

硅芯片魔鬼數字

— 60群魔亂舞 —

SS_{min} = 60, TFET

王不老說半导

硅芯片魔鬼數字

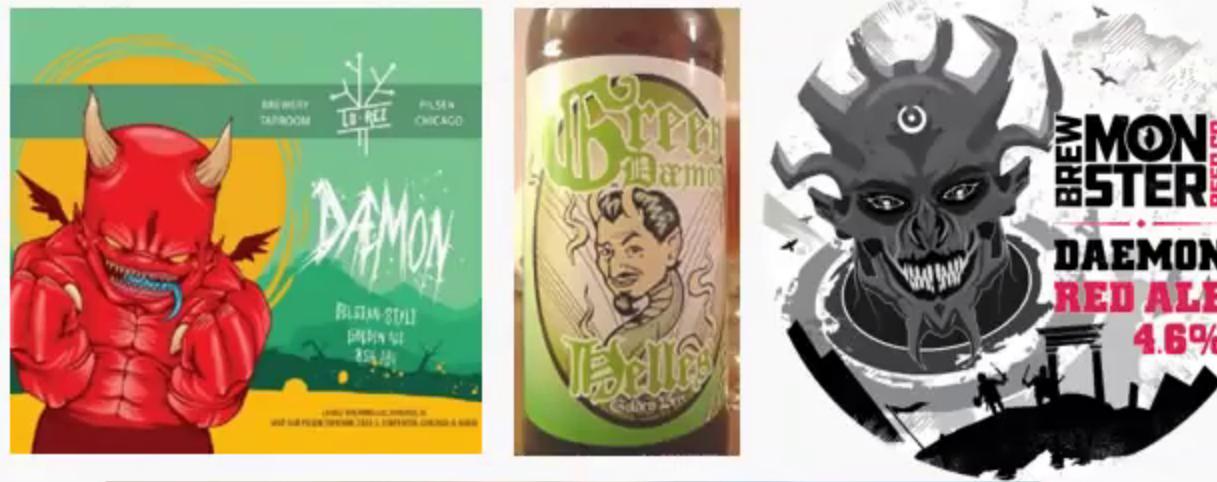
— 60群魔亂舞

SSmin = 60 , TFET

王不老說半导

魔鬼啤酒何其多

- 英文字代表魔鬼一詞有許多，例如**devil, demon, daemon, duvel**等等
- 市面上有許多愛標新立異的啤酒，特別愛用魔鬼之名（如右上圖所示），意思是要你一喝就上癮
- 世界公認最好喝的魔鬼啤酒，還是比利時的**Duvel**，愛啤人士，一喝就受不了



何謂Laplace魔鬼？

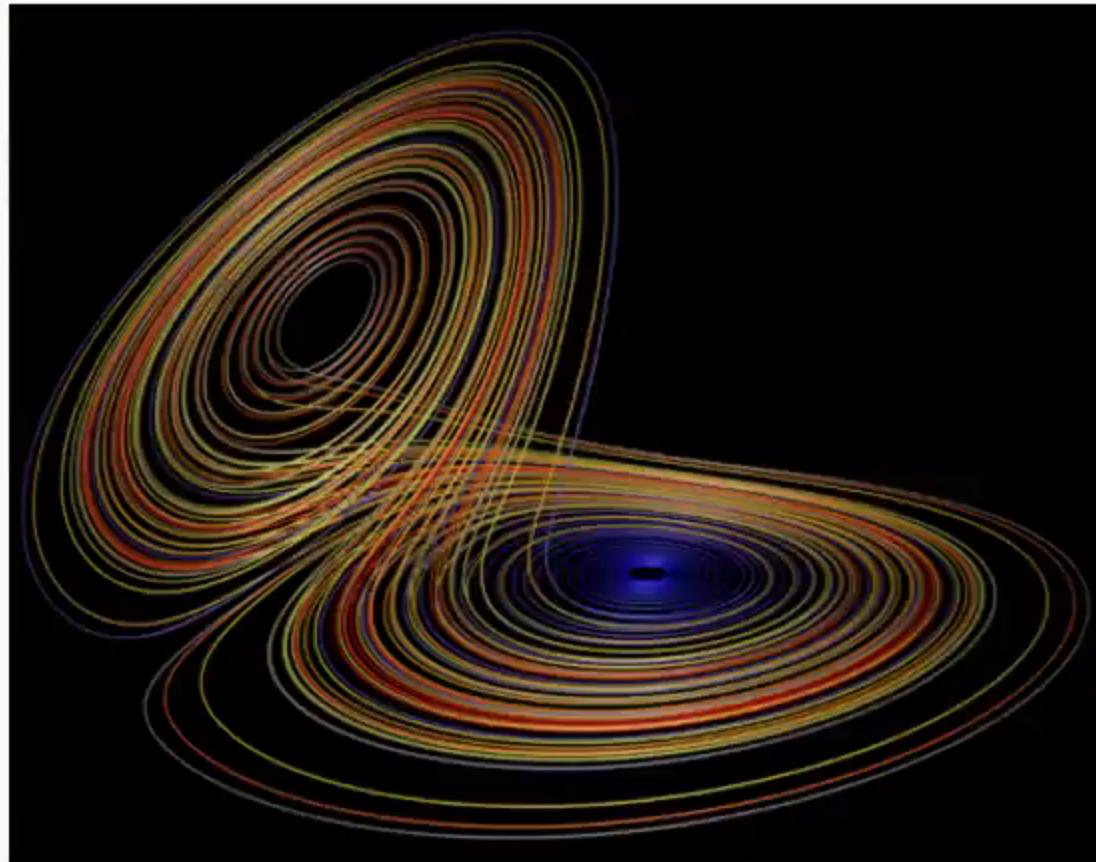
- 在科学史上，所謂的Laplace魔鬼來自於1814年皮埃尔-西蒙·拉普拉斯(Pierre-Simon Laplace)發表的關於“因果決定論”的著名論文
- 根據決定論，如果某(惡魔也)知道宇宙中每一個原子的精確位置和動量，那麼他們在任何給定時間的過去和未來價值都是必然，它們可以從古典力學計算出來
- 所以Laplace魔鬼驕傲地認為，世界一切均有簡單道理可循，可推演，因此沒有真正所謂的“不知”



French scholar [Pierre-Simon de Laplace](#) (1749–1827)

何謂Laplace魔鬼？

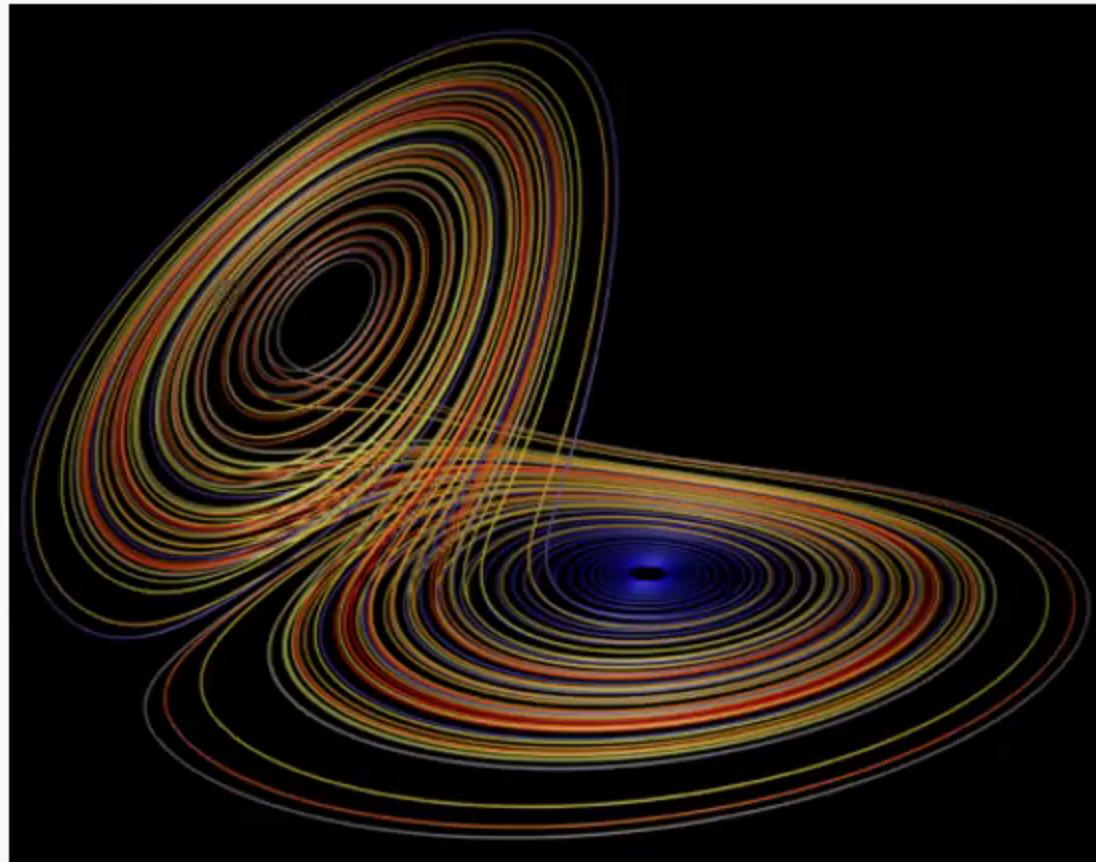
- Robert Ulanowicz在其書<Growth and Development>指出，就是因為後來科學家想要證實Laplace魔鬼的存在，最後才發展出所謂不可逆性、熵和熱力學第二定律概念的發展
- Laplace魔鬼是以可逆性為前提；然而許多熱力學過程是不可逆的，因此，如果將熱力學量視為純物理量，則Laplace魔鬼不能存，因無法從當前狀態重建過去的位置和動量
- 人間世，事事難料，Laplace魔鬼也把世界想得太簡單了



<https://goat777.medium.com/the-strange-attractor-that-pulls-the-strings-of-chaos-from-phase-space-6a6d197162f8>

何謂Laplace魔鬼？

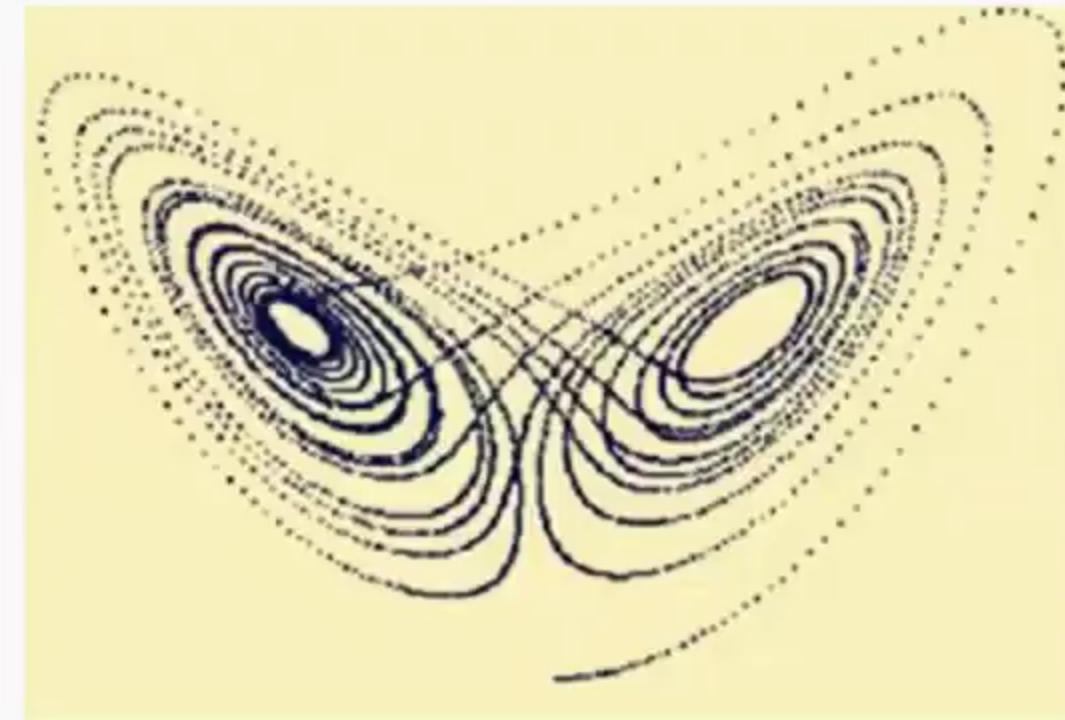
- Robert Ulanowicz在其書<Growth and Development>指出，就是因為後來科學家想要證實Laplace魔鬼的存在，最後才發展出所謂不可逆性、熵和熱力學第二定律概念的發展
- Laplace魔鬼是以可逆性為前提；然而許多熱力學過程是不可逆的，因此，如果將熱力學量視為純物理量，則Laplace魔鬼不能存，因無法從當前狀態重建過去的位置和動量
- 人間世，事事難料，Laplace魔鬼也把世界想得太簡單了



<https://goat777.medium.com/the-strange-attractor-that-pulls-the-strings-of-chaos-from-phase-space-6a6d197162f8>

何謂Laplace魔鬼？

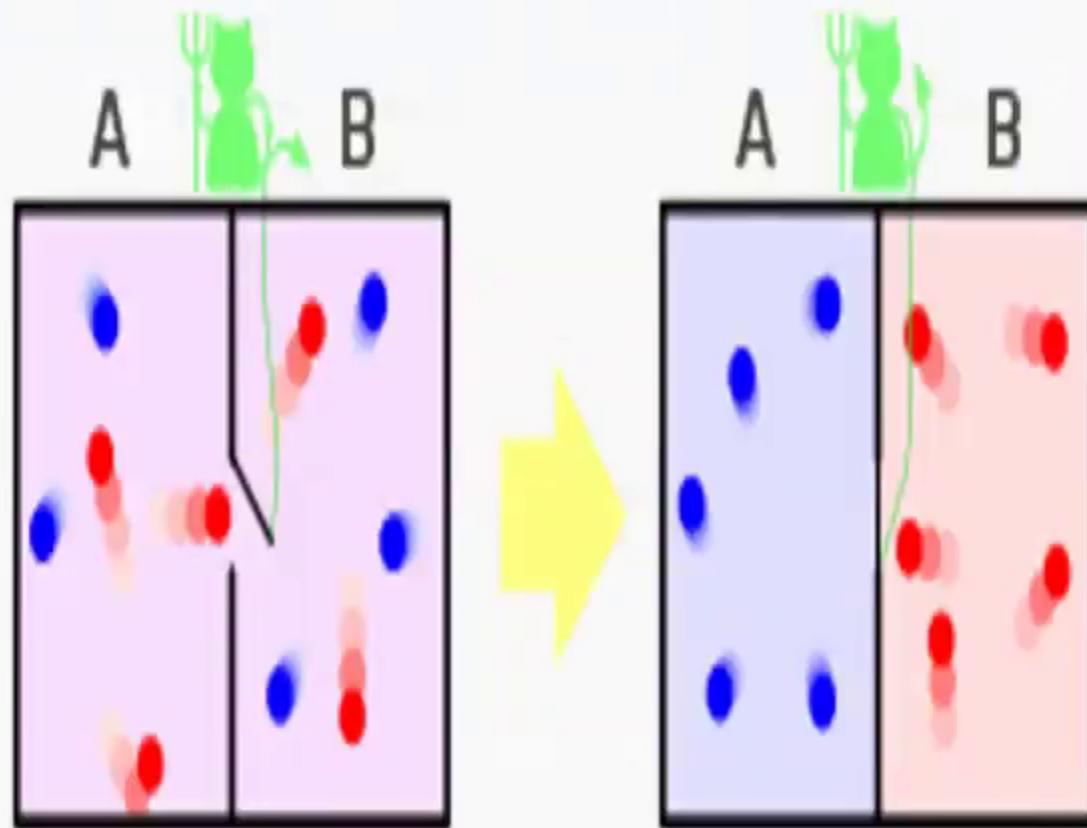
- 近代因Laplace魔鬼而生的著名理論為：混沌理論(Chaos theory)
- 混沌理論有三原則：對初始條件的極端敏感，因果關係無適當比例與非線性關係
- 著名的”蝴蝶效應”就是一種混沌現象，它說明了任何事物在發展過程中，雖發展軌跡有規律可循，但同時也存在不可測的“變數”，結果有時會适得其反，亦即一個微小的變化能影響事物的發展與結果，這正証實了世間事物的天生複雜混沌性格



<https://baike.baidu.com/item/%E8%9D%B4%E8%9D%B6%E6%95%88%E5%BA%94/13502>

何謂Maxell魔鬼？

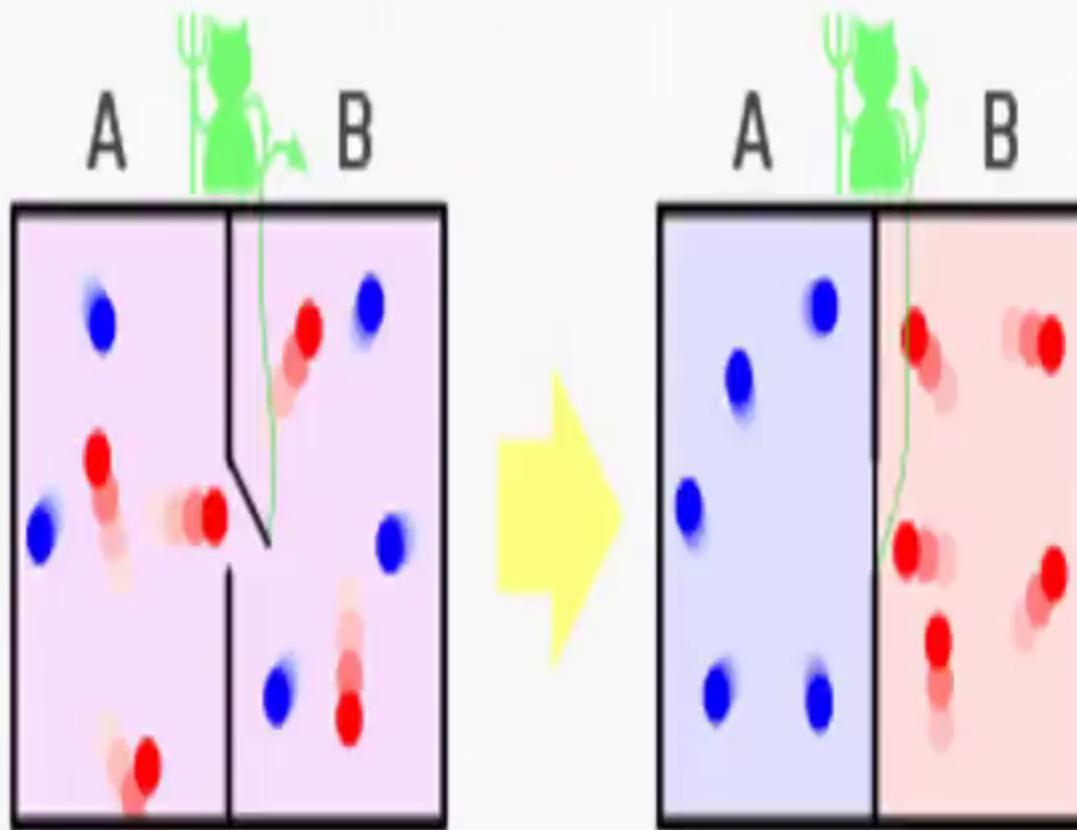
- 1867電磁老祖JC Maxwell提出了一個有趣的思想實驗：假設有一個魔鬼（右圖中綠色者）把門，他有魔法可以將某室中原來魚龍混雜的冷（藍色）熱（紅色）兩種分子分離，使其最後分離各歸一室，如右圖所示，此曰之" Maxwell's Demon "
- 此魔鬼之說，困擾也啟發了眾不服氣的科學家們百年之久，後為 Claude Shannon 所降伏，造就 Shannon 為現代資訊之祖



https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_demon

何謂Maxell魔鬼？

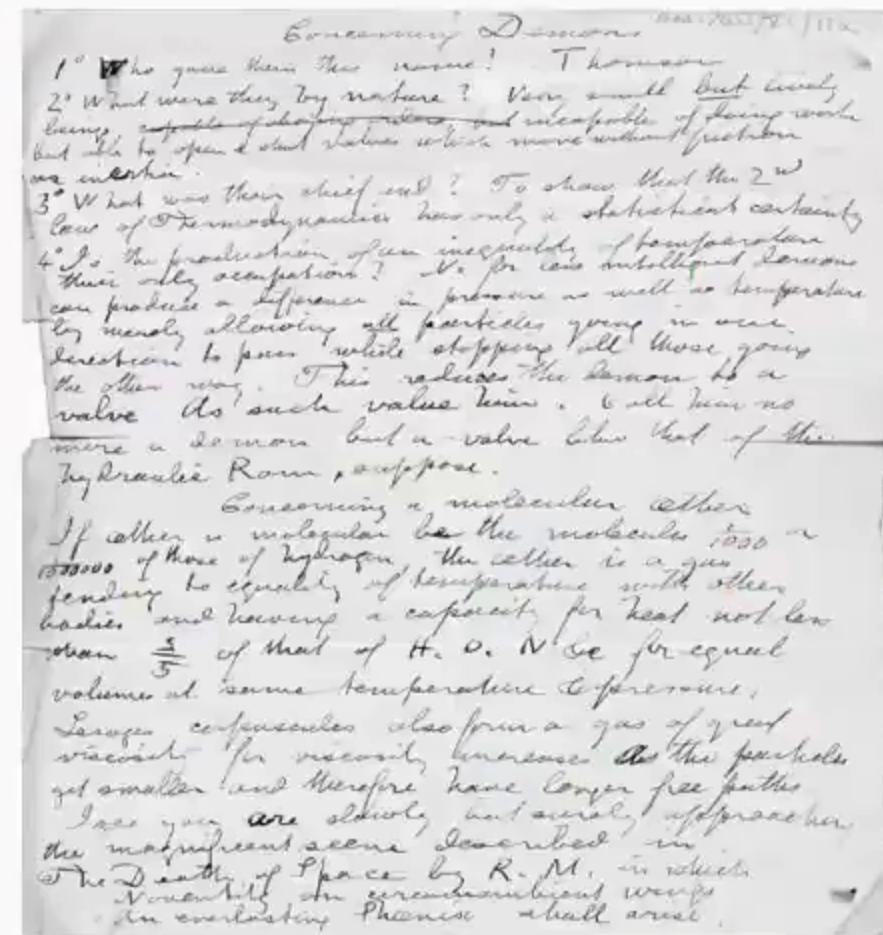
- 1867電磁老祖JC Maxwell提出了一個有趣的思想實驗：假設有一個魔鬼（右圖中綠色者）把門，他有魔法可以將某室中原來魚龍混雜的冷（藍色）熱（紅色）兩種分子分離，使其最後分離各歸一室，如右圖所示，此曰之" Maxwell's Demon "
- 此魔鬼之說，困擾也啟發了眾不服氣的科學家們百年之久，後為 Claude Shannon 所降伏，造就 Shannon 為現代資訊之祖



https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_demon

何謂Maxell魔鬼？

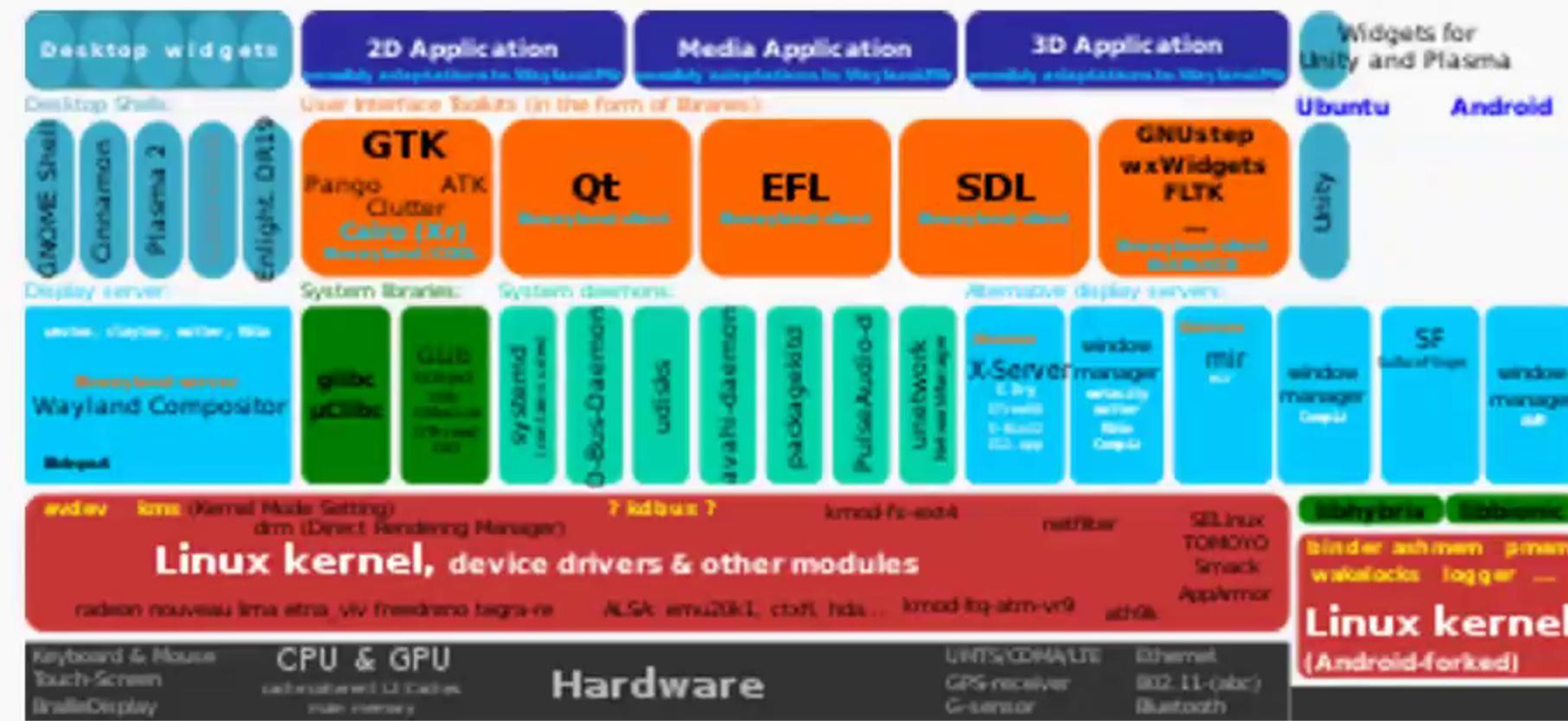
- (1948)Shannon老祖以其对Maxell魔鬼的现代理解，证明了消息的信息内容可以用他所谓的信息熵(**information entropy**)来量化
- (1982) Charles Bennett也意识到Maxell魔鬼的核心，其實是一台信息处理机器：它需要记录和存储有关单个粒子的信息，以便决定何时打开和关闭门
- Maxell魔鬼對近代科學之演進，其實有功無過，居功甚偉，即便是現在，仍有許多科學家得到啟發



電磁老祖JC Maxwell手稿，
Cambridge University Library

何謂Maxell魔鬼？

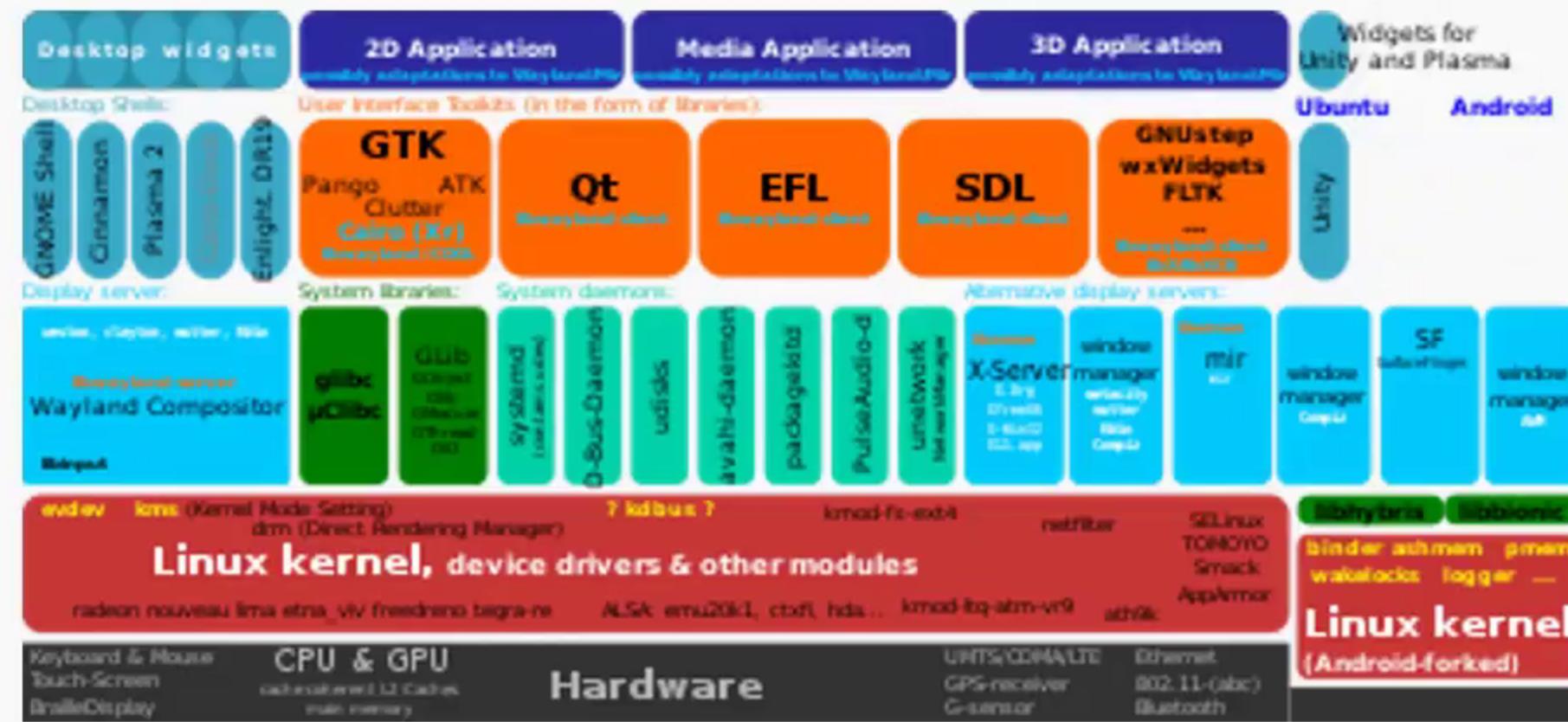
- 在現代我們每天息息相關的網路世界哩，其實是倚賴許多任务计算机操作系统(如下圖)的幕後计算，用戶不能直接控制，好似有鬼推磨，故有人稱之“**Daemon Computing**”(魔鬼運算)



[https://en.wikipedia.org/wiki/Daemon_\(computing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Daemon_(computing))

何謂Maxell魔鬼？

- 在現代我們每天息息相關的網路世界哩，其實是倚賴許多任务计算机操作系统(如下圖)的幕後计算，用戶不能直接控制，好似有鬼推磨，故有人稱之“**Daemon Computing**”(魔鬼運算)



[https://en.wikipedia.org/wiki/Daemon_\(computing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Daemon_(computing))

硅芯片世界竟有Boltzmann魔鬼

- 电子能量分布($n(E)$)是费米-狄拉克分布(Fermi-Dirac Distribution, $f(E)$)和电子态密度(DOS, $g_c(E)$)两个(如右二公式)的乘积, $n(E)$ 最後可簡化如下:

$$n \approx N_C e^{-(E_C - E_F)/kT}$$

- 其中 k 是Boltzmann常數, 基本上电子們已无法摆脱Boltzmann魔鬼的魔法控制
- 由電路的觀點來看, Boltzmann魔鬼帶來的可恨結果是"沒有外加電壓,
手機與電腦依舊漏電"

$$g_c(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2}$$

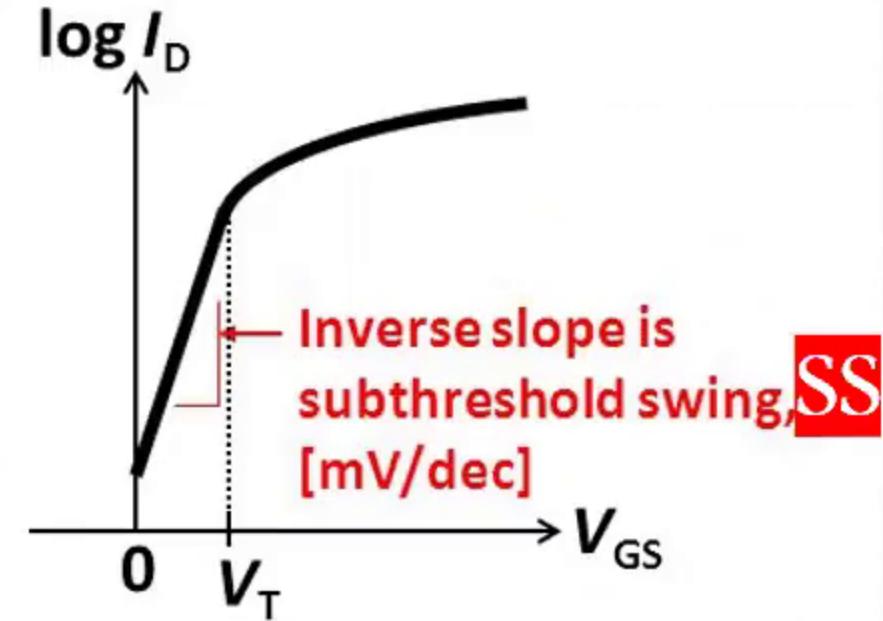
$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp \left[\frac{E - E_F}{kT} \right]}$$

回味：判斷DD帶來的影響

試問：若某芯片制程所得SS(subthreshold slope) = 70mV/dec，這是否可以怪罪表面缺陷密度太高？特別是SiO_x制程那一步驟有問題嗎？

解答：

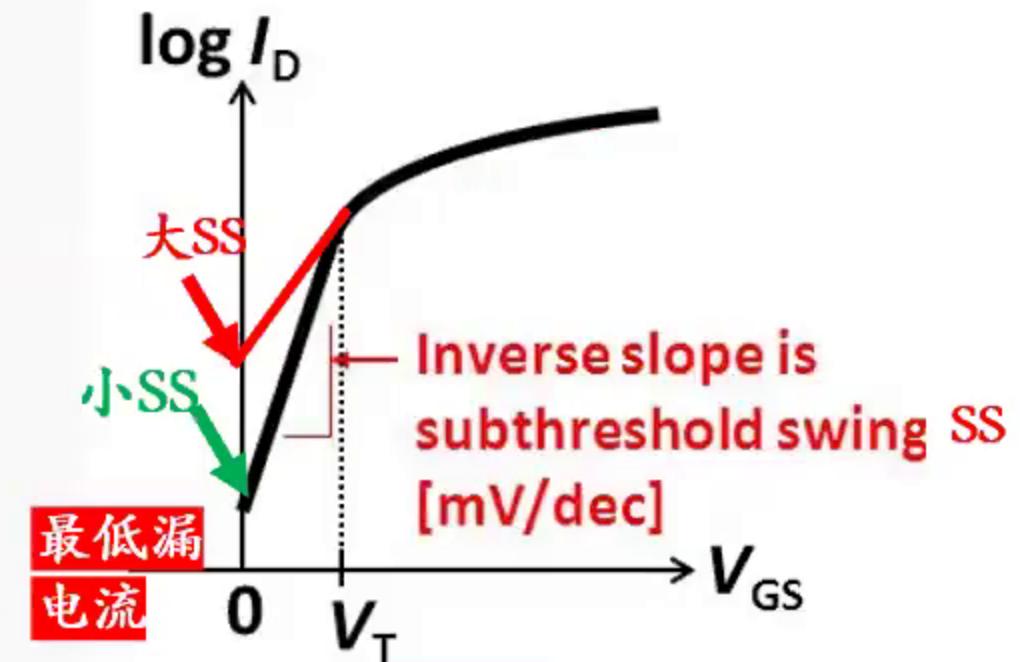
- 已知 $60 \left(1 + \frac{C_{it}}{3.4}\right) = 70$
- $DD = C_{it}/q = \frac{3.4 \times (\frac{7}{6} - 1) \times 10^{-6}}{1.6 \times 10^{-19}} \sim 3.5E12/cm^2$
- 其實一個像樣的硅芯片製程，DD應該是~ $E10-E11/cm^2$ ，所以DD ~ $3.5E12/cm^2$ ，應該太大不太可能，必不完全是因為表面缺陷密度太高，所以應該再查看是否有其他地方出了問題



$$SS = 2.3 \frac{mkT}{q} = 2.3 \frac{kT}{q} \left(1 + \frac{C_{it} + C_B}{C_{ox}}\right).$$

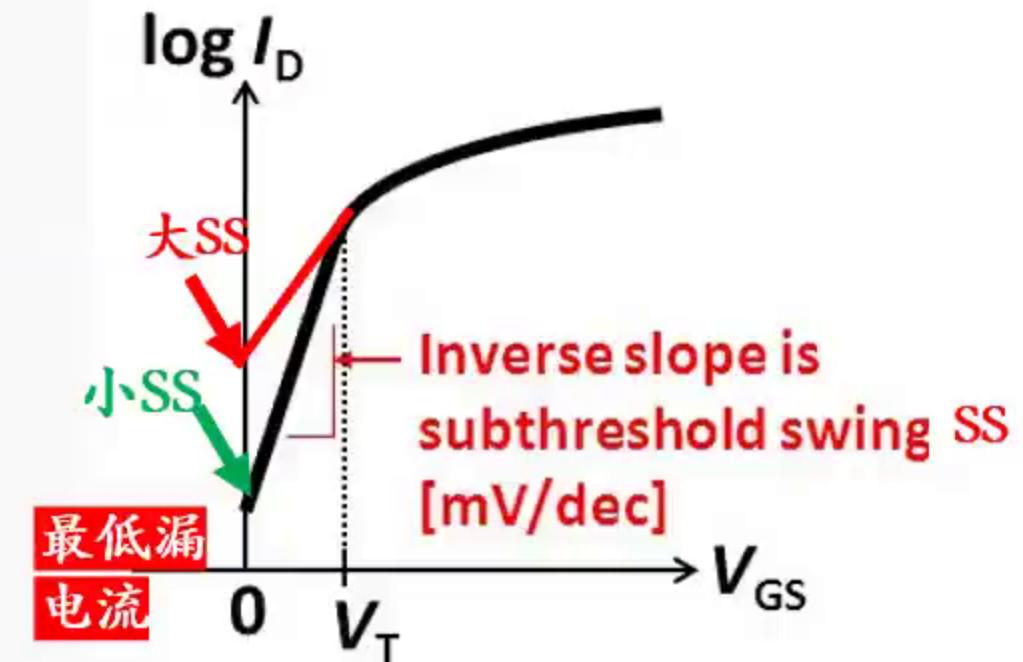
最低漏电流: Boltzmann的魔鬼數字 = 60

- 這個意思是說，硅芯片的電流即使在電壓(V_{GS})為零時仍存在，此為最低漏电流
- SS 為圖右直線區之斜率倒數， $C_{it} = 0$ 時
 - $SS_{min} = \ln(10) \times \frac{kT}{q} = \ln(10) \times 26mV = 60 mV/dec$
 - SS 越低越好，但我們都是在常溫(25C)用電腦或手機，所以 SS 有了最小值 = 60mV/dec
- 顧客要求最低漏电流: 0.1nA, 1nA, 10nA and 100nA，而且要求 $SS \sim 60$



最低漏电流: Boltzmann的魔鬼數字 = 60

- 這個意思是說，硅芯片的電流即使在電壓(V_{GS})為零時仍存在，此為最低漏电流
- SS 為圖右直線區之斜率倒數， $C_{it} = 0$ 時
 - $SS_{min} = \ln(10) \times \frac{kT}{q} = \ln(10) \times 26mV = 60mV/dec$
 - SS 越低越好，但我們都是在常溫(25C)用電腦或手機，所以 SS 有了最小值 = $60mV/dec$
- 顧客要求最低漏电流: $0.1nA, 1nA, 10nA$ and $100nA$ ，而且要求 $SS \sim 60$



TFET: 想要殺死Boltzmann魔鬼的傢伙

- Tunnel-FET: 宣稱能夠讓SS < 60 (因為它用p⁺-i-n⁺的奇怪結構來拒絕漏電流, 曰之Esaki diode, Nobel price winner) 結構來拒絕漏電流, 主電流(On-current)則用band-to-band tunneling 控制
- 結果是: 漏電流(SS)可以 < 60, 但主電流卻上不去, 而且無法量產
- TFET成為論文製造機

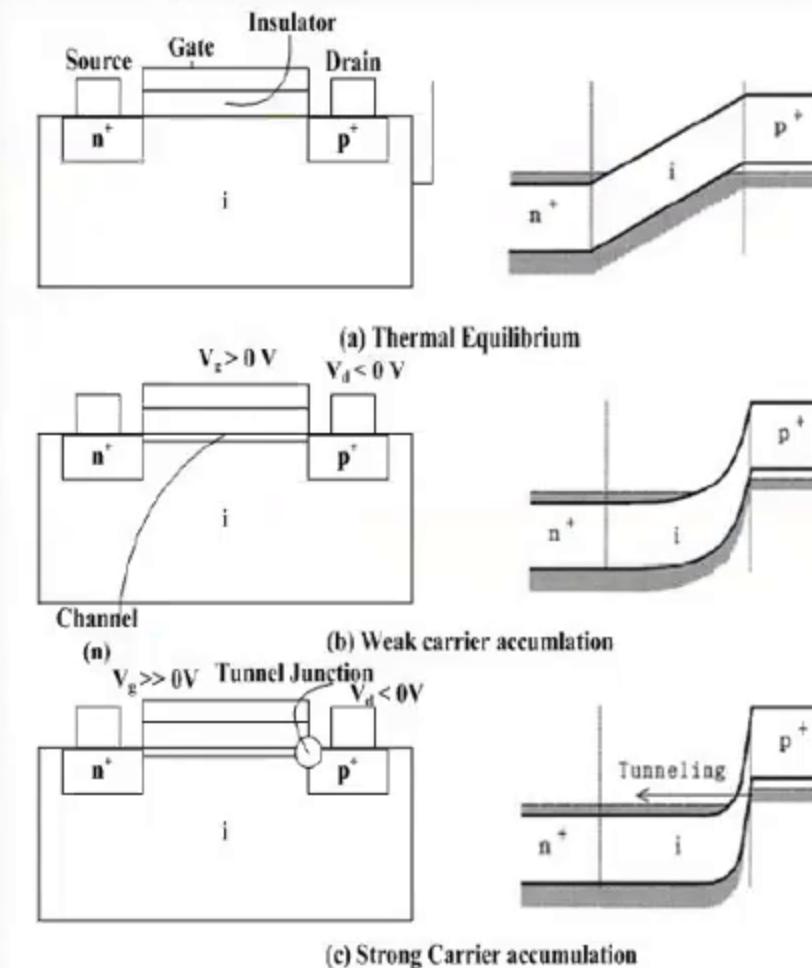
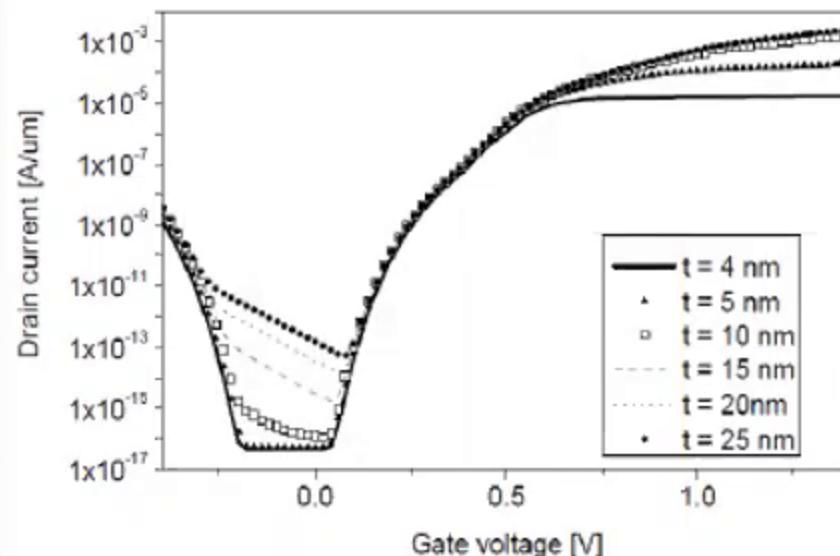


Fig. 1. Sample structure of Surface Tunnel Transistor at (a) Thermal equilibrium state (b) Weak carrier accumulation (c) Strong Carrier accumulation [5].