日常生活中的複雜網絡

Complex Networks in Daily Life

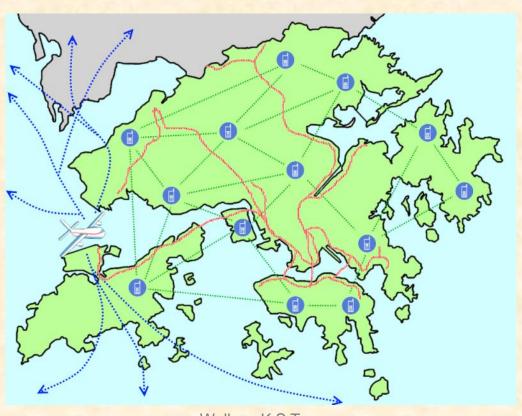
陳關榮



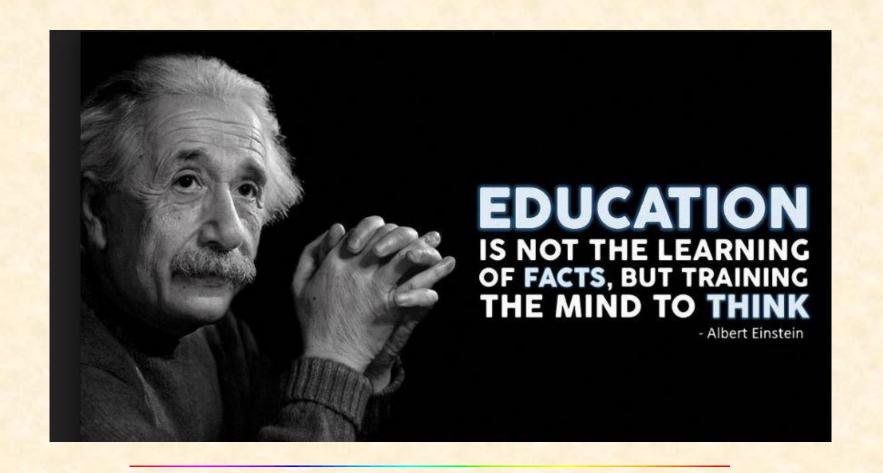
EEGChen@cityu.edu.hk

所用照片和圖片均從互聯網上公開之 無版權網頁上下載,並非作商業用途

謹向原作者致謝

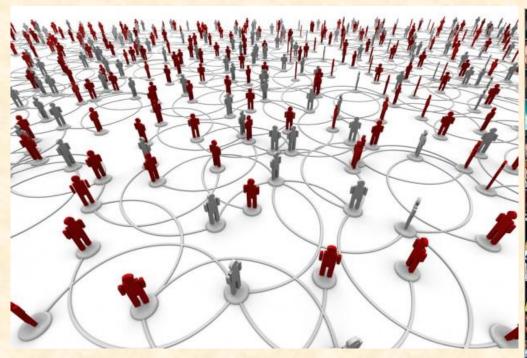


Wallace K S Tang



"教育的價值不在於學知很多事實,而在於訓練大腦學會思考。"

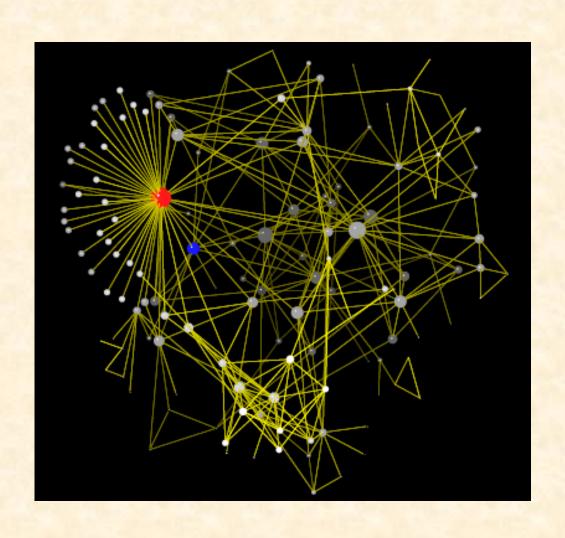
我們生活在網絡世界之中



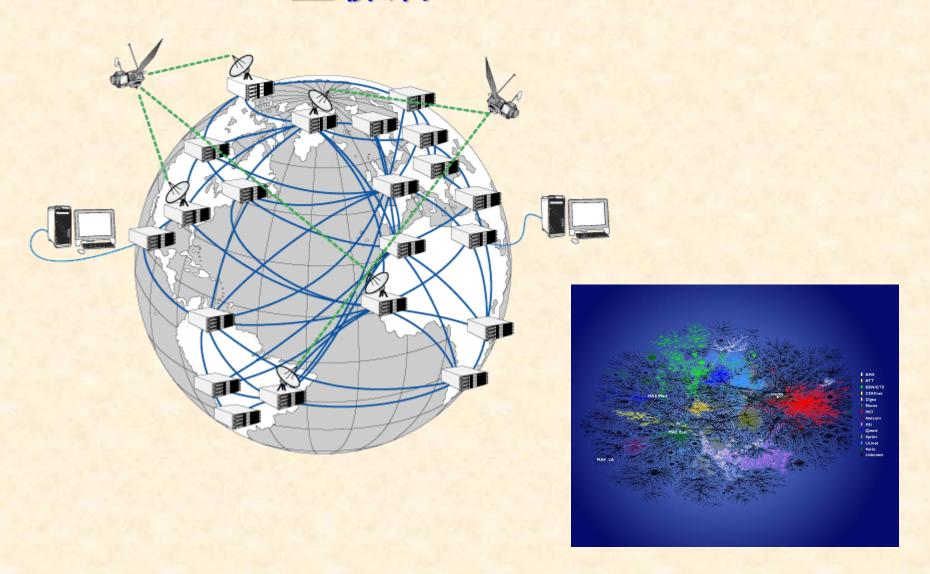
如果隨意地在世界上某個角落 找出一個人,他(她)會通過 多少中間朋友和你連接在一起?



複雜網絡簡介

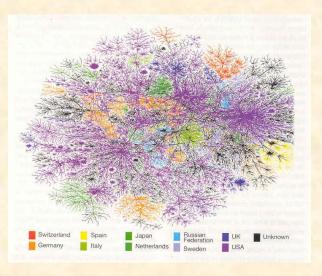


互聯網: Internet



萬維網: WWW



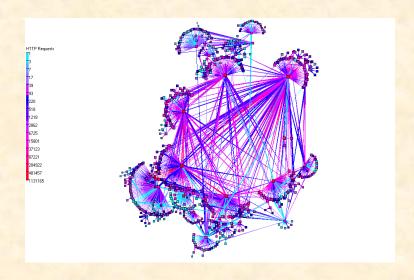


超文本傳輸協議: HTTP





Hyper Text Transfer Protocol



面書: Facebook

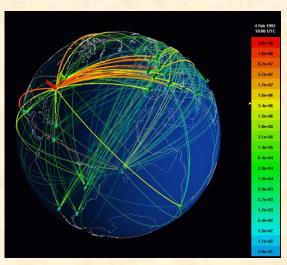


www.bbc.co.uk (24 Dec 2010)

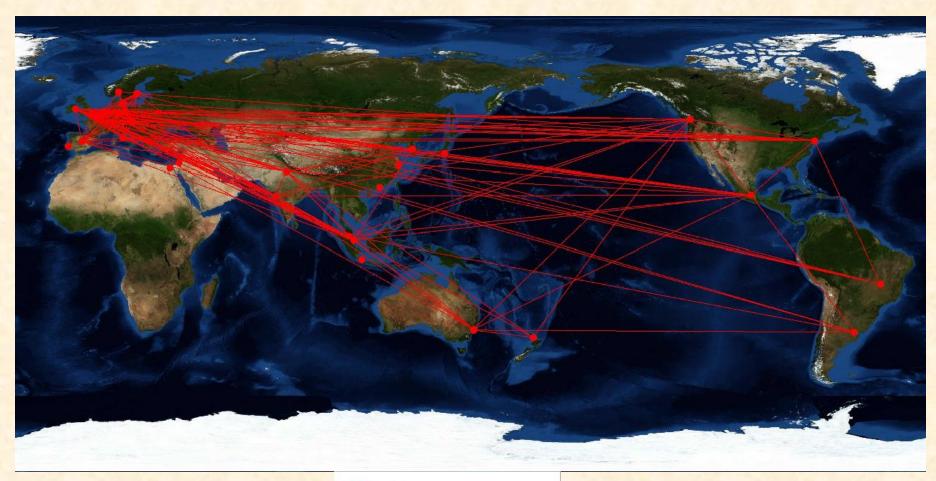
無線通信網: Telecomm Networks







股票網絡: Hang Seng Index

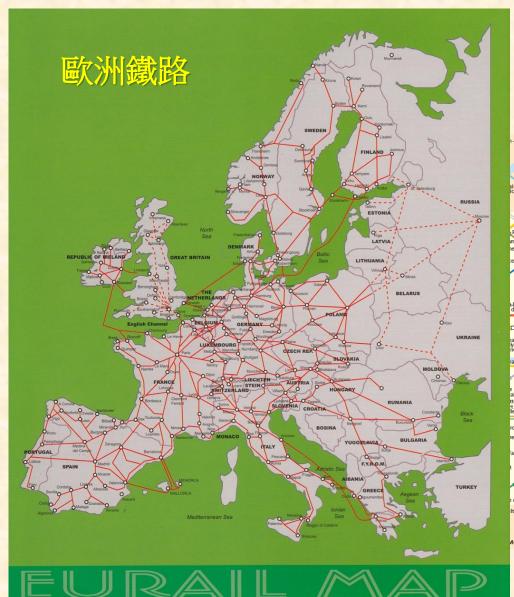




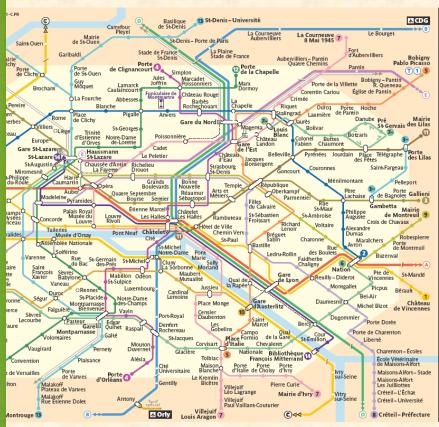
飛機航班圖: Airlines Route Maps



鐵路、公路、地鐵路線圖



均匀網絡



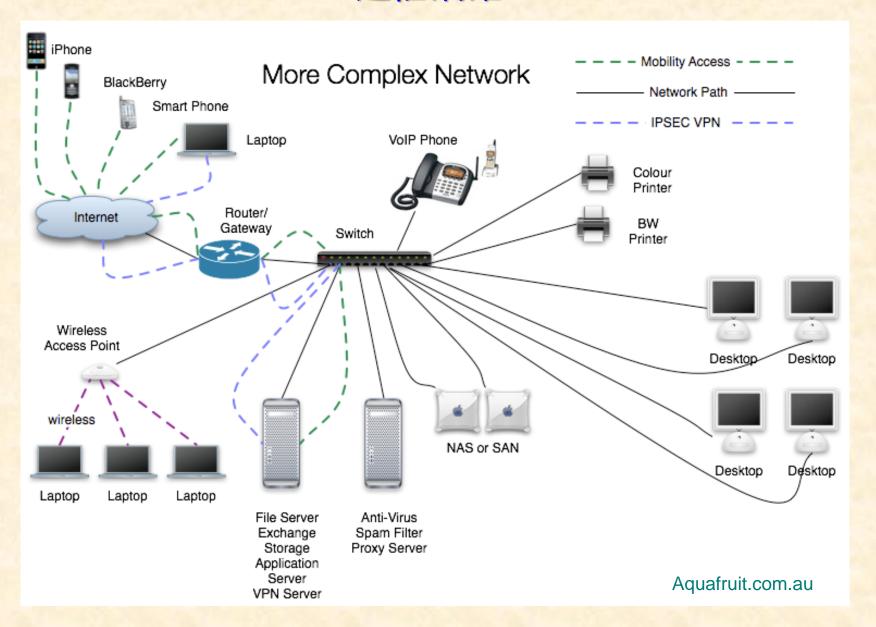
東京地鐵

鐵路、公路、地鐵 路線圖

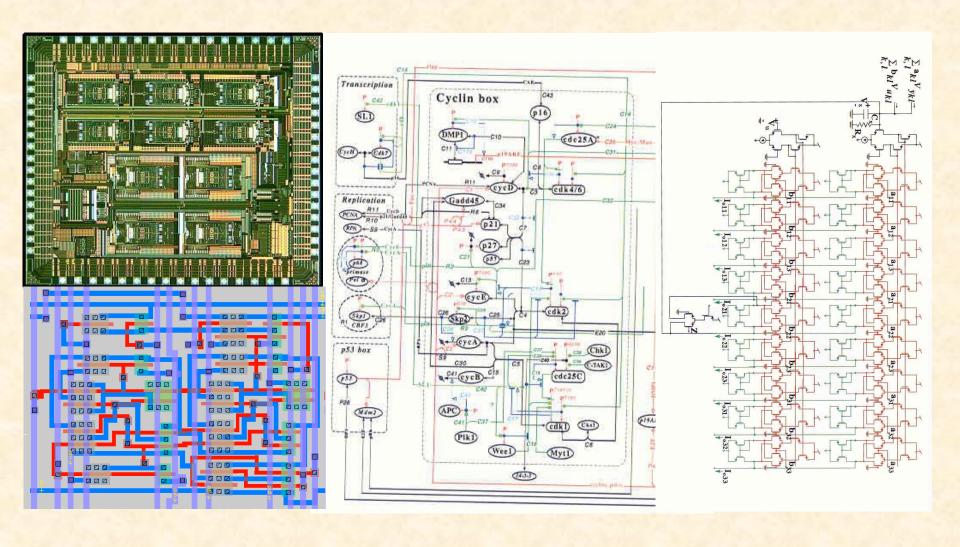


香港地鐵

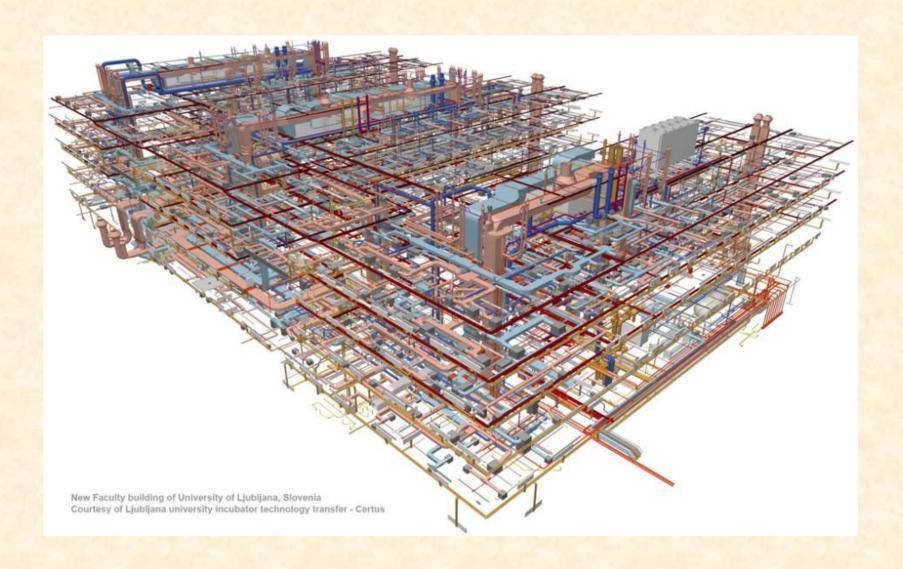
通信網絡



大規模集成電路



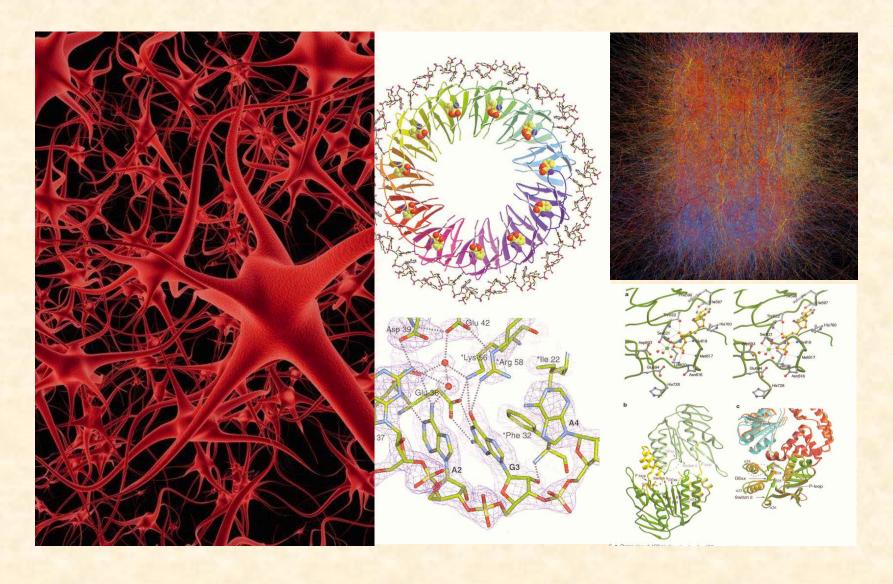
機械 結構 網絡



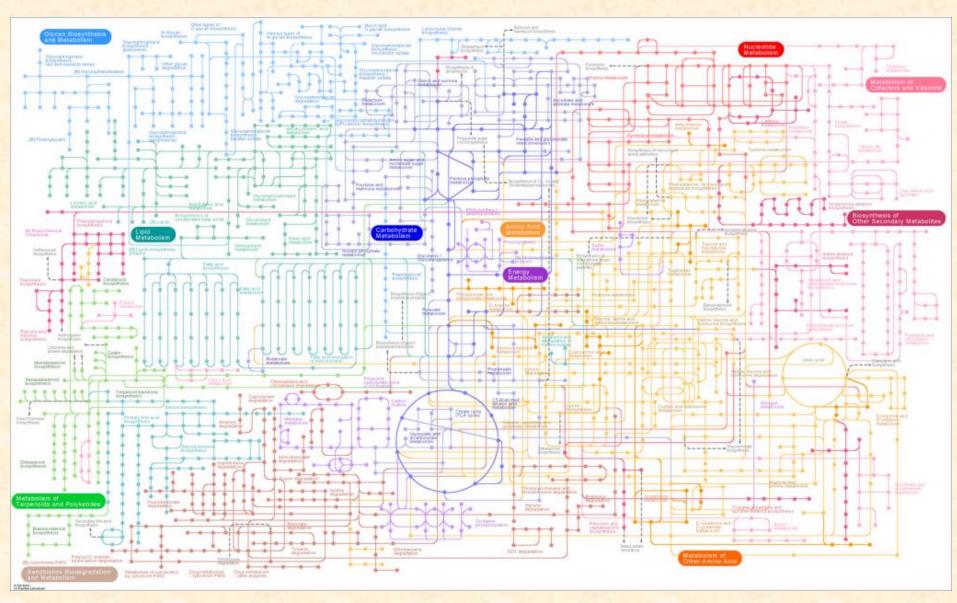
物聯網



生物網絡



新陳代謝系統: Metabolism Pathway



社會網絡



社會網絡



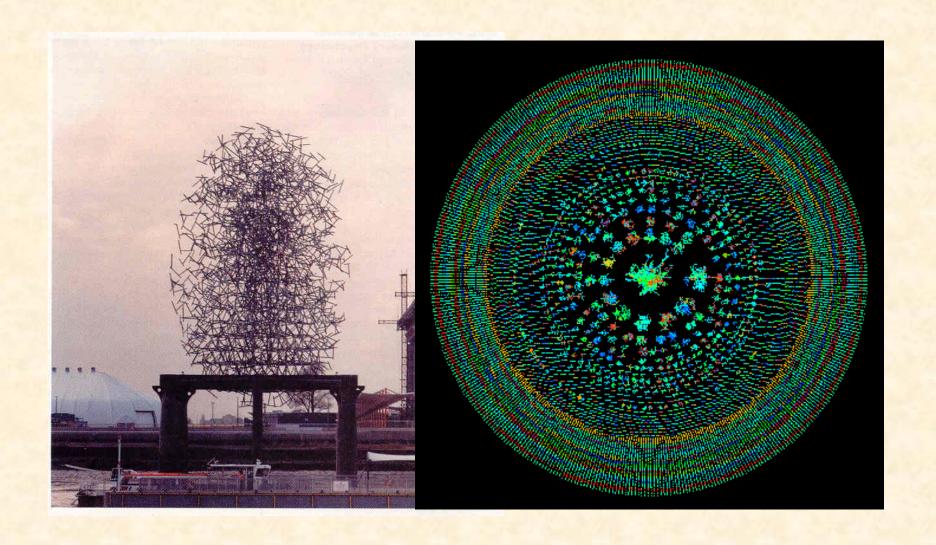
動物世界







藝術網絡: Arts



内容

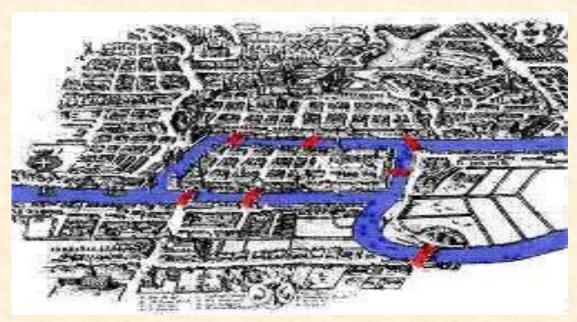
- **圖論** Graph Theory
- 網絡模型
- 隨機網絡 Random-Graph Networks
- 小世界網絡 Small-World Networks
- 無標度網絡 Scale-Free Networks



■現實世界例子

- 技術網絡
- 生物網絡
- 社會網絡

Königsberg 七橋問題

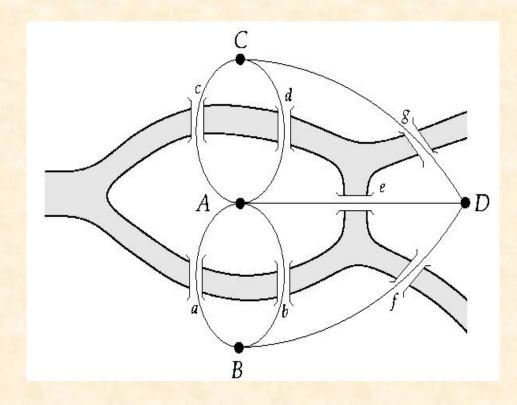


Königsburg 市區地圖(1736年)

問題:

能否從某個地方開始,走過每一道橋,並且只走過一次,最後回到起點?

歐拉 Euler



歐拉從此創立了-數學圖論



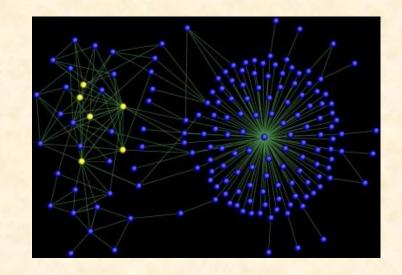
(1707-1783)

他把問題描述爲4個節點和7條連邊的圖

然後證明了問題無解

網絡拓撲(結構)

Network Topology (Structure)



網絡基本元素: 節點 (node, vertex)

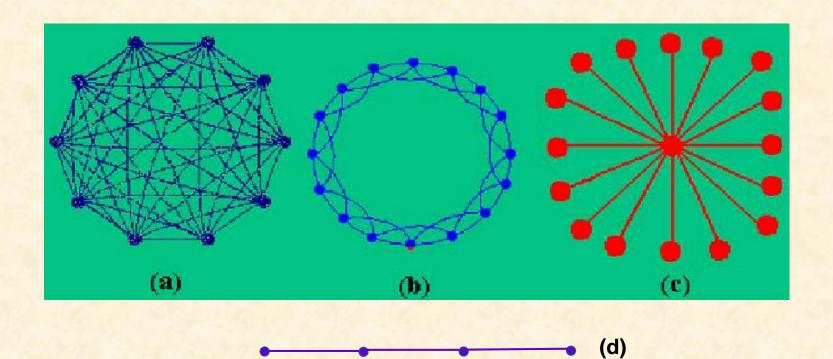
連邊 (edge, link)

❖ 計算機網絡: 節點 - 電腦 連邊 - 光纖

❖ 神經網絡: 節點 - 神經元 連邊 - 神經線

❖ 社會網絡: 節點 - 個人 連邊 - 關係

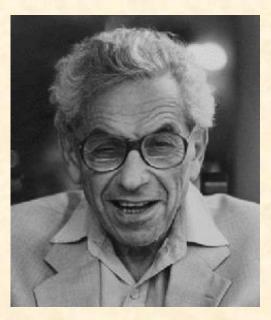
規則網絡



- (a) 全連接網絡 fully-connected network
- (b) 環形網絡 ring-shaped network
- (c) 星形網絡 star-shaped network
- (d) 鏈形網絡 chain-shaped network

隨機圖理論 Random Graph Theory

Paul Erdös

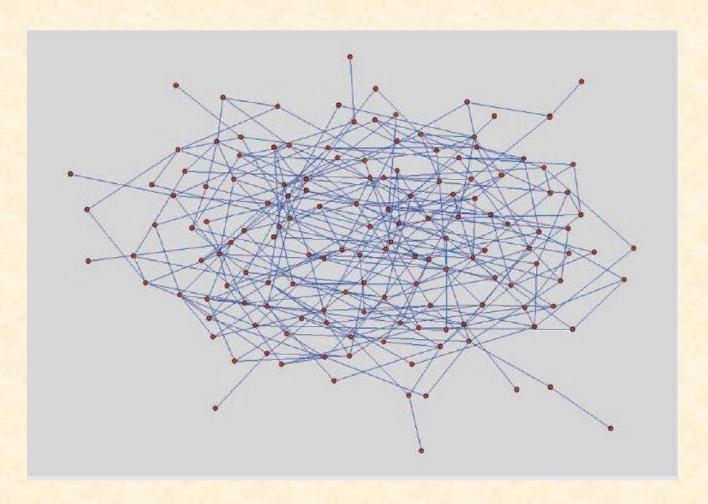


Alfred Rényi



1960年代 數學圖論的突破性發展

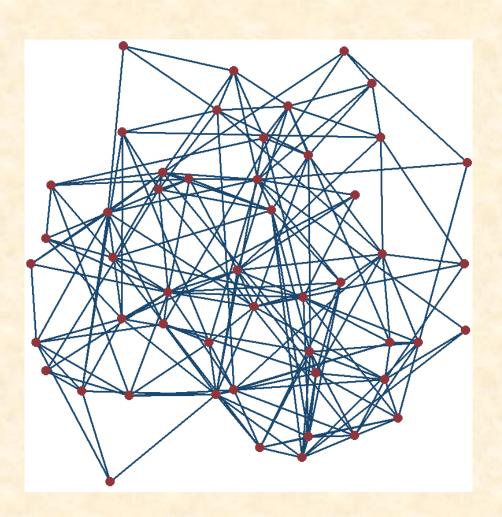
ER 隨機網絡模型



均勻性:所有節點都有大致相同的 "度" (degree)

ER 隨機網絡

均勻網絡



鐵路、公路、地鐵 路線圖



香港地鐵

小世界網絡 Small-World Networks

--- Nature, 393: 440-442, 1998

D. J. Watts

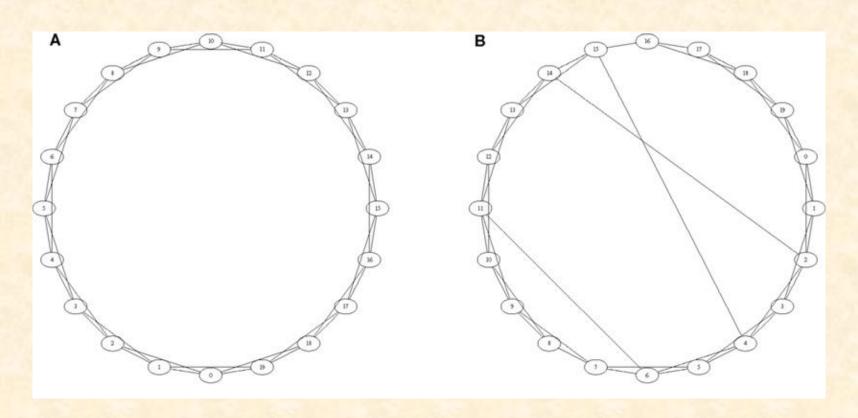


S. H. Strogatz



康奈爾大學 Cornell University

WS 小世界網絡



新發現: 小世界特性!

任意兩點之間的 "距離" (distance) 都很短

無標度網絡

Scale-Free Networks

--- Science, 286: 509 (1999)

A.-L. Barabási



R. Albert

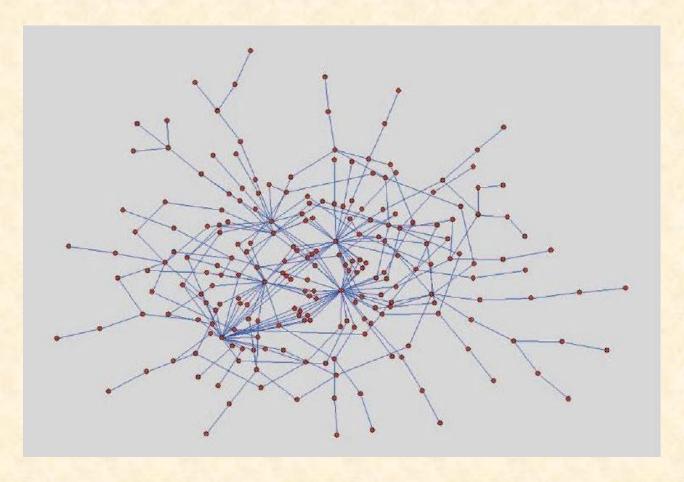


聖母大學 Norte Dame University

飛機航班圖: Airlines Route Maps

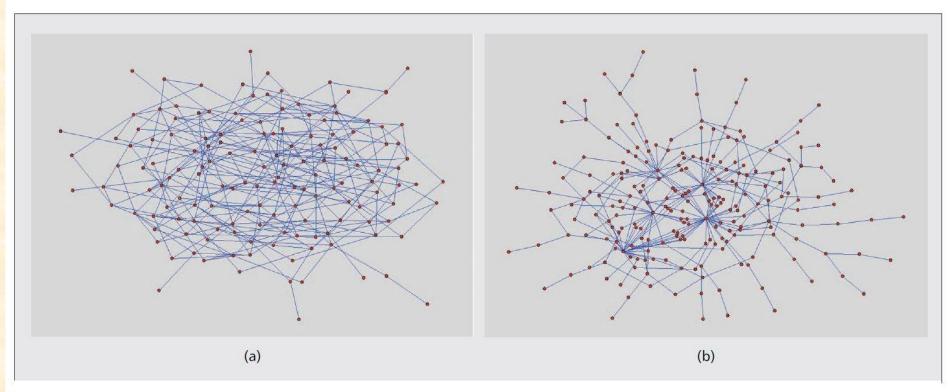


無標度網絡



非均匀性: 少部分節點有很多連線 大部分節點有很少連線

對比 Comparison

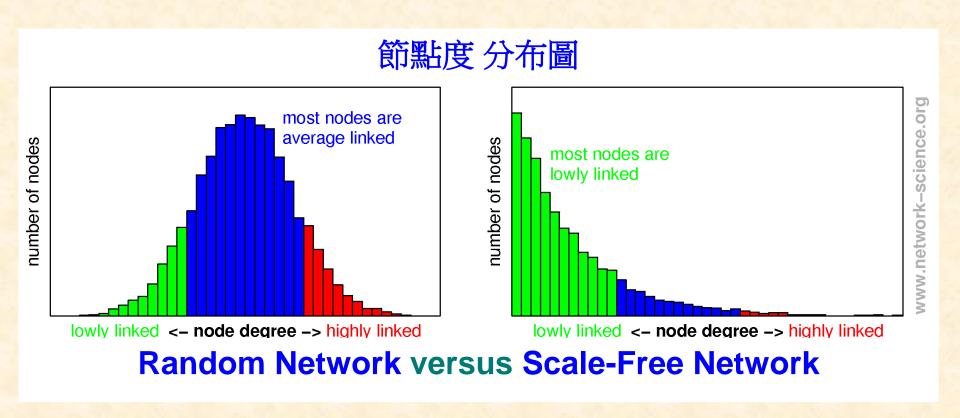


Random Network versus Scale-Free Network

(200 nodes)

隨機網絡 versus 無標度網絡

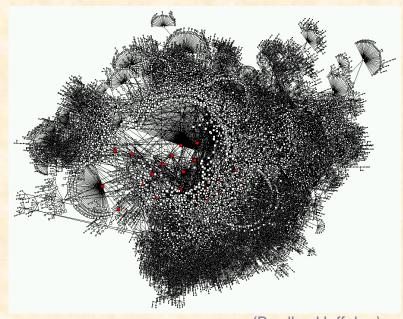
對比 Comparison



隨機網絡 versus 無標度網絡

真實世界複雜網絡例子

- * 技術網絡:
- > 萬維網 WWW
- > 互聯網 Internet
- * 生物網絡:
- > 基因、蛋白
- > 線蟲
- > 大腦
- ❖ 社會網絡:
- > 6度分離現象
- > 電影明星網絡
- > 科研合作網絡

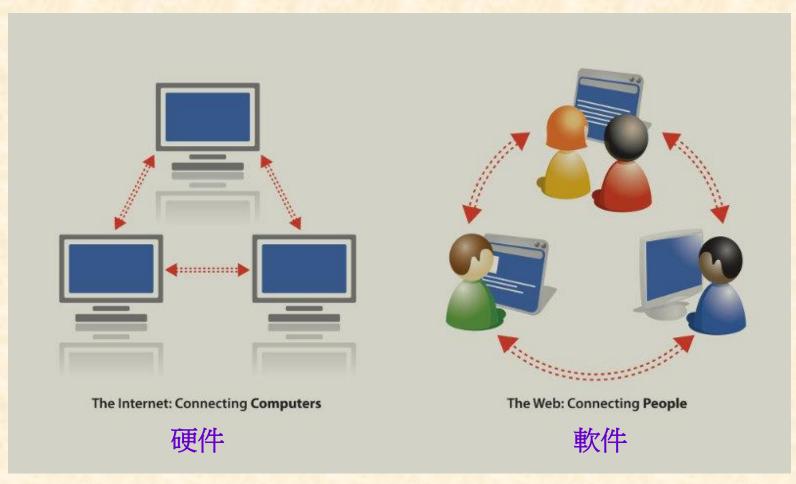


(Bradley Huffaker)

技術網絡



互聯網 Internet vs 萬維網 WWW



互聯網把機聯網

萬維網把人聯網

萬維網 World Wide Web

互聯網 Internet

大數據表明:

WWW 是小世界網絡也是無標度網絡



R. Albert et al., Nature (1999)

Internet

大數據表明:

Internet 是小世界網絡也是無標度網絡



Z. P. Fan, G. R. Chen (2005-2015)

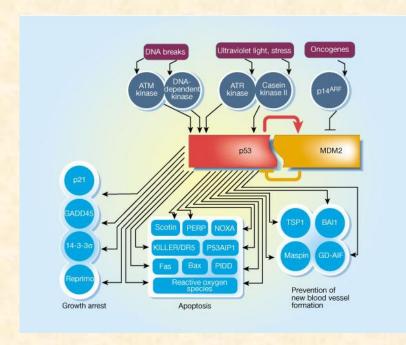
生物網絡



Surfing the p53 network

Bert Vogelstein, David Lane and Arnold J. Levine

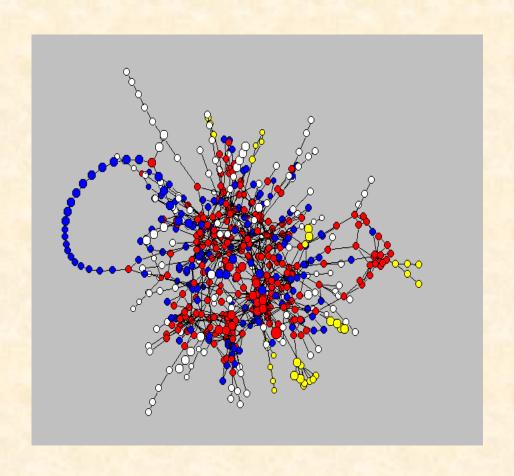
The p53 tumour-suppressor gene integrates numerous signals that control cell life and death. As when a highly connected node in the Internet breaks down, the disruption of p53 has severe consequences.



p53 基因控制癌細胞的生與死。它的發現被認爲是癌症研究中最重要的成果之一。

--- "了解 p53 網絡的方法是把它 與互聯網做直接對比。這基因和 互聯網一樣,是個無標度網絡"

新陳代謝網絡

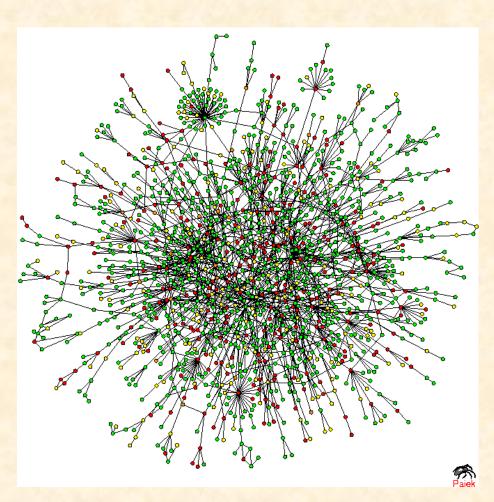


人體具有43個器官的 新陳代謝 (化學反應) 網絡是無標度網絡和 小世界網絡

H. Jeong et al.,

Nature, 407: 651-654, 2000

酵母蛋白作用網絡



H. Jeong et al., Nature, 411: 41-42, 2001

無標度網絡

節點:蛋白

連邊:相互作用

Red: lethal

Green: non-lethal

Orange: slow growth

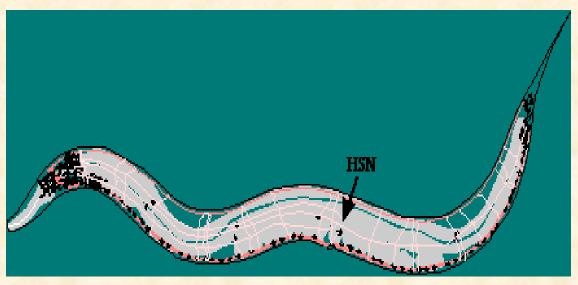
Yellow: unknown

線蟲 C. Elegans 神經網絡

小世界網絡

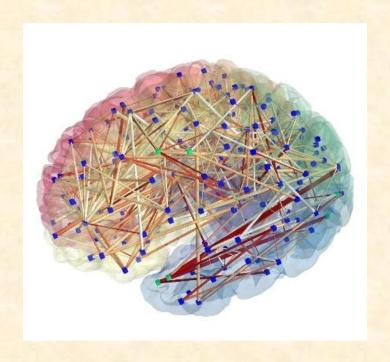
L. A. N. Amaral et al., *PNAS* (2000)



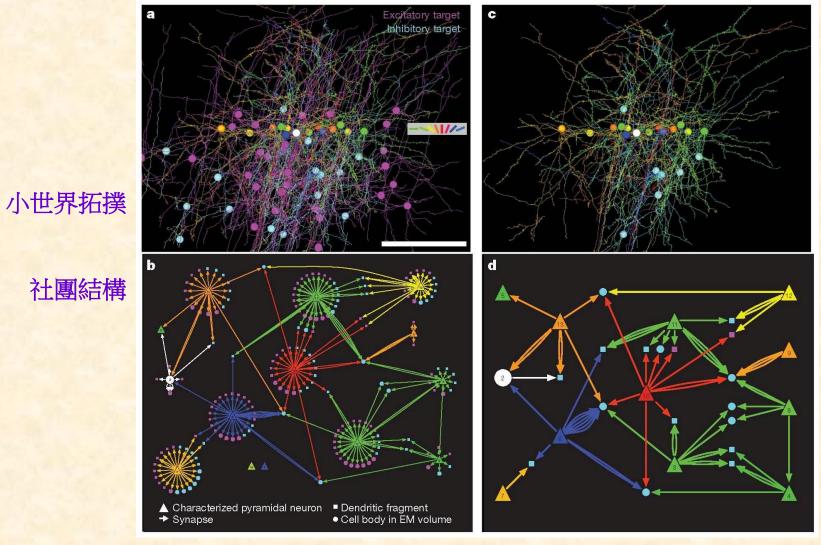


節點: ~300 神經元 連邊: ~7000 突觸

大腦



大腦神經網絡



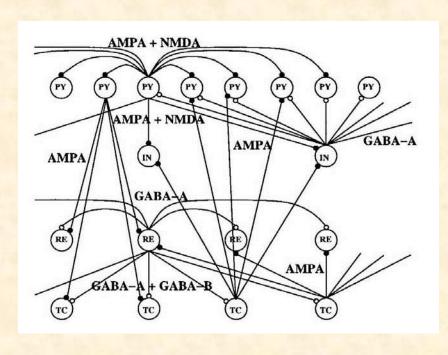
D. D. Bock et al., Nature, 2011

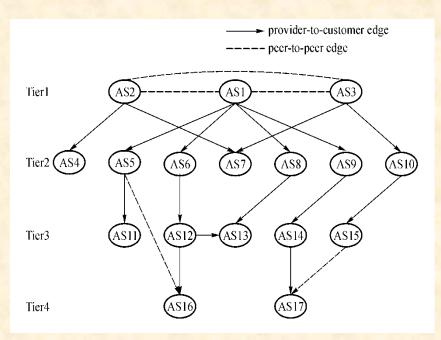
大腦結構

大腦 Bain



互聯網 Internet





M. Bazhenov et al., J. Neuroscience, 2002

S. I. Cai et al., Proc. IEEE CDC, 2004

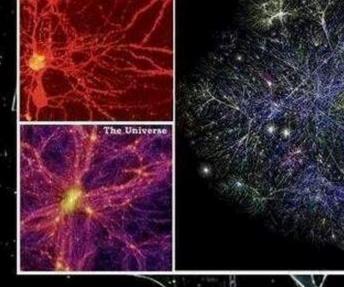
HUMAN BRAIN CELLS, OUR UNIVERSE AND THE INTERNET HAVE VERY SIMILAR STRUCTURES!!

December 13, 2013 by marcanthony213 in Uncategorized and tagged brain cells, cellular structures, energy, frequencies, internet, structures, universe, vibrations

D. Krioukov et al., Scientific Reports, 2012

The Internet

大腦



互聯網

社會網絡

有朋自遠方來, 不亦樂乎?

--- 孔子





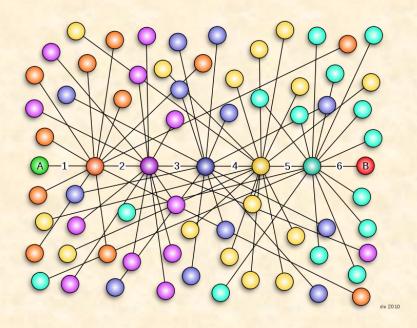
社會科學

小世界實驗 (1967)



Stanley Milgram, 哈佛大學 Harvard University

問題:在美國隨機地找兩個人,他們會通過多少個中間朋友連接在一起?

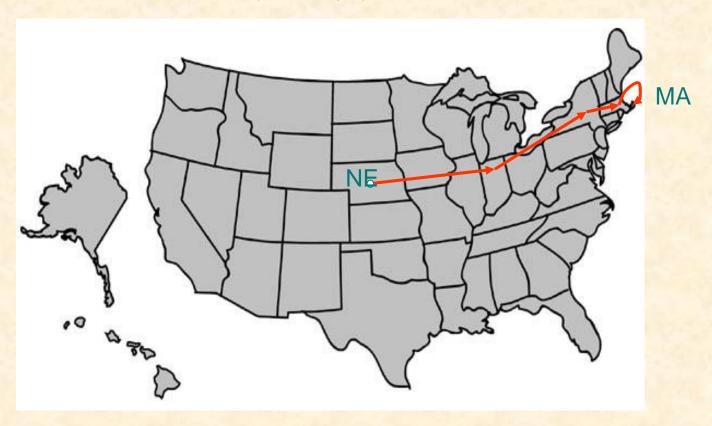


答案: 6

Alice \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow George

S. Milgram, The small world problem, *Psychology Today*, May 1967, 60-67.

小世界實驗



- 設定一個"收信人"(在 Boston)
- 隨機邀請 300 個 "發信人" (在 Omaha, Nebraska)
- "發信人"把信件發給可能在 Boston 有聯絡的朋友
- 結果: 平均 6人

新近大規模的小世界實驗

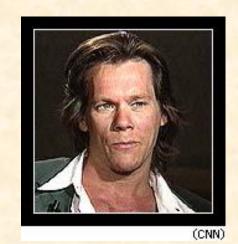
例 1: Duncan Watts 在 *Science* (August 2003)報告說:他們在曆時一年多的社會試驗中,聯絡了 60,000 個志願者(來自 166 國家),給 18 個 "收信人"(分散在 13 個國家裏)發電子郵件,最後成功到達的電子郵件都經過了 5~7 個用戶的傳遞。

例 2: Facebook Data Team 在2011年11月21日宣布,他們調查了7.21億個 Facebook 活躍用戶(佔全球人口的 10%),通過用戶690億條聯絡,發現兩個用戶之間的聯絡平均只有 4.74 個朋友的間隔。(2016年 Facebook 報告: 3.57)

→ 世界將變得越來越小

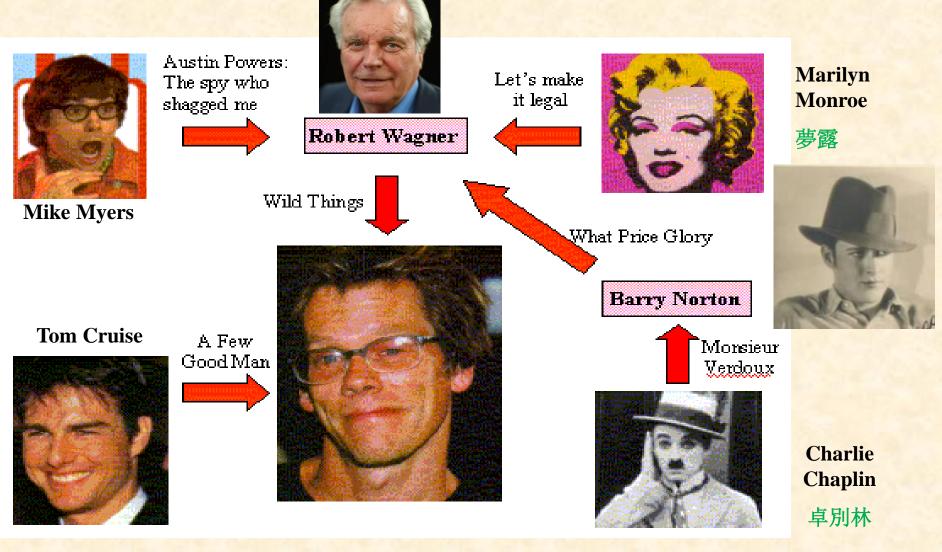
Kevin Bacon 網絡

美國電影明星 Kevin Bacon 和其他影星的 "距離" =?



- 如果兩個演員在同一部電影裏演出,就認 爲他們之間有一條連邊("距離"=1)
- ▶ 1994 年, CNN TV 的 Stewart Show 節目討論 了這樣一個問題:從荷里活中隨機地挑出 一個演員,問他(她)和 Bacon 之間的 "距離"是多少(即,有多少個其他演員 把他們聯繫起來)?
- ► 結果: 平均來說, 荷里活中任何一個演員和 Bacon 的 "距離"爲 2~3

Kevin Bacon 網絡的6度分離



小世界網絡!

科研合作網絡

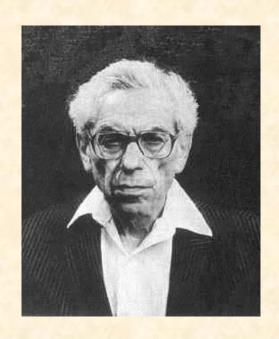




節點: 科學家

連邊: 合作寫文章

Erdös Number 網絡



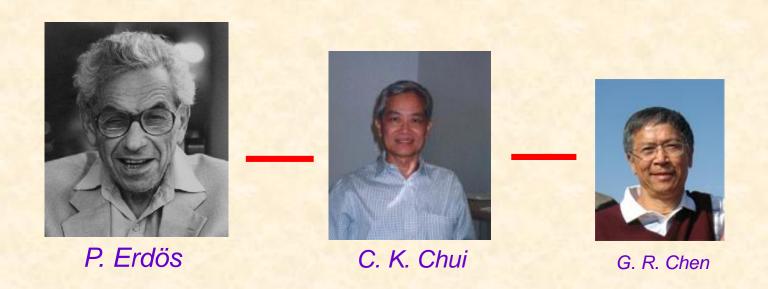
Pál Erdös (1913-1996)

- Erdös 一生發表了 1600 多篇論文 有 500 多個合作者
- 從20歲起到83歲止,平均每個月發表 2 篇論文
- Erdös number 網絡是小世界和無標度網絡

請你估計一下:

Erdös 與我之間的"距離"是多少?

我的 Erdös Number 是 2



小小世界!

Borosh, I., Chui, C. K. and Erdos, P., On changes of signs in infinite series, Anal. Math. 4(1), 3-12, 1978.

Chui, C. K. and Chen, G., Kalman Filtering with Real-Time Applications,

Springer-Verlag (1st ed., 1987; ...; 4th ed., 2009)



歐拉與我?

歐拉 Euler (1707-1783)

博士導師和學生的師徒關係



歐拉與我?

歐拉 Euler (1707-1783)

Academic Genealogy

 $(A \rightarrow B \text{ means that } A \text{ was PhD adviser of } B)$

博士導師和學生的師徒關係表

歐拉 L. Euler → J.-L. Lagrange → J.-B. J. Fourier → G. P. L. Dirichlet → L. Kronecker

→ M. Lerch → M. Plancherel → A. Edrei → S. Hellerstein → C. K. Chui → G. R. Chen 陳關榮



高斯與我?

高斯 Gauss (1777-1855)

博士導師和學生的師徒關係



高斯與我?

高斯 Gauss (1777-1855)

Academic Genealogy

 $(A \rightarrow B \text{ means that } A \text{ was PhD adviser of } B)$

博士導師和學生的師徒關係表

高斯 C. F. Gauss → F. W. Bessel → H. F. Scherk → C. C. Kummer →

J. von Neumann

→ H. A. Schwarz → L. Fejer → G. Polya → A. Edrei → S. Hellerstein → P. Erdös

→ C. K. Chui → G. R. Chen 陳關榮

It is a small world after all



小小世界!



