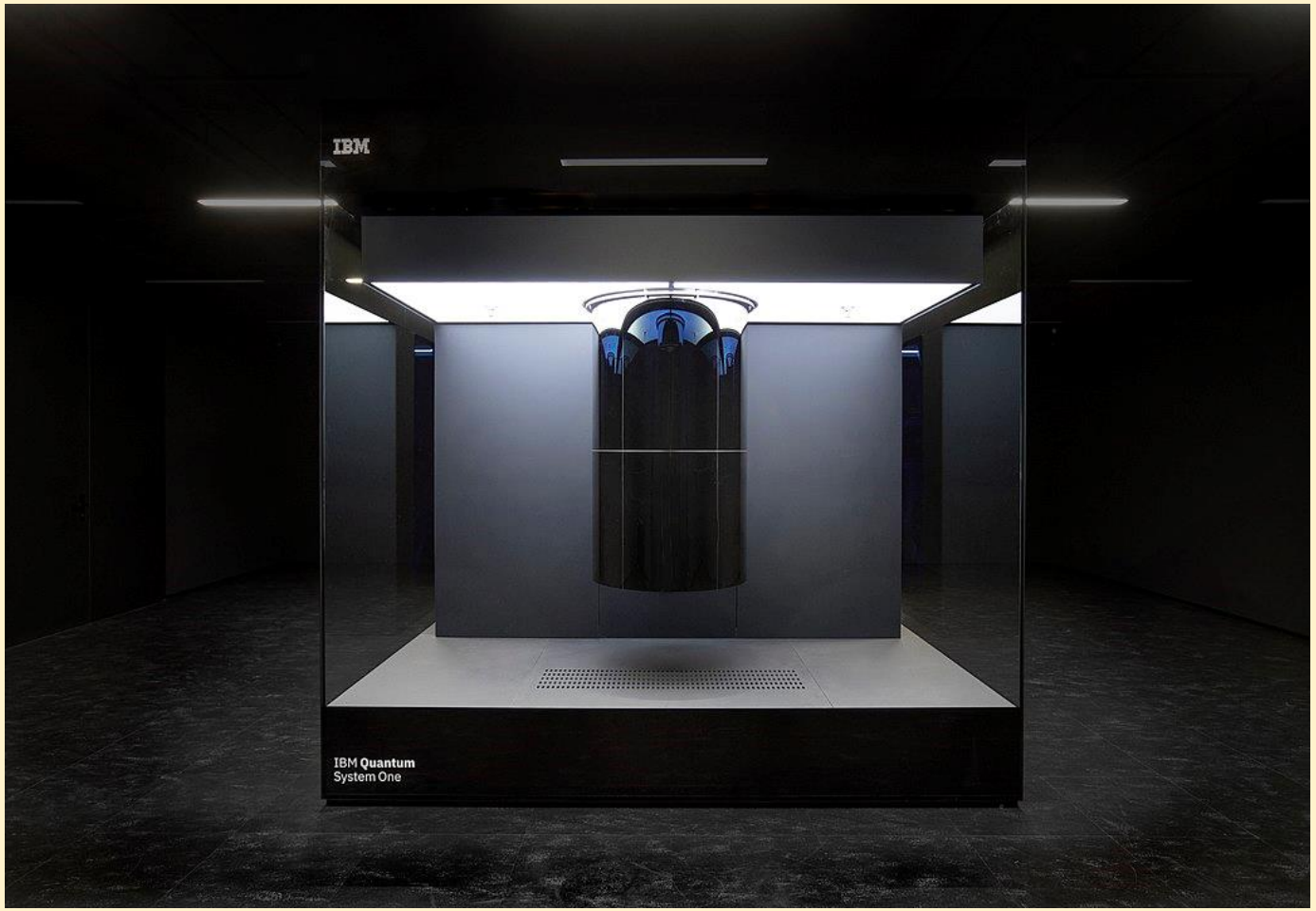
量子電腦的競爭



D-Wave 系統公司發布的計算裝置

由 D-Wave Systems, Inc. - D-Wave Systems, Inc., CC BY 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10722194

量子電腦的競爭



IBM Q System One (2019), the first circuit-based commercial quantum computer

By IBM Research - https://www.flickr.com/photos/ibm_research_zurich/51248690716/, CC BY 2.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=108205707

量子電腦的出現

因為很難，所以下一段要介紹介紹量子物理

量子資訊的發展及
物理系在其中的角色

超快速回顧量子電腦中的物理學

中國文化大學 鬍子拉拉鄒忠毅老師

量子物理是什麼

一句話：

描述微觀物質（原子、次原子粒子）行為的物理學理論

量子（quantum）：

系統是由基本個體（或單元）組合而成的

量子物理回顧

背景：100多年前物理學的困境

19世紀末，其實物理學家很高興：我們終於了解這個世界了～～～

但是天空中有兩朵烏雲

（極快的世界與極小的世界的奇怪現象）

量子物理回顧

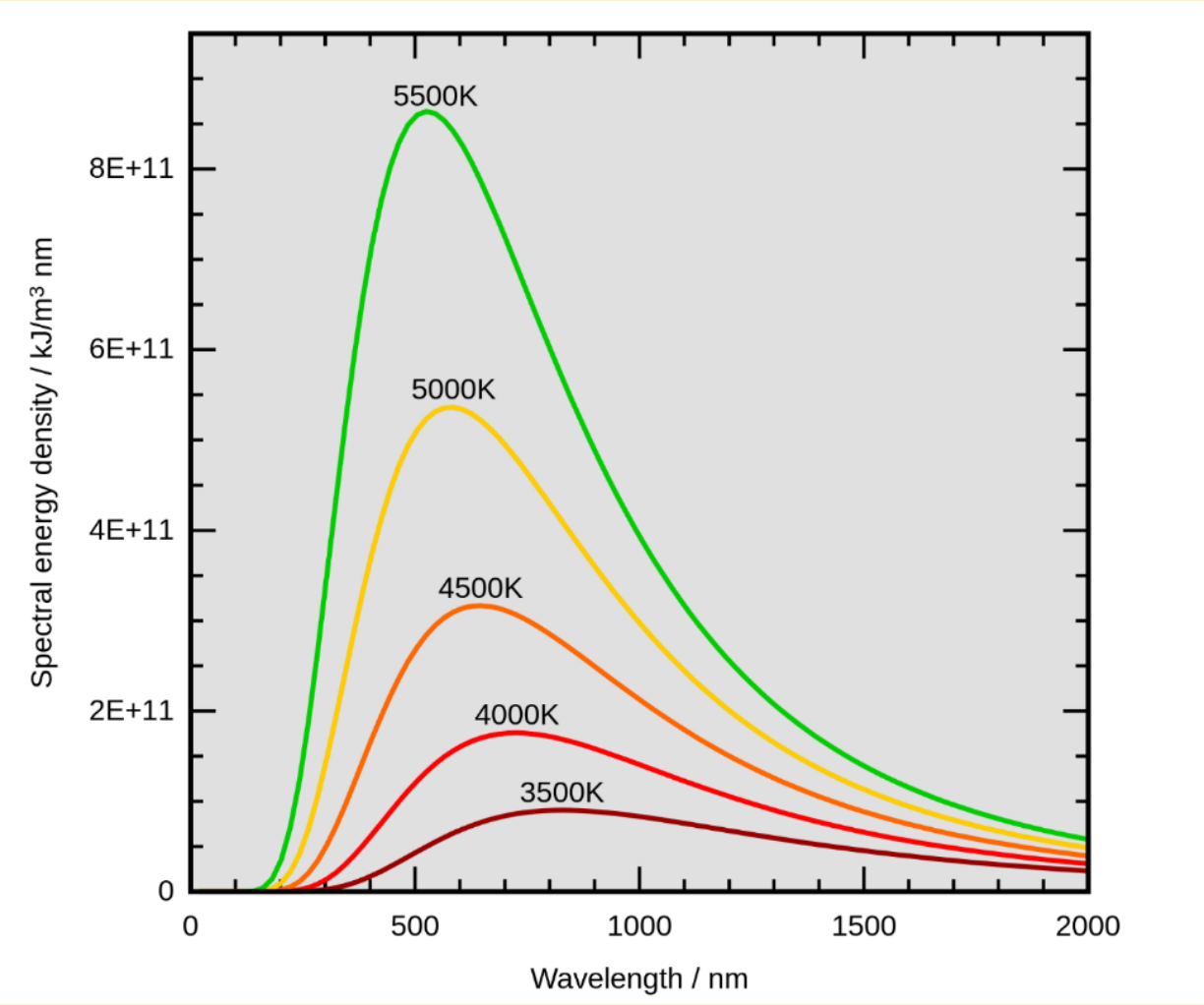
極小的世界的奇怪現象

- 黑體輻射：電磁波能量問題
- 光電效應：截止頻率問題
- 電子繞射：電子的波動性質
- 原子結構：電子軌道穩定問題

黑體輻射

普朗克：
黑體輻射中
電磁波輻射能量是
某個小單元的整數倍

電磁波能量不是連續的



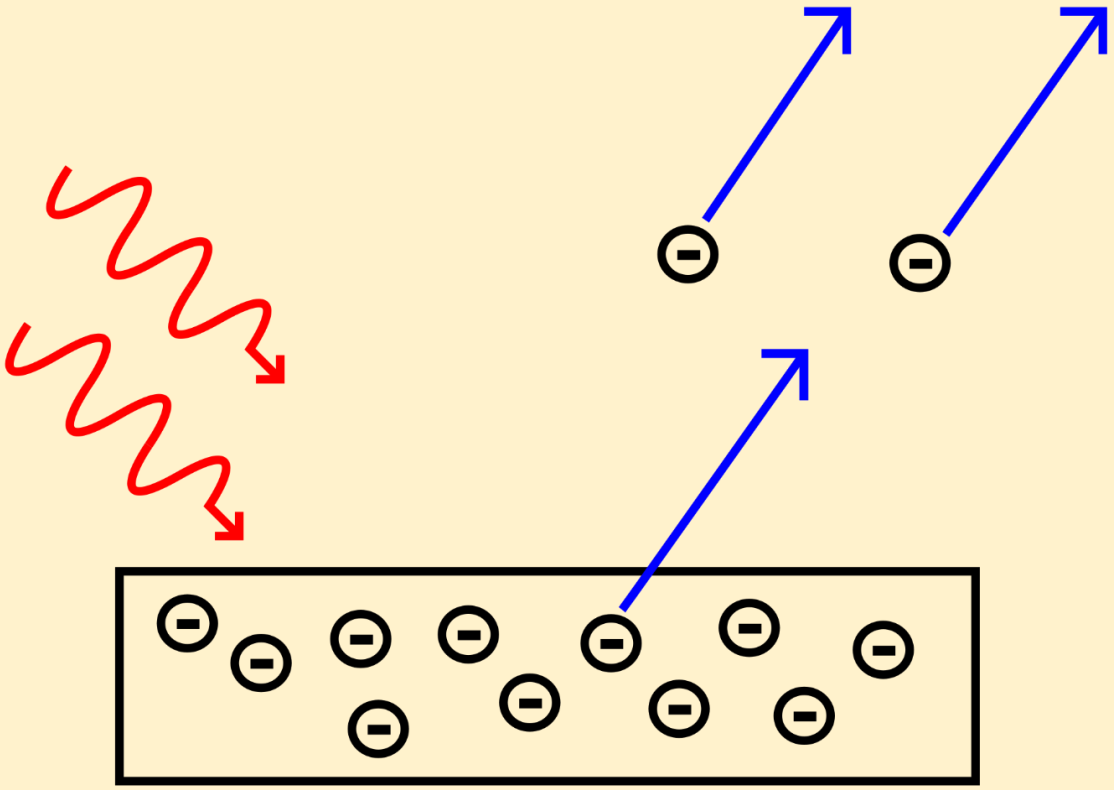
普朗克定律描述的黑體輻射在不同溫度下的頻譜

由 4C - 自己的作品 based on JPG version Curva Planck TT.jpg, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1017820

光電效應

愛因斯坦：
物質吸收個別光子，
而激發出電子

光有粒子的性質



光電效應示意圖：來自左上方的光子衝擊到金屬板，將電子逐出金屬板，並且向右上方移去。

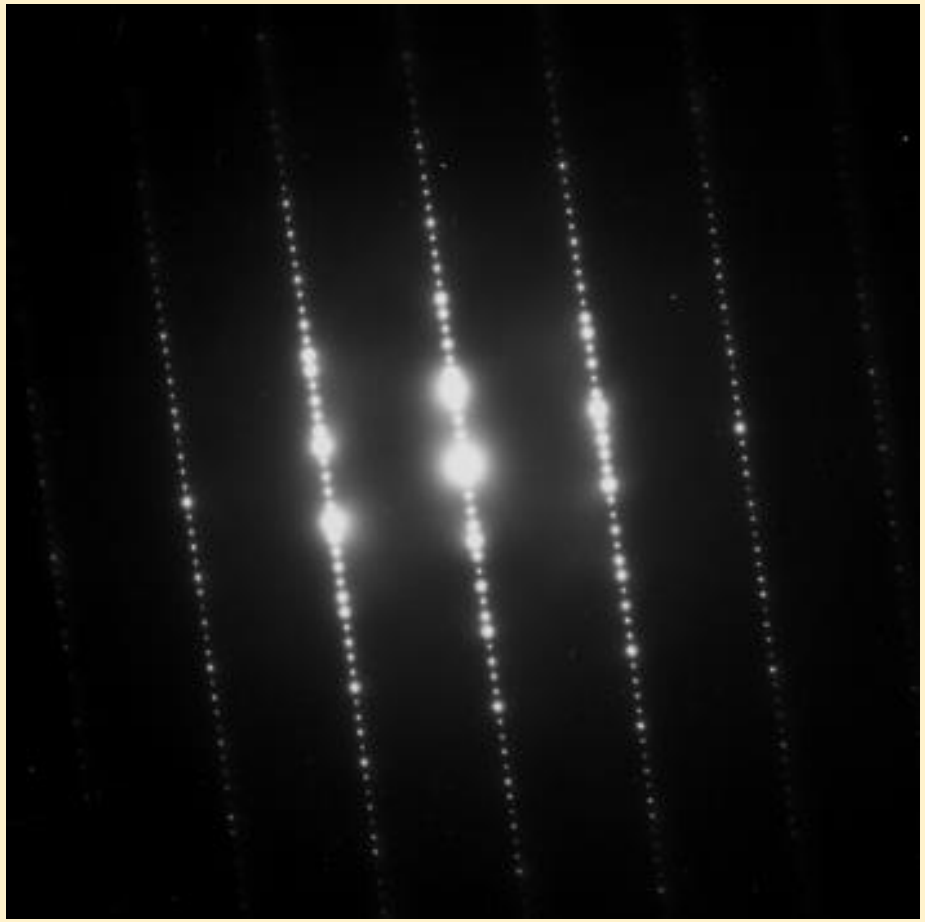
由 Wolfmankurd - en:Inkscape, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2072934

電子繞射

德布羅意：
物質具有波的性質，可以由普朗克常數連結，物質波長 λ和其動量 p

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

電子有波的性質



在TEM中使用平行電子束獲得的典型電子衍射圖

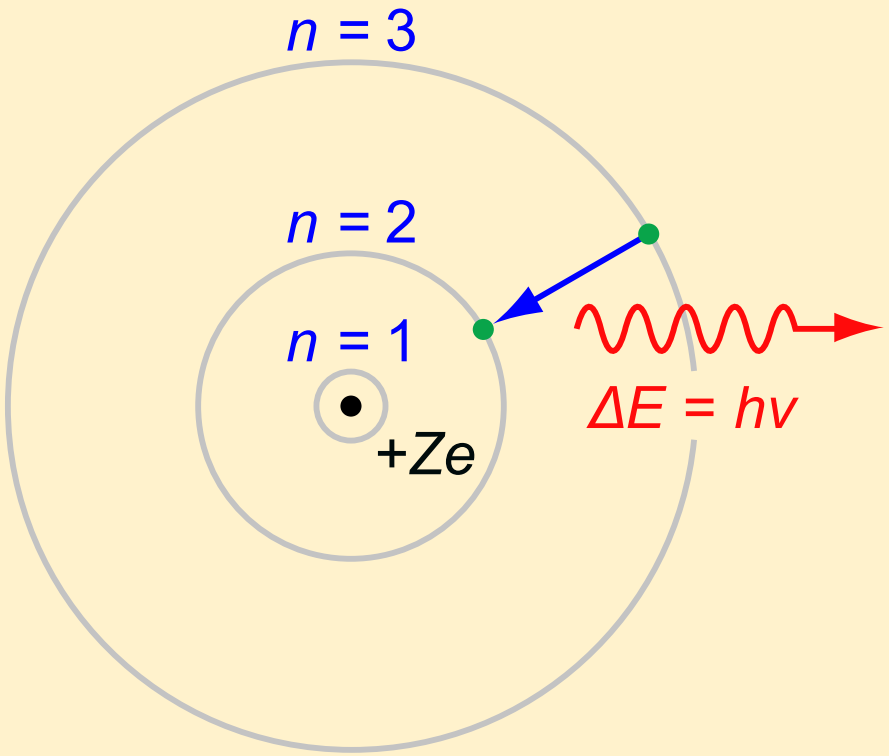
By Oysteinp at the English language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3193481

原子結構

波耳：

1. 在氫原子中，電子圍繞著原子核進行圓周運動。

2. 在軌道中運動的電子的角動量的大小是量子化的。



軌道分佈是不連續的

在波耳模型裡，被約束於原子殼層的帶負價電子，繞著帶正價原子核進行圓周運動。從一個軌道躍遷至另一個軌道會伴隨著離散能量以電磁波的形式被發射或吸收。[1]在圖中，電子的軌道顯示為灰色圓圈，其半徑隨著主量子數平方n^2增加，從主量子數3 → 2的躍遷製成了巴耳末系的第一條譜線，波長為656 nm（紅光）。

由 JabberWok, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2639910

世界需要
一個解釋

哥本哈根解釋

小歷史（廣義）：

人：尼爾斯·波耳和維爾納·海森堡開始的一大堆人

時：1927左右大吵一架，大概到1960年代，大家就習慣了

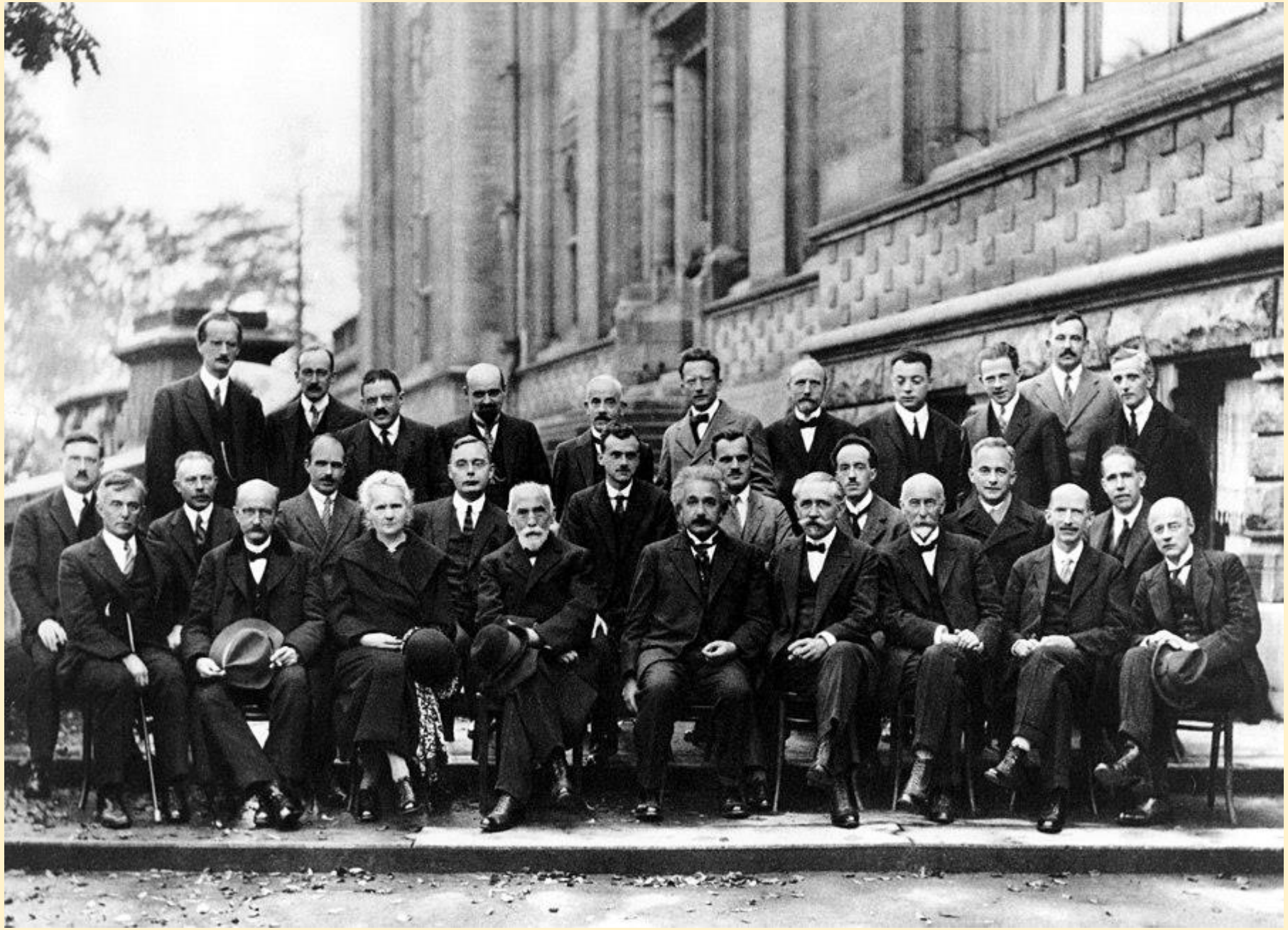
地：哥本哈根的幾個人，在布魯塞爾引爆。

事：量子物理到底是什麼？

索爾維會議
Conseils Solvay

第五次
索爾維會議
(布魯塞爾
1927年10月)

照片中29人中，
有17位是
諾貝爾獎得主



第三排：(1)奧古斯特·皮卡爾德、(2)亨里奧特、(3)保羅·埃倫費斯特、(4)愛德華·赫爾岑、(5)西奧費·頓德爾、(6)埃爾溫·薛丁格、(7)維夏菲爾特、(8)沃爾夫岡·包立、(9)維爾納·海森堡、(10)拉爾夫·福勒、(11)萊昂·布里淵

第二排：(1)彼得·德拜、(2)馬丁·努森、(3)威廉·勞倫斯·布拉格、(4)亨德里克·克雷默、(5)保羅·狄拉克、(6)阿瑟·康普頓、(7)路易·德布羅意、(8)馬克斯·玻恩、(9)尼爾斯·波耳

第一排：(1)歐文·朗繆耳、(2)馬克斯·普朗克、(3)瑪麗·居禮、(4)亨德里克·勞侖茲、(5)阿爾伯特·愛因斯坦、(6)保羅·朗之萬、(7)查爾斯·古耶、(8)查爾斯·威耳遜、(9)歐文·理查森

基本上，哥本哈根解釋，聽起來就像：

承認吧，肥宅就是沒有…

二次元中還是有啦

哥本哈根解釋

鬍子拉拉的整理：

物質的本質：

實驗的極限：

機率的描述：

機率的演變：

機率的崩解：

物質的本質

問題：物質（還有光）是波還是粒子

理論：波粒二像性

意義：物質的粒子性或波動性，依照實驗（觀測）方式顯示

實驗的極限

問題：實驗的準確度的極限在哪裡？（是否存在本質上的誤差？）

理論：測不準原理（海森堡）

意義：不可能在測量「位置」時，完全不影響或擾動「動量」。測量「動量」時也是如此。(順序測量不確定性原理）

機率的描述

問題：量子系統測量時的機率問題，到底是什麼？

理論：德布羅意(物質波)假說
玻恩(波函數的機率表述)定則

意義：量子系統的狀態可以用波函數（wave function）來描述。波函數與測量時的機率有關。波函數允許疊加態（superposition state）。

機率的演變

問題：量子系統測量時的機率，是可以預測的嗎？

理論：薛丁格（波動）方程式
海森堡的矩陣力學
費曼的路徑積分

意義：量子系統的狀態是可以預測的

機率的崩解

問題：機率與測量值的關係

理論：波函數塌縮

意義：測量前是機率，測量後波函數縮減成一個值。但有一個有趣的事：量子糾纏（quantum entanglement）

不完美但有用

相對於其他物理理論。

量子物理的哥本哈根解釋，
不完美但有用。

現在還正在發展（吵架）中。

你也可以去玩玩
量子電腦

中國文化大學 鬍子拉拉鄒忠毅老師

IBM Q Experience

臺灣大學-IBM量子電腦中心

http://quantum.ntu.edu.tw/

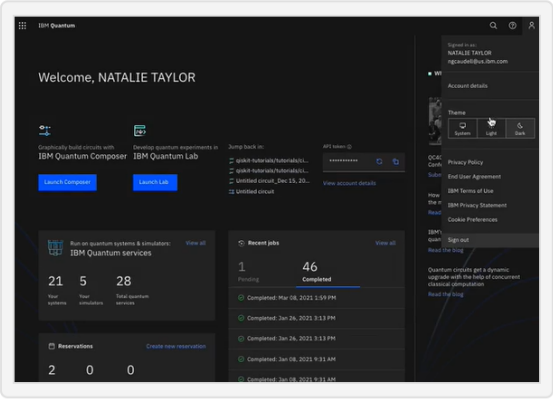
IBM Q

https://quantum-computing.ibm.com/

IBM **Quantum**

Real quantum computers. Right at your fingertips.

IBM offers cloud access to the most advanced quantum computers available. Learn, develop, and run programs with our quantum applications and systems.



Track activity and news

Use the dashboard to get a quick summary of your recent work, job activity, and product updates.

Sign in to IBM Quantum

IBMid

New to IBM Quantum?

Create an IBMid account.

IBM Quantum

Welcome, Chung-I Chou

Graphically build circuits with
IBM Quantum Composer

Launch Composer

Develop quantum experiments in
IBM Quantum Lab

Launch Lab

Jump back in:

- qiskit-tutorials/qiskit-optim...
- Untitled circuit_Oct 20, 202...
- Untitled circuit
- Untitled circuit

API token

****

View account details

Run on circuits & algorithms via
IBM Quantum services

View all

7	7	5	35
Your programs	Your systems	Your simulators	Total quantum services

Recent jobs View all

You have no recent jobs.

Create one by running a circuit or notebook on one of your IBM Quantum Systems.

Recent notifications View all

- Quantum News
  The IBM Quantum Challenge Fall 2021 is coming!
  14 days ago | Learn more
- Product Update
  Qiskit Runtime is now available on all IBM Quantum systems!
  a month ago | Learn more
- Product Update
  Improve gate fidelity (and Quantum Volume) with new compilation tools!
  2 months ago | Learn more
- Product Update
  Explore Qiskit Runtime programs on simulators today!
  3 months ago | Learn more
- Product Update
  Welcome to the new IBM Quantum Lab!
  3 months ago | Learn more
- Product Update
  Pulse Gates available to all users in Open Systems
  3 months ago | Learn more

IBM **Quantum Composer**

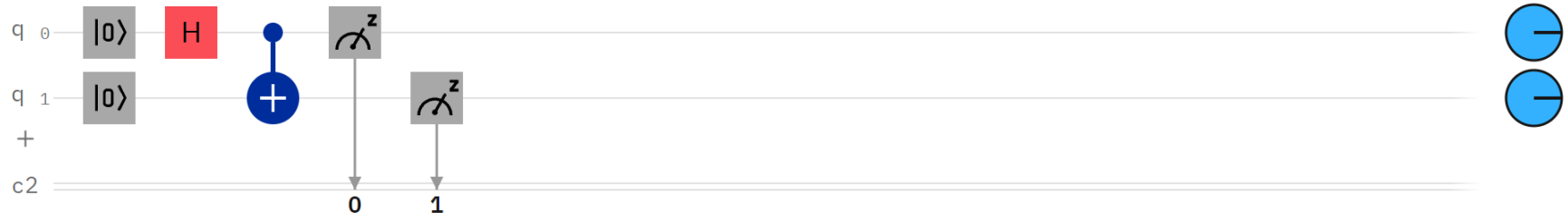
File Edit Inspect View Share

Setup and run

Bell State ZZ-Measurement *Saved*

Visualizations seed 42

H ⊕ ⊕ ⊕ ⊕ I T S Z T† S† P RZ ● |0⟩ ⟨Z⟩ if ⋮ √X √X† Y RX RY U RXX RZZ + Add

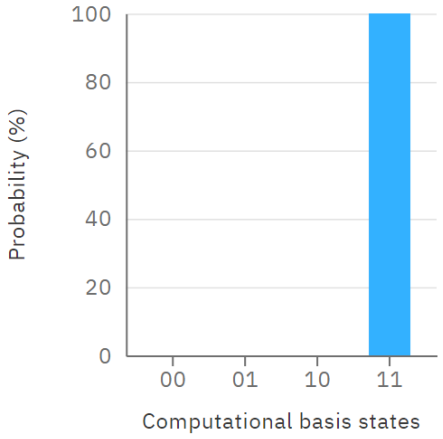


OpenQASM 2.0

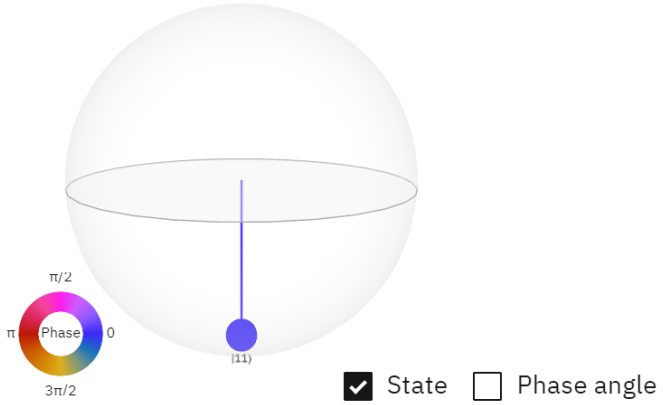
Open in Quantum Lab

```
OPENQASM 2.0;
include "qelib1.inc";

qreg q[2];
creg c[2];

reset q[0];
h q[0];
reset q[1];
cx q[0],q[1];
measure q[0] -> c[0];
measure q[1] -> c[1];
```

Probabilities



Q-sphere



IBM Quantum Lab

New file +

Filter files by name

Lab files / qiskit-tutorials / qiskit-optimization /

Name	Last Modified
aux_files	13 days ago
01_quadratic_program.ip...	13 days ago
02_converters_for_quadra...	13 days ago
03_minimum_eigen_opti...	13 days ago
04_grover_optimizer.ipynb	13 days ago
05_admm_optimizer.ipynb	13 days ago
06_examples_max_cut_a...	13 days ago
07_examples_vehicle_rou...	13 days ago
08_cvar_optimization.ipynb	13 days ago
09_application_classes.ip...	13 days ago
10_warm_start_qaoa.ipynb	13 days ago

File Edit View Run Kernel Tabs Settings Help

Launcher | Untitled circuit_Oct 20, 2(| 03_minimum_eigen_optir | 01_quadratic_program.ipy

Markdown | Qiskit v0.31.0 (ipykernel)

Minimum Eigen Optimizer

Introduction

An interesting class of optimization problems to be addressed by quantum computing are Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO) problems. Finding the solution to a QUBO is equivalent to finding the ground state of a corresponding Ising Hamiltonian, which is an important problem not only in optimization, but also in quantum chemistry and physics. For this translation, the binary variables taking values in $\{0, 1\}$ are replaced by spin variables taking values in $\{-1, +1\}$, which allows to replace the resulting spin variables by Pauli Z matrices, and thus, an Ising Hamiltonian. For more details on this mapping we refer to [1].

Qiskit provides automatic conversion from a suitable `QuadraticProgram` to an Ising Hamiltonian, which then allows to leverage all the `MinimumEigenSolver` such as

- `VQE`,
- `QAOA`, or
- `NumpyMinimumEigensolver` (classical exact method).

Qiskit wraps the translation to an Ising Hamiltonian (in Qiskit Aqua also called `Operator`), the call to an `MinimumEigensolver` as well as the translation of the results back to `OptimizationResult` in the `MinimumEigenOptimizer`.

In the following we first illustrate the conversion from a `QuadraticProgram` to an `Operator` and then show how to use the `MinimumEigenOptimizer` with different `MinimumEigensolver` to solve a given `QuadraticProgram`. The

Simple 0 3 Qiskit v0.31.0 (ipykernel) | Idle Mem: 275.29 / 8192.00 MB Mode: Command Ln 1, Col 1 03_minimum_eigen_optimizer.ipynb

在上線前先
預習（或複習）一下

物理系一定會學到滴

量子態的表示

狄拉克符號 Dirac Notation

- 基本定義（以離散態為例）
  - 名稱
    - Ket 右矢 | > 表示一個量子態
    - Bra 左矢 < | 表示一個量子態的共軛狀態
    - 不必涉及具體表象
    - 態的表示
      - 波函數 $|\psi\rangle, \langle\psi_\alpha|$
      - Eigenstate

$$|\psi_\alpha\rangle, |\psi_{nlm_l}\rangle, |nl\rangle, |1\rangle, |1/2\rangle, |\uparrow\rangle$$

量子態的表示

狄拉克符號 Dirac Notation

- 疊加態

$$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$$

$$|\psi\rangle = c_1|\uparrow\rangle + c_2|\downarrow\rangle$$

$$|\psi\rangle = c_1|生\rangle + c_2|死\rangle$$

廣義的向量：$c_1, c_2, c_3, c_4 \ldots$

狄拉克符號 Dirac Notation

- 組合才有意義

$\langle\psi|\psi\rangle$ ：期望值

$\langle\psi|A|\psi\rangle$ ：對某個測量的期望值

$|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$

$\langle\psi_1|\psi\rangle$ ： 態1出現的期望值

矩陣力學計算

$$|\psi'\rangle = A|\psi\rangle$$

向量　　矩陣　　向量

新狀態來自，某個動作**作用**在**舊狀態**的結果

現在可以去線上玩啦～

我們的一點工作

arXiv.org > quant-ph > arXiv:1307.3186

Search...

Help | Advance

Quantum Physics

[Submitted on 11 Jul 2013 (v1), last revised 28 Nov 2014 (this version, v3)]

Localization and Recurrence of Quantum Walk in Periodic Potential on a Line

C.-I. Chou, C.-L. Ho

We present numerical study of a model of quantum walk in periodic potential on the line. We take the simple view that different potentials affect differently the way the coin state of the walker is changed. For simplicity and definiteness, we assume the walker's coin state is unaffected at sites without potential, and is rotated in an unbiased way according to Hadamard matrix at sites with potential. This is the simplest and most natural model of a quantum walk in a periodic potential with two coins. Six generic cases of such quantum walks were studied numerically. It is found that of the six cases, four cases display significant localization effect, where the walker is confined in the neighborhood of the origin for sufficiently long times. Associated with such localization effect is the recurrence of the probability of the walker returning to the neighborhood of the origin.

Comments: 12 pages, 14 figures. References updated, sign typos in Eqs. (2.2) and (2.5) corrected

Subjects: **Quantum Physics (quant-ph)**; Other Condensed Matter (cond-mat.other); Mathematical Physics (math-ph)

Journal reference: Chin. Phys. B 23 (2014) 110302

DOI: 10.1088/1674-1056/23/11/110302

Cite as: arXiv:1307.3186 **[quant-ph]**

(or arXiv:1307.3186v3 **[quant-ph]** for this version)

關鍵字：
CHOU HO Quantum Walk

我們的一點工作

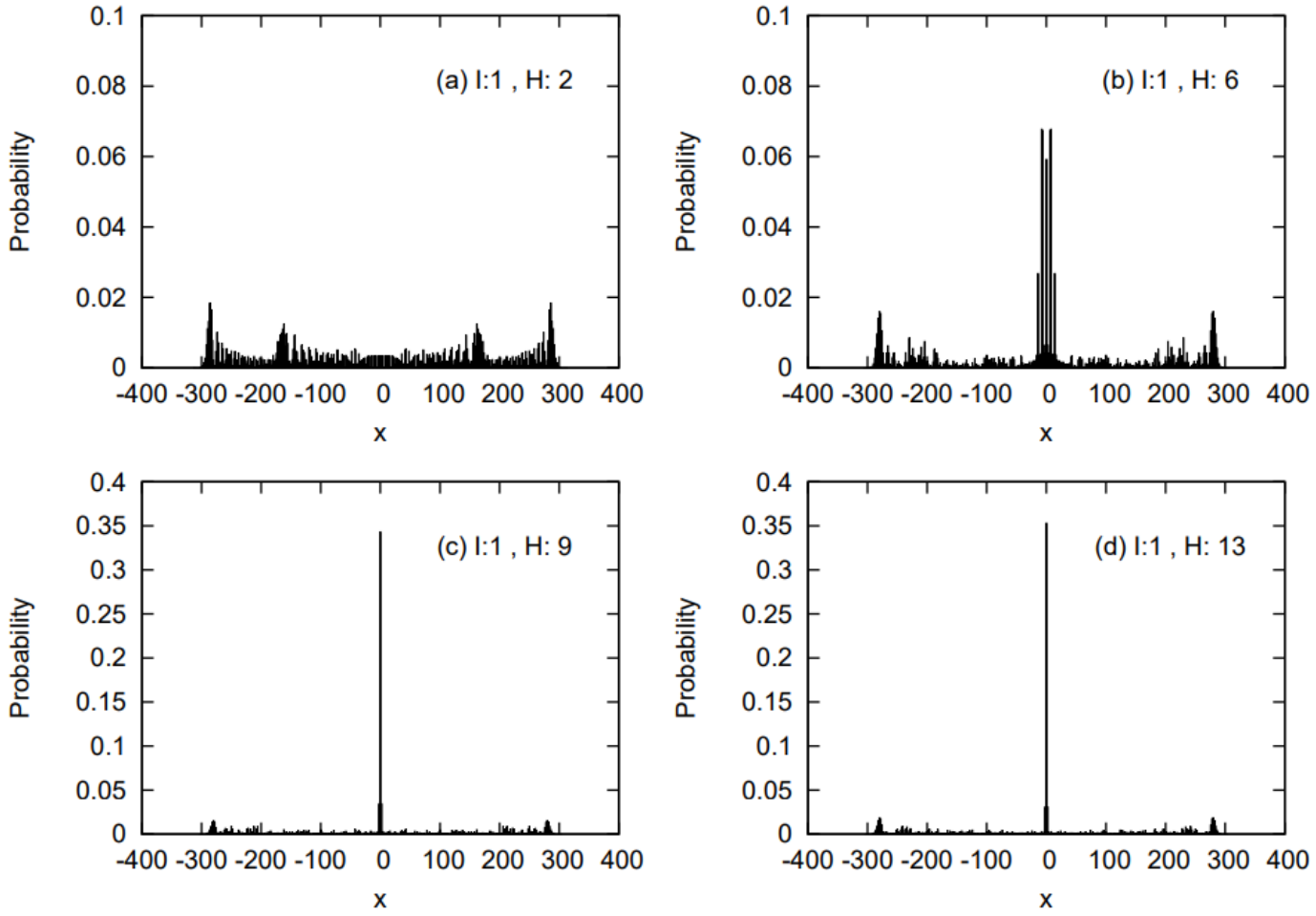


FIG. 5: Probability $P(x,t)$ of the quantum walk of case IB ($[I:1, H:N-1]$) with period $N = 3, 7, 10$ and 14 at $t = 400$. Localization at the origin occurs for $N > 3$.

量子資訊的發展及
物理系在其中的角色

如果你想進一步的
進入量子電腦世界

中國文化大學 鬍子拉拉鄒忠毅老師

高中有什麼可以學滴？

- 物理先學好
- 上網查 高中生 量子電腦，可以找到一堆培育計畫與線上課程

可以考慮呀？

大學有什麼系

當然是

物理系

其實，
硬體中，與材料、低溫技術、電子電機…
軟體中，與演算法、程式…
有關的都可以考慮。

如果你喜歡動手做

- 研發先進實驗技術，發明尖端科技
  - 從事實驗研究，與研發工作
- 學習先進實驗技術，熟悉實驗技能
  - 進入相關產業，成為硬體工程師

量子電腦的發展重點

物理系目前關於量子資訊的實驗重點

- 超導環（Superconducting ring）
- 光子晶體（Photonic crystal）
- 離子阱（Ion trap）
- 矽量子點（Si quantum dots）
- 拓撲量子位元（Topological qubits）
- 鑽石空缺（Diamond defect）
- 石墨烯量子點（Graphene quantum dots）

如果你喜歡推理

- 學好量子物理理論，開發演算法
  - 從事理論研究，與研發工作
- 熟悉量子電腦演算法，應用到實際問題上
  - 進入相關產業，成為軟體工程師

量子電腦的使用重點

- 用疊加態的表示狀態
- 用矩陣力學方法進行計算
- 用量子糾纏的概念，進行量子位元（qubits）的連接
- 設計各式量子邏輯閘
- 用機率與分布的狀況表示輸出值
- **演算法的設計**

物理是蟻人的好朋友

歡迎進入
量子世界

講完了

掰掰