



電腦裡的格子咖啡

本課講 2014 年的一篇論文。科學家 Aaronson、Carroll 和 Ouellette 在電腦裡做了一杯「格子咖啡」，真的量出了第 6 課說的那座小山。

適合 10 歲左右

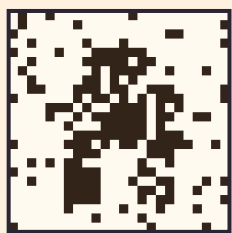
約 40 分鐘

需要：鉛筆、彩筆、一位同伴、2 個骰子、黑白棋子各 18 顆（或兩色紙片）

1 熱身：湊近看，站遠看

第 6 課說過：咖啡裡倒牛奶，亂的程度一直變大，有趣程度卻像一座小山，先升後降。今天看科學家怎麼真的把它量出來。先玩個看圖遊戲。

把紙湊到眼前看，再眯起眼睛（或者把紙拿遠）看。



湊近看，我看到 _____

眯眼看，我看到 _____

哪種看法更好描述？ _____

湊近看，只有一堆亂點，要說很久。眯起眼睛，一座小房子就出來了，一句話就說完。**眯眼**就是抹掉小細節，只留下大樣子。這一招是今天的主角。

2 電腦裡的格子咖啡

第 6 課說過，Aaronson 想用電腦做實驗。2014 年，他和物理學家 Sean Carroll、學生 Lauren Ouellette 把實驗做出來了。

他們在電腦裡畫了一大張方格圖。白格子是牛奶，黑格子是咖啡。開始時，牛奶在上半邊，咖啡在下半邊。然後，電腦一步一步地玩：

1

隨便挑一個格子

2

再隨便挑它旁邊的一個格子

3

兩格顏色不同，就交換

4

兩格顏色一樣，就不動

↻ 重複很多很多次

每一步只動兩個格子。重複很多次以後，分界線先變得毛毛糙糙，牛奶和咖啡再慢慢滲到對方那邊。最後，整張圖變成了亂點。第 3 節圖裡的上邊一排，就是它在三個時刻的樣子。

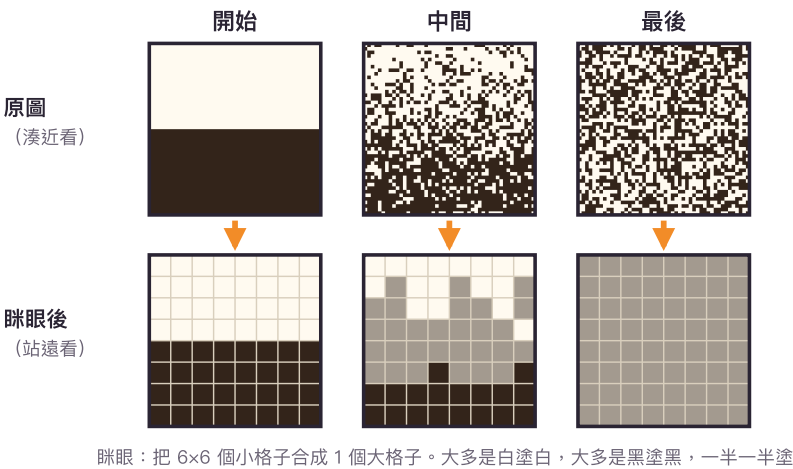
每個格子只和鄰居打交道，大家守同一條簡單規則。這種格子游戲叫**元胞自動機**。「元胞」就是小格子，「自動機」就是按規則自己動的機器。所以論文叫「咖啡自動機」。

3 兩把尺子：直接壓，眯眼再壓

第 5、6 課講過：有規律的東西能壓縮，亂的壓不小。壓完的大小，可以粗略地代表「描述要多長」。科學家每隔一段時間給格子圖拍一張「照片」，用兩把尺子量一量。

尺子	怎麼量	量的是什麼
尺子 1	把原圖直接交給壓縮軟件，看壓完有多大	亂的程度（熵）
尺子 2	先眯眼，再把眯眼後的圖交給壓縮軟件，看壓完有多大	有趣程度（複雜程度）

電腦怎麼「眯眼」？它把一小塊格子合成一個大格子。大格子裡大多是白，就塗白。大多是黑，就塗黑。差不多一半一半，就塗灰。科學家把這一招叫**粗粒化**。

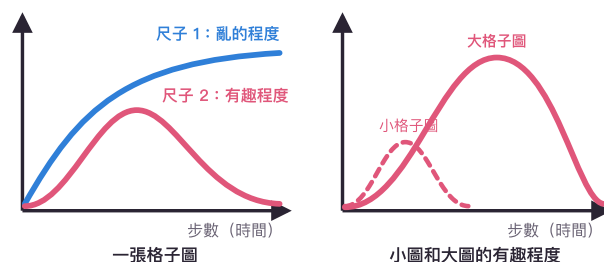


為什麼一定要眯眼？

看「最後」那張原圖：全是亂點。壓縮軟件找不到規律，只能一格一格照抄，壓完最大。不眯眼的話，最亂的圖會被當成「最複雜」。可它一點也不有趣，只是亂。

眯眼以後，亂點抹成一片灰，一句話就說完。眯眼抹掉**亂細節**，留下**大樣子**。尺子 2 量的，就是大樣子有多複雜。

4 結果：真的有一座小山



示意圖：只畫形狀，不是真實數據。

用尺子 1 量，亂的程度一路往上走，最後不再變。用尺子 2 量，有趣程度先上去，再下來，真的像一座小山。換別的壓縮軟件，小山的形狀也沒變。

格子圖越大，小山越高。換成更大的格子圖再做，小山更高，山頂也來得更晚。可以這樣想：大杯咖啡能冒出更多花紋，混勻也要更久。

要說清楚：這是電腦實驗，不是證明。科學家看到了小山，可是還沒有嚴格證明它一定會出現。

5 一定要「擠一擠」

科學家還做了另一個版本，我們叫它「幽靈牛奶」。兩個版本比一比：

	擠一擠版本（第 2 節那個）	幽靈版本
怎麼動	每格只放 1 個。牛奶和咖啡只能和鄰居換位置，互相擋路。	每顆牛奶自己亂走，不管別人。一個格子能疊好幾顆。
有沒有小山	有	幾乎沒有（科學家先修好了眯眼規則的小毛病，去掉了分界線上的「假花紋」）

可以這樣想：幽靈牛奶互不打擾，眯眼看是從上到下慢慢變深，幾句話就說完。擠一擠的版本里大家互相擋路，會冒出不規則的形狀。結論是：粒子之間要**互相影響**，有趣的花紋才會明顯出現。

6 這和今天有什麼關係

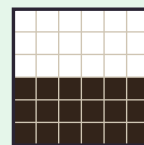
聊天 AI 要學的，也是「眯眼後的樣子」。ChatGPT、Claude 這些聊天 AI 讀過海量的文字。它們要學規律，不是背下每個字。第 5 課講過，會猜就會壓縮。2023 年，DeepMind 公司的科學家真的把這種猜字程序當壓縮軟件用，壓文字比普通壓縮軟件還小。

也要說清楚不足。這篇論文沒有造出 AI。它的壓縮軟件只會找「重複」，認不出漩渦。怎樣分清「有意義的樣子」和「亂細節」，科學家今天還在想。

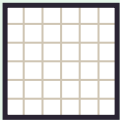
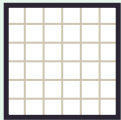
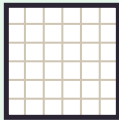
7 動手：方格紙上的格子咖啡

玩法（2—3 個人，約 20 分鐘）

1. 畫 6×6 方格（每格約 3 釐米）。上 3 行放白子（牛奶），下 3 行放黑子（咖啡）。
2. 擲兩次骰子定第幾行、第幾列。這個格子有不同色的鄰居，就交換，記 1 步（不止一個時，讓同伴閉眼指一個）。沒有就重擲。
3. 走到 10、20、30 步時，描下棋盤，寫下描述它要幾句話。



0 步

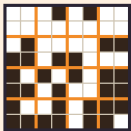
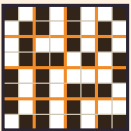
10 步	20 步	30 步
		
要 _____ 句話	要 _____ 句話	要 _____ 句話

你會發現：0 步時 1 句話就夠。後來分界線彎彎曲曲，要說好幾句。再走下去，黑白越來越亂。

8 動手：眯眼打分

玩法（2 個人，約 15 分鐘）

1. 橙色粗線把每張圖分成 16 個 2×2 小塊。數每塊的黑格：0—1 個塗白，2 個塗灰，3—4 個塗黑，塗進旁邊的 4×4 空格。
2. 一人描述，一人背過身照著畫。數一數原圖和眯眼後的圖各要幾句話。

	圖 A	圖 B	圖 C
原圖 → 眯眼後 (右邊你塗)			
原圖要幾句			
眯眼後要幾句			

你會發現：原圖裡圖 C 最費話。眯眼後圖 C 是一片灰，最費話的變成圖 B。A、B、C 就像開始、中間、最後，眯眼後的句數是一座小山。

9 詞語小卡片

元胞自動機

格子遊戲：每個格子只看鄰居，按同一條規則變化。

眯眼看（粗粒化）

把小格子合成大格子，抹掉亂細節，留下大樣子。

熵（亂的程度）

原圖直接壓縮後的大小。越亂，壓完越大。

複雜程度（有趣程度）

先眯眼再壓縮後的大小。太整齊、太亂都小。

10 想一想

1. 不眯眼，直接壓縮原圖，為什麼最亂的圖會被當成「最複雜」？

2. 如果眯眼時把整張圖合成 1 個大格子，開始、中間、最後三張圖還分得出誰有趣嗎？為什麼？

3. 擠一擠的版本有小山，幽靈版本幾乎沒有。你身邊還有什麼花樣，是大家互相擋路才出現的？

一句話記住：直接壓縮量出亂的程度，眯眼再壓縮量出有趣程度，它像一座小山。

給家長和老師：本課講的是 Scott Aaronson、Sean M. Carroll、Lauren Ouellette 2014 年的論文 [Quantifying the Rise and Fall of Complexity in Closed Systems: The Coffee Automaton](#)。論文用 gzip 壓縮精細狀態估計熵，粗粒化後再壓縮估計「表觀複雜度」：熵單調上升，複雜度先升後降；3 檔閾值有邊界偽影，改用 7 檔加行多數修正後，非交互模型（講義的「幽靈牛奶」）幾乎不出現複雜度；網格越大，峰值越高、出現越晚。作者承認這還沒有嚴格證明。

示意與簡化：第 3 節格子圖是我們按交互模型規則在 48×48 網格上自己跑的模擬（6×6 粗粒化、3 檔），不是論文原圖，「最後」一張挑了沒有邊界偽影的時刻；第 4 節曲線只示意形狀；房子點圖隨機生成；圖 A、B、C 是設計的例子（圖 C 每個 2×2 塊正好 2 個黑格）；動手 1 只有在有異色鄰居的格子上交換，比論文規則快；「幽靈版本眯眼後很平滑」是幫助理解的說法。規模關係的具體比例見 [第 7 天中文導讀](#)，代碼見 [30u30 第 7 天目錄](#)（英文）。